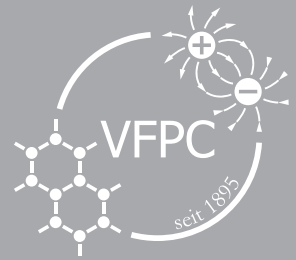


# plusLucis



Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts



# Seltenerdelemente

## Impressum

PLUS LUCIS, Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses Physik & Schule der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (VZR: 668472729) Erscheint vierteljährlich

### Medieninhaber:

Verein zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts  
 Adr.: AECC Physik Universität Wien, Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien  
 Web: <https://www.pluslucis.org>  
 Mail: [schriftenleitung@pluslucis.org](mailto:schriftenleitung@pluslucis.org)

### Redaktion:

Mag. Dr. Thomas Plotz (Leitung)  
 Mag. Sarah Zloklikovits

### Verantwortlicher Herausgeber dieser Ausgabe:

Univ.-Prof. Dr. Markus Prechtl  
 Technische Universität Darmstadt,  
 Fachdidaktik Chemie  
 E-Mail: [markus.prechtl@tu-darmstadt.de](mailto:markus.prechtl@tu-darmstadt.de)

### HerausgeberInnenteam:

Univ.-Prof. Dr. Claudia Haagen-Schützenhöfer  
 Universität Graz, Physikdidaktik  
 E-Mail: [claudia.haagen@uni-graz.at](mailto:claudia.haagen@uni-graz.at)

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf  
 Universität Wien, Physikdidaktik  
 E-Mail: [martin.hopf@univie.ac.at](mailto:martin.hopf@univie.ac.at)

Univ.-Prof. Dr. Anja Lembens  
 Universität Wien, Chemiedidaktik  
 E-Mail: [anja.lembens@univie.ac.at](mailto:anja.lembens@univie.ac.at)

Univ.-Prof. Dr. Thomas Wilhelm  
 Universität Frankfurt, Physikdidaktik  
 E-Mail: [wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

### Bezugshinweise:

Das Abonnement der Zeitschrift ist für Vereinsmitglieder im Mitgliedsbeitrag inkludiert.

Ein institutionelles Abonnement (z. B. für Bibliotheken) ist zum Bezugspreis von 40 Euro im Jahr möglich.

Offenlegung nach § 25 des Mediengesetzes Grundlegende Richtung: Fortbildung und fachliche Information für Physik- und ChemielehrerInnen, organisatorische Mitteilungen, Vereinsinterna.

Für die Inhalte der Artikel sind ausschließlich die namentlich genannten AutorInnen verantwortlich.

### Titelbild (Umschlag):

Markus Prechtl

## Inhalt

Seltenerdelemente.....	4
<i>Markus Prechtl</i>	
Storytelling zu Seltenerdelementen.....	11
<i>Markus Prechtl &amp; Yannick L. Legscha</i>	
Ein Momentum aus der Geschichte der künstlichen Beleuchtung.....	16
<i>Katharina-Maria Kuse</i>	
Vom Glühstrumpf zum modernen Leuchtstoff.....	19
<i>Dominik Diekemper, Lena Daumann &amp; Stefan Schwarzer</i>	
Wie funktioniert eigentlich ein MRT-Gerät?.....	23
<i>Philipp Spitzer &amp; Ingrid Krumphals</i>	
Das (umwelt)chemische Laborexperiment Neodym – Ein digitales Lernspiel.....	27
<i>Carmen Lawatscheck, Amiera Nadien Hadi &amp; Katharina-Maria Kuse</i>	
Wie man mit Tablets über Seltenerdelemente in Tablets lernen kann.....	30
<i>Canan Kanbur, Johannes Huwer, David Fetzer, Antje Siol &amp; Ingo Eilks</i>	
Nachhaltiger Umgang mit Seltenerdelementen.....	33
<i>Markus Prechtl</i>	
Preisträger*innen des sechsten Werner Rentzsch-Fotowettbewerbs.....	38



---

# Editorial

Liebe Kolleg\*innen,

für die Energiewende bedarf es leistungsstarker Dauermagnete in Windkraftgeneratoren, IT-Technologien und Elektromotoren in E-Fahrzeugen und, daran anknüpfend, einer gesicherten Versorgung mit Seltenerdelementen (nachfolgend wird das Akronym SEE verwendet). Ohne die SEE ist die Energiewende, zum derzeitigen Stand der Forschung, nicht denkbar.

Die Versorgungslage der SEE wird langfristig als kritisch eingestuft. In Österreich, einem der größten SEE-Importeure der EU, werden deshalb die Versorgung mit SEE, handelspolitische Entscheidungen und naturwissenschaftlich-technische Innovationen aufmerksam verfolgt („Seltene Erden – gar nicht so selten“, Kurier, 05.12.2011; „Der Kampf um Seltene Erden“, Wiener Zeitung, 08.05.2018; „Recycling: Elektroschrott aus Algenfutter“, Der Standard, 11.09.2021).

Als sich im August 2021 die Pressemeldungen zum „Afghanistan-Debakel“ überschlugen, berichteten Agenturen beiläufig, in kühler Diktion, über Chinas Strategie, sich Kupfer- und Uranerzminen sowie Seltenerdelemente in Afghanistan zu sichern. Wie könnte eindrücklicher vor Augen geführt werden, dass die SEE zu den Socio-Scientific Issues gezählt werden sollten, an denen sich Schüler\*innen naturwissenschaftlich-technisch sowie umwelt- und wirtschaftsbezogen bilden und Bewertungskompetenzen aufbauen können.

Alle Beiträge in diesem Themenheft sind faszinierenden historischen und gegenwärtigen Anwendungen der SEE gewidmet und spiegeln deren Facettenreichtum wider:

Der Basisartikel von Markus Precht führt in das Thema ein. Im Zentrum des Beitrags steht das Dilemma, dass SEE einerseits umweltkritisch, andererseits essenziell für grüne Technologien sind.

Die beiden darauffolgenden Beiträge bringen Österreichs großen Forscher Carl Auer von Welsbach ins Spiel. Markus Precht und Yannick Legscha referieren Anekdoten aus dessen Leben und fokussieren dabei das „Auer-Metall“, aus dem Zündsteine bestehen. Ihr Beitrag ist ganz dem bildenden Storytelling gewidmet. Katharina-Maria Kuses Beitrag befasst sich mit der Geschichte der künstlichen Beleuchtung – konkret mit dem „Auer-Licht“. Sie stellt einen Versuch zum Glühstrumpf vor, an dem sich bereits viele Schüler\*innen im NatLab (Berlin) erfreuen konnten.



*Markus Precht*

Die beiden anschließenden Beiträge führen von der Vergangenheit in die Gegenwart, indem moderne Anwendungsfelder für SEE vorgestellt werden. Dominik Diekemper, Lena Daumann und Stefan Schwarzer rücken SEE-Leuchtstoffe in den Mittelpunkt ihrer Darlegung. Sie stellen eine Versuchsvorschrift für die Leuchtstoffsynthese in der Mikrowelle vor und geben darüber hinaus Einblicke in ihr Schüler\*innen-Forschungsprojekt zum Thema SEE-Recycling. Philipp Spitzer und Ingrid Krumphals beantworten anschaulich die komplexe Frage, wie eigentlich ein MRT-Gerät funktioniert. Sie offerieren einen exzellenten ScienceSpot, der auf Augmented Reality basiert. Zudem erörtern sie die Funktion von Kontrastmitteln und berichten, wie sich deren Feinverteilung auswirkt.

Vom SEE-Recycling handeln drei weitere Beiträge. Mit dem digitalen, frei zugänglichen Lernspiel Neodym, das Carmen Lawatscheck, Amiera Nadien Hadi und Katharina-Maria Kuse vorstellen, erleben Schüler\*innen via Virtual Reality die Rückgewinnung von Neodymverbindungen aus Mobiltelefonen. Auch Canan Kanbur, Johannes Huwer, David Fetzer, Antje Siol und Ingo Eilks setzen auf Augmented Reality und nehmen das Innenleben eines Tablets zum Ausgangspunkt für das Lernen über Seltenerdelemente mit Tablets und in Tablets. Abschließend stellt Markus Precht einen miniaturisierten Modellversuch zum Recycling von Leuchtstofflampenpulver vor, den Studierende für Lehrer\*innen und Schüler\*innen entwickelt haben.

Die Autor\*innen und ich hoffen sehr, dass wir Ihnen Anregungen zur Bildung für nachhaltige Entwicklung für Ihren Unterricht bieten können und Sie Freude beim Lesen haben werden.

**Markus Precht**

# Seltenerdelemente

## Ein facettenreiches und forderndes Thema für den Unterricht

Markus Prechtl

### 1. Ausgangspunkt: Bildung für nachhaltige Entwicklung

Jugendstudien jüngerer Datums belegen einen bemerkenswerten Bedeutungsanstieg der Klimakrise unter Jugendlichen. Für viele Jugendliche (71 %) hatte der Umweltschutz zuletzt sogar einen höheren Stellenwert als der eigene Lebensstandard (63 %) [1]. Allerdings ist die Jugend diesbezüglich heterogen. Differenziert nach Kenntnis, Bewusstsein und Aktivität ergeben sich die vier Gruppen Distanzierte (25 %), Paralyisierte (14 %), Gemeinnützige (40 %) und besorgte Aktivist\*innen (21 %) [2]. Das Bewusstsein für die Klimakrise ist bei Aktivist\*innen am höchsten ausgeprägt und Gemeinnützige punkten beim Wissen. Vor allem die beiden anderen Gruppen bedürfen schulischer Unterstützung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, zum einen beim Wissensaufbau, begleitet durch Storytelling, und zum anderen bei der Entwicklung positiver Selbstwirksamkeitserwartungen bezogen auf Umwelthandeln [3].

### 2. „Missing our lessons – so we can teach you one“

Dieser Slogan von Fridays-for-Future-Demonstrant\*innen führt vor Augen, dass Jugendliche, wenn es um Umwelt- und Zukunftsfragen geht, klassischen Institutionen den Rücken kehren. Pessimismus angesichts globaler Krisen ist nachvollziehbar. Visuelle Eindrücke von Umweltverschmutzung, vielfach assoziiert mit Chemie und Technik, werden allenthalben medial geteilt. Informationen zu Technologien für nachhaltige, grüne Zukunftsvisionen sind vergleichsweise mühsam zugänglich. Doch sie lassen sich ausfindig machen und die Auseinandersetzung mit ihnen lohnt sich. Dieses Plus Lucis-Heft schließt an etablierte Beiträge über Nachhaltigkeit rund um das Mobiltelefon [4-6] an, indem es die 17 Seltenerdelemente (SEE) in den Blick nimmt (Abb. 1). Zu ihnen zählen Scandium (Sc), Yttrium (Y) und die Reihe der Lanthanoide (IUPAC): Lanthan (La), Cer (Ce), Praseodym (Pr), Neodym (Nd), Promethium (Pm), Samarium (Sm), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Terbium (Tb), Dysprosium (Dy), Holmium (Ho), Erbium (Er), Thulium (Tm), Ytterbium (Yb) und Lutetium (Lu) (zur Einführung vgl. [7-11]).

In den Nachrichten werden die SEE meist im Zusammenhang mit politischem Streit um Rohstoffe erwähnt. Während ihr wirtschaftlich-industrieller Stellenwert für nachhaltige Technologien hoch eingeschätzt wird, spielen sie in den Curricula (noch) keine Rolle. Das Plus Lucis-Heft schließt diese Lücke mit Beiträgen zu historischen und zeitgenössischen

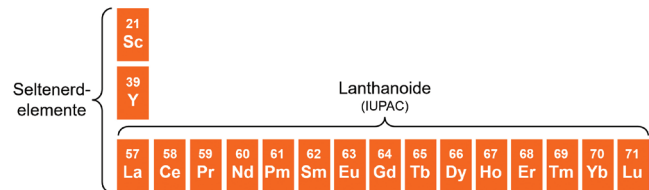


Abbildung 1. Die 17 Seltenerdelemente im PSE.

Anwendungen der SEE sowie zu deren Recycling. Die Gliederung des Basisartikels spiegelt das Konzept der Stoffgeschichte, beginnend mit Abbau und Aufbereitung über Anwendungen bis zur Dissipation der SEE, wider. Dabei wird das Dilemma der SEE-Nutzung augenscheinlich: SEE sind einerseits umweltkritisch, andererseits essenziell für grüne und innovative Technologien.

### 3. Verfügbarkeit, Abbau und Aufbereitung der SEE

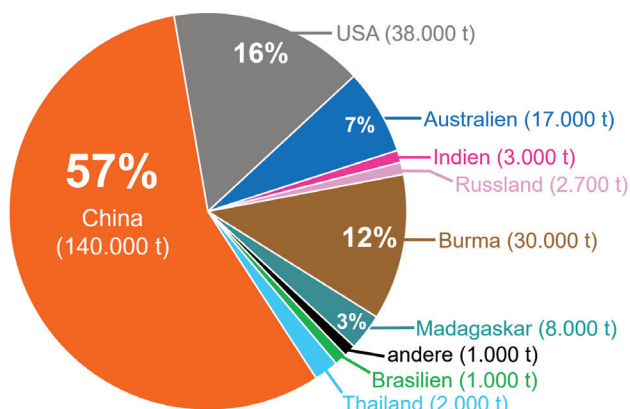
Die geschätzte und gemittelte Konzentration von SEE in der Erdkruste beträgt 150 bis 220 ppm; der mittlere Gehalt an Cer (40-60 ppm) ist besonders hoch ([9], S. 43) und entspricht annähernd dem von Kupfer. Demzufolge sind SEE nicht so selten, wie ihr Name nahelegt. Die Namensgebung muss in ihrem historischen Zusammenhang gesehen werden. Zu Beginn der Entdeckung der SEE, um 1800, war die Erzverteilung von Cerit, Gadolinit und Samarskit nur selten und als selten klassifiziert worden, und anstelle des Terminus Oxid sagte man damals *Erde* [9-10]. Dies ist bei Runge (1839) nachzulesen, der Erden „aus einer metallischen Grundlage mit Sauerstoff verbunden“ bestehend und folglich als „unverbrennlich“ beschreibt [12].

#### 3.1 SEE-Lagerstätten

Die bekannteste SEE-Erzmine, mit der höchsten Produktionsrate weltweit, liegt in der Inneren Mongolei: Bayan Obo [13]. Dort ist die Konzentration an SEE-Erzen hoch, sodass sich der Abbau wirtschaftlich lohnt. Von einer SEE-Lagerstätte spricht man ab 1000 ppm, wenn aus einer Tonne Gestein ein Kilogramm Rohstoff gewonnen werden kann. Im Vergleich zu Eisenlagerstätten ist das wenig; diese gelten bei einer Eisenkonzentration von 70 % als ergiebig ([9], S. 44). Neben China verfügen auch andere Länder über SEE-Reserven (Abb. 2). Aus diversen Gründen sind SEE-Ressourcen vielerorts aber nicht erschließbar. So gelingt in Sacha, einer Republik im Nordosten Russlands, der Erzabbau nicht, da der Standort für



Transporte ungeeignet ist ([9], S. 44). Andernorts sprechen ökologische Aspekte gegen den Bergbau.



**Abbildung 2.** Die wichtigsten SEE-Produzenten (SEE-Oxid, Tonnen/Jahr, [13]: Jänner 2022).

### 3.2 China ist der führende SEE-Produzent

Bis in die 1990er-Jahre hinein war die Mountain-Pass-Lagerstätte in Südkalifornien die weltweit wichtigste SEE-Produktionsstätte, bis die Ökologie zum politischen und wirtschaftlichen Faktor wurde. Da von der Erzwäsche in den Abraumbalden eine Gefährdung des Trinkwassers durch radioaktive Verbindungen ausging, wurde der Bergbau 1988 zeitweilig und 2002 längerfristig eingestellt ([7], Kap. 4). China, das in den 1980er-Jahren mit dem SEE-Abbau begonnen hatte, wurde Monopolproduzent. Aktuell bezieht die EU 99 % des Bedarfs an leichten SEE (Sc, La–Eu) und 98 % des Bedarfs an schweren SEE (Y, Gd–Lu) aus China [14]. Seit 2008 begegnet die EU dieser Importabhängigkeit mit Rohstoffinitiativen. Auf die *End-of-Life*-Recycling-Quote hat sich dies noch nicht deutlich ausgewirkt. Sie ist in der EU sowohl für leichte als auch für schwere SEE niedrig (3 % bzw. 8 %) [14].

### 3.3 Kritikalität von Rohstoffen

Die EU hat zuletzt 30 Rohstoffe, darunter SEE, als kritisch eingestuft [14]. Das Versorgungsrisiko und die wirtschaftliche Bedeutung von Rohstoffen sind wesentliche Dimensionen von Kritikalität. Mit „kritisch“ wird eine multifaktorielle Problemlage benannt. Darunter zählen die Konzentrierung des SEE-Abbaus auf Förderländer und die Stabilität deren Handelspolitik sowie Substitutionspotenziale und Recyclingquoten. Auch im US-Ranking [15] belegen SEE vordere Ränge (in Klammern): Nd (4), Dy (7), Pr (12), Ce (13), La (14), Y (16); Spitzenpositionen belegen Gallium (1), Niob (2) und Cobalt (3). Es wird deutlich, dass die Kritikalität einzelner SEE verschieden eingestuft wird. Ein Grund, neben den genannten, ist der prozentuale Gehalt einzelner SEE in Erzen. Für Cer ist dieser beispielsweise deutlich höher als für Dysprosium. Bei der Produktion einer Tonne Dysprosiumoxid entstehen 500 Tonnen Ceroxid (Abb. 3).

SEE-Oxid	SEE-Gehalte im Erz Bastnäsit (in %-Gesamtoxid)	
	Bayan Obo (China)	Mountain Pass (USA)
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.0	33.2
CeO <sub>2</sub>	50.0	49.1
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	6.2	4.3
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.5	12.0
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2	0.1
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0.1	Spuren
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1	Spuren
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Spuren	0.1

**Abbildung 3.** SEE-Gehalte in Bastnäsit (nach [8], Tab. 14.4).

Die Kritikalität spiegelt sich in SEE-Marktpreisen (in US-\$ pro kg) wider, die tagesaktuell publiziert werden ([16], Jänner 2022): Terbiumoxid (735 \$), Dysprosiumoxid (190 \$), Praseodymoxid und Neodymoxid (je 60 \$), Europiumoxid (13 \$), Lanthanoxid und Ceroxid (je 0.6 \$). Die EU stärkt ihre Widerstandsfähigkeit in SEE-Wertschöpfungsketten, da prognostiziert wurde, die Nachfrage an Dauermagneten für nachhaltige Technologien und die Digitalisierung werde sich bis 2050 verzehnfachen [14]. Vergleichbare Strategien verfolgt der US-Kongress. Präsident Biden erließ die Executive Order 14017 zur Prüfung von Lieferketten, da SEE eine Rolle im National Defense Authorization Act 2021 zukommt. Sie werden im Tonnenmaßstab in Lenk- und Steuerungssystemen für U-Boote, Kampffjets sowie Raketen und Tornados verbaut [17]. Das politische Streben nach Unabhängigkeit liegt auf der Hand. Auch Japan, das seit Jahrzehnten politische Konflikte mit China austrägt, orientiert sich neu.

### 3.4 „A Climate Solution Lies Deep Under the Ocean“

Sotitelte die Time, 2021, zum Abbau von SEE-Erzen in der Tiefsee. Von Interesse sind Bodensedimente, polymetallische Knollen, cobaltreiche Eisen-Mangan-Krusten und massive Sulfide bzw. sulfidbildende Fluide [18], die Offshore exploriert werden. Atomemissionsspektrometrie und Röntgenfluoreszenzanalytik belegen, dass Meeresbodensedimente teils 20- bis 30-mal

Standort	SEE-Gehalt ppm Min – Max
Atlantik 36°34' N, MAR	6.3 – 40.6
Atlantik 14°45' N, 44°58' W	13.6 – 130
Indik 1°–30° S, 57°–112° E	0.5 – 920
Pazifik 21°–27° N, 150°–158° E	299 – 6800
Pazifik 21°48'–22°15' N, 153°30'–154°07' E	5000 – 22000

**Abbildung 4.** SEE-Ressourcen in Ozeanen (nach [18]).

höhere SEE-Konzentrationen als terrestrische Lagerstätten aufweisen (Abb. 4). Extrem SEE-reiche Sedimente finden sich in der Wirtschaftszone Japans, nahe der Insel Minami-Torishima [18].

### 3.5 Abbau von SEE auf dem Meeresboden

Der Abbau SEE-haltiger Sedimente im Ozean kann nur von schwimmenden Plattformen aus erfolgen. Elektrische Planierdrahten müssen die Lagerstätten zunächst von einer Deckschicht befreien, bevor Mischer den zähen, klebrigen und abrasiven SEE-haltigen Schlamm mit Meerwasser so fluide machen, dass er mit aufsteigender Strömung durch die Rohre auf die Plattform gepumpt werden kann [19]. Derzeit stellen sich nur wenige hochtechnisierte Länder diesem Aufwand, da er noch unrentabel ist. Dazu gibt es negative Prognosen für Umweltschäden durch Bergbaufahrzeuge. Diese hinterlassen tiefe Spuren im Meeresboden und erzeugen Trübungswolken aus Sediment, die bodenlebende Organismen überdecken und damit abtöten.

### 3.6 Erzaufbereitung und Darstellung reiner SEE-Metalle

Beim Erzaufschluss werden unlösliche SEE-Verbindungen in lösliche Verbindungen überführt und gefällt. Die Trennung SEE-haltiger Erze von der Gangart erfolgt im sauren Milieu, häufig mit Schwefelsäure (Abb. 5–a) oder alkoholischer Ammoniumsulfatlösung, alternativ mit trockener Technologie, z. B. mit Chlorgas (Abb. 5–c). Anhand von Nachhaltigkeitskriterien werden diese Verfahren unterschiedlich bewertet [20]. Während bei der Haldenlaugung SEE-Erze in einem mit Plastik ausgekleideten Becken mit Säure versetzt werden, wird im Fall des *In-Situ-Leachings* die Lösung durch Bohrlöcher in poröse Gesteinsschichten gepumpt (vgl. [7], Kap. 5; [9], Kap. 5). In beiden Fällen besteht die Gefahr der Grundwasserkontamination. Im Fall der Haldenlaugung können Dämme brechen oder bei Hochwasser überspült werden. Beim *In-Situ-Leaching* bahnen sich im schlimmsten Fall Uran- und Thoriumverbindungen einen Weg durch feine Risse im Erdreich. Reine Metalle werden

a	$2 \text{SEEPO}_4 + 3 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SEE}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{H}_3\text{PO}_4$
b	$\text{SEEPO}_4 + 3 \text{C} + 3 \text{Cl}_2 \rightarrow \text{SEEC}_3 + 3 \text{CO} + \text{POCl}_3$
c	$6 \text{SEECO}_3\text{F} + 6 \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{SEEF}_3 + 4 \text{SEEC}_3 + 3 \text{O}_2 + 6 \text{CO}_2$
d	$2 \text{SEEF}_3 + 3 \text{La} \rightarrow 2 \text{SEE} + 3 \text{LaF}_2$
e	$2 \text{CeO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{CO}_2$
f	$\text{Dy}_2\text{O}_3 + 6 \text{HF} \rightarrow 2 \text{DyF}_3 + 3 \text{H}_2\text{O}$
g	$\text{Tb}_4\text{O}_7 + \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Tb}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$
h	$2 \text{SEECO}_3\text{F} + 3 \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{SEE}_2(\text{SO}_4)_3 + 2 \text{HF} + 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2$
i	$\text{Fe}^{2+} + \text{Ce}^{4+} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{Ce}^{3+}$
j	$\text{LaMg}_2\text{Ni} + 2 \text{H}_2 \leftrightarrow \text{LaMg}_2\text{NiH}_4$
k	$4 \text{CeO}_2 + 2 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Ce}_2\text{O}_3 + 2 \text{CO}_2$
l	$2 \text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{CeO}_2$

Abbildung 5. Alle chemischen Reaktionen auf einen Blick.

mittels Schmelzflusselektrolyse oder reduzierender Metalle wie Lanthan (Abb. 5–d), aufgrund hoher Bildungswärme von Lanthanoxid aus Lanthan, dargestellt. Weitere Optionen bieten Redoxreaktionen mit Kohlenstoffmonoxid, Fluorwasserstoff oder Wasserstoff (Abb. 5–e–f–g).

### 3.7 Pollution Export und Umweltpolitik

Die Region, in der die Mine Bayan Obo liegt, ist extrem trocken. Starke Winde verteilen Staubemissionen mit Thorium- und Uranverbindungen ostwärts, in Richtung der großen Ballungsräume Chinas. Im Umfeld der Minen, besonders in Baotou, dem Hauptstandort der Erzaufbereitung, leiden Menschen unter Staublungerkrankungen und Krebs ([7], Kap. 5). Ein weiteres Risiko für Mensch und Umwelt stellen Fluorverbindungen dar. Bei der Umsetzung von SEE-Erzen mit Schwefelsäure entsteht Fluorwasserstoffgas (Abb. 5–h). Giftige, ätzende Abfälle werden in künstlichen Seen in Größenordnungen von zehn Quadratkilometern (dies entspricht in etwa dem Ossiacher See) gelagert. Auf Satellitenbildern sind sie gut zu sehen. China wurde in der Vergangenheit wegen mangelnder Umweltstandards kritisiert, führt Kontrollen mittlerweile aber konsequent durch. Andere SEE-Erz-abbauende Länder mit höheren Umweltstandards entledigen sich des Problems, indem sie die Erzaufbereitung in das Ausland transferieren ([7], Kap. 5). Medial gut dokumentiert ist die *Causa Lynas Corporation*. Das Unternehmen baut SEE-Erze im Mount Weld in Westaustralien ab und transportiert die Konzentrate per Containerschiff nach Malaysia, wo *Lynas Advanced Materials Plant* die Veredelung übernimmt. Auch in diesem Fall sind Staubecken mit giftigem, radioaktivem Schlamm auf Satellitenbildern zu erkennen [21]. Proteste der Bevölkerung betrafen die Gefahr von Überschwemmungen während des Monsuns. Das Fallbeispiel zeigt, dass sich Menschen in der globalisierten Welt verlässliche Verantwortungszuschreibungen immer wieder aufs Neue erkämpfen müssen; auch andernorts.

### 3.8 TANBREEZ – Ausgang offen

Das australische Unternehmen TANBREEZ – ein Akronym für Tantal, Niob, SEE (*engl.* REE, Rare Earth Elements) und Zirconium – hat eine Abbaugenehmigung für Erzreserven im Süden Grönlands. Für die Grönländer\*innen ergibt sich damit ein Dilemma: Einerseits wäre der Bergbau ein Schlüssel zur Entwicklung der schwachen Wirtschaft des Landes, andererseits ist das Risiko der Kontamination des UNESCO-Weltkulturerbens nicht von der Hand zu weisen [22]. Auch auf Grönland geriet der Umgang mit Rohstoffen zum Wahlkampfthema, nicht zuletzt, weil sich die Menschen mit Unbehagen an die Schlagzeile, US-Präsident Trump möchte Grönland wegen seiner Rohstoffe kaufen, erinnerten [23].

## 4. Anwendungen mit SEE

Noch in den 1990er-Jahren waren SEE nur in den drei Anwendungsgebieten Katalyse, Metallurgie und Keramik

von Relevanz ([9], S. 73): Cer katalysiert das Cracken von Erdölprodukten; robuste Flugzeug- und Maschinenbauteile basieren auf SEE-Magnesium-Legierungen; SEE-haltige Keramiken bilden die Grundlage für Triebwerke und fungieren als Supraleiter oder Festkörperlaser. Mit dem Boom der Hightechprodukte und durch die treibende Kraft der Energiewende, gewannen die Anwendungsfelder Dauermagnete, Leuchtstoffe, Gläser und Poliermittel sowie Keramiken und Speziallegierungen für die grüne Energieerzeugung und -speicherung an Bedeutung (Abb. 6) ([9], Kap. 6). Ferner haben SEE einen pharmazeutischen Nutzen. Im Folgenden werden solche Anwendungsfelder betrachtet, die im Unterricht thematisiert werden können.

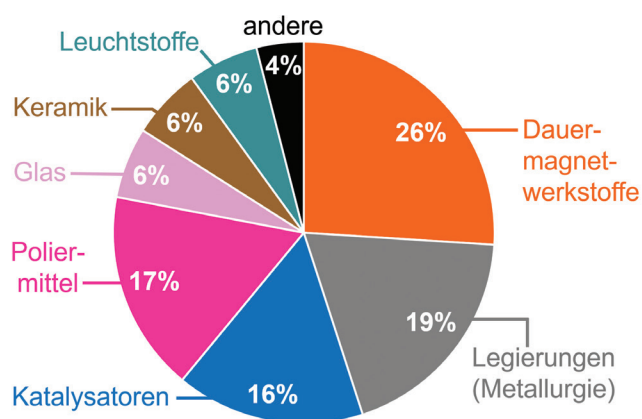


Abbildung 6. Anwendungsfelder (weltweit) für SEE (nach [13]).

#### 4.1 Leuchtstoffe

Viele Leuchtstoffe enthalten SEE (z. B. Ce, Eu, Tb) als Aktivatoren und Sensibilisatoren ([9], S. 80ff.; vgl. Diekemper, Daumann & Schwarzer in diesem Heft). Aktivatoren wandeln absorbierte Energie in Lumineszenz um, Sensibilisatoren erhöhen die Quantenausbeute. Je nach Kombination von Wirtsgitter und SEE-Dotierung ergeben sich unterschiedlich farbige Lumineszenzen ( $Y_3Al_2(OAlO_4)_3:Ce^{3+}$  = gelb,  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  = rot-orange,  $LaPO_4:Ce^{3+},Tb^{3+}$  = grün,  $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$  = blau). Nach dem Prinzip additiver Farbmischung lassen sich weiße Leuchtmittel herstellen. Nuancierte Farbeffekte entstehen auch bei Variation prozentualer SEE-Gehalte im *Metal-Organic Framework* (MOF) [24] (Abb. 7).

Ion	Prozentuale Verteilung						
	75%	70%	65%	50%	65%	70%	75%
Gd	75%	70%	65%	50%	65%	70%	75%
Eu	25%	25%	25%	25%	10%	5%	
Tb		5%	10%	25%	25%	25%	25%
Farb-eindruck	Rot	Orange	Gelb	Grün	Blau	Blau	Blau

Abbildung 7. Farbeffekt von SEE-haltigen MOFs bei UV-Strahlung ( $\lambda = 302 \text{ nm}$ ).

Vor der OLED-Zeit war Europium für die Leuchtstoffproduktion von hoher Relevanz. Mit Aufkommen der OLEDs, die den Leuchtmittelmarkt mittlerweile erobert haben, war eine

Materialsstitution gegeben, die den Europiumpreis in den Keller stürzen ließ ([5], S. 31).

#### 4.2 Glas und Poliermittel

SEE sind sowohl der Glasfärbung als auch der Glasentfärbung dienlich ([9], S. 92ff.). Neodym und Praseodym geben Neophanbrillengläsern den Farbton. Glasschmelzen, die aufgrund zwei- und dreiwertiger Eisenionen grünlich bis gelbbräunlich wirken, werden Cer(IV)-ionen als Oxidationsmittel für Eisen(II)-ionen zugesetzt (Abb. 5–j). Der verbleibende Gelbstich, hervorgerufen durch Eisen(III)-ionen, wird mit einer Blaukomponente optisch korrigiert. Die Fähigkeit dreiwertiger Cerionen, UV-Strahlung zu absorbieren, wird in Spezialgläsern genutzt, die zum Beispiel verderbliche Lebensmittel schützen. Auf Cerdioxid basierendes Poliermittel (Opaline) wird in der optischen Industrie zur Glaspolitur eingesetzt.

#### 4.3 Magnetwerkstoffe

SEE-haltige Magnetwerkstoffe werden in allen Größenordnungen eingesetzt, wobei das Spektrum von Turbinen in Wind- und Wasserkraftanlagen über Elektromotoren bis zu Lautsprechern und Vibrationsmotoren in Smartphones reicht [5]. Besonders effizient sind Neodym-Eisen-Bor-Magnete, allerdings nur, wenn diese nicht heiß werden. Bei einer Temperatur von etwa  $130^\circ\text{C}$  verlieren sie ihre Remanenz. Die Temperaturbeständigkeit der Dauermagnete wird durch Zulegierung von Dysprosium optimiert. Nicht nur darin liegt der Steigerungsfaktor des Gebrauchs von Dysprosium begründet [25–26]. Gadolinium ist auch Maßstab für Prototypen magnetokalorischer Kühlsysteme, die angesichts der Tatsache, dass Milliarden Haushalts-, Gewerbe- und Transportkühlgeräte, Klimaanlage und Wärmepumpen etwa zwölf Prozent der Treibhausgasemissionen verursachen, ineffiziente Kältesysteme ersetzen sollen [26]. Bei der Magnetkühlung wird das Phänomen, dass manche Stoffe im Magnetfeld Wärme freisetzen und sich beim Entfernen des Magnetfeldes abkühlen, technisch umgesetzt (Abb. 8).

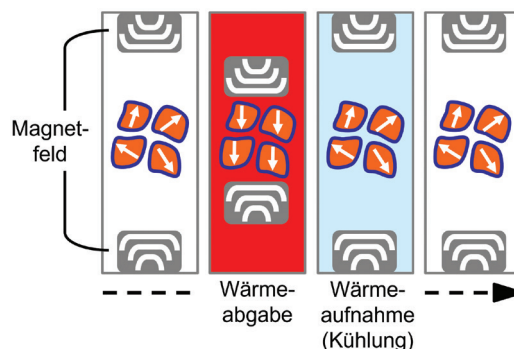


Abbildung 8. Magnetokalorische Kühlung.

Aufgrund der hohen Kritikalität des Gadoliniums wird an Substitutionen geforscht, aktuell unter anderem mit Blick auf intermetallische Verbindungen aus Eisen, Silicium und Mangan mit eingelagertem Wasserstoff [26].



#### 4.4 Energieerzeugung und -speicherung

Im Rahmen der Energiewende spielen Brennstoffzellen eine wichtige Rolle. Radikalfänger, in Form von  $\text{CeO}_2$ -Partikeln, erhöhen deren Haltbarkeit [27]; hier kommt die Fähigkeit der Cerionen, zwischen den Oxidationsstufen +III und +IV wechseln zu können, zupass (Abb. 9).

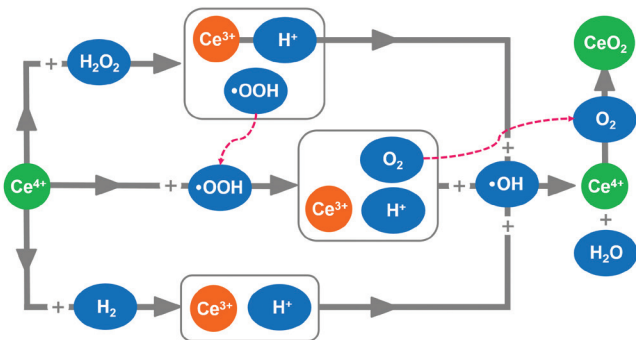


Abbildung 9. Cerionen als Radikalfänger in Brennstoffzellen [27].

Wiederum andere SEE (Sc, Y) erhöhen die Effizienz oxidkeramischer Brennstoffzellen und senken deren Betriebstemperatur und -kosten [28]. SEE unterstützen zudem die Energiespeicherung. Cer- bzw. Lanthan-Nickel-Legierungen bilden mit Wasserstoff Hydride ([9], S. 113f.) (Abb. 5–j). Die Metallhydridspeicher werden in Elektro- und Hybridautomobilen verbaut.

#### 4.5 Schadstoffreduktion in Luft und Wasser

Die Abgaskatalyse basiert (noch) auf Platin, aber auch SEE sind hierfür bedeutsam. Ceroxide halten das wabenförmige, aus Aluminiumoxid bestehende Trägermaterial des Drei-Wege-Katalysators thermisch stabil ([9], S. 112f.). Ein  $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$ -Gemisch fungiert zudem als Sauerstoffregulator. Bei Treibstoffüberschuss oxidiert  $\text{CeO}_2$  Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid (Abb. 5–k), bei Sauerstoffüberschuss wird das Edukt zurückgebildet (Abb. 5–l). Auch die Lambda-Sonde, die den Sauerstoffgehalt im Abgasstrom von Ottomotoren misst und darüber den Kraftstoffverbrauch regelt, enthält Yttrium als Bestandteil der Keramik.

SEE-Verbindungen, die Phosphate und schädliche Metallionen binden, werden in der Gewässeraufbereitung eingesetzt. Das Unternehmen Molycorp und die Treibacher Werke produzieren SEE-Adsorber, mit denen unter anderem Arsen, das beim Bergbau anfällt, und schädliche Phosphate aus Gewässern entfernt werden (vgl. Webauftritte der Unternehmen). Zum Einsatz kommen Cer- und Lanthanformulierungen. Der Einsatz von Cerchlorid ist effektiver als der von herkömmlichen Koagulationsmitteln auf Eisensalzbasis [29]. Auch Kombinationen von modifizierten Hölzern und Ceroxid-Aluminiumoxid-Nanokompositen werden als Phosphatadsorber erprobt; Abbildung 10 gibt hierzu die Struktur-Eigenschaftsbeziehungen wieder [30].

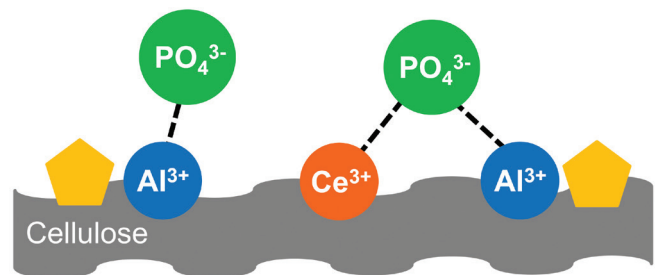


Abbildung 10. SEE-haltige Phosphatadsorber für Gewässerreinigung. Gelbe Fünfecke symbolisieren organische Reste.

#### 4.6 Pharmazeutische SEE-Anwendungen

Eine kleine Sparte bilden pharmazeutische, zahnmedizinische und röntgenanalytische SEE-Anwendungen, darunter Mittel gegen Übelkeit und Seekrankheit (Ce), Mittel gegen arteriosklerotische Gefäßveränderungen (La), Zusätze in Zahnimplantaten (Yb), krebstherapeutische Anwendungen (Sm) und MRT-Kontrastmittel (Gd) ([9], S. 116ff.). Letzteren widmen sich Spitzer und Krumphals in ihrem Beitrag in diesem Heft, und auch im nachfolgenden Kapitel werden sie relevant.

### 5. Dissipation von SEE

Mit Dissipation – der „Verdünnung von Elementen (Metallen) in Konsumgütern“ [31] – werden Materialverluste in die Umwelt, in Deponien und in individuell genutzte Gebrauchsgegenstände bezeichnet, die die Rückgewinnung des Materials verhindern. Beispiele für die Dissipation von SEE sind Wasseraufbereitungen, Glasabfälle, Anstriche mit Pigmenten, Feinverteilungen durch Pyrotechnik etc. ([9], Kap. 7). Eine neue Form von Dissipation in Österreich betrifft Lanthanverbindungen, die dem Futter in der Schweinemast beigemischt werden. In hohem Maße betrifft SEE-Dissipation ausgediente Fernsehgeräte, Smartphones und Tablets, die nicht mehr funktionieren (*End-of-Life*) oder, obwohl funktionsfähig, von Konsument\*innen durch neue Modelle ersetzt werden (*End-of-Use*). Diese schlummern oft langfristig in Schubladen und Kellerräumen. Schüler\*innen können an dieser Problematik interessante Recherchen vornehmen: Was ist Urban Mining? Sollten ausgediente Elektrogeräte deponiert werden, damit sie folgenden Generationen zur Verfügung stehen? Sollten *End-of-Life*-Produkte direkt recycelt werden? Wäre Geräteleasing eine Option? Oder Verzicht? Eine Perspektive auf Dissipation bietet Gadolinium, das als Komplex die Magnetresonanztomografie unterstützt. Über den Urin der Patient\*innen wird es ausgeschieden und passiert Kläranlagen. In Gewässern in Ballungsräumen – z. B. San Francisco und dem Ruhrgebiet – wurden erhöhte Konzentrationen an Gadoliniumkomplexen nachgewiesen [32–33]. Der Rhein schwemmt jährlich mehr als 700 kg komplexiertes Gadolinium in die Nordsee und auch Anreicherungen in Sedimenten und Tieren (Muscheln) sind messbar ([33], vgl. [7], Kap. 6). Die stabilen Komplexe gelten als sicher, jedoch ist nicht geklärt, inwiefern die Abwasserbehandlung mit UV-Strahlung in Kläranlagen zu ihrem Abbau führt. Zur Toxizität

der SEE-Ionen liegen kaum Befunde vor. Bedenklich ist, dass dreiwertige SEE-Ionen annähernd den gleichen Ionenradius wie zweiwertige Calciumionen haben. Auf Calciumionen basiert die Knochenmatrix von Säugern und als Messenger halten sie Zellmembranfunktionen aufrecht. Bekannt ist, dass dreiwertige SEE-Ionen die Wirkung von Calciumionen hemmen und Knochen und Leber schädigen; wegen ihrer Affinität zu Phosphat sind sie leicht toxisch ([9], S. 37ff.).

## 6. Recycling und Substitution

Wie sollte der Tatsache, dass SEE (umwelt)kritisch sind, angemessen begegnet werden? Drei Optionen sind nahe liegend: erstens die Substitution eines Elements durch ein anderes Element. Ist dies nicht möglich, kann zweitens der Versuch unternommen werden, die Konzentration des Elements in einer Anwendung zu verringern. Drittens besteht die Möglichkeit des Recyclings. Ein bereits angeführtes Beispiel für gelungene Substitution sind die OLEDs. Forscher\*innen befassen sich derzeit unter anderem mit Eisenverbindungen, aus denen nachhaltige Dauermagnete entstehen sollen [34]. Bestimmte SEE, wie Gadolinium, lassen sich aber noch nicht substituieren. Daher ist es geboten, sparsam mit diesen Rohstoffen umzugehen. Eine technische Option ist vielversprechend: Materialwissenschaftler\*innen stellten fest, dass bei der Herstellung von Dauermagneten eine gleichmäßige Verteilung von Dysprosium im Material nicht notwendig ist. Zufriedenstellende Ergebnisse wurden erzielt, als die Körner, aus denen Magnete bestehen, einen sehr feinen Überzug aus Dysprosium erhielten (Abb. 11) [35].

Beim Recycling „[werden] einmal eingesetzte Rohstoffe in Primärproduktqualität dem Wirtschaftskreislauf wieder zur Verfügung gestellt [...]“ [31]. Dauermagnete werden klassisch, mit Säuren, oder modern, mit Wasserstoff, ionischen Flüssigkeiten oder Mikroorganismen recycelt und auch für das Recycling von Leuchtstofflampenpulver bieten sich interessante

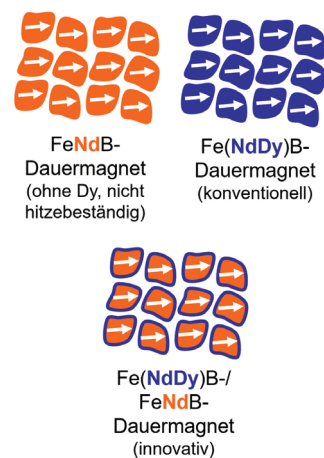


Abbildung 11. Von konventionellen zu innovativen Dauermagneten.

Möglichkeiten (vgl. die Beiträge zum SEE-Recycling in diesem Heft).

## 7. Resümee – Licht und Schatten

Mit den SEE sind Licht und Schatten in die Welt gekommen. Aktuell verläuft die Entwicklung (bio)chemisch-technologischer Innovationen zur Energiewende rasant. Schüler\*innen können am Beispiel des facettenreichen Themas SEE reflektieren lernen, dass Naturwissenschaften und Technik in der Lage sind, Konzepte und Anwendungen zur Umsetzung globaler Nachhaltigkeitsziele beizusteuern – eine gute Basis für optimistische Zukunftsvisionen.

## Danksagung

Herzlichen Dank an Tim Fecht und Philipp Hossner für die Unterstützung bei der Recherche.

Markus Prechtl Technische Universität Darmstadt

## Literatur

- [1] Albert, M. et al., Jugend 2019 – 18. Shell Jugendstudie. 2019: Beltz.
- [2] Kuthe, A. et al., How many young generations are there? – A typology of teenagers' climate change awareness in Germany and Austria. The Journal of Environmental Education, 2019. 50:4, S. 1-15.
- [3] Sach, A.A., Zwischen Distanz und Klimaangst. Einstellungen und Emotionen junger Menschen bezüglich der Klimakrise – ein Blick auf empirische Studien. Unterricht Physik, 2021. 32:183/184, S. 18-21.
- [4] Nordmann, J. et al., Die Rohstoff-Expedition: Entdecke, was in (d)einem Handy steckt. 2015: Springer.
- [5] Mener, M., N. Anderle & V. Zepf, Handbuch Flatscreen & Co. Umweltkritische Materialien. Zwei Bände. 2020. Online abrufbar unter [www.flatscreenjourney.de](http://www.flatscreenjourney.de)
- [6] <https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/e-learning/index.html> (07.01.2022)
- [7] Marschall, L. & H. Holdinghausen, Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters. 2018: Oekom.
- [8] Kausch, P., M. Bertau, J. Gutzmer & J. Matschullat, Strategische Rohstoffe – Risikovorsorge. 2014: Springer.
- [9] Adler, B. & R. Müller, Seltene Erdmetalle. Gewinnung, Verwendung und Recycling. 2014: Universitätsverlag Ilmenau.
- [10] Reinert, C.S., Die Scandiumgruppe. In: Handbuch der experimentellen Chemie, Band 5. W. Glöckner et al., Hrsg., 2003, Aulis. S. 1-27.
- [11] Themenheft „Kritische Metalle“, Unterricht Chemie, 2017. 28:161.
- [12] Marcet, J.H., Unterhaltungen über die Chemie. Nachdruck. 1839: Sander'sche.
- [13] U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov>, SEE-Statistik, Jänner 2022.

- [14] EU, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament [...]: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. 2020: EU.
- [15] Nassar, N.T. & S.M. Fortier, Methodology and Technical Input for the 2021 Review and Revision of the U.S. Critical Minerals List. Open-File Report 2021-1045. 2021: U.S. Geological Survey.
- [16] <https://mineralprices.com/rare-earth-metals/> (07.01.2022)
- [17] Wortzel, L. & K. Selley, Breaking China's Stranglehold on the Rare Earth Elements Supply Chain. Japan Forward, 2021 (28. April).
- [18] Milinovic, J. et al., Ocean-Floor Sediments as a Resource of Rare Earth Elements: An Overview of Recently Studied Sites. Minerals, 2021. 11:2 (142).
- [19] [www.jamstec.go.jp/sip2/e](http://www.jamstec.go.jp/sip2/e) (07.01.2022)
- [20] Peiro, L.T. & G.V. Mendez, Material and Energy Requirement for Rare Earth Production. Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2013. 65:10, S. 1327-1340.
- [21] <https://ejatlas.org/conflict/lynas-refinery-in-kuantan> (07.01.2022)
- [22] Moraca, S., Der Kampf um Grönlands Bodenschätze. Deutsche Welle, 2021 (10. April).
- [23] Hermann, R., Ein schlafender Riese für strategische Rohstoffe – warum Trump Grönland kaufen wollte, NZZ, 2021 (27. April).
- [24] Matthes P.R. et al., Luminescence tuning of MOFs via ligand to metal and metal to metal energy transfer by co-doping of  $2\infty[\text{Gd}_2\text{Cl}_6(\text{bipy})_3]_2\text{bipy}$  with europium and terbium. Journal of Materials Chemistry, 2012. 22, S. 10179-10187.
- [25] Schüler, D., Study on Rare Earth and Their Recycling. 2011: Öko-Institut.
- [26] Gottschall, T. et al., Making a Cool Choice: The Materials Library of Magnetic Refrigeration. Advanced Energy Materials, 2019. 9:34 (1901322).
- [27] Prabhakaran, V., C.G. Arges & V. Ramani, Investigation of polymer electrolyte membrane chemical degradation and degradation mitigation using in situ fluorescence spectroscopy. PNAS, 2012. 109:4, S. 1029-1034.
- [28] Steele, B.C.H. & A. Heinzl, Materials for fuel-cell technologies. Nature, 2001. 414, S. 345-352.
- [29] Lupo, J., New and Innovative Rare Earth Technology for Low-Level Phosphorus Removal. 2014: Molycorp.
- [30] Nakarmi, A. et al., Removal and Recovery of Phosphorus from Contaminated Water Using Novel, Reusable, Renewable Resource-Based Aluminum/Cerium Oxide Nanocomposite. Water Air & Soil Pollution, 2020. 231 (559).
- [31] Bertau, M., Warum wir uns mit Rohstoffen befassen müssen. Chemie in unserer Zeit, 2018. 52:5, S. 290-296.
- [32] Hatje, V., K.W. Bruland & A.R. Flegal, Increases in Anthropogenic Gadolinium Anomalies and Rare Earth Element Concentrations in San Francisco Bay over a 20 Year Record. Environmental Science & Technology, 2016. 50:8, S. 4159-4168.
- [33] Brünjes, R. & T. Hofmann, Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. Water Research, 2020, 182 (115966).
- [34] Shen, C. et al., Designing of magnetic MAB phases for energy Applications. Journal of Materials Chemistry A, 2021. 9, S. 8805-8813.
- [35] Sawatzki, S., C. Kübel, S. Ener & O. Gutfleisch, Grain boundary diffusion in nanocrystalline Nd-Fe-B permanent magnets with low-melting eutectics. Acta Materialia, 2016. 115, S. 354-363.



# Storytelling zu Seltenerdelementen

Markus Prechtl & Yannick L. Legscha

Storytelling macht Sachliches lebendig, erzeugt Aufmerksamkeit und weckt Emotionen [1]. Die Naturwissenschaften, die zuweilen auf Schüler\*innen abstrakt und unpersönlich wirken, werden durch Storytelling nahbar. Dies wirkt sich positiv auf das Lernen aus. Gut belegt ist der Vorteil von Kontextualisierungen auf die Entwicklung eines persönlich relevanten Interesses an Sachthemen bei Jugendlichen [2]. Mittlerweile gibt es Best-Practice-Beispiele aus dem naturwissenschaftlichen Unterricht, die zeigen, wie mit Texten [3-6] und Bildern [7] Forschung und Forscher\*innen in Szene gesetzt werden können. Diesen Ansatz greifen wir im Beitrag mit einer Hommage an die Seltenerdelemente (SEE) auf.

## 1. Primo Levis Cer

In seinem autobiografischen Roman *Das periodische System* [8] schreibt Primo Levi, das Cer habe ihm, dem Zwangsarbeiter in Auschwitz, geholfen, den Holocaust zu überleben. Denn eines Tages entdeckte er „(...) eine geheimnisvolle Dose. Sie enthielt etwa zwanzig kleine Zylinder, die hart, blassgrau und geschmacklos waren (...)“ ([8], S. 146). Diese schmuggelte er in die Schlafbaracke, wo sein Freund Alberto die Zylinder anritzte: „(...) man hörte ein leichtes Knistern, und eine gelbe Funkengarbe sprühte auf. Nun war die Diagnose leicht: es handelte sich um Cereisen, eine Legierung, aus der gewöhnlich Feuersteine bestehen“ ([8], S. 147). Nachts portionierten Alberto und er die Zylinder, um sie gegen Brot eintauschen zu können, welches sie bis zur Ankunft der Russen am Leben erhielt.

## 2. Anekdote zum Auermetall

Zur elektrolytischen Darstellung des Cers nutzte Carl Auer von Welsbach dünne Eisenelektroden. Beim Reinigen des Materials mit einer Feile verschmierte das weiche Cer die Zähne des Zerspanungswerkzeugs, worauf helle Funken folgten ([9], S. 52f.). Eisen und Cer hatten eine intermetallische Verbindung gebildet. Für Auer von Welsbach war deren Nutzen sprichwörtlich augenscheinlich. Noch heute basiert die Funktion diverser Feuerzeuge auf Reibungspyrophorität [10]. Gewöhnlich drückt eine Feder den Zündstein aus Auermetall gegen ein geriffeltes Reibrad. Aus einer weichen Cer-Matrix, in welche spröde, von einem Saum  $\text{CeFe}_2$  umgebene  $\text{Ce}_2\text{Fe}_{17}$ -Einheiten eingebettet sind ([11], S. 259f.), splintern Stücke ab, die sich selbst und daraufhin das gasige Brennstoffgemisch entzünden. Der Sachcomic (Abb. 1) überbrückt humorvoll 120 Jahre Geschichte, von der Entdeckung bis zur aktuell gängigen Anwendung.

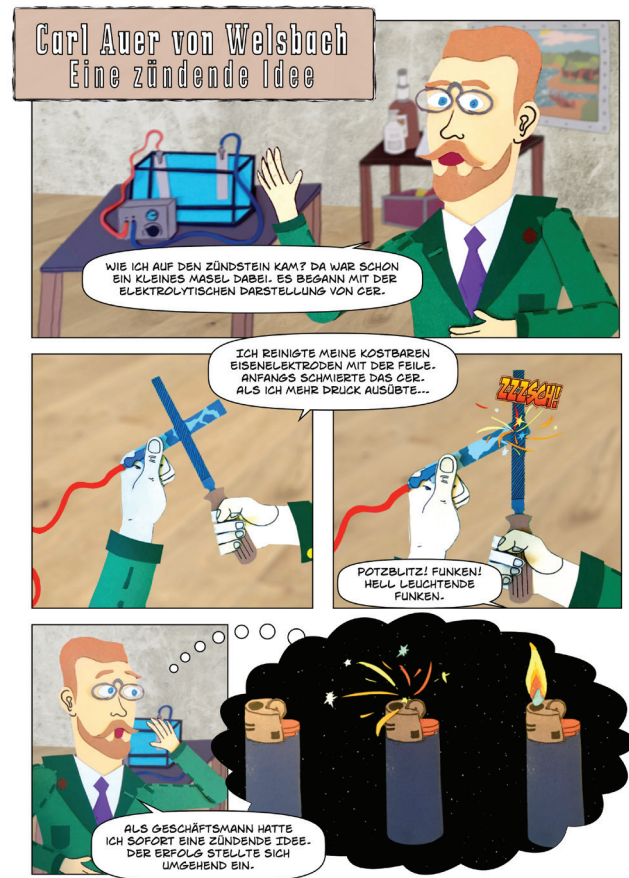


Abbildung 1. Eine zündende Idee (Sachcomic von J. Jakob).

## 3. Auerlicht

Eine weitere Anekdote ([9], S. 20) handelt davon, wie Auer von Welsbach auf den Glühstrumpf kam. In einem Moment der Unachtsamkeit habe er ein wenig SEE-Lösung verschüttet. Um die wertvolle Substanz nicht zu verlieren, sog er sie mit einem Tuch auf, um dieses in der Flamme des Gasbrenners zu veraschen. Erstaunlicherweise blieb ein Oxidgerüst in Form und Struktur des gewebten Tuchs zurück, das helles Licht ausstrahlte (Abb. 2). Der Incandescenz-Glühkörper war entdeckt. Es folgten Optimierungen mit unterschiedlichen Garnen, Strickmustern und Salzmischungen. Anfangs wurden Magnesiumoxid, Lanthanoxid und Yttriumoxid verwendet, mit dem Resultat einer mäßigen Emission, später Ceroxid und Thoriumoxid, mit deutlich besserer Leuchtkraft ([9], S. 20ff., [10], S. 105). Die so imprägnierten *Strümpfe* wurden mit Gestellen über den Flammen der mit Stadtgas betriebenen Lampen fixiert. Das künstliche Licht beförderte industrielle Produktionen im Schichtbetrieb und gestattete nächtliche Operationen in Spitälern ([10], S. 27), verlor im Zuge der Elektrifizierung aber an Bedeutung. Allein Campingbedarfsgeschäfte führen Glühstrümpfe heute noch in ihrem Sortiment.



Abbildung 2. Plus Lucis – mehr Licht (Sachcomic von J. Jakob).

#### 4. Grundformen des Storytellings

Zwei Formen des Storytellings, die auch kombiniert werden, haben wir kennengelernt: das charakter- und handlungsorientierte Erzählen. Charakterorientiertes Storytelling berichtet von Menschen, die ihre Mitmenschen damals wie heute inspirieren, wie beispielsweise von der Lichtgestalt Auer von Welsbach. Während eine Anekdote zum Schüler Carl, der am Lateinunterricht scheitert und sich angesichts seiner schlechten Leistung sorgt, ob ihm die Mutter das Chemiestudium finanzieren werde ([9], S. 12f.), noch den Charme einer Coming-of-Age-Story hat, offenbart sich am Wirken des reifen Erfinders und Firmengründers gänzlich die Bedeutung der Naturwissenschaften für die Gesellschaft. Handlungsorientiertes Storytelling rahmt das Forschen, das Herantasten an die Sache ein. Es macht Irrwege und Rückschläge gerade so greifbar wie Heureka-Momente. Die dritte Form, das themenorientierte Storytelling, erfasst das Große und Ganze – Inhalte von globaler Dimension. Die Thematisierung von Nachhaltigkeit ist hierfür ein Beispiel.

#### 5. Nachhaltige Pionierleistungen?

Auer von Welsbachs Erfindungen waren seinerzeit nicht nur ökonomisch lukrativ, sie waren auch von ökologischem Wert [9]: Der Gasverbrauch einer Schmetterlingsflamme konnte mithilfe von Glühstrümpfen um 60 bis 70 Prozent verringert werden und das ausgestrahlte Licht entsprach im Schnitt dem

von 20 Kerzen. Ein Zündstein, der tausende Zündungen gewährleistete, ersetzte entsprechend viele Streichhölzer, deren Herstellung Holz, Phosphor, Schwefel, Kaliumchlorat und weitere Substanzen erfordert hätte. In beiden Fällen wurden Schadgase reduziert. Auch wenn der Energieaufwand für die elektrolytische Darstellung von Cer nicht vernachlässigt werden darf – alles in allem waren es gelungene Materialsubstitutionen.

#### 6. Stoffgeschichten

Nachhaltigkeit kann besonders gut und prägnant mit dem Unterrichtsverfahren *Stoffgeschichten* [12-13] der Reflexion zugänglich gemacht werden. Denn es werden Lebenszyklen von Stoffen, folglich Herstellung, Anwendung, Nachfrage, Nutzung, Auswirkung, Entsorgung, Dissipation und Rückgewinnung, mit der Grundidee einer Bildung für nachhaltige Entwicklung verbunden. Dabei werden ökologische, ökonomische, politische und soziokulturelle Perspektiven zu ausgewählten Stoffen erfasst und optimale Grundlagen für fächerverbindenden Unterricht geschaffen. Flatscreens sind Produktbeispiele, an denen Stoffgeschichten über Neodym und Europium erzählt und technisch effizientere, umweltschonendere Alternativen für Anwendungen eruiert werden können [14]. Lernmaterial hierzu ist frei verfügbar: <https://www.flatscreenjourney.de>. An diesem können junge Produkt-Konsument\*innen die Wirkmächtigkeit persönlicher Entscheidungen, wie Kauf, Nutzung und Zeitpunkt des Austauschs alter Produkte sowie deren verantwortungsvolle Rückführung in Wertstoffketten, reflektieren lernen. Die Umsetzung von *Stoffgeschichten* erfolgt in den drei Phasen: *Recherchieren*, *Erstellen einer strukturierten Übersicht* und  *kreatives Verfassen der Geschichte*. Die Phasen werden an eigens erprobten Unterrichtsbeispielen veranschaulicht [15]:

**Recherchieren.** Die erste Phase dient dem Aufbau von Fachwissen zu Aspekten wie Rohstoffverfügbarkeit, Herstellung, Arbeitsbedingungen vor Ort, globale Handelsrouten, Konsum, Produkthanwendung, Entsorgung, Dissipation, Recycling etc. – und das alles in sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Zusammenhängen gedacht [12-13]. Wir haben als Stoff Cer und seine Verbindungen ausgewählt, da Grundlagen aus Chemie und Physik, die die Alltagsbezüge betreffen, für Schüler\*innen am Ende der Sekundarstufe I begreifbar sind. Hierzu zählen unter anderem Feuerzeugtechnik, Glasentfärbung (einfache Redoxreaktion) und Gewässerreinigung (Phosphatproblematik). Als Erweiterung des Unterrichtsverfahrens haben wir in dieser Phase Raum für Hands-on-Schulversuche ([16], [17], S. 324ff.) gegeben (vgl. Infokasten).

**Strukturieren.** Für die zweite Phase eignen sich Mapping-Techniken wie Mindmaps, ConceptMaps und Cluster sowie Strukturbäume (Abb. 3). Cluster aus dem Unterricht von C. Heyn [15] zeigten, dass die Schüler\*innen mit einigen Kategorien der Stoffgeschichte (z. B. Verwendung, Recycling) vertrauter waren als mit anderen Kategorien (z. B. Entsorgung, Dissipation).

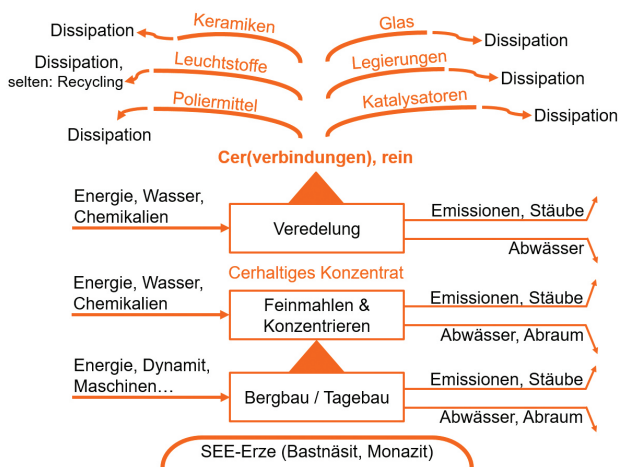


Abbildung 3. Strukturbaum zu Cer.

**Erzählen.** Im Rahmen der dritten Phase entscheiden sich die Schüler\*innen für ein Narrativ ihrer Wahl. Es dürfen Berichte, Erzählungen, Drehbücher etc. verfasst werden. Investigativer Journalismus ist ebenso erlaubt wie auch eine Science-Fiction-Geschichte. Der Unterricht von C. Heyn führte zu vielfältigen Kontextualisierungen [15]. Neben einer Produktwerbung, Firmenperspektive und Quizshow vom Typ *Die Millionenshow*, entstanden Stoffgeschichten, in denen Schüler\*innen Cer zum erzählenden und bestaunten Museumsobjekt machten.

## 7. Cer als erzählendes Ich

Schüler\*innen verfassten folgende (an dieser Stelle gekürzte, nicht redigierte) Stoffgeschichte: „Ich lebte schon immer auf diesem Planeten in Ruhe und in Frieden, bis ich 1803 erstmals von der Menschheit entdeckt wurde. Gefunden wurde ich von Martin Heinrich Klaproth und gleichzeitig von Jöns Jacob Berzelius und Wilhelm von Hisinger, die mich nach dem Zwergplaneten Ceres *Cer* benannten. Soweit so gut. Ich bekam ein bisschen Aufmerksamkeit, aber im Jahre 1825 wurde diese zu viel und etwas Schreckliches passierte. Carl Gustav Mosander führte einen schrecklichen Versuch an mir durch: Zuerst trennte er mich von meinen Freund\*innen. Diese sah ich nie wieder. Dann warf er mich in Flusssäure, was noch schlimmer war. Aus mir wurde Cerfluorid. Zum Schluss wurde ich mit Calcium zu (...) Cer reduziert. Auf einmal fühlte ich mich ganz einsam. Denn in der Natur komme ich nicht rein vor, sondern in Ceriterden mit anderen Lanthanoiden, wie im rosa Monazit oder im Bastnäsit. Die meisten von uns leben in China, aber auch in den USA, Australien, Russland und Indien. (...) Die Menschen verbauten mich in Katalysatoren, Haushaltsgeräten (z. B. selbstreinigende Backöfen), als Zündsteine im Feuerzeug und sogar als Zahnersatz. Das gefiel mir gar nicht und ich erforschte den menschlichen Körper. Dort traf ich auf die Leber und die Lunge, was die Menschen nicht so toll fanden, wie ich es fand. Es gibt jedoch auch ein Bakterium, was mich und andere Lanthanoide zur Energiegewinnung ausnutzt. (...) Obwohl ich zu den seltenen Erden gehöre, bin ich gar nicht so selten. Auf dem Weltmarkt gibt es sogar ein Überangebot von mir, wovon 85 % aus China stammen. Mein größter Feind ist

die Baogang Group aus China. Und was noch schrecklich ist: Ich werde immer günstiger. 2011 kostete 1 kg von mir noch ca. 158,94 €. Jetzt kostet 1 kg von mir nur noch ca. 6,39 €. Doch was sehr traurig ist: Wenn ich einmal verbaut bin, werde ich da nie mehr rausgeholt. Es gibt zwar Rettungsversuche durch [Bakterien], aber angeblich rentiert sich das nicht. Es gibt also kein ausgereiftes Verfahren, um mich aus dem Verbauten zu befreien.“

## 8. Cer als Museumsobjekt

Eine Gruppe verortete die (hier gekürzte, nicht redigierte) Stoffgeschichte im Museum: „Herzlich willkommen im Travel Museum. Heute stelle ich euch die Stoffgeschichte zu Cer vor. Museumsführer (M): Sie können Cer in seiner natürlichen Form in Ceriterden finden. Diese natürliche Form sehen sie nicht so häufig, denn Cer begegnet ihnen im Alltag am häufigsten in Zündsteinen für Feuerzeuge. In Reinform wird es ihnen nicht so häufig begegnen, da es die meiste Zeit als Mischmetall verwendet wird. Gast (G): Wie sieht Cer eigentlich in seiner elementaren Form aus? Die Gruppe geht zu einem Schaukasten. M: Wie sie sehen, hat Cer eine typisch metallische Charakteristik, es ist silbrig-weiß glänzend. G: Aber, wenn Cer nur in Ceriterden natürlich vorkommt, wie wird dann reines Cer gewonnen? M: Cer wird mit einem aufwendigen Verfahren von seinem Begleiter getrennt, dabei bleibt Ceroxid übrig, welches später mit Fluorwasserstoff zu Cerfluorid reagiert. Daraufhin wird es mit Calcium in Reaktion gebracht (...) und es entsteht reines Cer. Die Gruppe geht weiter. M: Eine weitere Besonderheit von Cer ist, dass es pyrophor ist, das bedeutet, dass es bei kleiner Körnung, die für eine große Oberfläche sorgt, leicht entflammbar ist und sich sogar selbst entzünden kann (...).“

## 9. Wann ist eine Stoffgeschichte perfekt?

Stoffgeschichten können nicht allumfassend sein. Zum einen sind Forschung und Technologieoptimierung zu den jeweiligen Stoffen auch nicht final. Zum anderen greifen Schüler\*innen vorwiegend die Schwerpunkte auf, bei deren Darstellung sie sich kompetent fühlen, Inhalte fachlich korrekt, strukturiert und eingebettet in persönlich sinnstiftende Kontexte zu präsentieren. Exemplarizität ist daher der Schlüssel zu einem zufriedenstellenden Gesamtergebnis. Die Kreativität, die dabei entsteht, beflügelt nicht nur den Unterricht in den Naturwissenschaften, sie kann auch Zugänge zu *Nature of Science* schaffen [18].

## 10. Visuelles Storytelling mit Sachcomics

Ein weiteres Format, in dem Storytelling bestens funktioniert, ist der Sachcomic. Ein lesenswerter Sachcomic zu Neodym in Flatscreens [14] ist online abrufbar: <https://comic.flatscreenjourney.de>. Die beiden Sachcomics zu Auer von Welsbach (Abb. 1-2) wurden eigens mit der Paper-Cut-Out-Technik gestaltet, zu der ein ebenfalls online verfügbares Manual vorliegt [7]. Unterrichten mit Comics bietet ferner Anlässe für



Fakten-Check-Recherchen. (Bei Jugendlichen ist heuer die mit Chemie und Physik angereicherte Manga und Animeserie *Doctor Stone*, jap. Dokutā Sutōn, von Inagaki & Boichi, beliebt.) Diese wiederum sensibilisieren Schüler\*innen dafür, dass Social Media, Fernsehsendungen und Printmedien Informationen unterschiedlichster Provenienz bereitstellen: Fakten, Fiktionen und – leider auch – *alternative Fakten* (Österreichs Unwort des Jahres 2017). Gelungenes Storytelling verknüpft Inhalte und Werte.

## Danksagung

Herzlichen Dank an Cindy Heyn für die Umsetzung der Cer-Stoffgeschichten im Unterricht und an Jonas Jakob für die Gestaltung der Sachcomics.

Markus Prechtl *Technische Universität Darmstadt*  
Yannick L. Legscha *Technische Universität Darmstadt*

### Info-Kasten: Hands-on-Schulversuche mit Auermetall-Zündsteinen

Sicherheitshinweis: Bei allen Schulversuchen ist eine Schutzbrille zu tragen. Das Auflösen von Zündsteinen in verdünnter Säure sollte im Laborabzug/Digestor durchgeführt werden.

#### V1. Auermetall-Zündstein reiben

Material: Zündstein und Zündsteinreibe (Abb. 4), feuerfeste Unterlage.

Durchführung: Spannen Sie einen Zündstein in die Reibe ein und betätigen Sie diese. Achten Sie darauf, dass die Funken weder Haut noch Bekleidung treffen können.

Beobachtung: Es entstehen helle, weiß-gelbe Funken (Abb. 5).

Erklärung: Vom Zündstein splintern Cereisenpartikel ab und entzünden sich selbst.



Abbildung 4. Auermetall (Stiftform) mit Reibe



Abbildung 5. Reibzündung.

#### V2. Vom Zündstein zur Cerionenlösung

Material: Zündsteine, Weithalskolben (klein), Reagenzglas, Trichter, Filterpapier, Salpetersäure ( $w=10\%$ ; Gefahr! – ätzend; H: 290-314, P: 280-310-303+361+353-305+351+338), verdünnte Natriumhydroxidlösung für pH-Einstellung (Gefahr! – ätzend; H: 290-314, P: 280-308+310-303+361+353-305+351+338), pH-Indikatorpapier, Pipetten.

Durchführung: Geben Sie 2-3 Zündsteine in den Kolben und überdecken Sie diese mit verdünnter Salpetersäure. Warten Sie ab, bis sich die Zündsteine unter Gasentwicklung zersetzt haben. Filtrieren Sie die Lösung in ein Reagenzglas und verwerfen Sie das Filterpapier mit den Überresten des Schutzlacks. Pipettieren Sie in die saure Lösung tropfenweise alkalische Lösung, bis Sie einen pH-Wert von 2 erreicht haben.

Erklärung: Cer (Cermischmetall) reagiert mit Säure unter Bildung von Cerionen (und Eisenionen) und Wasserstoffgas:  $2 \text{Ce}_{(s)} + 6 \text{HNO}_{3(aq)} \rightarrow 2 \text{Ce}^{3+}_{(aq)} + 6 \text{NO}_{3(aq)} + 3 \text{H}_{2(g)}$

#### V3. Fällungsreaktion

Material: Lösung aus V2, Cer(III)-nitratlösung als Referenz ( $w = 1\%$ ; Achtung! – reizend, umweltgefährdend; für Feststoff gilt H: 272-318-410, P: 210-273-280-305+351+338+310-370+378-501), Kaliumoxalatlösung ( $w = 1\%$ ; Achtung! – gesundheitsschädlich; für den Feststoff gilt H: 302+312, P: 280-301+312+330), 2 Reagenzgläser, Pipetten.

Durchführung: Befüllen Sie die Reagenzgläser, eines mit Cer(III)-nitratlösung, eines mit der Lösung aus V2, jeweils fingerbreit. Beide Lösungen sollten auf pH 2 eingestellt sein. Fügen Sie zu beiden Lösungen tropfenweise Kaliumoxalatlösung hinzu.

Beobachtung: Es entsteht jeweils ein milchig-weißer, schlieriger Niederschlag.

Erklärung: Cer(III)-Ionen bilden mit Oxalationen schwerlösliches Cer(III)-oxalat:

$2 \text{Ce}^{3+}_{(aq)} + 3 \text{C}_2\text{O}_4^{2-}_{(aq)} \rightarrow \text{Ce}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3(s)$ . In Salpetersäure löst sich dieser Niederschlag auf.

## Literatur

- [1] Kellermann, R., Das Storytelling Handbuch. 2018: Midas.
- [2] Parchmann, I. & J. Kuhn, Lernen im Kontext. In: Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung, D. Krüger et al., Hrsg. 2018, Springer. S. 193-205.
- [3] Heering, P., Geschichten erzählen im naturwissenschaftlichen Unterricht. MNU-Journal, 2016. 69(3): S. 171-176.
- [4] Klassen, S. & C. Froese Klassen, Science Teaching with Historically based Stories: Theoretical and Practical Perspectives. In: International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching, M.R. Matthews, Hrsg. 2014, Springer. S. 1503-1529.
- [5] Kokkotas, P.V. & S. Kokkotas, Storytelling in Science Education – Experiences and Perspectives. 2014: CreateSpace.
- [6] Kubli, F., Mit Geschichten und Erzählungen motivieren: Beispiele für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. 2005: Aulis/Deubner.
- [7] Prechtel, M., Sachcomicgestaltung mit der Paper-Cut-Out-Technik im Lehramt der Naturwissenschaften. In: Lehrkräftebildung neu gedacht, M. Kubsch et al., Hrsg. 2021, Waxmann. S. 145-149. Supplement: <https://doi.org/10.31244/9783830993490>
- [8] Levi, P., Das periodische System. (Nachdruck) 2004: Süddeutsche Zeitung/Bibliothek.
- [9] Adunka, R., Carl Auer von Welsbach: Entdecker – Erfinder – Firmengründer. 2013: Kärntner Landesarchiv.
- [10] Brandes, G. & R. Jarschel, Feuer und Flamme. Interessantes vom Feuerzeug. 1988: Fachbuch Verlag Leipzig VEB.
- [11] Reinhardt, K. & C. Herget, Cermischmetall und Cereisen. In: Ullmans Enzyklopädie der technischen Chemie, Bd. 9, 1975, Verlag Chemie. S. 254-261.
- [12] Schmidt, C. & A. Reller, Bewerten lernen durch Stoffgeschichten und Kritikalitätsanalysen. Unterricht Chemie, 2012. 23(127): S. 44-47.
- [13] Menner, M., N. Anderle & V. Zepf et al., Handbuch Flatscreen & Co. Umweltkritische Materialien. Zwei Bände. 2020. Online abrufbar unter [www.flatscreenjourney.de](http://www.flatscreenjourney.de)
- [14] Hamann, A. & M. Žalalytė, High Five. Eine Reise ins Innere des Smartphones. Neodym. 2019. [https://www.flatscreenjourney.de/res/pdf/Comic\\_Neodym.pdf](https://www.flatscreenjourney.de/res/pdf/Comic_Neodym.pdf)
- [15] Heyn, C.M., Schülerinnen und Schüler auf den Spuren der Seltenerdelemente – fachdidaktische Implementierung des Unterrichtsverfahrens „Stoffgeschichten und Kritikalität“ in den Chemieunterricht der gymnasialen Oberstufe. Staatsexamensarbeit. 2019.
- [16] Prechtel, M., Cer sorgt für den zündenden Funken im Feuerzeug. Schulversuche mit einem Seltenerdelement. Unterricht Chemie, 2017. 28(161): S. 32-38.
- [17] Kickuth, R. & R. Stephani, Viktor Obendraufs schöne Experimente, Bd. 1. 2015: Rubikon.
- [18] Bliersbach, M. & C.S. Reiners, Kreativität und Chemie? Chemie in unserer Zeit, 2017. 51(5): S. 324-331.

# Ein Momentum aus der Geschichte der künstlichen Beleuchtung

## Herstellung eines historischen Gasglühlichts

Katharina-Maria Kuse

### 1. Einleitung

Auch heute noch sieht man im Stadtbild in Wien oder Berlin die alten, formschönen Gaslaternen, die mit einem brennbaren Gas (Stadtgas) als Energiequelle betrieben werden (Abb. 1). Das Stadtgas selbst verbrennt nur mit schwach leuchtender Flamme. Leitet man das Gas bei der Verbrennung über ein Gazegewebe, so erhält man ein warmes, helles Licht, das für eine Straßenbeleuchtung ausreicht.



Abbildung 1. Berliner Aufsatzleuchte (1920er Jahre).

Auf die Beherrschung des Feuers folgten Erfindungen wie Öllampe, Kerze und Kohlefadenlampe. Künstliches Licht wurde mit glühendem Kohlenstoff als Lichtquelle geschaffen. Ein Meilenstein auf dem Weg zu modernen elektrischen Leuchtstoffen ist das Gasglühlicht, dessen Leuchtkraft von heißen Metalloxiden ausgeht. Erfunden wurde das Gasglühlicht („Auerlicht“) im Jahre 1885 von Carl Auer von Welsbach, einem österreichischen Chemiker und Unternehmer, der auch als Entdecker der Seltenerdelemente (SEE) Neodym, Praseodym, Ytterbium und Lutetium sowie dem Zündstein aus Cereisen gilt [1-2]. Er erkannte 1885, dass die Oxide der SEE in der Lage sind, helles Licht zu emittieren und meldete im Jahr 1891 den Auer-Glühstrumpf (engl. *gas mantle*) zum Patent an. Dieser bestand zu 98-99 Prozent aus radioaktivem Thoriumoxid ( $\text{Th}_2\text{O}_3$ ), das zur Gruppe der Aktinoide gehört, und 1-2 Prozent Ceroxid ( $\text{CeO}_2$ ), einem SEE. Thoriumoxid ist radioaktiv und emittiert beim Zerfall ein radioaktives Gas ( $^{220}\text{Rn}$ ). Daher wird es heute nicht mehr verwendet. Thoriumoxid konnte unter Einbuße von 20 Prozent der Lichtausbeute durch die nicht-radioaktive SEE-Verbindung Yttriumoxid ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) ersetzt werden [3]. In Anwesenheit von Ceroxid ( $\text{Ce}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ ) kann eine maximale Lichtstärke erreicht werden. Der Glühkörper wurde durch die ab 1902 industriell gefertigte, elektrisch betriebene, Metallfadenlampe aus Osmium und Wolfram (Auer-Oslicht, Patent 1898) abgelöst.

### 2. Schüler\*innen auf Auer von Welsbachs Spuren

Der hier vorgestellte Versuch eignet sich für einen naturwissenschaftlichen Workshop, der z. B. im Kontext „Entwicklung der künstlichen Beleuchtung“ steht. Einen Bezug zur Nachhaltigkeit kann über „Rohstoffe“ und „Energieeffizienz verschiedener Leuchtmittel“ hergestellt werden. Mit Fokus auf das Fach Chemie finden sich Verbindungen zu „Metallionen“, „Metalle und ihre Oxide“ oder auch die Reaktion von Metallnitraten zu den entsprechenden Oxiden durch Hitze. Entsprechend der historischen Vorgehensweise, stellen Schüler\*innen einen Gasglühstrumpf her, der im Anschluss zu einem Gasglühlicht montiert wird. Mittels Flüssigkeiten mit gelösten SEE-Ionen wird ein Baumwollgewebe imprägniert. Nach Veraschung des Textils in der nichtleuchtenden Brennerflamme entsteht ein fragiles Metalloxidgerüst, das durch Hitze auf helle Weißglut gebracht wird. Ein üblicher Glühstrumpf (Abb. 2) hat eine Leistung von 70 bis 120 W und eine Lichtausbeute von 5 lm/W. Zum Vergleich: Die Lichtausbeute heutiger LEDs bei 75 W beträgt circa 1000 lm/W [4].



Abbildung 2: Glühstrumpf kommerziell.

### 3. Herstellung eines feinmaschigen Strumpfes

Diese Materialien werden benötigt: Verbandsmull (100 % Baumwolle), Bleistift, Schere, Nähnadel, Baumwollgarn, Schablone. Die Schüler\*innen fertigen aus Verbandsmull (Abb. 3-4) ein feinmaschiges halb-kugeliges Gewebe und nehmen ein Schnittmuster zur Vorlage (Abb. 5).



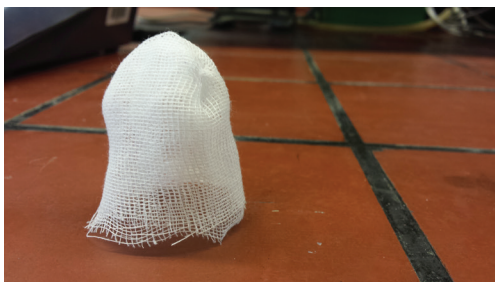


Abbildung 3. Verbandsmull.

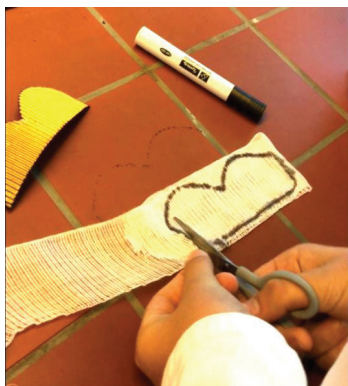


Abbildung 4. Zuschneiden des Verbandsmulls.

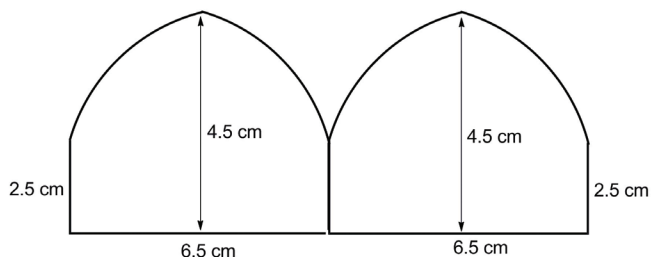


Abbildung 5. Schnittmuster.

#### 4. Herstellen der Imprägnierlösung

Materialien: Spatel, Präzisionswaage ( $\pm 0.001$  g), Wägeschälchen, kleiner Pulvertrichter, Messzylinder (50 mL), Becherglas 50 mL, Pipette/Peleusball, drei Siedesteinchen, Dreifuß, Drahtnetz, Gasbrenner, Feuerzeug, Pinzette, großes Reagenzglas, Föhn. Chemikalien mit H- und P-Sätzen: Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ;  $M = 225.81$  g/mol), Cernitrat ( $Ce(NO_3)_3 \cdot 6 H_2O$ ;  $M = 434.23$  g/mol; H: 272-318-410, P: 210-273-280-305+351+338+310-370+378-501), Salpetersäure ( $HNO_3$ ;  $w = 30\%$ ig;  $M = 63.01$  g/mol; H: 272-290-314-331, P: 280-303+361+353-304+340-305+351+338-310).

#### 5. Das Mischungskreuz: Verdünnen der 30%igen Salpetersäure auf 20 Prozent

Konzentrierte und verdünnte Säuren oder Laugen werden oft in Massenprozenten angegeben. Konzentrierte Lösungen lassen sich unter Zuhilfenahme des Mischungskreuzes (Andreakreuz) verdünnen. In diesem Fall soll aus einer 30%igen Salpetersäure durch Zugabe von Wasser eine 20%ige Salpetersäure hergestellt werden. Man bilde die Differenz

aus der bekannten Konzentration links oben (30 %) und der gewünschten Zielkonzentration in der Mitte (20 %) (Abb. 6).

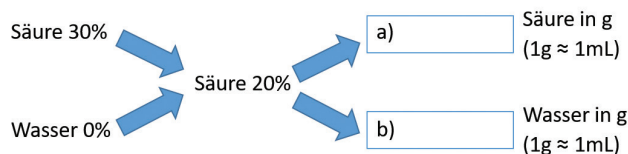


Abbildung 6. Mischungskreuz zum Verdünnen einer Säure.

Das Ergebnis wird in das Feld b) eingetragen. Dann bildet man die Differenz aus der bekannten Konzentration links unten (0 %) und der gewünschten Zielkonzentration in der Mitte (20 %). Dieses Ergebnis fügt man in Feld a) ein. Zur Berechnung der gewünschten Molarität der Salpetersäure ist die Dichteformel  $\rho = m/V$  zu verwenden; bei 20 °C gilt  $\rho(HNO_3) 30\% = 1.180$  g/cm<sup>3</sup>;  $\rho(HNO_3) 20\% = 1.115$  g/cm<sup>3</sup>.

#### 6. Lösen der SEE-Verbindungen in Salpetersäure

2.71 g Yttriumoxid ( $Y_2O_3$ ) und 0.072 g Cernitrat ( $Ce(NO_3)_3 \cdot 6 H_2O$ ) werden auf einer Analysenwaage abgewogen, in ein Becherglas gegeben und zum Lösen mit 25 mL der 20%igen (3.54 M) Salpetersäure versetzt. Dreifuß, Drahtnetz und Gasbrenner werden aufgestellt und das Becherglas darauf abgestellt, nachdem diesem drei Siedesteinchen hinzugefügt wurden. Der Gasbrenner wird entzündet und auf die leuchtende Flamme eingestellt. Nach kurzer Zeit sollten sich die SEE-Salze gelöst haben. Yttriumoxid löst sich in Salpetersäure, Cernitrat bleibt unverändert (Abb. 7). Die Imprägnierlösung für den Baumwollstrumpf lässt man abkühlen.

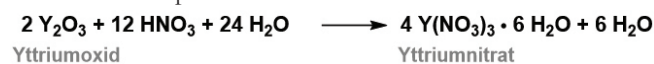


Abbildung 7. Reaktionsschema.

#### 7. Imprägnieren des Textils mit der Lösung der Seltenerdelementen

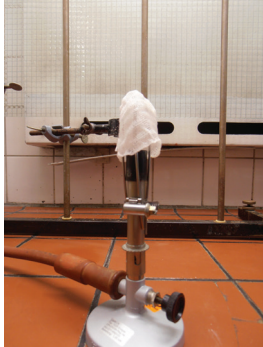
Der hergestellte Strumpf wird in die Imprägnierlösung eingetaucht, so dass er gut getränkt wird. Nach dem Abtropfen wird er über den Boden eines großen Reagenzglases gestülpt und getrocknet (Abb. 8). Das Trocknen wird mit einem Föhn (warm, nicht heiß!) beschleunigt.



Abbildung 8. Montage des Textilstrumpfs und Trocknung.

## 8. Herstellen des Gasglühlichts

Der trockene, noch klebrige Strumpf wird vorsichtig mit der Pinzette von der Halterung heruntergenommen und über den, mit zwei zu einer Kuppel gebogenen Drähte, präparierten Gasbrenner gestülpt (Abb. 9). Die Drähte sind mit einer Schlauchschelle am Brennerschaft fixiert.

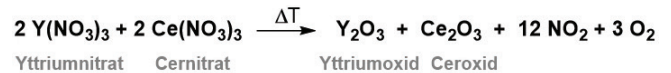


**Abbildung 9.** Imprägniertes Textil auf Gasbrenner.

Das noch flexible, imprägnierte Textil wird unter Gaszufuhr am Brenner angezündet. Dabei verbrennt/verascht das Baumwollgewebe, das als Matrizie/Template diente, für circa fünf Minuten in der leuchtenden Gasbrennerflamme zu Kohlenstoffdioxid und Asche (Abb. 10). Das nitratgetränkte Textil brennt gut, ähnlich einer Zündschnur (Abb. 18).



**Abbildung 10.** weißglühendes SEE-Oxid-Gerüst.



**Abbildung 11.** Thermische Zersetzung der SEE-nitrate zu den entsprechenden Oxiden.

Im Folgenden verglüht das Textil in der nichtleuchtenden (heißen) Brennerflamme unter Bildung eines festen, aber fragilen, keramischen Oxidgerüsts (Abb. 11). Die poröse Keramik ( $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Ce}_2\text{O}_3$ ) kann als Glühkörper verwendet werden. Berührt man sie, zerfällt sie zu weißem Staub.

Katharina-Maria Kuse Freie Universität Berlin

## Literatur

- [1] Welsbach, C.A., Ger. Patent 39, 162, 1885.
- [2] Böhm, C.R., Das Gasglühlicht. Seine Geschichte, Herstellung und Anwendung: Ein Handbuch für die Beleuchtungsindustrie. 2018: Classic Reprint.
- [3] US Patent 6. August 1985, The Coleman Company Inc., US4533317 A.
- [4] [www.beleuchtungdirekt.de](http://www.beleuchtungdirekt.de)

## Zusatzmaterial

online unter: <https://refubium.fu-berlin.de/handle/fub188/32855>

# Vom Glühstrumpf zum modernen Leuchtstoff

## Nachhaltige Beleuchtung mit Seltenerdelementen

Dominik Diekemper, Lena Daumann & Stefan Schwarzer

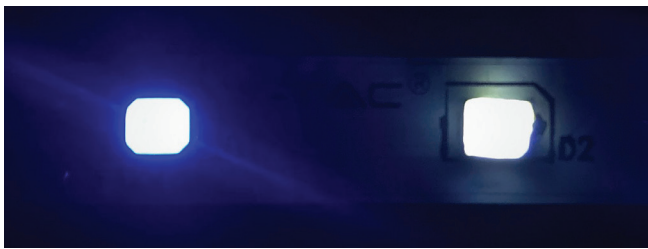
### 1. Es werde Licht! Von Carl Auer von Welsbach bis zu energiesparender LED Beleuchtung

„Plus Lucis Carl Freiherr Auer von Welsbach. Aus seltenen Erden und Metallen schuf sein forschender Geist das Gasglühlicht, die elektrische Osmiumlampe, das funkensprühende Cereisen“ [1]. Diese Inschrift findet sich auf dem Denkmal des österreichischen Chemikers und Erfinders Carl Freiherr Auer von Welsbach (1858-1929), der viele der ersten Anwendungen von Seltenerdelementen (SEE) in unseren Alltag brachte. Wie bereits zwei Artikel dieses Themenheftes verraten, war ein wichtiges Forschungsgebiet von Auer von Welsbach die Beleuchtung mit Gas und elektrischem Strom. Mit der Patentanmeldung seines Aktinophors 1885 war ein Meilenstein der Beleuchtungsentwicklung geleistet. Jedoch erwies sich die Erfindung nach einiger Zeit als Flop. Zu „kalt“ war das Licht und zu zerbrechlich die Konstruktion. Ein abgewandeltes Modell mit 99 % des radioaktiven Thoriums und 1 % Cer, erwies sich schnell als Kassenschlager. Mit dem technischen Fortschritt setzte sich die elektrische Beleuchtung immer mehr durch und der gewiefte Erfinder brachte erneut gekonnt seinen Erfindergeist ein. Er entwickelte die Metallfadenlampe, eine Weiterentwicklung von Thomas Edisons Kohlefadenlampe. Zunächst nutzte er Osmium, das später durch das günstigere Wolfram ersetzt wurde. Das Warenzeichen dürfte jedem ein Begriff sein: Osram (**O**smium+**W**olfram). Mit dem Siegeszug der energiesparenden LED-Beleuchtung rückte auch diese Erfindung langsam in den Hintergrund. Sicher würde es aber Auer freuen, zu wissen, dass gerade in Leuchtstoffröhren und LED-Beleuchtungen immer noch auf SEE gesetzt wird, denn sie verhelfen dem sonst kalten, bläulichen Licht zu einer warmen Note. Die Forderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel, einer gemäßigten Nutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und einer signifikanten Steigerung der Energieeffizienz machen das Feld der Beleuchtung zu einem geeigneten Schauplatz, einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Denn etwa 20 Prozent der weltweit erzeugten elektrischen Energie werden aktuell für Beleuchtungszwecke verwendet [2]. Die chemische Forschung ist bisweilen daran interessiert, den Lichtstrom (in Lumen [lm]) von leuchtstoffkonvertierenden LEDs zu optimieren. Jede Lichtquelle emittiert eine bestimmte Menge Licht, die das menschliche Auge wahrnehmen kann. Durch die Entwicklung hocheffizienter Leuchtstoffe, lässt sich somit die LED-Beleuchtung optimieren [3].

### 2. Weißes Licht aus LED – Zusammenarbeit von Physik und Chemie

Knapp 100 Jahre nach Auers Patentanmeldung erschienen die ersten Veröffentlichungen Akasakis Forschungsgruppe, die sich mit Galliumnitrid als III-V-Halbleitermaterial für blau leuchtende LEDs beschäftigten [4]. Die Forschung an blauen LEDs galt lange als das fehlende Mosaikstück zur Realisierung einer weißen LED-Beleuchtung. Das größte Problem: die notwendige Herstellung von extrem dünnen, kristallinen und defektfreien Schichten der Halbleitermaterialien. Akasaki und seine Mitarbeiter\*innen überwandene dieses Problem durch metallorganische Gasphasenepitaxie. Bei niedriger Temperatur wird Aluminiumnitrid auf Saphir als Keimbildungsschicht aufgetragen. Durch Temperaturerhöhung und Kristallkeimsumwandlung wird das epitaktische Wachstum einer weiteren GaN-Schicht ermöglicht. Den notwendigen p-n-Heteroübergang kann man durch das Auftragen weiterer Schichten ermöglichen [4-5]. Diese Entwicklungsleistung wurde 2014 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet und bildet – faktisch wie auch im Aufbau einer weißen LED – die Grundlage für weißes Licht durch LED. An dieser Stelle kommt die anorganisch-chemische Forschung ins Spiel. Um aus dem blauen Licht der energieeffizienten, Primär-LED nun weißes, alltagstaugliches Licht zu erzeugen, werden farbkonvertierende Leuchtstoffe benötigt, die sich durch ausgezeichnete Farbwiedergabe, optische Transparenz der Wirtsgitter und chemische wie physikalische Stabilität auszeichnen sollen. Dabei sind Leuchtstoffe im Allgemeinen Pigmente, die nach einer Anregung durch Strahlung elektromagnetische Strahlung im nichtthermischen Gleichgewicht aussenden können [6]. Hier sind SEE von Bedeutung. Für Leuchtstoffe werden häufig Wirtsgitter mit SEE-Ionen (v.a.  $\text{Ce}^{3+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$ ,  $\text{Lu}^{3+}$ ) dotiert. In der Summenformel wird die Dotierung durch einen Doppelpunkt symbolisiert. In dem im Folgenden vorgestellten Experiment wird Yttrium-Aluminium-Granat dotiert mit Cer ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ ) synthetisiert, kurz YAG:Ce. Die Dotierung führt zu Substitutionsdefekten im Gitter und zur entscheidenden Fähigkeit, durch photochemische Anregung Licht zu emittieren [7]. Diese Eigenschaft macht man sich in weißen LEDs zu Nutze. Das blaue Licht der LED wird durch den darüber verbauten Leuchtstoff in Licht längerer Wellenlänge konvertiert (gelb). Durch additive Farbmischung mit Resten des blauen Lichts der LED entsteht ein weißer Farbeindruck (Abb. 1). Im folgenden Absatz wird ein Experiment für eine schulgeeignete Leuchtstoffsynthese vorgestellt.





**Abbildung 1.** Blaue LED (links) mit selbstsynthetisiertem Leuchtstoff YAG:Ce (rechts).

### 3. Das Experiment: Leuchtstoffsynthese in der Mikrowelle

Um einen experimentellen Zugang zu Leuchtstoffen im Chemieunterricht zu ermöglichen, kann YAG:Ce in einer Haushaltsmikrowelle hergestellt werden [8-9]. Das lumineszente Material findet sich (häufig gemischt mit anderen Leuchtstoffen) in vielen käuflichen LED-Lampen.

**Sicherheitshinweise:** Zur Durchführung sollte persönliche Schutzausrüstung (Kittel, Schutzbrille) getragen werden. Während der Synthesereaktion in der Mikrowelle entstehen die Gase Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser. Aus diesem Grund wird die Mikrowelle zwingend in einem Abzug betrieben. Sinnvoll ist die Verwendung eines Steckdosenschalters außerhalb des Abzuges, um die Mikrowelle auch bei verschlossenem Frontschieber des Abzugs abschalten zu können. Die Synthese erfolgt bei hohen Temperaturen. Zusätzlich zur Verwendung einer Tiegelzange können Hitzehandschuhe verwendet werden.

### 4. Vorbereitungen der Chemikalien

**Chemikalien und Geräte:** Aluminiumnitrat-Nonahydrat (Achtung), Cer(III)-nitrat-Hexahydrat (Gefahr), Yttrium(III)-nitrat-Hexahydrat (Gefahr), Harnstoff, Mikrowelle (min. 500 W Leistung), 25-mL-Becherglas, Kristallisierschale, Porzellantiegel, Tiegelzange, Magnetrührer mit Thermometer, Rührfisch, 1 cm dicke Scheibe Gasbetonstein (oder Ähnliches als Unterlage in der Mikrowelle), Thermopapier (z. B. Thermofaxpapier oder Kassenzettelpapier), UV-Taschenlampe, LED-Band (blau,  $\lambda = 420\text{-}480\text{ nm}$ ), Mörser, Klebstoff (z. B. UHU-Alleskleber), Sand.

**Herstellung des Reaktionsgemisches:** Für die Synthese in der Mikrowelle wird im 25-mL-Becherglas eine Lösung aus 0,81 g Yttrium(III)-nitrat-Hexahydrat, 3,46 g Aluminiumnitrat-Nonahydrat und 0,02 g Cer(III)-nitrat-Hexahydrat in 1 mL Wasser hergestellt. Sind die Salze in Lösung gegangen, werden 2,20 g Harnstoff zur Lösung gegeben. Mit einem Magnetrührer wird die Lösung bei 60 °C so lange gerührt, bis eine klare, leicht viskose Lösung entstanden ist (Abb. 2). Dieser Prozess benötigt etwa zehn Minuten. Um die Porzellantiegel für die nachfolgende Reaktion vorzuwärmen, können diese mit auf die Heizplatte gestellt werden.



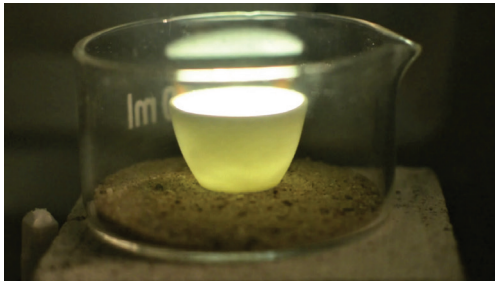
**Abbildung 2.** Viskose, klare Lösung aus SEE-nitrat, Harnstoff und Wasser.

### 5. Vorbereitung der (Haushalts-) Mikrowelle

Während des Rührens der Reaktionslösung kann die Vorbereitung der Mikrowelle starten. Für ein sicheres Arbeiten wird die Mikrowelle in einem Laborabzug betrieben. Für die Festkörpersynthese des Leuchtstoffes YAG:Ce werden hohe Temperaturen benötigt. Im Innenraum der Mikrowelle interferieren an bestimmten Punkten die Wellen ( $\lambda \approx 12\text{ cm}$ ). An diesen Punkten ist die Intensität der Mikrowellen besonders hoch, weshalb diese Punkte auch als Hotspots bezeichnet werden. Eben jene Stellen müssen vorab gefunden werden [10]. Zum Auffinden der Hotspots auf dem Mikrowellenboden werden Drehteller und Gestell entfernt. Die Schüler\*innen erhalten eine passende Styroporplatte als Unterlage, Zellstofftücher und eine wassergefüllte Spritzflasche. Das Zellstoffpapier wird befeuchtet und auf der Styroporunterlage ausgebreitet. Darüber wird eine Schicht des Thermopapiers gelegt. Dieser Aufbau wird in die Mikrowelle gegeben und diese für fünf bis zehn Sekunden betätigt, bis das Thermopapier deutliche, schwarze Flecken zeigt. An Punkten mit Schwarzfärbung befinden sich die Hotspots [11]. An einem dieser Punkte wird die Gasbetonunterlage positioniert und die mit wenig Sand gefüllte Kristallisierschale daraufgestellt.

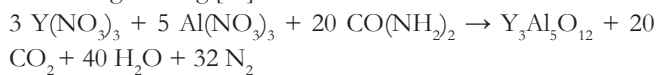
### 6. Durchführung der Mikrowellensynthese

Für die Synthese werden 0,75 mL der vorbereiteten Lösung mit der Pipette in den vorgewärmten Porzellantiegel gefüllt. Mit der Tiegelzange wird der Tiegel anschließend mittig in die sandgefüllte Kristallisierschale gestellt. Die Tür der Mikrowelle und die Scheibe des Abzugs werden geschlossen. Zum Einschalten der Mikrowelle ist ein Netzschalter außerhalb des Abzugs ratsam, um die Mikrowelle bei geschlossenem Abzug ein- und ausschalten zu können. Kurz nach dem Einschalten der Mikrowelle beginnt die Lösung im Porzellantiegel unter Dampfentwicklung zu kochen. Dabei entstehen Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser. Der Tiegel erreicht zügig sehr hohe Temperaturen. Sobald der Tiegel gelb-grün aufleuchtet (Abb. 3), ist die Reaktion beendet.



**Abbildung 3.** Synthese von YAG:Ce, gelblich-grünes Aufleuchten des Tiegels in der Mikrowelle.

Die Synthese des Wirtsgitters (YAG) verläuft nach folgender Reaktionsgleichung [12]:



Erlischt das Leuchten, ist die Synthese beendet und die Mikrowellentür kann geöffnet werden. Der Dampf wird durch den Laborabzug abgesaugt. Der sehr heiße Tiegel (Achtung! Nicht berühren!) kann mit der Tiegelzange (!) entnommen werden. Zur Sicherheit können zudem Hitzehandschuhe getragen werden. Im Tiegel kann ein poröser, gelber Feststoff beobachtet werden.

## 7. Untersuchung des Reaktionsproduktes und Beschichtung einer blauen LED

Dervorliegende Feststoff ist Yttrium-Aluminium-Granat dotiert mit Cer. Die Schüler\*innen können den entstandenen Feststoff mit einer UV-(Taschen-)lampe oder blauen LED identifizieren. Es zeigt sich eine markante, gelbliche Lumineszenz. Um die Leuchtstoffeigenschaften des selbst hergestellten Feststoffes zeigen zu können, kann der entstandene Feststoff aus dem Tiegel geschabt und zu einem feinen Pulver gemörsert werden. Vermengt man das Pulver nun mit handelsüblichem Klebstoff (z. B. UHU-Alleskleber) bildet sich eine streichfähige Masse, die auf eine blaue LED aufgetragen werden kann. Es eignen sich alle LEDs ohne Streukörper, wobei eine kostengünstige Varianten LED-Bänder (z. B. von V-Tech) sein können, die zu Abschnitten von je drei LED mit einer 9-V-Batterie betrieben werden. Mit einem Spatel wird auf die blau leuchtende LED das Klebstoff-Leuchtstoff-Gemenge aufgetragen. Die farbkonvertierenden Eigenschaften sind direkt beobachtbar. Das zuvor blaue Licht erscheint weiß.

## 8. Ausgeleuchtet: Aus dem Alltag in den Müll? Herausforderung Recycling!

Neben der immensen Energieeinsparung ist ein weiterer Vorteil der LEDs die vergleichsweise hohe Lebensdauer von etwa 20.000 Betriebsstunden. Im Vergleich zur altgedienten Glühlampe fallen moderne LEDs nicht schlagartig aus. Vielmehr verringert sich im Laufe ihres Lebens die Helligkeit. Trotzdem sind die meisten Lampen nicht derart lang in Betrieb. Der limitierende Faktor ist häufig nicht die Diode selbst, sondern vielmehr die Elektronik die durch Umgebungsfaktoren und Ein- und Ausschaltvorgänge in Mitleidenschaft gezogen

werden kann [2]. An dieser Stelle stellt sich bei dem Ziel einer nachhaltigen Entwicklung – zu der energiesparenden Beleuchtung durch LEDs ohne Zweifel einen Beitrag leisten – die Frage nach dem Recycling ausgedienter LEDs und den darin enthaltenen kritischen Rohstoffen wie SEE. Aktuell werden weniger als ein Prozent der verwendeten SEE recycelt [13]. Der Abbau der SEE-haltigen Verbindungen führt zu massiven Eingriffen in die Natur. Da die SEE zusammen mit den beiden Actinoiden Uran und Thorium vergesellschaftet vorkommen, entstehen zudem tonnenweise konzentrierter radioaktiver Abfall bei der Aufbereitung. Dies geschieht in den derzeitigen Förderländern oft ohne klare Kontrolle von Umweltauflagen. Daher wäre eine notwendige Alternative das Recycling von bereits im Umlauf befindlichen SEE aus End-of-Life-Produkten. Leider existieren derzeit fast keine nachhaltigen Kreisläufe für SEE. Ein mehrjähriges Schule-Hochschul-Forschungsprojekt zu *innovativen Methoden zum Recycling von Seltenerd-Metallen aus Alltagsgegenständen* an der LMU München zeigte die Möglichkeit, das Problem im Unterricht zu thematisieren [14]. So wurde laborpraktisch untersucht, SEE mit Hefekulturen, Kombucha, schwarzem Tee oder Ionischen Flüssigkeiten aus Alltagsgegenständen zurückzugewinnen, um die SEE erneut zu verwenden (Abb. 4).



**Abbildung 4.** Schüler\*innen des Schule-Hochschul-Forschungsprojekts im Labor.

Erfolgreich herausgelöst werden konnten die SEE zum Beispiel aus Feuerzeugzündsteinen (Cereisen) und aus Neodymflattentmagneten. Erstere waren für die Schüler\*innenarbeit aufgrund des leichteren Ausbaus aus dem jeweiligen Alltagsgegenstand besser geeignet. Als rein qualitativer Nachweis des Recyclerfolgs bei den Dauermagneten konnte die wahrnehmbare Farbigkeit des gefällten Neodymoxalats angewendet werden. Das Neodymoxalat erscheint in Abhängigkeit von der verwendeten Lichtquelle grau (künstliches Licht) bzw. rosa (Sonnenlicht). Auch die Laugung von Neodym mit einem Kombuchapilz war erfolgreich und wurde quantitativ durch die Untersuchung der Magnetpulverzusammensetzung vor, während und nach der Rückgewinnung verfolgt [14]. Hierzu wurden Proben mittels Atomemissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) elementaranalytisch untersucht.

## 9. Ausblick: SEE – auch biologisch für eine Überraschung gut!

Ein wissenschaftlich ganz neuer Ansatz zum effektiven Recycling ist die Entdeckung, dass viele Bakterien SEE nutzen und somit auch eine biologische Relevanz gegeben ist. Für Bakterien besonders relevant sind die frühen Lanthanoide, die in Enzymen eine Rolle spielen [15]. SEE-haltige Enzyme können den Bakterien bei der Verstoffwechslung ihrer „Nahrung“ (Methanol) dienen und so mithelfen, ihren Energiekreislauf aufrechtzuerhalten (Abb. 5).



**Abbildung 5.** Kultivierung von *M. extorquens* AM1, einem SEE-nutzenden Bakterium mit Methanol als Energiequelle (Foto: Sophie Gutenthaler).

Diese Entdeckung war eine kleine Sensation, denn bis dahin war unbekannt, dass SEE auch eine biologisch essenzielle Funktion haben können. Weil die biologischen Systeme nach mehreren Millionen Jahren der Evolution eine ausgezeichnete selektive Aufnahme unterschiedlicher Elemente aufweisen,

könnten aber gerade diese Bakterien Forscher\*innen dabei helfen, die herausfordernde Trennung und das Recycling der SEE zu verbessern.

So konnte gezeigt werden, dass ein isoliertes Protein aus einem solchen Bakterium in der Lage ist, SEE zu binden und zudem in der Reihe der Lanthanoide eine Präferenz für Neodym hat [16]. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Bakterien selbst zu nutzen, um SEE zu binden. Beispielsweise werden diese dann eingesetzt, um Gadolinium, das in Krankenhäusern bei der MRT-Diagnostik verwendet wird und sich nach dem Ausscheiden durch Patient\*innen in Abwässern anreichert, zu entfernen. Heutzutage existieren somit neue Zugänge, SEE (wieder)verfügbar zu machen und spannende naturwissenschaftliche Forschung mit diesen Elementen zu betreiben. Die SEE sind also für Forschende interessant, Teil des Alltags der Schüler\*innen und Gegenstand von politischen, ökologischen und ökonomischen Debatten. Offene Fragen wie fehlende Recyclingprozesse können die Schüler\*innen zur kritischen Reflexion anregen und die Bewertungskompetenz schulen.

Dominik Diekemper *Universität Tübingen*

Lena Daumann *Ludwig-Maximilians-Universität München*

Stefan Schwarzer *Universität Tübingen*

## Literatur

- [1] Austria Forum, Carl Auer von Welsbach, 2020 (letzter Zugriff am 30.6.2021).
- [2] Baur, F. & T. Jüstel, Weiße Leuchtdioden als moderne Leuchtmittel. Chem. Unserer Zeit, 2021. 109, 100622.
- [3] Suta, M. & J. George, Das Rezept für schmalbandige Leuchtstoffe. Nachr. Chem., 2020. 68:6, S. 54-58.
- [4] Harrer, R., Leuchtdioden als umweltschonendes Beleuchtungskonzept. Chem. Unserer Zeit, 2014. 48:6, S. 422-423.
- [5] Dollen, P. von, S. Pimputkar & J.S. Speck, Let There Be Light-With Gallium Nitride: the 2014 Nobel Prize in Physics. Angew. Chem. Int. Ed., 2014. 53:51, S. 13978-13980.
- [6] Jüstel, T. & S. Schwung, Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz. 2019: Springer.
- [7] Janiak, C., D. Gudat & P. Kurz, Moderne anorganische Chemie. 2018: De Gruyter.
- [8] Diekemper, D., W. Schnick & S. Schwarzer, Blue turns white – Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting Using the Example of a LED Phosphor. ChemKon, 2020. 28:8, S. 341-348.
- [9] Diekemper, D., W. Schnick & S. Schwarzer, Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting. J. Chem. Educ., 2019. 96:12, S. 3018-3024.
- [10] Kaufmann, I. & P. Menzel, Chemie mit Mikrowelle. Neue Möglichkeiten und Wege. Praxis der Naturwissenschaft – Chemie in der Schule, 2007. 2, S. 31-34.
- [11] Lühken, A., Ultraschall und Mikrowellenstrahlung im Chemieunterricht. 2005: Diss., Univ. Frankfurt/Main.
- [12] Fu, Y.-P., Preparation of Y3Al5O12:Ce Powders by Microwave-Induced Combustion Process and their Luminescent Properties. J. Alloys Compd., 2006. 414:1-2, S. 181-185.
- [13] Daumann, L.J., Wirklich unzertrennlich? Seltene Erden trennen und recyceln. Nachr. Chem., 2018. 66:6, S. 597-600.
- [14] Mandal, N. et al., Seltenerdelemente recyceln. Erprobung nachhaltiger Recycling-Methoden für Seltenerdelemente aus Alltagsgegenständen als kooperatives Schülerprojekt. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 2021. 32:3, S. 16-21.
- [15] Römer, J., Biorecycling "Die Bakterien wachsen, wenn wir alte Magneten dazugeben". 2021: SPIEGEL.
- [16] Singer, H., B. Drobot, C. Zeymer, R. Steudtner & L.J. Daumann, Americium preferred: LanM, a natural lanthanide-binding protein favors an actinide over lanthanides. Chem. Sci., 2021. 12, 15581.



# Wie funktioniert eigentlich ein MRT-Gerät?

## Ein Science-Spotlight zur Funktion von MRT und Kontrastmitteln

Philipp Spitzer & Ingrid Krumphals

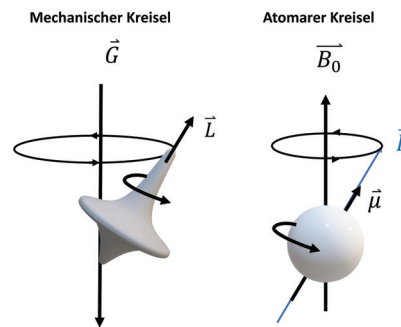
### 1. Einleitung

Bildgebende Verfahren sind in der medizinischen Diagnostik nicht mehr wegzudenken. Magnetresonanztomographie (MRT) und Computertomographie (CT) sind Standardverfahren in der Medizin. Während bei CT Röntgenstrahlung notwendig ist, arbeitet MRT hauptsächlich mit einem Magnetfeld und kommt somit ohne ionisierende Strahlung aus. Für manche Gewebeerkrankungen sind zusätzlich Kontrastmittel notwendig. MRT ist aus dem Alltag bekannt, aber wie funktioniert sie eigentlich? Im vorliegenden Beitrag wird MRT mittels einer Analogie des Kernspins zu einem mechanischen Kreisel dargestellt. Außerdem wird erläutert, welche Funktion Kontrastmittel haben und warum sich das (komplexierte) Seltenerd-element Gadolinium hierfür besonders eignet. Zusätzlich zum Artikel sind Informationen als Science-Spotlight im SpottingScience-Projekt unter [www.spottingscience.com/MRT](http://www.spottingscience.com/MRT) abrufbar.

### 2. Kernspin/Kernspinresonanz

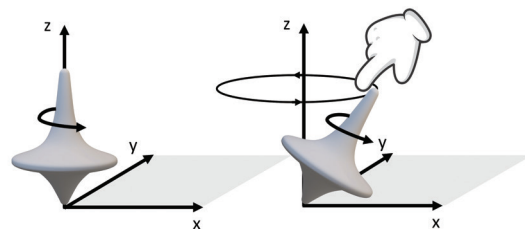
Die Funktionsweise der MRT fußt auf Kernspin bzw. Kernspinresonanz. Die Auslenkung des Kernspins bzw. die Kernspinresonanz sind somit für die MRT essenziell. Wie kann man sich das vorstellen? Der Spin ist eine Eigenschaft von Elementarteilchen und gibt Auskunft über den Eigendrehimpuls des Teilchens. Zudem besitzt ein geladenes Teilchen mit Spin auch ein magnetisches Moment. Das zusammengesetzte Proton (bestehend aus Up-Up-Down-Quarks) besitzt also die Eigenschaft Spin  $\frac{1}{2}$  mit zwei möglichen Richtungswerten  $\downarrow$  und  $\uparrow$  sowie ein magnetisches Moment. Betrachtet man nun ganze Atomkerne, so geht auch der Kernspin bei ungerader Nukleonenzahl mit einem magnetischen Moment einher, das bei der Kernspintomographie, oder MRT genannt, genutzt wird. Der Wasserstoffatomkern ist nicht nur der einfachste Kern (mit einem Proton), sondern auch jener mit dem größten magnetischen Kernmoment. Außerdem ist Wasserstoff in lebender Materie überall und fast immer vorhanden und daher für MRT bestens geeignet. Daher beschränken sich auch die weiteren Ausführungen rein auf den Wasserstoffatomkern [1].

Die Vorstellung quantenmechanischer Phänomene ist abstrakt. Im Folgenden verwenden wir deshalb das Analogon eines mechanischen Kreisels. Übertragen in die makroskopische Welt kann man sich den Spin in Analogie zu einem Kreisel vorstellen [2]. Der Spin wird in diesem Fall auf einen Zustand reduziert. Der gedachte Kreisel dreht sich um die z-Achse. Da der Spin eine Eigenschaft ist, hört der gedachte Kreisel niemals auf, sich zu drehen (Abb. 1).



**Abbildung 1.** Vergleich eines mechanischen Kreisels im Schwerfeld der Erde mit einem atomaren Kreisel (magnetisches Moment im magnetischen Feld mit inhärentem Eigendrehimpuls (Abbildung nach [3])).

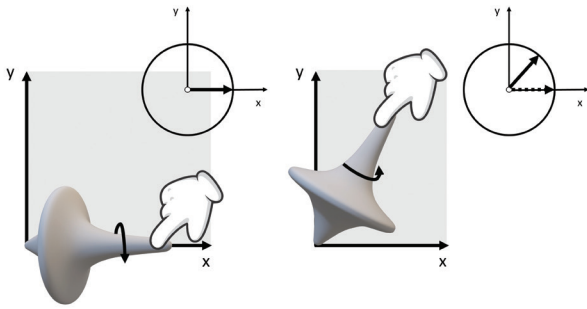
Ein Kreisel dreht sich gleichmäßig um die eigene Achse. Wenn man die Achse des Kreisels nun vorsichtig auslenkt, „eiert“ der Kreisel um die Drehachse. Sprachlich korrekt bezeichnet man diese Richtungsänderung der Achse eines rotierenden Objekts als Präzessionsbewegung (Abb. 2).



**Abbildung 2.** Auslenkung eines Kreisels in Richtung der X-Achse.

Diese eben beschriebene Bewegung kann man mit der Auslenkung des Spins vergleichen. Die Frequenz mit der der Spin präzessiert, bezeichnet man als Larmorfrequenz. Diese ist eine der wichtigsten Kenngrößen bei der MRT [2]. Wenn er nicht mehr ausgelenkt wird, richtet sich der Spin wieder entlang des Magnetfelds in z-Richtung aus (ein mechanischer Kreisel würde sich jedoch in der Präzessionsbewegung stabilisieren).

Bei der MRT werden diese Auslenkungen zur Bildgebung verwendet. Betrachten wir wieder unseren Kreisel, so kann man ihn zum Beispiel entlang der x-Achse auslenken. Mit der Zeit richtet sich der Spin wieder in Richtung der z-Achse aus, indem Energie an die Umgebung abgegeben wird. Die Zeit, in der diese Präzisionsbewegung abklingt, nennt man *Longitudinale Relaxation* ( $T_1$ ). Sie ist ein Faktor für die Bildgebung. Wenn wir im Bild des Kreisels bleiben, so kann dieser nicht nur entlang der x-Achse ausgelenkt werden, sondern zusätzlich auch in der gesamten xy-Ebene (Abb. 3).

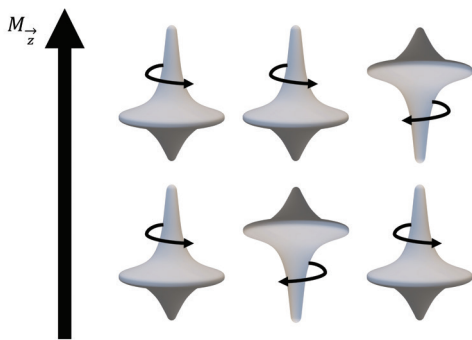


**Abbildung 3.** Auslenkung des Kreises in verschiedenen Positionen der xy-Ebene (dargestellt in der Draufsicht). Zusätzlich dargestellt ist jeweils eine vereinfachte Abbildung.

Auch diese Auslenkung hat einen Einfluss auf die Bildgebung. Die Zeit, die der Spin zur Rückkehr in die z-Drehung benötigt, wird hier als *Transversale Relaxation (T2)* bezeichnet.

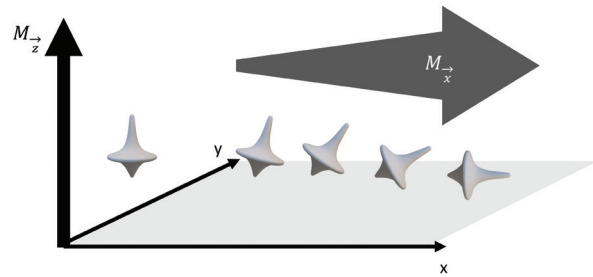
### 3. Vom Kreisel zur MRT

Für ein MRT-Gerät benötigen wir nun ein Hauptmagnetfeld sowie Spulen, die den Spin in x-, y- und z-Richtung auslenken können. Schauen wir uns an, wo sich diese Elemente im Gerät befinden. Der Hauptmagnet eines MRT-Geräts erzeugt ein Magnetfeld in der Achse der zu behandelnden Person in Richtung des Kopfes (z-Achse). Dieses Magnetfeld lenkt den Spin der Protonen im Kern in Richtung der z-Achse aus. Jedoch werden nicht alle Spins in die positive z-Richtung ausgelenkt. Messbar wird die Auslenkung erst durch deutlich weniger (zufällig) in die gegensätzliche Richtung zeigende Spins.



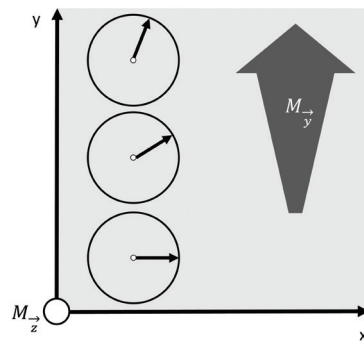
**Abbildung 4.** Auslenkung der Spins entlang des Magnetfelds in z-Richtung. Wenige zufällige Spins sind entgegengesetzt angeordnet.

Nun geht es bei der MRT um die Darstellung eines räumlichen Bildes. Zu diesem Zweck muss man Informationen über den Ort der jeweiligen Spins bzw. Kerne erhalten. Dies geschieht mit Hilfe der Gradientenspulen und den beiden durch sie resultierenden Relaxationszeiten. Diese beiden Spulen erzeugen ebenfalls ein Magnetfeld, allerdings ist dieses nicht homogen, sondern beinhaltet einen Gradienten; es nimmt also zu. Dadurch werden die Spins unterschiedlich stark ausgelenkt. In Abbildung 5 ist die Auslenkung in Richtung der x-Achse dargestellt.



**Abbildung 5.** Unterschiedlich starke Auslenkung des Spins entlang der x-Achse.

Eine ebensolche Auslenkung ist auch entlang der y-Achsen möglich. In Abbildung 6 ist die maximale Auslenkung in Richtung der x-Achse sowie ein Gradienten in y-Achse dargestellt. Die dargestellten Pfeile sind dann das Ergebnis der Auslenkungen in x-y Richtung.



**Abbildung 6.** Auslenkung des Spins in x- und y-Achse. Das Magnetfeld zeigt in z-Richtung aus der Ebene hinaus

Kombiniert man die Auslenkungen beider Gradienten, so erhält jeder Spin in der Ebene eine eindeutige Auslenkung (Pfeile in Abb. 6). Auf diese Weise kann jedem Proton ein eindeutiger Ort zugeordnet und damit ein Bild generiert werden. Eine Gradientenspule entlang der z-Achse sorgt für die notwendige Information bezüglich der Schichtdicke. Das Prinzip ist ähnlich zu den beiden anderen Spulen.

### 4. Hauptkomponenten eines MRTs

Wie bei vielen technischen Geräten gibt es auch bei einem MRT-Gerät unterschiedliche Bauarten, jedoch sind die Hauptkomponenten im Grunde immer gleich: Der *Hauptfeldmagnet* generiert ein statisches, möglichst homogenes Grundmagnetfeld. Die drei in x-, y- und z-Achse angeordneten *Gradientenspulen* generieren zusätzlich aus- und einschaltbare Gradientenfelder und dienen dazu den Kernspin zu beeinflussen. Mittels *Hochfrequenzspulen* wird das nach der Veränderung des Kernspins ausgesendete Resonanzsignal aufgenommen. Die Kontrolle und Datenaufnahme bei der Messung läuft über den *Steuerrechner*, der anschließend auch die Daten in Bilder transformiert [4]. In Abbildung 7 ist das augmentierte Modell eines MRT-Geräts dargestellt.

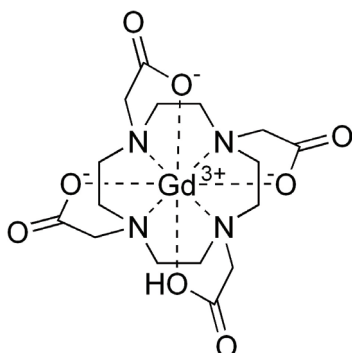


**Abbildung 7.** Die Verwendung des augmentierten MRT-Modells.

Über [www.spottingscience.com/MRT-Modell](http://www.spottingscience.com/MRT-Modell) kann das Modell eines MRT-Gerätes abgerufen werden und augmentiert betrachtet werden. Augmented Reality versteht sich als erweiterte Realität und ermöglicht beispielsweise die Betrachtung von Modellen in realen Umgebungen. Mit Hilfe des Smartphones kann das Modell so von allen Seiten wie ein natürlicher Gegenstand betrachtet werden. Ebenso auf der Webseite befindet sich ein Video des Modells.

## 5. Was ist ein Kontrastmittel

Das MRT-Bild entsteht durch mehrere aufeinanderfolgenden Anregungen und Relaxationen der Spins. Je nach Geschwindigkeit der Relaxation entstehen andere Strukturen. Das Bild bzw. die Signalintensität ist abhängig von (1) der Protonendichte, (2) der Zeit, die der Spin bei x-Auslenkung benötigt, um sich wieder entlang des Magnetfeldes auszurichten (Repetitionszeit T1) und (3) die durch Spin-Spin-Wechselwirkungen bedingte Relaxationszeit (T2) [5]. Letztere bedingt eine Phasenverschiebung zwischen Signal und Messung. Je besser sich der Spin wieder in Richtung des ursprünglichen Magnetfeldes orientieren kann, desto besser kann er erneut ausgelenkt werden und desto besser ist das zu messende Signal. Typischerweise strebt man eine kurze Relaxationszeit für die Ausrichtung in z-Richtung an. Legt man Wert auf diesen Faktor, werden Gewebe mit hohem Fett- und Proteinanteil hell, Gewebe mit viel Flüssigkeit hingegen dunkel dargestellt. Gewichtet man bei der Messung den zweiten Faktor, also die Relaxationszeit bei der Auslenkung in xy-Ebene mehr, so dreht sich die Farbgebung um [6]. Kontrastmittel helfen Relaxationszeiten zu verkürzen. Der Spin richtet sich schneller wieder entlang des Magnetfeldes aus und kann somit schneller mit Hilfe der Gradientenspulen wieder ausgelenkt werden.



**Abbildung 8.** Gadotersäure: Gadoliniumion an 1,4,7,10-Tetraazacyclododecan-1,4,7,10-tetraessigsäure gebunden.

Kontrastmittel sind vielfältig und werden aufgrund ihres magnetischen Charakters oder ihrer chemischen Zusammensetzung unterschieden. Viele Kontrastmittel enthalten Metallionen (meistens  $Gd^{3+}$  oder  $Mn^{2+}$ ), die an Chelatkomplexe gebunden sind [7]. Abbildung 8 zeigt Gadotersäure, ein dreiwertiges Gadoliniumion in einem DOTA-Chelat.

Das Gadoliniumion wird wegen seiner Elektronenkonfiguration, den sieben ungepaarten Elektronen, verwendet. Es ist paramagnetisch und kann sich somit entlang eines Magnetfeldes ausrichten und ist dann für diesen Zustand magnetisch [8]. Gadolinium trägt als Element der Lanthanoide die Ordnungszahl 64 und wurde 1880 von Jean C. Galissard de Marignac entdeckt [9]. Da die Ionen in wässriger Lösung giftig sind, werden sie in Kontrastmitteln an Chelatkomplexe gebunden und sind so ausreichend stabil [10].

Als paramagnetisches Kontrastmittel sorgt es für eine schnellere Relaxation bei der Auslenkung des Spins in Richtung der x-Achse durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen mit benachbarten Wassermolekülen [11]. Der Spin richtet sich schneller wieder entlang des Hauptmagnetfeldes aus. Als Resultat dieser schnelleren longitudinalen Relaxation können die Spins auch schneller wieder vollständig ausgelenkt werden. Je stärker die Auslenkung, desto stärker der Kontrast. Solche Kontrastmittel werden auch als positive Kontrastmittel bezeichnet [2]. Normalerweise werden gadoliniumionenhaltige Kontrastmittel schnell aus dem Körper ausgeschieden. Wissenschaftler\*innen haben in der Vergangenheit allerdings festgestellt, dass sich Gadoliniumionen unter bestimmten Umständen in einzelnen Organen ansammeln und Schäden verursachen können [12]. Aus diesem Grund wird momentan verstärkt nach Alternativen gesucht. Gadoliniumionenhaltige Kontrastmittel sind vor allem in den vergangenen Jahren in die Schlagzeilen gekommen, weil sich mehr und mehr von diesem im Trinkwasser ansammelt [13]. Unter anderen fand man in Großstädten Kontrastmittelreste in Softdrinks großer Fast-Food-Ketten. Der Grund hierfür ist die Zubereitung der Softdrink aus Konzentrat und Leitungswasser. Problematisch ist, dass es noch keine Methode gibt, Kontrastmittel wieder aus dem Trinkwasser zu entfernen. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass sich durch den gestiegenen Bedarf an Kontrastmitteln zur Analyse von Covid-Infektionen [14] während der Coronapandemie vermehrt komplexiertes Gadolinium im Trinkwasser anreichert. Daher forschen zum Beispiel Robert Brünjes und Thilo Hofmann an der Universität Wien daran, den Chelatkomplex zu zerstören und Gadoliniumionen zu recyceln [15].

## 6. Der Science-Spotlight

Ziel des Artikels ist die Erklärung der Funktion der Magnetresonanztomographie (MRT). Damit das MRT-Gerät auch für Patient\*innen keine Blackbox bleibt, möchten wir mit Hilfe eines Science-Spotlight Einblicke in die MRT geben, damit physikalische und chemische Prozesse im Rahmen



einer MRT-Untersuchung verstanden werden können. MRT-Geräte bieten keinen Einblick in ihr Inneres. Die Verwendung eines augmentierten Modells bietet die Möglichkeit, in das Innere des Geräts zu schauen. Es hat zudem den Vorteil, dass Anwender\*innen mit dem Smartphone um das Modell herumgehen können, sodass Details besser sichtbar werden. Sie sind nun herzlich eingeladen, den Science-Spotlight durch Scannen des QR-Codes (s. Abb. 9) oder durch Eingabe des Links [www.spottingscience.com/MRT](http://www.spottingscience.com/MRT) selbst zu entdecken!

## Danksagung

Wir bedanken uns bei Haider AK Mughal (Pakistan) für die Erstellung des augmentierten Modells des MRT-Geräts. Ebenso möchten wir uns bei Erich Reichel für die fachlichen Anregungen zu unserem Artikel bedanken.



Abbildung 9: Science-Spotlight.

Philipp Spitzer *Karl-Franzens-Universität Graz*  
Ingrid Krumphals *Pädagogische Hochschule Steiermark*

## Literatur

- [1] Semmler, W., Einleitende Übersicht. In: Reiser M, Semmler W, editors. *Magnetresonananztherapie*. 1997: Springer. S. 4-6.
- [2] Weishaupt, D., Köchli, V.D., Marincek, B., *Wie funktioniert MRI?* 2014: Springer.
- [3] Brix, G., *Physikalische Grundlagen*. In: Reiser M, Semmler W, eds. *Magnetresonanztomographie*. 1997: Springer. S. 6-27.
- [4] Bock, M., *Magnetresonanztomographie*. In: Reiser M, Semmler W, editors. *Magnetresonanztomographie*. 2002: Springer. S. 82-111.
- [5] Niendorf, H.P. & Balzer, T., *Kontrastmittel*. In: Reiser M, Semmler W, editors. *Magnetresonananztherapie*. 1997: Springer. S. 95-113.
- [6] Pabst, C., *Magnetresonananz-Tomographie – Lernskript für Mediziner*. 2013: Universitätsklinikum Gießen und Marburg: [https://www.ukgm.de/ugm\\_2/deu/umr\\_rdi/Teaser/Grundlagen\\_der\\_Magnetresonanztomographie\\_MRT\\_2013.pdf](https://www.ukgm.de/ugm_2/deu/umr_rdi/Teaser/Grundlagen_der_Magnetresonanztomographie_MRT_2013.pdf)
- [7] Geraldes, C.F.G.C. & Laurent, S., *Classification and basic properties of contrast agents for magnetic resonance imaging*. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2009. 4(1): S. 1-23. Available from: <https://doi.org/10.1002/cmml.265>
- [8] Knecht, J., *Paramagnetismus*. In Gressner A, Arndt T, eds., *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik*, 2018.
- [9] Bünzli, J.-C., *Discovery of the rare-earth elements*. In Pöttgen R, Jüstel T, Strassert CA, eds., *Rare Earth Chemistry*. 2020: De Gruyter. S. 3-14: <https://doi.org/10.1515/9783110654929>
- [10] Daumann, L.J., *Rare Earth Chemistry*. In Pöttgen R, Jüstel T, Strassert CA, eds., *Rare Earth Chemistry*. 2020: De Gruyter. S. 601-609: <https://doi.org/10.1515/9783110654929>
- [11] Nitz, W.R. & Oppelt, A., *Vielschichtiger Blick in den Körper. Magnet-Resonananz-Tomographie. Physik in unserer Zeit*, 2010. 41:5. S. 228-235.
- [12] Rogosnitzky, M. & Branch, S., *Gadolinium-based contrast agent toxicity: a review of known and proposed mechanisms*. *BioMetals*, 2016. 29:3. S. 365-376.
- [13] Schmidt, K, Bau, M., Merschel, G. & Tepe, N., *Anthropogenic gadolinium in tap water and in tap water-based beverages from fast-food franchises in six major cities in Germany*. *Science of the Total Environment*, 2019. 687, S. 1401-1408.
- [14] Langenbach, M.C., Hokamp, N.G., Persigehl, T. & Bratke, G., *MRI appearance of COVID-19 infection*. *Diagnostic and Interventional Radiology*, 2020. 26:4. S. 377-378.
- [15] Brünjes, R. & Hofmann, T., *Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems*. Vol. 182, *Water Research*. 2020: Elsevier.

# Das (umwelt)chemische Laborexperiment Neodym – Ein digitales Lernspiel

Carmen Lawatscheck, Amiera Nadien Hadi & Katharina-Maria Kuse

## 1. Digitales Lernspiel (Serious Game)

Ein Serious Game („Ernstes Spiel“) ermöglicht Schüler\*innen die spielerische Aneignung von Wissen und praktischen Fähigkeiten (Edutainment) in einer digitalen Form des selbstständigen Lernens. Unter Zuhilfenahme motivierender Einheiten aus Spielelementen der Unterhaltungsbranche stellt eine derartige Lerneinheit eine sowohl glaubwürdige als auch unterhaltsame Form der Wissensvermittlung dar. Im Serious Game Neodym [1] bewegen sich die Spielenden in einer

authentischen Laborumgebung in drei typischen Arbeitsbereichen von Chemiker\*innen: der Laborbank (Abb. 1), dem Laborabzug (Abb. 2) und dem Whiteboard (Abb. 3).

In einem interaktiven dreidimensionalen Chemielabor gewinnen die Spielenden unter Anleitung einen Rohstoff, das Neodym, welches Bestandteil von Smartphones ist, zurück und erfahren neben dem eigenständigen Entscheiden und Ausprobieren verschiedener Labortätigkeiten ihre Selbstwirksamkeit. Insbesondere in Zeiten von Pandemie und Distanzlernen kann das Format des digitalen Lernspiels als Alternative zum realen Laborbesuch dienen.



Abbildung 1. Arbeitsbereich Laborbank.



Abbildung 2. Arbeitsbereich Abzug.



Abbildung 3. Arbeitsbereich Wissensbasis.

## 2. Ziele des Serious Games Neodym

Das chemische Element Neodym gehört zu den Seltenerd-elementen (SEE), die bei einer Reihe von elektronischen Produkten wie Plasmabildschirmen, Akkumulatoren und speziellen Magneten zum Einsatz kommen. SEE sind bislang unersetzbar und demzufolge eine Schlüsselkomponente für Zukunftstechnologien, wie Elektroautos oder erneuerbare Energien ([2], S. 55ff., [3], S. 379). Die Gewinnung der begehrten Rohstoffe erfolgt aus Erzen und zieht aufwendige Trennverfahren nach sich. Der derzeitige Hauptexporteur ist das Land China, das bereits häufiger durch Drohungen zur Beschränkung der Metallausfuhr für Schlagzeilen gesorgt hat ([2], S. 71ff., [3], S. 383f.). Wie nie zuvor sind daher heute Recyclingverfahren gefragt, die SEE aus Elektroschrott zurückgewinnen. Im Spiel Neodym lernen die Schüler\*innen ein solches nass-chemisches Verfahren zum Recycling von Neodym aus Smartphone-Lautsprechern kennen. Damit rückt das ausgediente Smartphone als Sekundärrohstoffquelle in den Fokus. Das Spiel beinhaltet sowohl die Durchführung chemischer Experimente als auch die Benennung von Laborutensilien und Arbeitstechniken und vermittelt den Spielenden in drei abwechslungsreichen Wissensblöcken Informationen zu den Thematiken Kritikalität von Rohstoffen, chemisches Basiswissen und praktische Laborarbeit.

## 3. Aufbau und Spielprinzip

Die Spielenden sind in dem Serious Game Neodym in den drei Arbeitsbereichen der Laborbank, dem Laborabzug und dem Whiteboard tätig. Mithilfe einer detaillierten Arbeitsanleitung und den Hinweisen zweier Avatare wechseln die Schüler\*innen zwischen den Arbeitsbereichen und führen Labortechniken aus, erlangen und festigen ihr Wissen in Wissensblöcken und sammeln Belohnungspunkte für abgeschlossene Arbeiten sowie

Extrapunkte für den nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen innerhalb des Labors. Die praktisch zu absolvierenden Phasen zum Recycling des kritischen Metalls Neodym sind im Diagramm (Abb. 4) dargestellt. Nach erfolgreichem Abschluss des Spiels können sich die Schüler\*innen in eine Bestenliste eintragen, wodurch die Lerneinheit auch einen kompetitiven Charakter erhält.

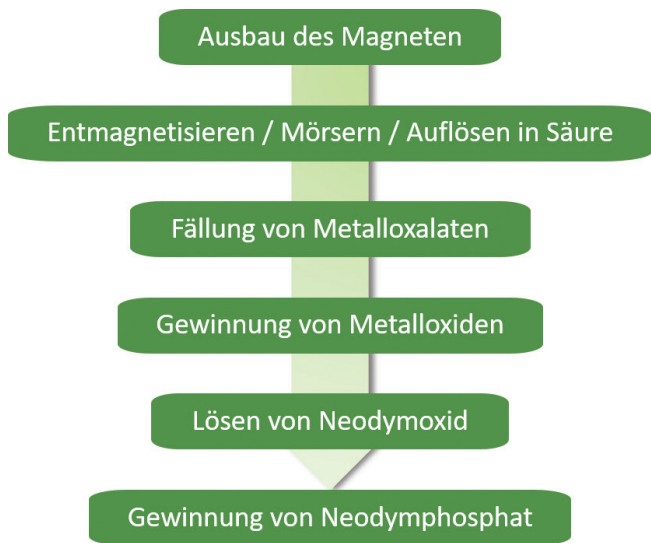


Abbildung 4. Rückgewinnung von Neodym aus Smartphone-Lautsprechern.

#### 4. Digitale Praxis- und Wissensvermittlung

Die Praxis beinhaltet Minigames, in denen typische chemische Arbeitsprozesse von den Spielenden erlernt und geübt werden. Auf diese Weise können Vorgänge wie das Erhitzen von Gegenständen, Feststoffen und Flüssigkeiten mit der Brennerflamme (Abb. 5), das Zerkleinern von Feststoffen mithilfe eines Mörsers (Abb. 6), die Einstellung von pH-Werten/ Pipettieren (Abb. 7) und die Filtration von Suspensionen (Abb. 8) realistisch vermittelt werden. Auch die Geduld, die Geschicklichkeit und der sorgsame Umgang mit Laborgeräten seitens der Spielenden werden bei Ausführung der praktischen Tätigkeiten gefordert.

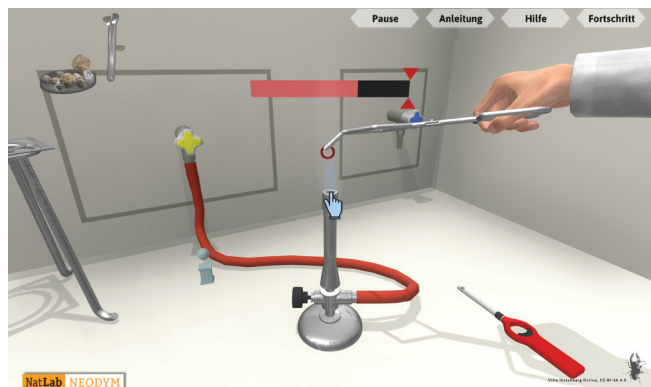


Abbildung 5. Minigame zur Bedienung eines Gasbrenners.



Abbildung 6. Minigame zum Umgang mit dem Mörser.

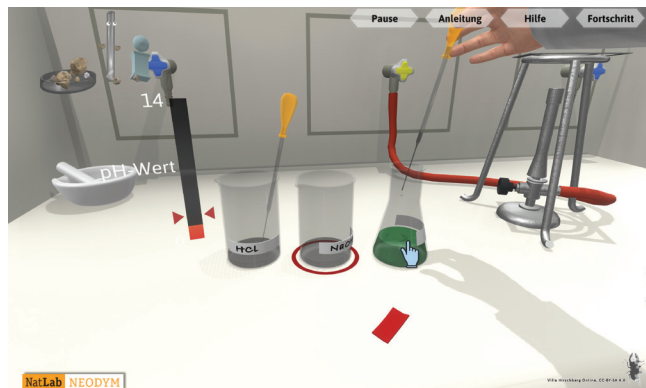


Abbildung 7. Einstellung eines pH-Werts.



Abbildung 8. Filtration einer Suspension.

Theoretische Inhalte werden über drei animierte Lehr-Lern-Einheiten vermittelt (Abb. 9). Jedes Kapitel lässt sich beliebig oft wiederholen. Das optionale Zuschalten einer Gebärdensprachdolmetscherin ermöglicht den mit dem Hörsinn

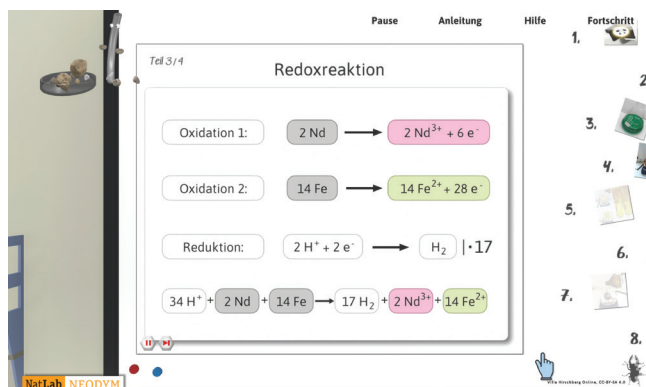


Abbildung 9. Animierte Lehr-Lern-Inhalte.



beeinträchtigten Spielenden einen barrierefreien Zugang zu den Wissenseinheiten und der topaktuellen Thematik des Recyclings.

Im Anschluss an jeden Wissensblock werden die vermittelten Inhalte zur Wissenssicherung über vielseitige Formate, differenziert nach Sek I und Sek II, abgefragt. Darunter finden sich interaktive Lückentexte, Zuordnungs- und Schätzfragen, wie auch Multiple Choice. Die diversen praktischen Arbeitsschritte sowie die theoretischen Inhalte in den Wissensblöcken sind in Tabelle 1 als Übersicht dargestellt.

**Tabelle 1. Themenfelder und praktische Phasen im Serious Game.**

Theoretische Wissensvermittlung	Praktische Spielphasen
<b>Wissensblock I</b> Rohstoffkritikalität bezüglich Umwelt, Technik, Wirtschaft, Politik; Sekundärrohstoffe; PSE	<b>Praktische Phase I</b> Ausbauen eines Magneten aus einem defekten Smartphone
<b>Wissensblock II</b> Entmagnetisierung; Redoxreaktionen: Oxidation von Neodym und Eisen, Reduktion von Hydronium-ionen; Metallchemie, Oxidationszahlen; Oberflächenberechnungen	<b>Praktische Phase II</b> Bedienung eines Gasbrenners; Entmagnetisieren; Mörsern; Auflösen der Legierung in Salzsäure; pH-Wert-Einstellung mit Natronlauge
<b>Wissensblock III</b> Einstellung und Berechnung von pH-Werten; Fällungsreaktionen, Säure-Base-Reaktion, Kalzinieren; Gleichgewichte, Löslichkeit, Aggregatzustand, Solvatation	<b>Praktische Phase III</b> Fällungsreaktion (Metalloxalate); Dekantieren; Zentrifugieren; Kalzinieren; selektive Löslichkeit (Metalloxide); Filtrieren; Fällungsreaktion (Neodymphosphat)

## 5. Einsatz des Serious Games Neodym im Unterricht

Das hier vorgestellte virtuelle naturwissenschaftliche Spiel kann in Form von Blended Learning bzw. Flipped Classroom sowohl aktiv in eine Unterrichtseinheit als auch als Hausaufgabe in den Unterricht für Schüler\*innen der Sekundarstufen I und II eingebunden werden. In den Wissensblöcken erlernen und festigen die Spielenden ihr Wissen in den rahmenlehrplanrelevanten Bereichen Säuren/Basen und Redoxreaktionen. Das vermittelte Wissen und die verwendeten Arbeitstechniken werden im Rahmen von abwechslungsreichen und an den Wissenstand der Klassenstufe des Spielenden angepassten Fragen gesichert und können im Präsenzunterricht gemeinsam mit den Lehrenden besprochen werden. Über den Eintrag der Spielenden in die Bestenliste nach Abschluss des Spiels ist die Überprüfung der Durchführung der Hausaufgabe seitens der Lehrenden möglich. Schüler\*innen benötigen zur Ausführung des Games vorzugsweise einen Laptop oder PC mit

## Literatur

- [1] Weblink zum Serious Game Neodym: [https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/e-learning/serious\\_game\\_neodym/index.html](https://www.bcp.fu-berlin.de/natlab/e-learning/serious_game_neodym/index.html)
- [2] Marschall, L. & H. Holdinghausen, Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters. 2018: Oekom.
- [3] Schmid, M., Rare Earths in the Trade Dispute Between the US and China: A Déjà Vu, *Intereconomics*, 2019. 54:6. S. 378-384.

angeschlossener Computermaus. Eine hohe Rechnerleistung und eine stabile Internetverbindung sind für den reibungslosen Spielablauf von Vorteil. Es ist möglich, die grafische Auflösung zu reduzieren, um ein fließendes Spielen zu gewährleisten.

## 6. Zusammenfassung

Im Serious Game Neodym gewinnen Schüler\*innen das kritische Metall Neodym aus nicht mehr funktionstüchtigen Handys bzw. Smartphones auf nass-chemischem Weg zurück. Da die derzeitige Recyclingrate von Smartphones unter einem Prozent liegt [4], ist eine Sensibilisierung der Jugendlichen für ein Recycling von Rohstoffen und damit verbunden ein Verständnis für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft von immenser Bedeutung. Hierfür eignet sich insbesondere das Konsumgut Smartphone, da dieses elektronische Gerät flächendeckend und täglich bei Schüler\*innen zum Einsatz kommt. Daher können sich die Jugendlichen sehr gut mit diesem Anschauungsgegenstand identifizieren. „Nachhaltig“ werden Smartphones nur, wenn entlang der gesamten Lieferkette, von der Gewinnung der Rohstoffe über die Fertigung der Geräte bis zur Nutzungsphase, entsprechende Umwelt- und Sozialbilanzen nachweisbar sind. Dazu gehören neben Materialeffizienz und Langlebigkeit auch eine Rückgewinnung der, in den Geräten verbauten, wertvollen metallischen Rohstoffe. Gelingt es die Schüler\*innen an diesen Punkten in ihrer Bewertungs- und auch Handlungskompetenz zu fördern, so ist die Erweiterung des üblicherweise bereits vorhandenen Umweltbewusstseins um ein Rohstoffbewusstsein möglich. Damit fördert das Serious Game ein nachhaltiges Verhalten der Spielenden im Alltag, das im besten Fall dann aktive Beiträge zur Schonung der Umwelt zur Folge hat. Die Förderung dieser Kompetenzen und Sensibilisierung für die Problematik der kritischen Metalle erfolgt in diesem ersten Spiel durch selbstgesteuertes Lernen in einer authentischen, simulierten Laborumgebung. Das Motivationspotenzial der Schüler\*innen wird durch die spielerische und unterhaltsame Herangehensweise innerhalb des Serious Games gesteigert. Insbesondere als Erweiterung und Unterstützung des Präsenzunterrichts in der Schule kann das Serious Game eingesetzt werden. Weitere Informationen zu dem vorgestellten Projekt können über den Tagungsband „Digitale NAWIgation von Inklusion“ [5] abgerufen werden.

Carmen Lawatscheck *Freie Universität Berlin*  
Amiera Nadien Hadi *Freie Universität Berlin*  
Katharina-Maria Kuse *Freie Universität Berlin*

- [4] Balaram, V., Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact, *Geoscience Frontiers*, 2019. 10. S. 1285-1303.
- [5] E.M. Watts & C. Hoffmann, *Digitale NAWIgation von Inklusion*. Geplante Veröffentlichung 2022: Springer Nature.

Fotos: Villa Hirschberg Online – CC-BY-SA 4.0

# Wie man mit Tablets über Seltenerdelemente in Tablets lernen kann

Canan Kanbur, Johannes Huwer, David Fetzer, Antje Siol & Ingo Eilks

## 1. Einleitung

Die Digitalisierung der schulischen Bildung gewann in den letzten Jahren – beschleunigt durch die Corona-Pandemie – zunehmend an Bedeutung. Schüler\*innen sowie Lehrkräfte sollen „digital fit“ gemacht werden. Der DigCompEdu der Europäischen Kommission bietet einen Kompetenzrahmen, derer sich die Mitgliedstaaten der EU bei der Entwicklung nationaler Strategien für die Digitalisierung im Bildungsbereich bedienen [1]. Im deutschsprachigen Raum sind in den letzten Jahren die Initiative „Digitale Schule“ in Österreich [2] und das Handlungskonzept „Bildung in der Digitalen Welt“ der deutschen Kultusministerkonferenz entstanden [3]. Beide Strategien sehen vor, Schüler\*innen mit digitalen Endgeräten zu versorgen. So kam es, dass sich Schulen spätestens mit der Coronapandemie gezwungen sahen, eine für das Distanzlernen geeignete Infrastruktur aufzubauen und schafften in großer Zahl digitale Endgeräte für Schüler\*innen und Lehrkräfte an; in Österreich im Rahmen des 8-Punkte-Planes für die Digitalisierung [4]. Angesichts der Chancen, die Tablets im Unterricht bieten, ist die Ausstattung von Schulen mit mobilen Endgeräten zu begrüßen. Sie stellt uns jedoch auch vor Herausforderungen, die auf den ersten Blick insbesondere für Schüler\*innen nicht vordergründig sind. Es geht darum, was mit den Geräten passiert, wenn sie ausgedient haben.

## 2. Lernen über Seltenerdelemente im digitalisierten Unterricht

Statistiken thematisieren vor allem Smartphones, wenn es um das „End of Life“ von digitalen Endgeräten geht. Aktuelle Umfragen zeigen, dass rund 206 Millionen Alt-Handys in deutschen Haushalten lagern [5]. In absoluten Zahlen sind sicherlich weniger Tablets als Smartphones im Umlauf, aber ihr Schicksal wird einander gleichen. In Rohstoffen ausgedrückt, ergibt das bei einer Masse von z. B. 0,05 g Neodym pro Smartphone [6] eine Menge von 10.300 kg Neodym. Angesichts der steigenden Zahl an Tablet-Nutzer\*innen, ist damit zu rechnen, dass diese Zahl zunehmen wird, wenn diese Geräte nicht systematisch in das Recycling zurückgeführt werden. Exemplarisch benennt die deutsche Kultusministerkonferenz hierzu in ihrem Beschluss zur digitalen Bildung im Kompetenzbereich 4 explizit „Umweltauswirkungen digitaler Technologien berücksichtigen“ als Unterrichtsgegenstand [3]. Dabei ist zu beachten, dass sich Tablets nicht nur bei der Entsorgung auf die Umwelt auswirken, sondern bereits bei der Rohstoffgewinnung. Damit ergibt sich der Bedarf nach einer ganzheitlichen Betrachtung des gesamten Lebenszyklus von Tablets im Sinne einer „digital bezogenen MINT-

Nachhaltigkeitsbildung“ [7]. Hier setzt das Projekt „Seltene Erden & Co in der digitalen Nachhaltigkeitsbildung – Lernen mit und über den nachhaltigen Einsatz von Tablets in der Schule“ an. In diesem Beitrag stellen wir eine digitale Lernumgebung aus diesem Projekt vor, in der das als kritisch eingestufte Seltenerdelement Neodym im Zentrum steht [8-9].

## 3. Das Tablet als Lerngegenstand

Digitale Medien lassen sich im Naturwissenschaftsunterricht nach ihrer didaktischen Funktion in vier Kategorien einordnen [10]: *Experimentalwerkzeuge*, z. B. für Messwerterfassungen; *Lernwerkzeuge*, die in zeitlich und örtlich beschränkten, konkreten Situationen kognitive Lernprozesse fördern können, z. B. Erklärvideos; *Lernbegleitung* zur Förderung kognitiver Lernprozesse über einen längeren Zeitraum, etwa Lernplattformen oder digitale Lehrbücher; oder digitale Medien als *Lerngegenstand* selbst. Zu den *Lernbegleitungen* gehören Anwendungen, die sich der Technologie der Augmented Reality (AR) bedienen. AR bietet die Möglichkeit, Realität mit virtuellen Elementen anzureichern und eröffnet damit im Unterricht Perspektiven, die Realität mit verständlichen Visualisierungen von Prozessen auf der submikroskopischen Ebene direkt zu verbinden [11]. Dies kann man mit der Funktion als *Lerngegenstand* verbinden, wenn das Tablet selbst „unter die Lupe“ genommen wird. Das Tablet als Lerngegenstand bietet angesichts der Fülle der darin verarbeiteten Werkstoffe Anknüpfungspunkte an den Unterricht, allen voran Metalle, Kunststoffe und Funktionsmaterialien [7]. Nicht wenige der in Tablets verbauten Rohstoffe werden als kritisch betrachtet. Die EU bezieht 99 Prozent ihres Bedarfs an leichten Seltenerdelementen aus dem handelspolitisch kritischen China [9]. Abhängigkeit zu solchen Förderländern und die zunehmende wirtschaftliche Bedeutung von z. B. Neodym für zukunftsfähige technologische Entwicklungen sind Ausgangspunkte dafür, sich mit den Stoffkreisläufen von kritischen Rohstoffen, die in Tablets verbaut sind, und mit deren Substitutionspotenzial auseinanderzusetzen [7].

## 4. Das Projekt Seltene Erden & Co

Im Projekt verfolgen wir das Ziel, Lernumgebungen zu entwickeln, in denen fachliche Inhalte zum *Lerngegenstand* Tablet multimedial aufbereitet sind, sodass sie *mit* dem Tablet als *Lernwerkzeug* bearbeitet werden können. Eine zentrale Rolle nimmt der Nachhaltigkeitsaspekt ein. Schlussendlich soll den Schüler\*innen eine kritische Auseinandersetzung mit dem Einsatz von Tablets in der Schule ermöglicht

und die Kompetenz zur Bewertung ihrer Nachhaltigkeit unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekten vermittelt werden. Auf dem Weg zu diesem Ziel sind digital gestaltete Lernangebote entstanden, die auch unabhängig von Schule oder Schüler\*innenlabor genutzt werden können. Digitale Lernumgebungen haben sich im Corona-bedingten Distanzunterricht als hilfreich erwiesen, da sie ortsunabhängig genutzt werden können [12]. Über die Pandemiezeit hinaus eröffnet die digitale Durchführung von Versuchen im Unterricht zudem die Möglichkeit, in der Schule verbotene bzw. aufwändige Versuche zu visualisieren. Die Lernumgebung wurde rund um das iPad der Firma Apple entwickelt. Die Firma will bis 2030 klimaneutral werden und läuft nach eigenen Angaben in großen Schritten auf dieses Ziel zu [13]. Auch diese Selbstdarstellung sollte kritisch beleuchtet werden, was eine weitere Möglichkeit für die Bildung für nachhaltige Entwicklung im schulischen Kontext bietet. Wir haben uns in der digitalen Lernumgebung, die vorgestellt wird, auf die technische Nutzung von Neodym in iPads und das Recycling aus iPads fokussiert.

## 5. Neodym in der digitalen Lernumgebung

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 AR visualisiert. AR bietet die Möglichkeit, die Realität mit virtuellen Elementen anzureichern und eröffnet damit gerade im naturwissenschaftlichen Unterricht einen neuen Zugang zu Visualisierungen von Prozessen auf der submikroskopischen Ebene [11]. 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 [7]. Durch die Verlagerung dieses Schrittes ins Digitale können die Schüler\*innen trotzdem interaktiv alle technischen 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 [7]. Diese lassen sich drehen und zurückdrehen, sodass man sie multidimensional betrachten kann. Im nächsten Schritt geht es in die bauteilspezifische Lernumgebung. Neodym findet als Bestandteil von Neodym-Eisen-Bor-Dauermagneten in miniaturisierten Lautsprechern von iPads Anwendung. Darüber wird in einer Textbox (Abb. 1) 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.



Abbildung 1. Textbox: Funktion und Kritikalität von Neodym im iPad.

Darauffolgend können sich die Schüler\*innen selbstständig in der Lernumgebung navigieren. Der zugrundeliegende Versuch für das Neodym-Recycling aus Magneten stammt aus [14]. 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 (Abb. 2). Dies wird zudem symbolisch erklärt. Währenddessen sind die virtuellen Objekte auf dem Triggerbild sowie dem realen iPad verankert. 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.

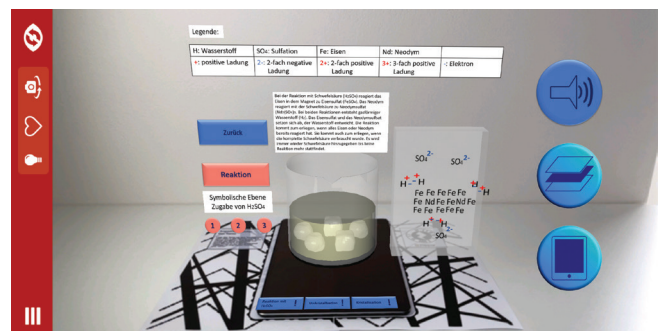


Abbildung 2. Reaktionen auf Symbolebene. Das Becherglas lässt sich virtuell „anfassen“.

Neben der Symbolebene werden die Abläufe auf der Teilchenebene visualisiert. Dies ist bei der Umkristallisation des Neodym(III)-sulfats anschaulich (Abb. 3-4). Die Teilchenebene mitsamt Legende und Textbox wird durch Klicken auf den Informationsbutton eingeblendet. Dabei können die Schüler\*innen durch die Animationen rechts vom Becherglas nachvollziehen, was sich beim Waschvorgang auf der Teilchenebene ereignet. Durch Zoomen lässt sich die Teilchenbenenvisualisierung genauer betrachten. In der Lernumgebung werden somit alle drei Ebenen des Johnstone-Dreiecks bedient: Makro-, Submikro- und Symbolebene [15].



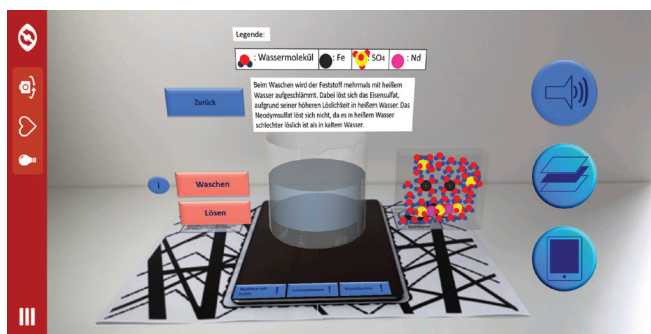


Abbildung 3. Prozesse auf der Teilchenebene in AR (I).

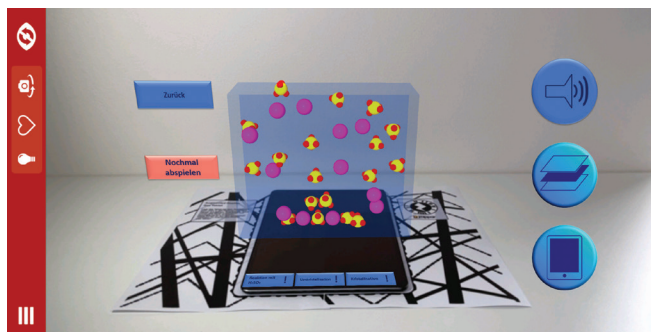


Abbildung 4. Prozesse auf der Teilchenebene in AR (II).

Die Lernumgebung (iPad als Ganzes und in der Sprengansicht) ist modular aufgebaut und wird bauteilspezifisch ergänzt. Aktuell sind neben dieser Lernumgebung Angebote zum Lithium-Ionen-Akku [7] verfügbar. Weitere Komponenten zum Kupfer- und Goldrecycling sind in Planung. Triggerbilder können über den QR-Code (Abb. 5) heruntergeladen werden.



Abbildung 5. QR-Code zum Download.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde eine AR-gestützte Lernumgebung zum Neodymrecycling vorgestellt. Angesichts steigender Nutzer\*innenzahlen von Tablets, insbesondere in Schulklassen, ist es unabdingbar, Schüler\*innen die Kompetenzen zu vermitteln, sich den Herausforderungen des digitalen Wandels zu stellen, über Alternativen zu reflektieren und nachhaltige Entscheidungen zu treffen. Das Projekt „Seltene Erden & Co in der digitalen Nachhaltigkeitsbildung“ bietet hierzu Lehr-Lern-Angebote an, die diesen Ansprüchen genügen.

## Danksagung

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Projektes (Aktenzeichen 34467/01).

Canan Kanbur *Universität Konstanz*

Johannes Huwer *Universität Konstanz*

David Fetzer *Pädagogische Hochschule Weingarten*

Antje Siol *Universität Bremen*

Ingo Eilks *Universität Bremen*

## Literatur

- [1] Redecker, C., European Framework for the Digital Competence of Educators (DigCompEdu). European Commission, 2017: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC107466> [03.12.2021].
- [2] BMBWF. Digitale Schule. 2021: <https://digitaleschule.gv.at> [03.12.2021].
- [3] Kultusministerkonferenz. Bildung in der Digitalen Welt: Strategie der Kultusministerkonferenz. 2016. Abrufbar unter: <https://www.kmk.org/themen/bildung-in-der-digitalen-welt/strategie-bildung-in-der-digitalen-welt.html> [27.11.2021].
- [4] Ohlenschläger, D., Erste Laptops und Tablets für Schulen (22.09.2021): <https://www.schule.at/bildungsnews/detail/erste-laptops-und-tablets-fuer-schulen> [03.12.2021].
- [5] Bitkom, Mehr als 200 Millionen Alt-Handys lagern in deutschen Wohnungen. 2021: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Mehr-als-200-Millionen-Alt-Handys-lagern-in-deutschen-Wohnungen> [27.11.2021].
- [6] Manhart, A. et al., Resource Efficiency in the ICT Sector. Öko-Institut e.V., 2016: [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Resource\\_Efficiency\\_ICT\\_LV.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Resource_Efficiency_ICT_LV.pdf) [27.11.2021].
- [7] Huwer, J. et al., Nachhaltigkeitsbildung und Digitalisierung gemeinsam denken – Lernen mit und über den nachhaltigen Einsatz von Tablets am Beispiel einer Augmented-Reality-Lernumgebung. Chemkon, 2021. 28(6): S. 235-240.
- [8] Zepf, V. et al., Materials Critical to the Energy Industry – An Introduction. 2014: BP.
- [9] EU-Kommission, Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken. 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN> [28.11.2021].
- [10] Huwer, J., A. Banerji & C. Thyssen, Digitalisierung – Perspektiven für den Chemieunterricht. Nachrichten aus der Chemie, 2020. 68(10): S. 10-16.
- [11] Seibert, J. et al., Reale und digitale Inhalte verknüpfen – Den Aufbau von Lithium-Ionen-Akkus mit Augmented Reality verstehen. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 2020. 31(177/178): S. 86-91.
- [12] Probst, C., S. Lukas & J. Huwer, Distance learning in times of crisis. Digital technologies and resources for learning under lockdown: Promoting homeschooling in chemistry education with augmented reality, in iCERI Proceedings. 2020. S. 2023-2031.
- [13] Apple. Apple beschleunigt Fortschritte auf dem Weg bis 2030 klimaneutral zu werden – Einsatz an erneuerbarer Energie wird um neun Gigawatt ausgebaut und Zahl der Zuliefererzusagen verdoppelt (27.10.2021): <https://www.apple.com/de/newsroom/2021/10/apple-charges-forward-to-2030-carbon-neutral-goal-adding-9-gigawatts-of-clean-power-and-doubling-supplier-commitments/> [28.11.2021].
- [14] Mieger, D. & M. Prechtel, Recycling von Neodym(III)-sulfat aus Festplattenmagneten. Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 2017. 17(5): S. 39-43.
- [15] Johnstone, A. H., Macro- and micro-chemistry. School Science Review, 1982. 64: S. 377-379.

# Nachhaltiger Umgang mit Seltenerdelementen

## Ein miniaturisierter Modellversuch zum Recycling von Leuchtstofflampenpulver

Markus Prechtl

### 1. Einleitung

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 (...)“ [1]. Bezogen auf die Seltenerdelemente (SEE) muss konstatiert werden, dass deren Recycling derzeit noch in den Kinderschuhen steckt. Nur wenige Hightech-Anlagen weltweit, wie Umicore, Rhodia/Solvay und Osram, bereiten SEE-Verbindungen aus End-of-Life-Produkten auf ([2], Kap. 7). Indes führten Appelle der EU bezüglich Wertschöpfungsketten zuletzt dazu, dass SEE-bezogene Forschungsprojekte, unter anderem REECOVER, REE4EU, REMANENCE, REProMag, RECLAIM und REEgain, EU- und Landesfördermittel erhielten (vgl. Suchfunktion über [3]). Insofern wird in Forschungslaboren mit Nachdruck an chemisch-technischen Verfahren zum SEE-Recycling gearbeitet [4-7], deren Umsetzung im industriellen Maßstab eine Frage der Zeit und des wirtschaftspolitischen Engagements sein dürfte. Der Beitrag nimmt Bezug auf die innovative Methode *Feststoffchlorierung* zur Separation von SEE aus entsorgungspflichtigen Abfällen, die im Projekt SepSELSA [7-8] an der TU Bergakademie Freiberg – „Der Ressourcenuniversität“ – entwickelt wurde. Damit Schüler\*innen diese Methode nachvollziehen können, wurde ein miniaturisierter Modellversuch von Lehramtsstudierenden (TUDa) für die Schule erprobt und optimiert, der in diesem Beitrag im Anschluss an zwei Theorieblöcke vorgestellt wird.

### 2. Warum wurde bis dato nicht mehr SEE-Recycling betrieben?

Lange Zeit sprachen ökonomische, technische und infrastrukturelle Gründe gegen ein breit angelegtes Recycling von SEE. Es erschien unrentabel angesichts geringer SEE-Konzentrationen in Elektronikbauteilen und Leuchtstoffen. Auch fehlten Recyclingtechnologien, die der Komplexität der SEE-haltigen Matrix genüge leisteten. Im Fall von Dauermagneten besteht eine Herausforderung darin, dass diese mit Schutzlack aus Epoxidharz oder einer Korrosionsschutzschicht aus Nickel überzogen und mit anderen Bauteilen verklebt sind. Die manuelle Demontage gestaltet sich dadurch schwierig und ist im Fall von Kleingeräten nicht wirtschaftlich. Die kostengünstige Alternative des Schredderns führt zu einer geringen Recyclingquote ([2], Kap. 7). Zudem fehlt es weiterhin an Infrastruktur zur sortengerechten Erfassung von SEE-haltigem Abfall.

### 3. Wie könnte die Zukunft des SEE-Recyclings aussehen?

Kritikalitätsanalysen zu SEE der vergangenen Jahre wurden zum Ausgangspunkt genommen, um auszuloten, wie das Überangebot einzelner SEE (Ce, La) auf der einen Seite und der Mangel an kritischen SEE (Dy, Tb) auf der anderen Seiten in Balance zu bringen sei [9]. In diesem Zusammenhang wurden auch Potenziale der Umverteilung recycelter SEE-Verbindungen aus Leuchtstofflampenpulver und Dauermagnetwerkstoffen auf andere Anwendungen erörtert [9]. Damit erhalten Datenmanagement und Nachhaltigkeit einen hohen Stellenwert. Zum ersten Punkt sei beispielhaft das österreichische Projekt MUL 4.0 angeführt, das sich mit der Digitalisierung gesamter Wertschöpfungsketten, vom Rohmaterial bis zum Recycling, befasst [10]. Der zweite Punkt umfasst auch neue Recyclingverfahren, unter anderem mit Bakterien, Algen oder Pilzen [11-12] und mit effektiveren, sicheren Extraktionsmitteln [12-13], über die zum Teil öffentlich berichtet wird („Recycling: Elektroschrott aus Algenfutter“, Der Standard, 11.09.2021). Während die Medien mittlerweile über eindrucksvolle Zukunftsvisionen wie Biomining und Urban Mining (der besiedelte Raum als anthropogene Rohstofflagerstätte) informieren, bleiben Aspekte wie Pre-Consumer-Recycling, d.h. die Rückgewinnung von Ausschuss bereits während der Produktion, und mannigfaltige kreative Prozesse, wie z. B. der Einsatz magnetischer Mikrokugeln, die mit SEE aus Abfällen beladenen und magnetisch aussortiert werden [14], Expert\*innen vorbehalten. Schüler\*innen sollten Zugang zu solchen Visionen und Entwicklungen erhalten, da sie sich daran exemplarisch *Green-Chemistry*-Prinzipien [15] erschließen können. Hierzu zählen: 1. Abfallvermeidung, 2. Atomökonomie, 3. sichere Herstellungsprozesse, 4. Entwicklung ungefährlicher Stoffe, 5. sichere Lösungsmittel, 6. minimaler Energieverbrauch, 7. erneuerbare Ressourcen, 8. einfache Reaktionen, 9. Katalyse, 10. Abbaubarkeit, 11. Echtzeitanalysen und 12. Unfallrisikovermeidung (Abb. 1). Ein Beispiel ist der Einsatz ionischer Flüssigkeiten, wie Tributylphosphat und Methylimidazol-Hydrogensulfat, für das Recycling SEE-haltiger Abfälle [12-13], anstelle konzentrierter Säuren, deren Überschuss mit Laugen kostspielig neutralisiert werden muss. (Ionische Flüssigkeiten sind Salze mit einer Schmelztemperatur kleiner 100 °C, die flüssig vorliegen, da keine Kristallgitter ausgebildet werden.) Eine innovative Alternative, in der sich *Green-Chemistry*-Prinzipien widerspiegeln, stellt die angesprochene Feststoffchlorierung mit Ammoniumchlorid dar. Der Stoff ist preisgünstiger als Mineralsäuren und

kann, wie nachfolgend dargelegt, aus seinen überschüssigen Zersetzungsprodukten zurückgewonnen werden.

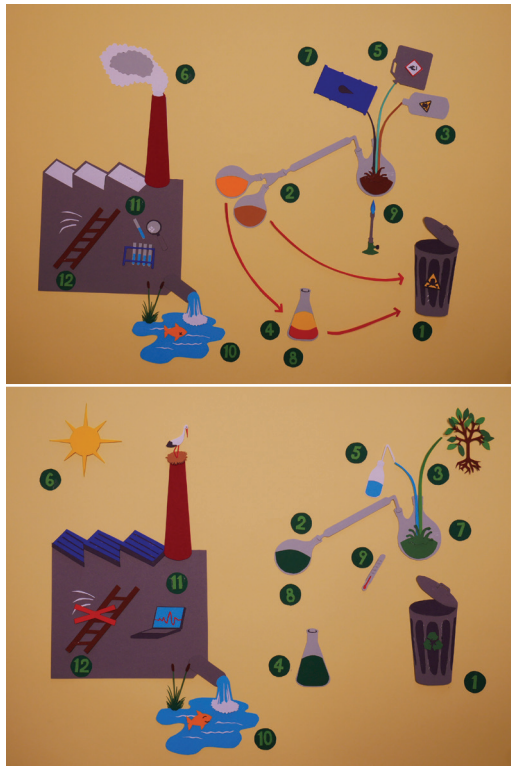


Abbildung 1. Von konventioneller Chemie (oben) zu Green Chemistry (unten).

#### 4. Vom klassischen zum innovativen Recycling von Leuchtstofflampenpulver

Die Rückgewinnung von SEE-Verbindungen aus Leuchtstoffröhren beinhaltet mechanische Trennungen und chemische Prozesse. Mechanisch werden z. B. Schraubfassungen entfernt, chemisch Leuchtstoffe umgesetzt. Den Großteil des Leuchtstoffröhrenabfalls macht Glasbruch aus. Das recycelbare Leuchtstofflampenpulver enthält 40-50 Gew.-% SEE-freie Leuchtstoffe, circa 31 Gew.-% SEE-haltige Leuchtstoffe (YOX, BAM, LAP) (Abb. 2) sowie sonstige Reste von feinen Glaspartikeln und Bindemitteln wie Aluminiumoxid, außerdem kleinere Mengen weiterer Leuchtstoffe ([13], S. 857). Die Angaben variieren, je nach Produkt (vgl. auch [8]).

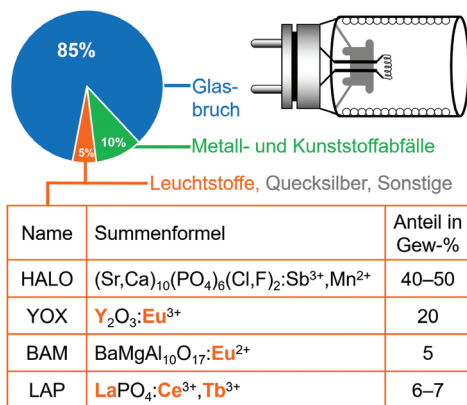


Abbildung 2. Leuchtstoffröhre als Abfall.

Im klassischen Recycling wird YOX üblicherweise in 1-molarer Chlorwasserstoffsäure bei einer Temperatur von 60-90 °C umgesetzt. Für die Aufbereitung von LAP, bei 120-230 °C, wird konzentrierte Schwefelsäure verwendet [13]. Nach Neutralisation überschüssiger Säure folgt gewöhnlich die Fällung der SEE-ionen als Oxalate. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass die eingesetzten Säuren nicht regeneriert werden können. Idealerweise sollte nur so viel Substanz eingesetzt werden, wie für die Stoffumsetzung erforderlich ist. Hier setzt SepSELSA [7-8] an und eröffnet mit der Feststoffchlorierung nachhaltige Perspektiven: Eine Apparatur – ein Drehrohrofen – wird mit Leuchtstofflampenpulverabfall und Ammoniumchlorid beschickt. Stickstoff dient als Schutzgas und verhindert unerwünschte Reaktionen. Bei steigender Temperatur dissoziiert Ammoniumchlorid in Chlorwasserstoff und Ammoniak (Abb. 3–a). Chlorwasserstoff reagiert mit SEE-Verbindungen im Leuchtstofflampenpulverabfall. Dies wird in Abbildung 3–b anhand der Umsetzung von Yttriumoxid (stellvertretend für YOX) symbolisiert.

a	$NH_4Cl_{(s)} \rightarrow NH_{3(g)} + HCl_{(g)}$
b	$Y_2O_{3(s)} + 6 HCl_{(g)} \rightarrow 2 YCl_{3(s)} + 3 H_2O_{(g)}$
c	$NH_{3(g)} + HCl_{(g)} \rightarrow NH_4Cl_{(s)}$
d	$Cu^{2+}_{(aq)} + SO_4^{2-}_{(aq)} + 4 NH_{3(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow [Cu(NH_3)_4]SO_4 \cdot H_2O_{(aq)}$
e	$2 Y^{3+}_{(aq)} + 3 C_2O_4^{2-}_{(aq)} \rightarrow Y_2(C_2O_4)_3_{(s)}$

Abbildung 3. Alle Reaktionen im Überblick.

Der Name des Prozesses – Feststoffchlorierung – rührt von der Bildung der Chloride her, die in diesem Fall nicht in Lösung abläuft. Der Prozess ist selektiv. Es wird so viel Chlorwasserstoff verbraucht, wie SEE-oxid umgesetzt werden kann. Bei Abkühlung bilden Chlorwasserstoff und Ammoniak wieder Ammoniumchlorid (Abb. 3–c). Da während der Reaktion Chlorwasserstoff verbraucht und ein Ammoniaküberschuss gebildet wird, kann Ammoniak abgesaugt und als hochreines Nebenprodukt verwertet oder an die Düngemittelproduktion verkauft werden [8]. Dies macht das Verfahren auch wirtschaftlich interessant.

#### 5. Modellversuch

Das Verfahren Feststoffchlorierung kann von Lehrer\*innen und Schüler\*innen im miniaturisierten Modellversuch ressourcenschonend und sicher nachvollzogen werden.

##### 5.1 Safety first!

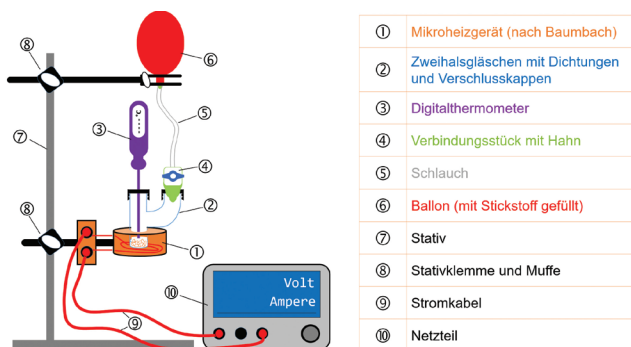
Bei allen Versuchen ist die persönliche Schutzausrüstung (Schutzbrille, Laborkittel) zu tragen. Der Modellversuch sollte im Laborabzug/Digestor durchgeführt werden, da Ammoniak freigesetzt wird. Ammoniak ist der problematischste Stoff im Modellversuch (Gefahr! – ätzend, giftig, gewässergefährdend; H: 221-280-314-331-410, EUH071, P: 210-260-273-280-377-381-403-405-304+340+315-303+361+353+315-305+351+338+315). Da die Durchführung im Mikromaßstab



und im Laborabzug/Digestor erfolgt, ist das Gefährdungspotenzial reduziert. Anstelle echten Leuchtstofflampenpulvers, das giftiges Quecksilber enthält, muss für den Modellversuch ein ungiftiges Gemisch bereitgestellt werden: mit Sand versetztes Yttrium(III)-oxid. Alternativ zum Yttriumoxid könnten andere SEE-Verbindungen verwendet werden, diese sind mitunter jedoch zu kostspielig und gesundheitsschädlich.

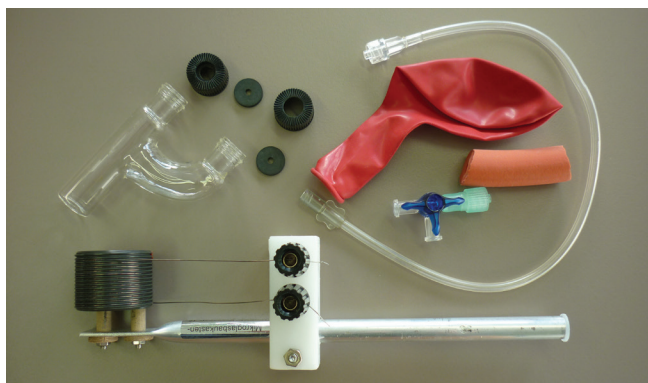
## 5.2 Versuchsteil 1: Feststoffchlorierung

Es wird die Apparatur in Abbildung 4 nach den folgenden Angaben aufgebaut:



**Abbildung 4.** Miniaturisierter Modellversuch zum Recycling von Leuchtstofflampenpulver.

**Chemikalien und Geräte:** Gemisch aus Yttrium(III)-oxid und Sand, Ammoniumchlorid (Achtung! – reizend; H: 302-319, P: 305+351+338), Stickstoff (Achtung!, H: 280, P: 403, für Comp. Gas), Stativ, Stativklemme, 2 Muffen, Mikroheizgerät nach Baumbach mit Halterung [16] und passendes Zweihaalsgläschen inklusive 2 Viton-Dichtungen und 2 Kappen mit Öffnung (Abb. 5), medizintechnische/r Schlauch und Verbindungsstücke (Luer-Lock) – ein Verbinder mit Absperrhahn (Abb. 5), Digitalthermometer, Netzgerät, 2 Stromkabel, Ballon, Vakuumschlauchstück oder Gummistopfen, Parafilm, Mörser und Pistill.



**Abbildung 5.** Einzelteile der Apparatur.

**Vorbereitung des Ballons:** Die Ballonöffnung wird über ein kurzes Vakuumschlauchstück (alternativ: Gummistopfen) gestülpt. Über einen Verbinder wird ein Schlauch angeschlossen. Das offene Ende des Schlauchs wird am Verbinder mit Hahn

befestigt. Alle Übergänge werden zusätzlich mit Parafilm abgedichtet. Danach wird der Ballon mit Stickstoff befüllt.

**Vorbereitung der Apparatur:** Es wird das Mikroheizgerät nach Baumbach [16] verwendet. Dieses wird mit einer Muffe am Stativ befestigt und über eine regelbare Stromquelle betrieben. In die Öffnung des Mikroheizgerätes wird das Zweihaalsgläschen gesteckt. Im Mörser werden 1 g Sand, 0,2 g Yttriumoxid und 0,6 g Ammoniumchlorid vermischt. Eine kleine Probe dieses Gemischs wird abgetrennt und für Teilversuch 3 aufbewahrt. Der Großteil des Gemischs wird in das Zweihaalsgläschen gegeben. Dieses wird mit den Kappen mit Viton-Dichtung verschlossen. Durch den Viton-Ring des geraden Glashalses wird das Digitalthermometer in das Gemisch hineingesteckt. Auf den gebogenen Hals wird der Verbinder mit Hahn, der über den Schlauch mit dem Ballon verbunden ist, gesteckt. Der Hahn wird vorsichtig geöffnet bis der Gasstrom hörbar bzw. am Ballonvolumen wahrnehmbar ist. Stickstoff tritt an der Öffnung, in der das Digitalthermometer steckt, heraus, wenn dieses leicht bewegt wird. Hat sich der Ballon entleert, ist die Apparatur mit Stickstoff geflutet. Das Netzteil wird eingeschaltet und so eingestellt bzw. nachjustiert, dass eine Temperatur von 300 °C erreicht und für fünf Minuten gehalten wird. Ab 200 °C wird das Gemisch mit dem Thermometerfühler kreisend bewegt. Bevor das noch heiße Zweihaalsgläschen vorsichtig mit einer Holzklammer (nicht mit den Fingern!) aus dem Mikroheizgerät entfernt und zum Abkühlen einige Minuten lang stehen gelassen wird, muss der Hahn, der über den Schlauch mit dem Ballon verbunden ist, wieder geschlossen werden.

**Ergänzender Hinweis zur Kurzschlussgefahr:** Am Versuchsende sind die Kabel zunächst aus der Stromversorgung und danach aus den Buchsen des Mikroheizgerätes zu ziehen.

**Beobachtungen:** Der zuvor leere Ballon bläht sich leicht auf. An den kühlen Wänden des Zweihaalsglases setzen sich ein weißer Feststoff und Kondensat ab.

**Ergebnis:** Ammoniak und gasiges Wasser, die bei der Reaktion freigesetzt werden, füllen den Ballon. Ammoniak stammt aus der thermischen Zersetzung des Ammoniumchlorids (Abb. 3–a). Chlorwasserstoff reagiert mit dem SEE-oxid unter Bildung des Chlorids und Wasser (Abb. 3–b). An den kühlen Bereichen des Zweihaalsglases bilden die Gase Ammoniak und Chlorwasserstoff wieder festes Ammoniumchlorid (Abb. 3–c).

## 5.3 Versuchsteil 2: Nachweis von Ammoniak

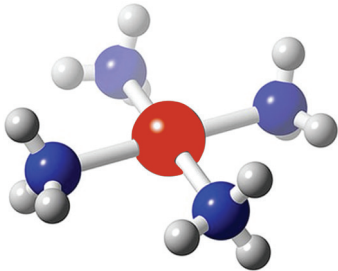
**Chemikalien und Geräte:** gasgefüllter Ballon aus Versuchsteil 1, Kupfer(II)-sulfatlösung ( $w = 5\%$ ig; Gefahr! – ätzend, gewässergefährdend; H: 318-411, P: 273-302+352-305+351+338), hohes Becherglas (50 mL).

**Durchführung:** Das Becherglas wird bis zur Hälfte mit verdünnter Kupfer(II)-sulfatlösung befüllt. Der Ballon aus Versuchsteil 1

wird aus dem Stativ genommen. Der Hahn am Schlauchende wird geöffnet und der Inhalt des Ballons in die Kupfer(II)-sulfatlösung entleert.

*Beobachtung:* Dort, wo das Gas in die Lösung perlt, entsteht eine aquamarinblaue Färbung.

*Ergebnis:* Kupfer(II)-ionen und Ammoniakmoleküle reagieren zu Tetraamminkupfer(II)-komplexen (Abb. 3–d, Abb. 6).



**Abbildung 6.** Kugelstabsmodell des Tetraamminkupferkomplexes (Farbzuordnung: Cu = rot, N = blau, H = grau).

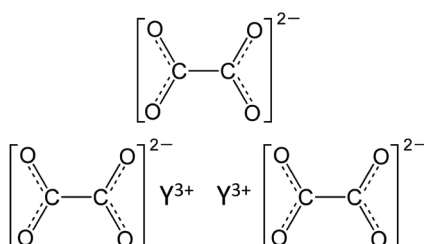
### 5.4 Versuchsteil 3: Fällungsreaktion

*Chemikalien und Geräte:* aufbewahrte Modellgemisch-Probe, Produkt der Feststoffchlorierung aus Teilversuch 1, Kaliumoxalatlösung ( $w = 1\%$ ; Achtung! – gesundheitsschädlich; für den Feststoff gilt H: 302+312, P: 280-301+312+330), 4 Reagenzgläser im Gestell, 2 Glasrichter mit Faltenfiltern, Tropfpipette.

*Durchführung:* Das Produkt der Feststoffchlorierung aus Teilversuch 1 wird in ein Reagenzglas gegeben. Die Modellgemisch-Probe, die zurückgehalten wurde, wird als Kontrolle in ein zweites Reagenzglas gegeben. Beide Reagenzgläser werden bis zur Hälfte mit Wasser befüllt und geschwenkt. Die Lösungen werden jeweils in neue Reagenzgläser abfiltriert und die nicht löslichen Rückstände damit abgetrennt. Die Filtrate in den beiden Reagenzgläsern werden tropfenweise mit Kaliumoxalatlösung versetzt.

*Beobachtung:* Im Fall des Gemischs vor der Feststoffchlorierung passiert nichts. Im Fall des Produkts aus der Feststoffchlorierung führt die Zugabe von Kaliumoxalatlösung zur Ausfällung eines weißen Niederschlags.

*Ergebnis:* Yttriumionen und Oxalationen bilden Yttriumoxalat (Abb. 3–e, Abb. 7).



**Abbildung 7.** Symbolik zu Yttriumoxalat.

### 5.5 Alternativen und Ergänzungen zum Modellversuch?

Sind weder Mikroheizgerät noch Mikrogasgeräte vorhanden, kann alternativ ein Reagenzglas mit seitlichem Ansatz verwendet werden, das vorsichtig mit einem Gasbrenner erwärmt wird. Auf das Vorhandensein von Ammoniak kann optional auch ein angefeuchtetes pH-Indikatorpapier oder die Rauchbildung an einem Tropfen konzentrierter Chlorwasserstoffsäure, an der Spitze eines Glasstabs, oder ein kolorimetrischer Ammoniumtest zur Gewässeranalytik, wie er im Aquarienfachhandel erhältlich ist, hindeuten. Der Modellversuch kann nicht mit Luft anstelle des Stickstoffs durchgeführt werden, da Modifikationen von Yttriumoxidchlorid entstehen, die nicht wasserlöslich sind, sodass der dritte Versuchsteil nicht funktionieren würde. Zum Ausschluss von Sauerstoff gibt es keine Alternative. Für den Unterricht an Berufsschulen lässt sich der Modellversuch hinsichtlich Theorie und Analytik erweitern: Trennung von Yttrium- und Europiumionen aufgrund der Tatsache, dass Europiumionen die Oxidationsstufen +II und +III aufweisen [8], IR-Spektroskopie des gebildeten Ammoniumchlorids, UV-VIS-Photometrie zum Nachweis von Yttriumionen mit Methylthymolblau [17] sowie, wenn vorhanden, Pulverdiffraktometrie zur Bestimmung von Yttriumchlorid bzw. Yttriumoxidchlorid.

### 6. Ausblick – Recycling versus Substitution versus Rohstoffgewinnung

Im Unterricht können sich packende Diskussionen entwickeln, wenn sich die Schüler\*innen vergegenwärtigen, dass nachhaltige Strategien in wirtschaftlicher Konkurrenz zueinanderstehen und sich damit gegenseitig beflügeln aber auch ausbremsen können. So wird parallel zu SEE-Recyclingverfahren an Möglichkeiten der SEE-Substitution (Tabelle 1) und an umweltschonender Primärproduktion von SEE, z. B. via Biomining, gearbeitet. Um nur ein Beispiel herauszugreifen: Bei Laborversuchen zum Bioleaching des SEE- und Thorium-haltigen Erzes Monazit mit Pilzen zeigte sich, dass manche Pilze SEE gegenüber Thorium bevorzugen, sodass nur SEE dem Monazit entzogen werden, während radioaktives Thorium in den Rückständen verbleibt [18].

**Tabelle 1.** SEE-Substitution

Typ	Beispiele (vgl. [2], Kap. 8)
Materialsubstitution	Legierungen auf Basis von Eisennitrid oder Eisen-Cobalt-Legierungen anstatt SEE-haltiger Legierungen; Legierungen mit Cer anstatt mit kritischem Dysprosium; Strontium-Ferrit- und Mangan-Aluminium-Systeme anstatt SEE-haltiger Magnetwerkstoffe (vgl. EU-Projekt PASSENGER).
Funktionale Substitution	Induktionsmotoren kommen ohne SEE aus; Organische Leuchtdioden funktionieren ohne SEE; SEE-freie Halbleiterlaserverstärker (SOA).
Ideelle Substitution	Ist es notwendig, dass jeder Haushalt mehrere SEE-haltige IT- und Elektrogeräte, wie etwa eine Bohrmaschine, einen Rasenmäher, einen Kompressor usw. besitzt? Option: Ausleih-Reparatur-Dienste.

Letztendlich spielt die Wirtschaftlichkeit nachhaltiger Verfahren eine große Rolle. Optimistisch stimmt, dass *Green-Chemistry*-Prinzipien per se darauf ausgerichtet sind. Das Forschungsfeld boomt und wird zukünftig nachhaltige Beiträge zur Energiewende, zum Umweltschutz und zur Wertstoffchemie leisten können.

## Danksagung

Mein Dank gilt André Zimmermann und Benedikt Vogel, die verschiedene Versionen des miniaturisierten Modellversuchs entwickelt haben, sowie den Chemie-Lehramtsstudierenden der TUDa, die den Modellversuch erprobt haben.

---

Markus Prechtl *Technische Universität Darmstadt*

## Literatur

- [1] Bertau, M., Warum wir uns mit Rohstoffen befassen müssen. *Chemie in unserer Zeit*, 2018. 52:5, S. 290-296.
- [2] Marschall, L. & H. Holdinghausen, Seltene Erden. *Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters*. 2018: Oekom.
- [3] <https://cordis.europa.eu/> (07.01.2022)
- [4] Yang, Y. et al., REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2017. 3, S. 122-149.
- [5] Tsamis, A. & M. Coyne, Recovery of Rare Earths from Electronic Wastes. *An Opportunity for High-Tech SMEs*. 2015: Publications Office of the EU.
- [6] Adler, B. & R. Müller, Seltene Erdmetalle. *Gewinnung, Verwendung und Recycling*. 2014: Universitätsverlag Ilmenau.
- [7] Lorenz, T. & M. Bertau, Recycling of Rare Earth Elements. *Physical Sciences Reviews*, 2017. 2:1 (20160067).
- [8] Lorenz, T. & M. Bertau, Das SepSELSA-Projekt – Wie man Seltene Erden aus Leuchtstoffröhren gewinnt. *Chemie Konkret*, 2019. 26:2, S. 72-77.
- [9] Binnemans, K. et al., Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2018. 4, S. 126-146.
- [10] Woschank, M. et al., MUL 4.0 – Digitalisierung der Wertschöpfungskette vom Rohmaterial bis hin zum Recycling. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 2021. 166:6, S. 309-313.
- [11] Čížková, M. et al., Bioaccumulation of Rare Earth Elements from Waste Luminophores in the Red Algae, *Galdieria phlegrea*. *Waste and Biomass Valorization*, 2021. 12, S. 3137-3146.
- [12] Daumann, L.J., Wirklich unzertrennlich? Seltene Erden trennen und recyceln. *Nachrichten aus der Chemie*, 2018. 66:6, S. 597-600.
- [13] Dupont, D. & K. Binnemans, Rare-earth recycling using a functionalized ionic liquid for the selective dissolution and revalorization of Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> from lamp phosphor waste. *Green Chemistry*, 2015. 17, S. 856-868.
- [14] Elsaidi, S.K. et al., Extraction of rare earth elements using magnetite@MOF composites. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018. 6, S. 18438-18443.
- [15] Anastas, P.T. & J.C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*. 2000: Oxford University Press.
- [16] Baumbach, E., *Chemische Schulversuche mit dem Mikroglassbaukasten*. 1997: Dümmler.
- [17] Bartušek, M., Zur spektrophotometrischen Bestimmung von Yttrium, Lanthan und Cer. *Fresenius Zeitschrift für analytische Chemie*, 1965. 214, S. 440.
- [18] Brisson, V.L., W.-Q. Zhuang & L. Alvarez-Cohen, Bioleaching of rare earth elements from monazite sand. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015. 113:2, S. 339-348.



# Preisträger\*innen des sechsten Werner Rentzsch-Fotowettbewerbs

Im Rahmen der Fortbildungswoche wurden die ausgezeichneten Arbeiten des Fotowettbewerbs bekanntgegeben. Wir gratulieren den Gewinner\*innen.

## Erster Preis: Chemolumineszenz

Kofler Anna, Padinger Anna-Lena, Pillichshammer Hanna, Nini Konstantin, Stetina Jakob, Huemer-Meyer Vincent, Auer Sarah, Emig Marlene (BG Vöcklabruck)

*Wir experimentierten im Chemie-Wahlpflichtfach zum Thema Chemolumineszenz. Bei diesem Experiment entstand das angehängte Foto. Wir ritzen einen Kastanienzweig an, tauchten ihn in Wasser und bestrahlten diesen mit UV-Licht (Abb. 1).*



Abbildung 1: Chemolumineszenz

## Zweiter Preis: Sternstunde des Reflexionsgesetzes

Fanny Hollenthoner und das 7. Klasse-Wahlpflichtfach: Helm Laura, Waltenberger Lena, Arslan Serhart, Bahcetepe Berhan, Hess Elias, Sinani Bedri, Springer Marian, Zauner Elia, Zulajeva Tansila (BG/BRG Wels Dr. Schauerstraße)

*Neben der ansprechenden Optik (zu dessen Themengebiet es auch gehört) dieses Experiments verbirgt sich ganz schön viel Physik. Zum einen stellt es das Reflexionsgesetz an spiegelnden Oberflächen dar. Zum anderen haben wir hier mit Laserstrahlen gearbeitet, die an Kreidestaubteilchen und Wassertropfen in das Auge bzw. in die Kamera reflektiert werden (Abb. 2).*

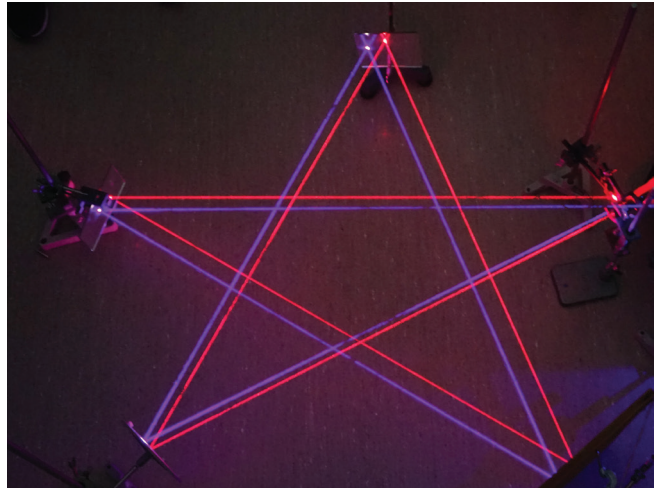


Abbildung 2: Sternstunde des Reflexionsgesetzes

## Dritter Preis: Wärmebild eines Atemzyklus mit FFP2-Maske

Luis Waxenegger und Christoph Sickinger (AHS Wien West)

*Beim Experimentieren mit der Wärmebildkamera im Physik-labor tauchte die Frage nach der Sichtbarkeit der Atemluft auf. Aufgrund der getragenen FFP2-Maske kam es tatsächlich zu einer Veränderung im Wärmebild und die Wärme der Atemluft wurde auf indirektem Wege sichtbar. Auch die Abkühlung beim Einatmen (vermutlich mitverursacht durch Verdampfungsenthalpie) konnte beobachtet werden (Abb. 3).*



Abbildung 3: Wärmebild eines Atemzyklus mit FFP2-Maske

# IHR EXPERTE FÜR STUDIENREISEN!

Außergewöhnliche Kultur- und Studienreisen mit ausgewählten Hotels und fachlich fundierten Reiseleitern!



## Naturwissenschaft und Technik

### Reise zum Cern

Eine Fahrt für alle, die an aktueller Naturwissenschaft interessiert sind.  
REISELEITUNG: MAG. LEO LUDICK



23.-27.4.2022 | 26.-30.10.2022  
12.-16.11.2022 ab 890,-

### Technikreise Turin

Pininfarina – Sacra di San Michele – Alba – Barolo – Heritage HUB Torino – Lingotto – Automuseum



2.-6.6.2022 | 26.-30.9.2022 559,-

### Atemberaubendes Island

Mit täglichen geologisch-naturwissenschaftlichen Fachvorträgen und Möglichkeit zur Walbeobachtung!

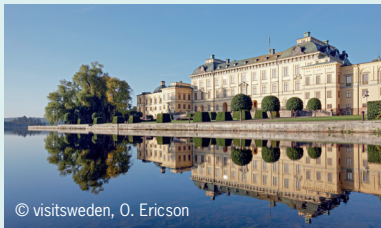


29.7.-7.8.2022 ab 3.195,-

## Musik und Kunst

### Ö1 Opernreise Schweden

Schwedische Kunst, Opern und der Siljansee. Begleitet von Ö1 Redakteurin Mag. Renate Burtscher



5.-12.8.2022 2.210,-

### Goldene Zeitalter

Grandiose Höhepunkte der Malerei und Architektur in der Benelux-Region mit schönem Design-Hotel in Rotterdam



3.-9.10.2022 1.490,-

### Kunstbiennale Venedig

Reiseleitung: Arch. DI Klaus Hagenauer  
4-Sterne-Hotel in bester Lage!



26.-29.10.2022 625,-

## Geschichte und Kulturgeschichte

### Schottlands Norden

Mit den Orkney-Inseln sowie den Äußeren und Inneren Hebriden! Inseln, Meer und Hochlandtäler



7.-15.7.2022 2.095,-

### Gotland · Öland · Bornholm

Sagenumwobene Sonneninseln der Ostsee. UNESCO-Weltkulturerbe!



23.-31.8.2022 1.989,-

### Angelsachsen und Wikinger

Königreiche der Angelsachsen und Wikinger. Englands mittelalterliche Städte und Burgen von York bis Dover.



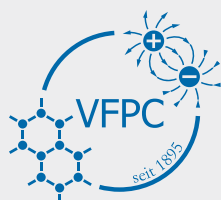
26.8.-2.9.2022 ab 1.585,-



Mehr Spezialreisen und das jeweilige Detailprogramm finden Sie auf [www.kastler.at](http://www.kastler.at)

**REISEPARADIES KASTLER GMBH**  
Reise-Hotline: **07234-82323-0**  
[reiseparadies@kastler.at](mailto:reiseparadies@kastler.at)





## Neues aus dem Verein

### Bericht zur Fortbildungswoche 2022

Alles wäre bereit gewesen. Die Vortragenden gebucht, die Workshopleiter\*innen engagiert, der Wein eingekühlt und die Brote geschmiert. Doch die Pandemie hat uns auch in diesem Jahr gezwungen die Fortbildungswoche online abzuhalten. Da es uns etwas widerstrebte die diesjährige Ausgabe zu unserer 75-ten zu machen, folgt der Nummer 74a heuer die Nummer 74b und wir hoffen, dass die Pandemie 2023 tatsächlich überwunden sein wird.

Wie gewohnt eröffnete der Obmann die Fortbildungswoche am Montag im neuen Online-Rahmen. Der diesjährige Werner Rentzsch-Preis geht nach Vöcklabruck an das Chemie-Wahlpflichtfach des BG Vöcklabruck mit dem Bild „Chemolumineszenz“. Das Bild und die weiteren Preisträger\*innen finden Sie in dieser Ausgabe. In Summe waren in diesem Jahr noch viele weitere großartige Beiträge dabei. Wir ermutigen Sie auch weiterhin fleißig am Wettbewerb teilzunehmen.

Das Onlineformat machte in diesem Jahr Workshops schwierig, aber möglich. Ein besonderer Dank gilt hier den Kolleg\*innen für die Flexibilität und den Einsatz. Beeindruckend waren die Vorträge von anerkannten Expert\*innen von der Batterietechnologie bis zum Aufgabendesign.

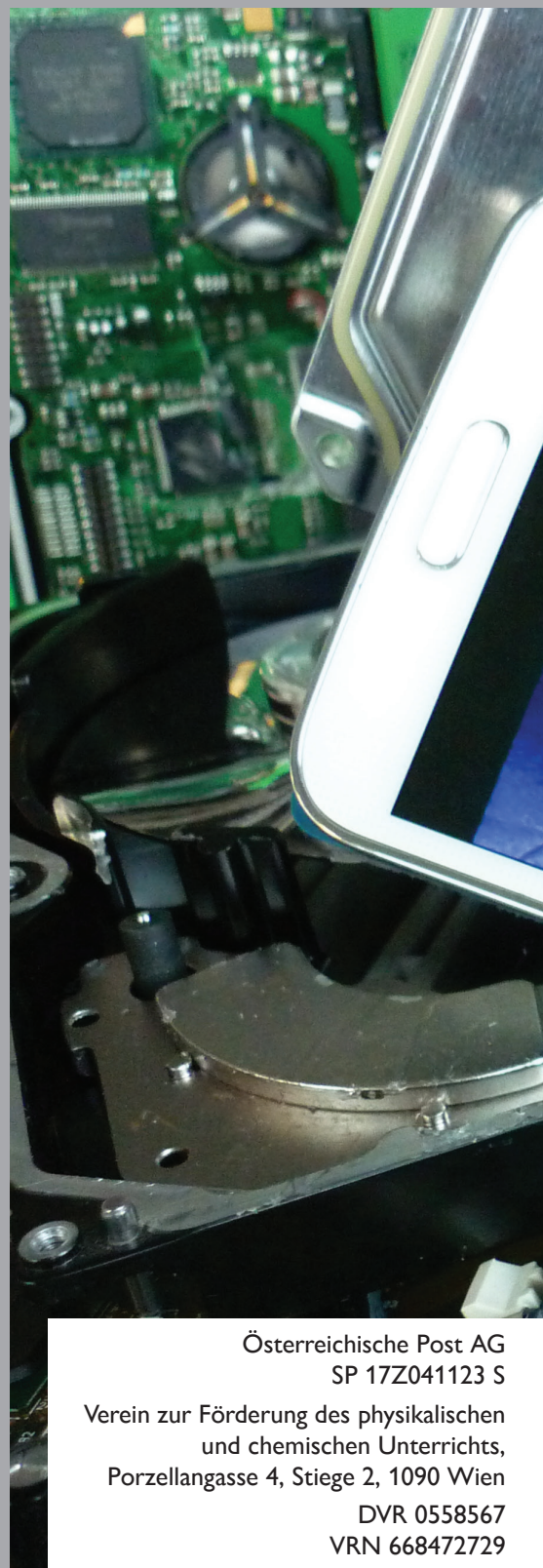
### Fortbildungswoche 2023 – Anmeldung schon im MAI!

Die Fortbildungswoche 2023 wird vom 20.-22.2.2023 stattfinden. Die PH-Anmeldung dafür findet bereits im Mai 2022 statt. Wir bitten um zahlreiche Anmeldungen. „77. Fortbildungswoche Plus Lucis“ ist unter der Lehrveranstaltungs-Nummer 3023CWB146 immatrikulierbar,

[https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/284734?ctx=design=ca;lang=de&scrollTo=toc\\_overview](https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/284734?ctx=design=ca;lang=de&scrollTo=toc_overview)

der VS-Nachmittag: „77. Fortbildungswoche Plus Lucis. Physik und Chemie in der Volksschule“ unter der LV-Nummer 3023CWB169

[https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/285158?ctx=design=ca;lang=de&scrollTo=toc\\_overview](https://www.ph-online.ac.at/ph-wien/ee/ui/ca2/app/desktop/#/slc.tm.cp/student/courses/285158?ctx=design=ca;lang=de&scrollTo=toc_overview)



Österreichische Post AG  
SP 17Z041123 S

Verein zur Förderung des physikalischen  
und chemischen Unterrichts,  
Porzellangasse 4, Stiege 2, 1090 Wien  
DVR 0558567  
VRN 668472729