

## Seltenerdelemente – historische und fachdidaktische Analyse

### Von der Stoffgeschichte...

Die Seltenerdelemente (SEE) umfassen 17 Elemente: Scandium, Yttrium und die Elemente Lanthan bis Lutetium. Mit Ausnahme des radioaktiven Promethiums kommen sie in der Natur vor und treten in Mineralien miteinander vergesellschaftet auf, da sie sich chemisch sehr ähneln. Dies ist auch der Grund, warum sie technisch schwer voneinander zu trennen sind (vgl. Bock & Fischer, 2004, 67ff.). Der historisch einzuordnende Terminus Seltene Erden, rührt daher, dass zunächst die Oxide (Erden) der SEE beschrieben wurden. In diesem Zusammenhang ist „selten“ nicht im Sinne von „rar“ zu verstehen, wenngleich aktuell die SEE zu den kritischen Rohstoffen gezählt werden. Selbst das seltenste SEE, Thulium, tritt in der Erdkruste häufiger auf als Iod und Silber (Trueb, 2005, 111). Eingedenk der Tatsache, dass die SEE der Forschung lange Rätsel aufgaben, träfe eher die Konnotation „seltsam“ zu. So berichtet Sir William Crookes 1902 (andere Publikationen geben das Jahr 1887 an): „Diese Elemente verblüffen uns in unseren Untersuchungen, widersprechen unseren Annahmen und verfolgen uns in unseren Träumen“ (Marschall & Holdinghausen, 2018, 11; Bünzli & Pecharsky, 2012, 9). Aus diesem Grunde währte die Entdeckungsgeschichte der SEE mehr als 100 Jahre – eine Zeitspanne mannigfaltiger Missverständnisse und Irrtümer. Die Stoffgeschichte der SEE ermöglicht sowohl historisch-genetische als auch historisch-problemorientierte Unterrichtskonzeptionen, ohne dabei Selbstzweck zu sein. Exemplarisch können zum einen Stoff-Eigenschafts-Beziehungen erarbeitet werden und zum anderen wird über den Blick auf die historische Forschung diese als Kulturleistung gewürdigt, was letztendlich zu einem tieferen Verständnis von Nature of Science (NOS) führt. Im Hinblick auf Vorgaben der Kerncurricula für die gymnasiale Oberstufe im Fach Chemie, können die Kompetenzbereiche Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und besonders die Bewertung und Reflexion in einem fachübergreifenden Kontext erworben werden (vgl. Reiners, 2017).

### ...zum Unterrichtsverfahren Stoffgeschichten

Bis in die 1990er-Jahre hinein gab es im Wesentlichen nur drei Anwendungsbereiche für die SEE: Katalysatoren für das Erdöl-Cracken (31 %), Keramik (29 %) und Metallurgie (37 %). Mittlerweile ist das Spektrum für SEE-basierte Anwendungen sehr viel breiter. SEE spielen eine zentrale Rolle als Bestandteil von Dauermagneten, die in nachhaltigen Technologien wie Windkraft und E-Mobilität zum Einsatz kommen, in der Diagnostik und Medizin zur Krebstherapie sowie in der Elektrotechnik (Kondensatoren, Sensoren) (Adler & Müller, 2015, 73f.). Die Lebenswelt von Schülerinnen und Schülern betreffen sie unmittelbar, da weder Smartphones, Tablets noch Kopfhörer ohne die SEE-haltigen Verbindungen funktionieren würden. Trotz des deutlichen Lebensweltbezugs liegen für den Unterricht bislang nur wenige fachdidaktische Beiträge zu SEE vor (Reiners 2017; Reiners 2003). Dabei sind zahlreiche thematische Vernetzungen mit dem Konzept einer Bildung für nachhaltigen Entwicklung über die Aspekte Kritikalität, Recycling und Substitution von SEE realisierbar. Vermittels des Unterrichtsverfahrens „Stoffgeschichten“ (Schmidt & Reller, 2012) eröffnen sich, neben Zugängen zum Kompetenzbereich Fachwissen (Vorkommen, Reserven, Eigenschaften der SEE), Möglichkeiten der Entwicklung eines naturwissenschaftlichen Problembewusstseins bei den Jugendlichen, bezogen auf technische Entwicklungen, Substitutionsmöglichkeiten, ökonomische und ökologische Aspekte, geopolitische Einflussfaktoren etc. – und damit ein Zugang zur multidimensionalen Scientific Literacy.

### **Problemstellungen und Methoden des Forschungsvorhabens**

*Fokus Stoffgeschichte:* Im Rahmen des Forschungsvorhabens erfolgten bisher Recherchen zu und Analysen von Literaturquellen zur Entdeckungsgeschichte der SEE. Die Primärliteratur und Laborjournale lieferten konkrete Eindrücke von den Arbeitsweisen der Chemiker. Bei dieser Sichtung wurden Unklarheiten und Widersprüche in den Quellen augenscheinlich, zudem wurde deutlich, dass zentrale Schlüsselmomente in der Forschungsgenese, wie beispielsweise die Verwechslung von Erbium und Terbium, nur kurz (Pilgrim, 1951, 275) oder überhaupt nicht (Trivonov, 1984) erwähnt wurden. Daher wird im Forschungsvorhaben darauf hingezielt, vermittels einer Analyse von Originalarbeiten wie Briefwechseln, die fruchtbaren Momente naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung widerspruchsfrei und pointiert darzulegen. In dem nachfolgenden Abschnitt werden hierzu ausgewählte Befunde dargelegt. Bei der Sichtung von Literaturquellen ergaben sich auch Beschränkungen, da Originalarbeiten von Marignac und Cleve nur in französischer bzw. schwedischer Sprache vorliegen, und nur eine kleine Anzahl an Originalarbeiten von Nils Johan Berlin zugänglich ist. Dies macht weiterführende Recherchen notwendig.

*Fokus Unterrichtsverfahren Stoffgeschichten:* In Bezug auf die Implementierung von SEE in den Schulunterricht stellt sich die Frage, wie Unterricht so gestaltet werden kann, dass neben dem Erwerb von Faktenwissen über die SEE und ihre Anwendungen, der Aspekt der Nachhaltigkeit und die Förderung der naturwissenschaftsbezogenen Bewertungskompetenz in den Mittelpunkt gerückt werden können. Es ist anzunehmen, dass die Schülerinnen und Schüler anhand von Kritikalitätsanalysen erfahren können, dass die Interdependenz von quantitativen und qualitativen Daten und Fakten eine angemessene Bewertungsgrundlage für die Kritikalität von Stoffen bietet. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird deshalb ein Unterrichtsgang nach den Leitlinien des Unterrichtsverfahrens Stoffgeschichten entwickelt, gemeinsam mit einem Chemiekurs erprobt und in qualitativer Begleitforschung evaluiert.

### **Ausgewählte Fallbeispiele aus den Quellenanalysen und fachdidaktische Implikationen**

*Beispiel 1:* Die Durchsicht der Literatur zur Entdeckungsgeschichte legt offen, dass mehrere Chemiker bei der Gadolinit-Untersuchung zu verschiedenen, uneinheitlichen Ergebnissen kamen. Im Jahr 1796 konstatierte Gadolin, nach eingehenden Untersuchungen von Ytterbit, es bestehe zu 31 % aus Kieselerde, 19 % Alaunerde, 12 % Eisenkalk und 38 % einer unbekanntem Erde, also dem Oxid eines neuen Elements (vgl. Gadolin, 1796, 321). Ytterbit wurde später zu Ehren Gadolins in Gadolinit umbenannt, wie bei Klaproth nachzulesen ist: „Herr Gadolin hat den Verdienst, diese neue Erde im Gegenwärtigen Fossil zuerst entdeckt zu haben; weshalb ich auch, mit mehreren Naturforschern, dessen Namen Gadolinit der ersteren Benennung Ytterbit vorziehe“ (Klaproth, 1802, 54). 1799 bestätigte der Schwede Ekeberg Gadolins Ergebnis. Auch er fand neben Kieselerde (25 %), Eisenoxid (18 %) und Thonerde (4,5 %) eine bis dato noch unbekanntem Erde (47,5 %) (vgl. Ekeberg, 1799, 192). Die „Yttererde“ wurde zudem durch den Deutschen Klaproth (59,75 %) und den Franzosen Vauquelin (35 %) bestätigt. Irrtümlicherweise waren alle vier Forscher von Aluminiumoxid anstatt von Berylliumoxid ausgegangen. Nach weiteren Untersuchungen nahm Ekeberg eine Korrektur vor, indem er die Zusammensetzung des Gadolinitis folgendermaßen angab: 23 % Kieselerde, 16,5 % Eisenoxid, 4,5 % Beryllerde und 55,5 % Yttererde (vgl. Gilbert, 1803, 247). Im selben Beitrag wird die Problematik der Verwechslung von Berylliumoxid mit Aluminiumoxid ausdrücklich erwähnt: „Beryllerde haben weder Vauquelin noch Klaproth im Gadolinit gefunden. Doch lässt sich Ekeberg's Angabe nicht bezweifeln, da er die Unterschiede beider Erden sehr wohl kannte“ (ebd., 249). Für den Unterricht bieten solche Bekundungen fruchtbare Lernanlässe. Denn im Gegensatz zur Darlegung banaler Genie- und Heldengeschichten (vgl. die Kritik bei Hofheinz, 2008, 131), wird die Frage aufgeworfen, wie Ekeberg seinen Fehler feststellte und folglich die Fehlbarkeit von Forschern erwo- gen.

*Beispiel 2:* Aus unserer heutigen Sicht unterhaltsame Episoden sind dem Briefwechsel zwischen Berzelius und Wöhler zu entnehmen. Über die Entdeckung des Lanthans schrieb Berzelius: „Ich glaube mich zu erinnern, dass ich in meinem letzten Brief Dir erzählte, dass einer von Sefströms Schülern, Erdmann, in einem Mineral aus Norwegen ein neues Metall entdeckt zu haben meint. [...] Habe ich aber in meinem letzten Briefe etwas über Mosanders neue Erde erwähnt? Sie ist vollständig konstatiert. Als ich Mosander Erdmanns kleines Probchen zeigte, kam er damit heraus, dass auch er etwas Neues im Cerit gefunden hätte. Obleich wir uns täglich sehen, hatte er mir doch nie vorher mit einem halben Atemzug etwas darüber verraten“ (Wallach, 1901, 89). In einem weiteren Brief an Berzelius haderte Wöhler mit dem Namen Didymium: „Was ich nämlich vorzuschlagen habe ist: eine Änderung des Namens Didymium. Verzeih mir, dass ich an einem Namen, der vielleicht von Dir, dem glücklichsten aller Namenmacher erfunden worden ist, etwas auszusetzen habe. Aber dieser Namen will mir durchaus nicht gefallen [...] Es ist in dem Klang für ein deutsches Ohr so zu sagen etwas Kindisches, etwas Läppisches“ (ebd., 321). – Bei der Erarbeitung solcher Fälle lernen die Schülerinnen und Schüler, dass Forschung eine Kulturleistung ist, die im wissenschaftlichen Austausch von Menschen erbracht wird, deren Gütekriterien ausgehandelt werden und sich im historischen Kontext auch verändern können. Damit rücken die forschenden Menschen wieder stärker in den Fokus des Nachdenkens über und des Erlebens der Wissenschaft Chemie.

*Beispiel 3:* Tragischer Art war der Prioritätsstreit zwischen Auer von Welsbach und Urbain, in dem auch die Konkurrenz zwischen der Habsburger-Monarchie und Frankreich zum Ausdruck kommt und der teils nationalistische Züge trug (vgl. Pohl, 2008, 69). 1910 schrieb Urbain in der Zeitschrift für Anorganische Chemie: „Es bleibt also von dem Artikel des Herrn Auer v. Welsbach nicht mehr übrig, als Betrachtungen, die zu verstehen mir schwer fallen, es sei denn, dass er so weit geht mich eines bloßen Abschreibens zu beschuldigen. Auf eine solche Beschuldigung könnte ich nur dann antworten, wenn sie präzisiert wäre“ (Urbain, 1910, 241). Dieser Streit wurde erst nach dem Ersten Weltkrieg beigelegt. Eine Kommission, in der allerdings kein deutscher oder österreichischer Vertreter zugelassen war, entschied zugunsten Urbains. – Anhand solcher und ähnlicher Fälle erfahren die Schülerinnen und Schüler, dass die Chemie eine politische Dimension haben kann. Ihnen wird damit ein fachdidaktischer Zugang zur multidimensionalen Scientific Literacy geboten.

### **Ausblick**

Während Deng Xiaoping die Vorkommen an SEE seines Landes mit den Ölvorkommen der arabischen Welt verglich und die Japaner sie als Vitamine der Industrie bezeichneten, fristen die SEE in der Schule ein Schattendasein. Schullehrbücher erwähnen sie oft überhaupt nicht, obwohl sie durch ihre Anwendungen in Smartphones, Kopfhörern, Tablets usw. längst in der Lebenswelt von Jugendlichen angekommen sind. Curriculare Innovationen wären somit sehr wünschenswert. Sie lassen sich legitimieren, in Hinblick auf die Option einer Anbahnung von naturwissenschaftsbezogenen Kompetenzen für die Partizipation an einer an Fortschritt und Nachhaltigkeit orientierten Gesellschaft. Das vorliegende Forschungsvorhaben zielt in diese Richtung via die Stoffgeschichte der SEE und Stoffgeschichten von Schülerinnen und Schülern über die SEE. Aktuell wird eine Unterrichtsreihe mit einem Chemiekurs des Ludwig-Georgs-Gymnasiums in Darmstadt erprobt.

**Literatur**

- Adler, B. & Müller, R. (2014). *Seltene Erdmetalle. Gewinnung, Verwendung und Recycling*. Ilmenau: Univ.-Verl. Ilmenau (Berichte aus der Biomechatronik, 10).
- Altenberger, U. & Oberhänsli, R. (2012). Vom Atom zum Hightec-Produkt. Minerale der Seltenerdelemente als Rohstoffe. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule* 61(7).
- Bock, R. & Fischer, W. (2004). *Die Trennung der Seltenerdelemente und anderer Gemische*. In memoriam Werner Fischer 1902 - 2001.
- Bünzli, J.-C. G. & Pecharsky, V. K. (2012). *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. Including Actinides*. Burlington: Elsevier Science.
- Eckeberg, A. (1799). Ferne Untersuchungen der schwarzen Steinart von Ytterby und der, in derselben gefundenen eigenen Erde. *Allgemeines Journal der Chemie*, 187-195.
- Emsley, J. (2002). *Nature's building blocks. An A-Z guide to the elements. Repr. (with corr.)*. Oxford: Oxford Univ. Press.
- Enghag, P. (2004). *Encyclopedia of the elements. Technical data, history, processing, applications*. Weinheim: Wiley-VCH.
- Figurovskij, N. A. (1982). *Die Entdeckung der chemischen Elemente und der Ursprung ihrer Namen*. Köln: Deubner.
- Gadolin, J. (1796). Von einer schwarze, schweren Steinart aus Ytterby Steinbruch in Roslagen in Schweden. *Chemische Annalen für die Freunde der Naturlehre, Arzneigelahrtheit, Haushalstkunst und Manufakturen*, 313-329.
- Gilbert, L. W. (1803). Wesentliche Verschiedenheiten der Yttererde von der Beryllerde. *Annalen der Physik* (14), S. 247-249.
- Herzfeld, J. & Korn, O. (2012). *Chemie der seltenen Erden. [Nachdruck d. Originals 1901]*. Bremen: Unikum.
- Hofheinz, V. (2008). *Erwerb von Wissen über „Nature of Science“*. Dissertation Universität Siegen.
- Klaproth, M. H. (1802). *Beiträge zur chemischen Kenntniss der Mineralkörper*: Decker und Compagnie. Heinrich August Rottmann.
- Marschall, L. & Holdinghausen, H. (2018). *Seltene Erden. Umkämpfte Rohstoffe des Hightech-Zeitalters*. München: oekom.
- Pykkö, P. & Orama, O. (1996). What did John Gadolin actually do? In C. H. Evans (Hrsg.), *Episodes from the history of the rare earth elements*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers (Chemists and chemistry, 15).
- Pilgrim, E. (1951). *Entdeckung der Elemente mit Biographien ihrer Entdecker*. Stuttgart: Mundus-Verlag.
- Pohl, W. G. (2008). Carl Auer von Welsbach als Konkurrent von Georges Urbain. In P. Schuster (Hrsg.), *Carl Freiherr Auer von Welsbach (1858-1929). Symposium anlässlich des 150. Geburtstages, Wien, 4. Juni 2008 (59-69)*. Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Precht, M. & Schmidt, R. (2019). Shaping the future with Rare Earth Elements – Model Experiments for “damage monitoring” with [Eu(DBM)<sub>3</sub>TEA] and for Recycling Neodym(III) Sulfate from Hard Disc Magnets. *World Journal of Chemical Education* 7(2), 90-95.
- Reiners, Ch. S. (2017). Kritische Rohstoffe! – Kritische Unterrichtsstoffe? Eine fachdidaktische Reflexion am Beispiel der Seltene Erden. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 28(161), 8-12.
- Reiners, Ch. S. (2003). Die Scandiumgruppe (3. Gruppe, III. Nebengruppe). In W. Glöckner, W. Jansen, & R. G. Weissenhorn (Hrsg.), *Chemie der Gebrauchsmetalle: Bd. 5. Handbuch der experimentellen Chemie Sekundarbereich II (1-27)*. Köln: Aulis-Verl. Deubner.
- Schmidt, C. & Reller, A. (2012). Bewerten lernen durch Stoffgeschichten und Kritikalitätsanalysen. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 23(127), 44-47.
- Trivonov, D. T. (1984). *The price of truth. The story of Rare-Earth-Elements*. Moskau: Mir Publishers.
- Trueb, L. F. (2005). *Die chemischen Elemente. Ein Streifzug durch das Periodensystem*. Stuttgart: Hirzel.
- Urbain, G. (1910). Lutetium und Neoytterbium oder Cassiopeium und Aldebaranium. *Zeitschrift für Anorganische Chemie* 68(1), 236-242.
- Wallach, O. (1901). *Briefwechsel zwischen J. Berzelius und F. Wöhler*. Im Auftrage der königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mit einem komment. Leipzig: Engelmann.
- Weeks, M. E. & Leicester, H. M. (Hrsg.) (1960). *Discovery of the elements*. Easton (Pennsylvania): Journal of Chem. Education.