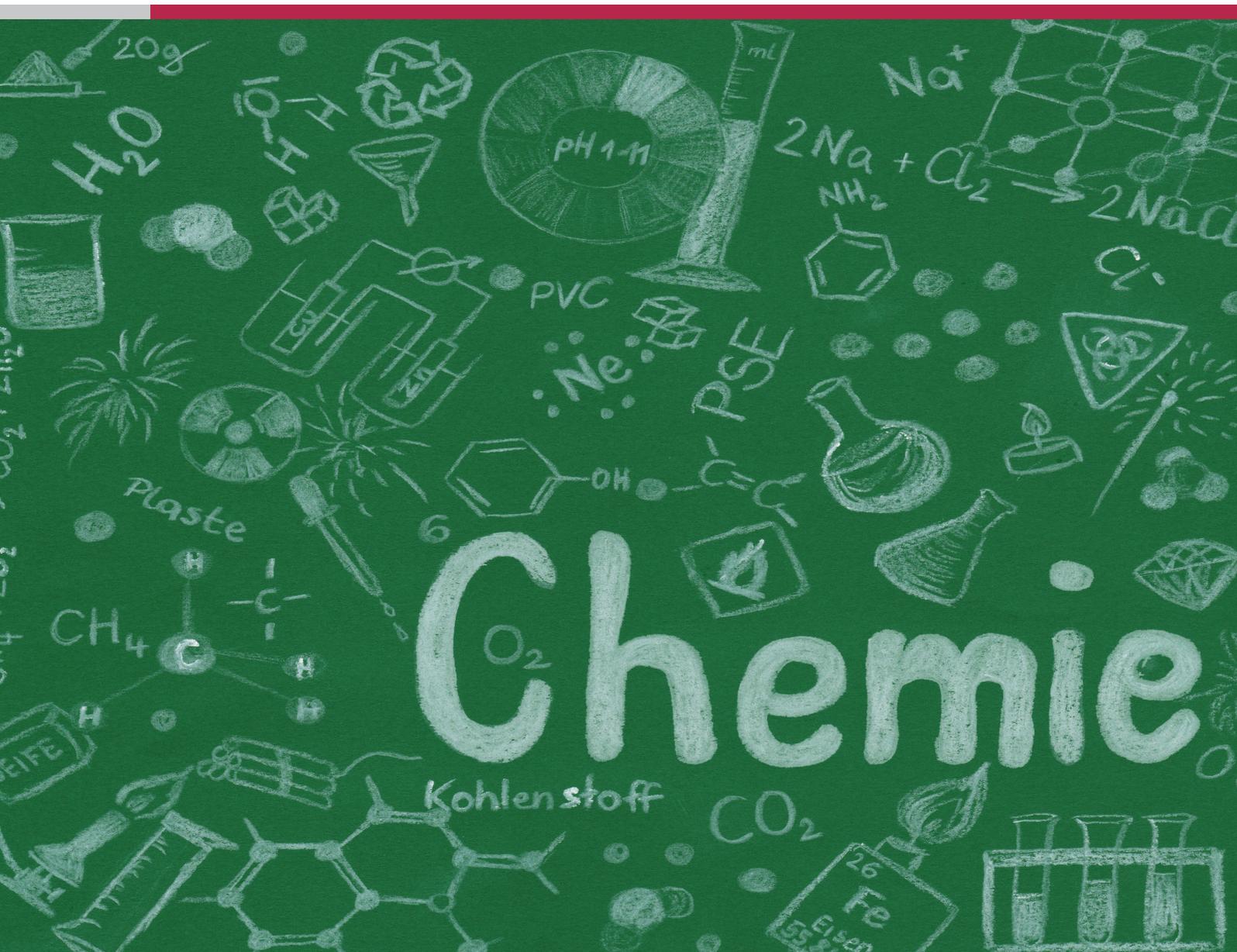




MOBILE ENERGIETRÄGER

Handreichung zur Umsetzung des Lehrplans Chemie – Themenfeld 12



In den PL-Informationen werden Ergebnisse veröffentlicht, die von Lehrerinnen und Lehrern aller Schularten unter Einbeziehung weiterer Experten erarbeitet und auf der Grundlage der aktuellen pädagogischen oder fachdidaktischen Diskussion für den Unterricht oder die Schulentwicklung aufbereitet wurden. Mit ihnen werden Anregungen gegeben, wie Schulen bildungspolitische Vorgaben und aktuelle Entwicklungen umsetzen können.

Die PL-Informationen erscheinen unregelmäßig. Unser Materialangebot finden Sie im Internet auf dem Landesbildungsserver unter folgender Adresse:

<https://pl.bildung-rp.de/publikationen>

Die vorliegende Veröffentlichung wird gegen eine Schutzgebühr von 6,00 Euro zzgl. Versandkosten abgegeben. Bestellungen richten Sie bitte an das Pädagogische Landesinstitut:

bestellung@pl.rlp.de

IMPRESSUM

Herausgeber:

Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz
Standort Bad Kreuznach
Röntgenstraße 32
55543 Bad Kreuznach
pl@pl.rlp.de

Redaktion:

Barbara Dolch, Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz

Skriptbearbeitung:

Ute Nagelschmitt, Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz

Titelbild:

Andrea Bürgin, Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz

Erscheinungstermin: November 2021

© Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz 2021

ISSN 2190-9148

Soweit die vorliegende Handreichung Nachdrucke enthält, wurden dafür nach bestem Wissen und Gewissen Lizenzen eingeholt. Sollten dennoch in einigen Fällen Urheberrechte nicht berücksichtigt worden sein, wenden Sie sich bitte an das Pädagogische Landesinstitut Rheinland-Pfalz.

INHALT

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Themenfeld 12: Mobile Energieträger | 3 |
| 1.1 | Vorüberlegungen | 3 |
| 1.2 | Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene | 4 |
| 1.3 | Konzept- und Kompetenzentwicklung | 5 |
| 2 | Vom Lehrplan zum kompetenzorientierten Unterricht | 9 |
| 2.1 | Die Stellung des Themenfeldes 12 im Lehrplan | 9 |
| 2.2 | Die Themenfeld-Doppelseite | 11 |
| 2.3 | Von der Themenfeld-Doppelseite zur Unterrichtsplanung | 13 |
| 2.4 | Überblick über die Kontexte des Themenfeldes | 19 |
| 2.5 | Differenzierungsmöglichkeiten | 21 |
| 3 | Zu den Lerneinheiten | 22 |
| 3.1 | Lerneinheit 1: Bau und Funktionsweise galvanischer Elemente | 24 |
| 3.1.1 | Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft | 26 |
| 3.1.2 | Primärelemente (Primärzellen) | 28 |
| 3.1.3 | Sekundärelemente (Sekundärzellen, Akkumulatoren) | 37 |
| 3.2 | Lerneinheit 2: Die Redoxreihe nutzen zur Entwicklung mobiler Energieträger | 42 |
| 3.2.1 | Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft | 43 |
| 3.2.2 | Die Optimierung galvanischer Elemente im Unterricht | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | Lerneinheit 3: Energie mobiler Energieträger | 51 |
| 3.3.1 | Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft | 52 |
| 3.3.2 | Kenngößen galvanischer Elemente im Unterricht | 59 |
| 3.4 | Lerneinheit 4: Nachhaltigkeit bei Bau und Nutzung von galvanischen Elementen | 60 |
| 3.4.1 | Das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung | 66 |
| 3.4.2 | Kriterien der nachhaltigen Entwicklung im Unterricht | 67 |
| 4 | Zusammenfassung | 73 |
| 4.1 | Üben und Vernetzen | 73 |
| 4.2 | Mögliche Unterrichtsgänge im Überblick | 74 |
| 4.3 | Liste der verfügbaren Muster-Gefährdungsbeurteilungen zum Themenfeld 12 | 78 |
| | Literaturverzeichnis | 79 |
| | Autorinnen und Autoren | 80 |

1 THEMENFELD 12: MOBILE ENERGIETRÄGER

1.1 Vorüberlegungen

Der aktuelle Lehrplan im Fach Chemie für die Klassen 7 bis 9/10 der weiterführenden Schulen des Landes Rheinland-Pfalz schließt konzeptionell an den Lehrplan des Faches Naturwissenschaften in der Orientierungsstufe an.

Die drei Säulen des naturwissenschaftlichen Unterrichts Kompetenzen, Basiskonzepte und Kontexte bilden auch die Stützpfeiler des Chemieunterrichts und erfordern eine darauf aufbauende unterrichtliche Umsetzung.

Die „Aspekte der Chemie“, die sich aus ihrer Bedeutung für den Menschen ableiten, begründen den bildenden Charakter des Unterrichtsfaches Chemie und sind die Grundlage für die Themenfelder. Sie bieten eine Orientierung für die Auswahl der Kontexte.

In dieser Handreichung geht es um die Ausgestaltung des Unterrichts zum Themenfeld 12 „Mobile Energieträger“ gemäß der Intentionen des Lehrplans. Dazu werden die Themenfeld-Doppelseite vorgestellt und exemplarisch mögliche Kontexte und Lerneinheiten ausgeführt.

Lerngruppen, denen weniger Zeit zur Verfügung steht, integrieren ausgewählte Inhalte bzw. zentrale Elemente des Themenfeldes 12 in andere Themenfelder.

Die Leitfragen lauten: „Wie lese ich das Themenfeld?“, „Welche Stellung hat das Themenfeld im Gesamtlehrplan?“ und „Wie kann ich dieses Themenfeld den Lehrplananforderungen entsprechend konkret im Unterricht umsetzen?“

Da aus ökologischen und ökonomischen Gründen nur ein kleiner Teil der Materialien abgedruckt wird, stehen die gesamte Handreichung sowie die Materialien mit möglichen Lösungen auf folgenden Seiten online zur Verfügung:

Bildungsserver: <https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/faecher/chemie/unterricht.html>

Mediathek des Schulcampus: <https://www.schulcampus-rlp.de/dashboard>

1.2 Wechsel zwischen Stoff- und Teilchenebene

Ein wesentliches Merkmal des Faches Chemie ist der Wechsel zwischen der makroskopischen (Stoffebene) und der submikroskopischen Ebene (Teilchenebene). (Vgl. Lehrplan, S. 57-58.)

Auf der **Stoffebene** geht es um Metalle und ihre Metallionen-Lösungen in wässrigen und nichtwässrigen Systemen sowie gelösten Sauerstoff in wässrigen Systemen, die für moderne kommerzielle elektrochemische Energiespeichersysteme von Bedeutung sind.

Dabei werden Kombinationen aus verschiedenen Halbzellen verglichen und die elektrochemische Spannungsreihe in Ausschnitten ermittelt.

Im Zuge einer Optimierung wird der aktuell verbreitetste Akkumulator, der Lithium-Ionen-Akku in einem Modellversuch vorgestellt.

Auf der **Teilchenebene** werden die Elektronenübertragungen der oben genannten Redoxsysteme betrachtet. Beispielsweise wird das relativ unedle Metall Zink zu Zink(II)-Ionen oxidiert und die Elektronen dienen zur Reduktion von im Wasser gelösten Sauerstoffmolekülen zu Hydroxid-Ionen.

Die Darstellungen dieser Übertragungen erfolgen mit Formelgleichungen, die über das Verständnis der Teilchenebene möglich werden. Dies führt zu einer kontinuierlichen Entwicklung auf beiden Ebenen. Durch den permanenten Wechsel wird Vernetzung möglich, was nun zum Abschluss der Sekundarstufe I deutlich wird. Die Deutung von Phänomenen auf der Teilchenebene ist zu einem Prinzip von Chemieunterricht geworden.

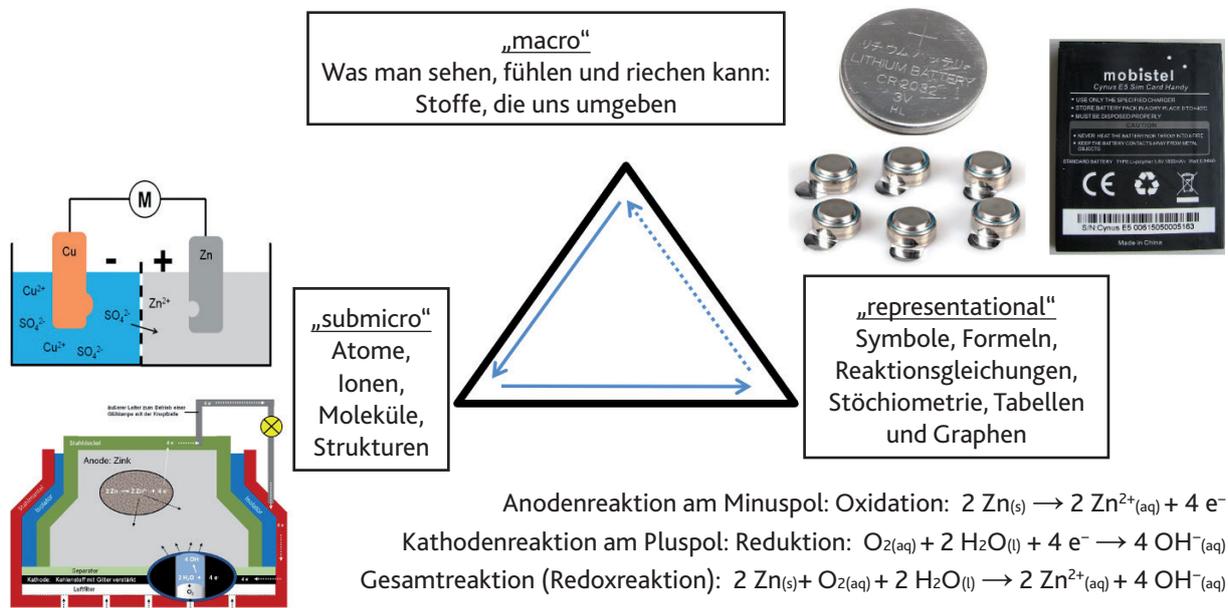


Abb. 1: nach Johnstone-Dreieck¹ (erweiterte Abbildung)

1 Springer-Lehrbuch Chemiedidaktik, Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen; bearbeitet von Hans-Dieter Barke, 1. Auflage 2006, S. 31

1.3 Konzept- und Kompetenzentwicklung

Die thematischen Schwerpunkte im Lehrplan Chemie sind so gewählt, dass parallel die Kompetenzentwicklung und die Entwicklung der Basiskonzepte möglich sind (vgl. Lehrplan Kapitel 5.3, „Zur Arbeit mit dem Lehrplan Chemie“). Die im Themenfeld 12 angestrebte Kompetenzentwicklung der Schülerinnen und Schüler ist im Rahmen des Unterrichts verbindlich zu ermöglichen.

Das Themenfeld 12 mit dem Aspekt „Mit Stoffen Zukunft gestalten“ bietet hierbei Gelegenheit, sich ausgehend von galvanischen Elementen des Alltags, wie der Zink-Luft-Knopfzelle, das in den Themenfeldern 1-7 erworbene Wissen des **Basiskonzepts Teilchen-Materie/Stoff** anzuwenden.

Die Schülerinnen und Schüler betrachten Elektronenübertragungen und wenden das Donator-Akzeptor-Prinzip an (Weiterentwicklung des **Basiskonzepts Chemische Reaktion**). Durch die **Verschränkung zwischen Stoff- und Teilchenebene** vertiefen die Schülerinnen und Schüler Erklärungszusammenhänge und sind in der Lage, diese in Formelgleichungen auszudrücken.

Anknüpfend an die bisherigen Erkenntnisse aus dem **Basiskonzept Energie** (im Fach Physik und im Fach Chemie in den Themenfeldern 1, 3 und 4) wird dieses um die Speicherung von Energie durch elektrochemische Systeme erweitert. Dabei finden in dieser Handreichung bei den Formulierungen sowohl das Energieträgerkonzept als auch das Energieformenkonzept Berücksichtigung.

In diesem Themenfeld bauen die Schülerinnen und Schüler ihre experimentellen Fähigkeiten und ihre Kompetenzen auf dem Gebiet der **Erkenntnisgewinnung** aus, indem sie Untersuchungen zu galvanischen Elementen hypothesengeleitet planen, auswerten und auf praktisch-experimenteller Ebene optimieren.

Sie **kommunizieren** mit der entsprechenden Fachsprache und wenden ihr erworbenes Wissen im Zusammenhang mit der Verwendung von Batterien und Akkumulatoren an. Darauf basierend **bewerten** sie den Einsatz von elektrochemischen Speichern im Vergleich zu fossilen Brennstoffen und diskutieren die Vor- und Nachteile.

| Aspekt | Themenfeld | TF | TMS | SEF | CR | E | Stoffebene | Teilchenebene |
|-------------------------------------|---------------------------------------|----|-----|-----|----|---|---|---------------------------------|
| Was ist Stoff? | Chemikers Vorstellung von den Stoffen | 1 | ■ | | ■ | | Vielfalt der Stoffe | Atom, Massenerhaltung |
| Stoffe gewinnen | Von der Saline zum Kochsalz | 2 | ■ | ■ | | | Kochsalz (Salze) | Ionen, Ionenbindung |
| Stoffe nutzen | Heizen und Antreiben | 3 | ■ | | ■ | ■ | Wasserstoff, Methan (u. a. Kohlenstoffverbindungen) | Moleküle, Elektronenpaarbindung |
| Stoffe gewinnen | Vom Erz zum Metall | 4 | ■ | ■ | ■ | | Erze, Metalle | Metallbindung |
| Stoffe nutzen | Sauber und schön | 5 | ■ | ■ | | | Wasser, Kohlenwasserstoffe, Alkanole | Dipol, Elektronenpaarbindung |
| | Säuren und Laugen | 6 | ■ | ■ | ■ | | Säuren und Laugen | Ionen, Donator-Akzeptor |
| Stoffe neu herstellen | Schöne neue Kunststoffwelt | 7 | ■ | ■ | | | Polymere | Makromoleküle |
| | Vom Reagenzglas zum Reaktor | 8 | | | ■ | ■ | Produkte der chem. Industrie (nach Wahl) | Je nach gewähltem Stoff |
| Stoffe untersuchen | Den Stoffen auf der Spur | 9 | ■ | ■ | ■ | | Wässrige Lösungen | Ionen |
| Stoffe verantwortungsvoll handhaben | Gefährliche Stoffe | 10 | | ■ | ■ | ■ | Explosivstoffe, Giftstoffe | Je nach gewähltem Stoff |
| | Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima | 11 | | ■ | ■ | ■ | Kohlenstoffkreislauf | Moleküle, Ionen |
| Mit Stoffen Zukunft gestalten | Mobile Energieträger | 12 | ■ | | ■ | ■ | Metalle | Ionen, Donator-Akzeptor |

Abb. 2: Entwicklung der Basiskonzepte

TF = Themenfeld

TMS = Teilchen-Materie/Stoff

SEF = Struktur-Eigenschaft-Funktion

CR = Chemische Reaktion

E = Energiekonzept

Gefüllte Felder bedeuten:

Das entsprechende Basiskonzept wird eingeführt bzw. (weiter)entwickelt.

Felder mit Kästchen bedeuten:

Das entsprechende Basiskonzept wird genutzt bzw. angewandt.

| | |
|---|--|
| Teilkonzepte Teilchen-Materie/Stoff (TMS) | Themenfeld 12 |
| Materie/Stoff besteht aus Teilchen, die sich bewegen und miteinander wechselwirken. | Stoffe unterscheiden sich in ihrer Tendenz zur Elektronenabgabe (Oxidation) bzw. -aufnahme (Reduktion). In der Kombination zweier geeigneter Halbzellen entsteht ein galvanisches Element. |
| Der submikroskopische Bau der Stoffe wird mit Modellen beschrieben. | |
| Teilkonzepte Struktur-Eigenschaft-Funktion (SEF) | Themenfeld 12 |
| Die Eigenschaften der Stoffe bestimmen ihre Verwendung. | Bei der Auswahl geeigneter Stoffe zur elektrochemischen Energiegewinnung bzw. Energiespeicherung spielt die Verfügbarkeit, Massensparnis und die relative Lage in der Redoxreihe eine Rolle. |
| Stoffeigenschaften werden mit Teilchenmodellen gedeutet. | |
| Teilkonzepte Chemische Reaktion (CR) | Themenfeld 12 |
| Stoffumwandlungen werden modellhaft auf Veränderungen von Teilchen und Bindungen zurückgeführt. | Diese Elektronenübertragung ist durch Elektronenabgabe (Oxidation) und Elektronenaufnahme (Reduktion) gekennzeichnet und wird als Redoxreaktion bezeichnet. |
| In Donator-Akzeptor-Reaktionen werden Teilchen übertragen. | Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Elementen werden Elektronen nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip übertragen. |
| Chemische Reaktionen sind umkehrbar. | Chemische Reaktionen im Akkumulator sind umkehrbar. |
| Teilkonzepte Energie (E) | Themenfeld 12 |
| Die Energie wird mit Hilfe von Energieträgern transportiert. | Stoffe sind Energieträger. Bei chemischen Reaktionen entstehen neue Stoffe mit anderem Energiegehalt. |
| Meistens wird bei der Nutzung von Energie der Energieträger gewechselt. | Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Elementen wird der Energieträger gewechselt. Dies macht sich am elektrischen Stromfluss bemerkbar. |

2 VOM LEHRPLAN ZUM KOMPETENZORIENTIERTEN UNTERRICHT

2.1 Die Stellung des Themenfeldes 12 im Lehrplan

Der Aspekt 7 „Mit Stoffen Zukunft gestalten – Vom Status quo zu den Herausforderungen der Zukunft“ stellt einen zentralen, gesellschaftlich bedeutenden Aspekt der Chemie dar.

Was kann der Chemieunterricht leisten, damit die Erkenntnisse der Chemie als relevant für die verantwortungsvolle Planung der eigenen und Teilhabe an der gesellschaftlichen Zukunft gesehen werden? Neue Energieträger, Nanotechnik, Food- und Drugdesign, neue Materialien und vieles mehr. Was ist der Beitrag der Chemie? Eine zentrale Frage ist die Versorgung mit elektrischer Energie. Dabei trägt die Chemie Lösungen für die Speicherung und den Transport oder die Mobilität von Energie bei.

Unter diesem Aspekt begründet sich systematisch das Themenfeld „Mobile Energieträger“.

Die folgende Grafik verdeutlicht den Schwerpunkt im Themenfeld, der auf dem Aspekt „Mit Stoffen Zukunft gestalten“ liegt, und weist Möglichkeiten in Bezug auf die übrigen Aspekte aus.

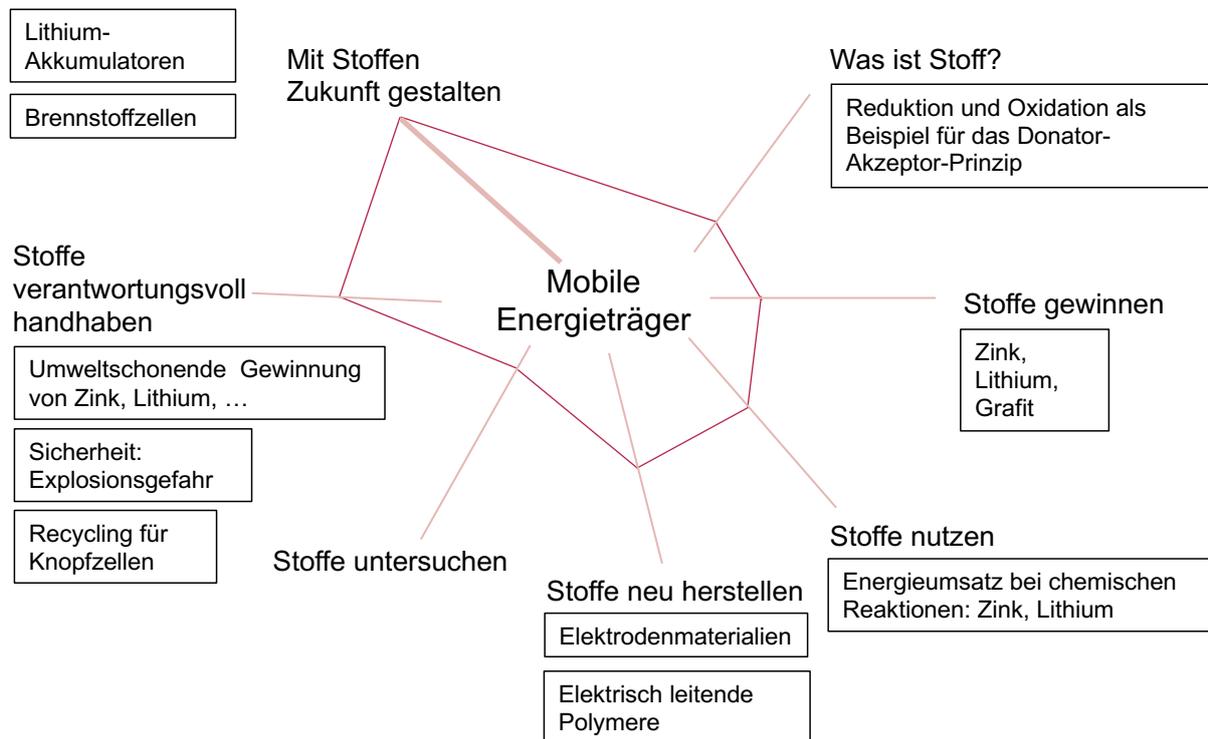


Abb. 3: Aspekte im Themenfeld 12

Auf der Stoffebene:

Die Stoffe aus dem Themenfeld 4, die Metalle, bilden eine Basis, auf der die galvanischen Halbzellen aufgebaut werden. Unedle Metalle (z. B. Zink) werden als Reaktionspartner mit zu reduzierenden Stoffen (z. B. Sauerstoff oder Ionen von edleren Metallen) kombiniert und die daraus resultierende elektrische Spannung als Maß für die Verwendbarkeit bzw. ihre Leistungsfähigkeit betrachtet. Die Erweiterung auf nichtwässrige Systeme ermöglicht die Verwendung von Lithium.

Bei vorausschauender Planung und absehbarer Zeitnot (insbesondere für die Berufsreife) bietet sich eine Integration zentraler Inhalte von Themenfeld 12 in Themenfeld 4 an.

Auf der Teilchenebene:

Im Lehrplan Chemie ist die Reihenfolge und der Inhalt der Themenfelder stark von der Entwicklung des Teilchenkonzepts bestimmt. Die Zuordnung von Stoffgruppen zu diesen Themenfeldern folgt fachdidaktischen Überlegungen.

In den vorangegangenen Themenfeldern wurde am Beispiel konkreter Stoffe oder Stoffgruppen ein differenziertes Teilchenmodell eingeführt und weiterentwickelt.

Die Handreichungen der Themenfelder 1-11 sowie ergänzende Onlinematerialien stehen auf folgenden Seiten zum Download bereit:

Bildungsserver: <https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/faecher/chemie/unterricht.html>

Mediathek des Schulcampus: <https://www.schulcampus-rlp.de/dashboard>

Das in den vorangegangenen Themenfeldern erworbene Konzeptwissen (Teilchen-Materie/Stoff und Chemische Reaktion) wird in Themenfeld 12 genutzt bzw. weiterentwickelt:

Die chemischen Reaktionen bei galvanischen Elementen werden als Oxidation, Reduktion und Elektronenübertragungen (Redoxreaktion) nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip beschrieben. Die Begriffe werden erstmals eingeführt oder, wenn sie im Themenfeld 4 bereits angelegt wurden, wieder aufgegriffen und genutzt.

Damit können Schülerinnen und Schüler das, in den vorangegangenen Themenfeldern eingeführte und verwendete, Chemische Dreieck nach Johnstone oder die „Drei-Ebenen-Darstellung“ vertiefend anwenden.

2.2 Die Themenfeld-Doppelseite

| TF 12: Mobile Energieträger | |
|---|--|
| <p>Gesellschaftliche Entwicklungen, insbesondere das Wachstum der Bevölkerung, gehen einher mit einem stetig steigenden Energiebedarf. Dies stellt Wissenschaft und Technik vor große Herausforderungen. In der Chemie werden innovative Produkte und Verfahren entwickelt, die u. a. die effiziente und ortsunabhängige Nutzung von Energie ermöglichen. Dazu gibt es zahlreiche Lösungsansätze. Die Schülerinnen und Schüler lernen das Prinzip der Nutzung von Redoxreaktionen für mobile Energiequellen kennen und erhalten einen Überblick über die Vielfalt der technischen Umsetzungen ohne vertiefte Betrachtungen von Elektrodenprozessen.</p> <p>Auf der Stoffebene stehen Materialkombinationen im Mittelpunkt, die Speicherung und „Mobilität“ von Energie ermöglichen. Auf der Teilchenebene führt dies zur Auseinandersetzung mit Elektronenübertragungsvorgängen.</p> | |
| <p>Kompetenzen:</p> <p>Schülerinnen und Schüler</p> <ul style="list-style-type: none"> • führen Versuche zu galvanischen Elementen und der Redoxreihe durch, protokollieren sie und werten sie aus, • wenden das Akzeptor-Donator-Prinzip auf verschiedene Redox-Reaktionen an, • nutzen Modellzeichnungen und Formelsprache zur Darstellung von Elektronenübergängen, • bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit) und Kriterien zur Nachhaltigkeit anwenden.. | |
| <p>Beitrag zur Entwicklung der Basiskonzepte:</p> <p><i>Auf der Stoffebene:</i></p> <p>Bei der Auswahl geeigneter Stoffe zur elektrochemischen Energiegewinnung bzw. Energiespeicherung spielt die Verfügbarkeit, Massensparnis und die relative Lage in der Redoxreihe eine Rolle. (SEF)</p> <p>Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Zellen wird der Energieträger gewechselt. Dies macht sich am elektrischen Stromfluss bemerkbar. (E)</p> <p><i>Auf der Teilchenebene:</i></p> <p>Stoffe unterscheiden sich in ihrer Tendenz zur Elektronenabgabe (Oxidation) bzw. -aufnahme (Reduktion). In der Kombination zweier geeigneter Halbzellen entsteht ein galvanisches Element. (TMS)</p> <p>Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Zellen werden Elektronen nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip übertragen.</p> <p>Diese Elektronenübertragung ist durch Elektronenabgabe (Oxidation) und Elektronenaufnahme (Reduktion) gekennzeichnet und wird als Redoxreaktion bezeichnet.</p> <p>Chemische Reaktionen im Akkumulator sind umkehrbar. (CR)</p> | <p>Fachbegriffe:</p> <p>Batterie</p> <p>Akkumulator</p> <p>Redoxreihe</p> <p>Oxidation, Reduktion</p> <p>galvanisches Element</p> <p>Elektronenübertragung</p> <p>Donator-Akzeptor-Prinzip</p> <p>Redoxreaktion</p> |

| Erschließung des Themenfeldes durch Kontextorientierung: | |
|--|--|
| <pre> mindmap (Mobile Energieträger) (Geschichte und Kultur) Dynamo Daniell-Experiment Von der Batterie im Kassettenrekorder zum Akku im Handy ... (Tägliches Leben und Gesundheit) Was kostet eine Kilowattstunde? Batterie oder Akku? MP3, Smartphone, Tablet und Co. Energie ohne Steckdose ... (Umwelt und Verantwortung) Energie sparen Entsorgung von Batterien Saubere Energie? ... (Technologie und Industrie) Lithium-Ionen-Akkumulator Energie sparende Technik? Miniaturisierung ... </pre> | |
| Differenzierungsmöglichkeiten: | |
| <p>G: Ein grundlegendes Verständnis des Donator-Akzeptor-Prinzips wird erreicht, wenn eine in einer einfachen Reaktionsgleichung dargestellte Redoxreaktion in ihre Teilprozesse zerlegt und modellhaft auf der Teilchenebene dargestellt werden kann.</p> <p>Einfache Untersuchungen galvanischer Elemente nach Anleitung sind ausreichend.</p> <p>V: Einem erweiterten Verständnis entspricht es, wenn Untersuchungen zu galvanischen Elementen theoriegeleitet entworfen und auf praktisch-experimenteller Ebene optimiert werden können.</p> | |
| Bezüge: | |
| <p>NaWi</p> <p>TF 5 Energieträger Sonne</p> | <p>Biologie</p> <p>TF 5 Energiefluss, Nachhaltigkeit</p> <p>TF 12 Biologische Anthropologie</p> |
| <p>Chemie</p> <p>TF 1 chemische Reaktion</p> <p>TF 2 Atombau, Ionen</p> <p>TF 3 Energieträger</p> <p>TF 4 Metalle</p> <p>TF 6 Donator-Akzeptor-Prinzip</p> <p>TF 8 Energiebilanz</p> | <p>Physik</p> <p>TF 4 Wechselwirkungen</p> <p>TF 5 Wechselwirkungen</p> <p>TF 6 Energieversorgung, Spannung</p> <p>TF 10 Wirkungsgrad</p> |

Abb. 4: Auszug aus „Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer – Chemie“, S. 88-89

2.3 Von der Themenfeld-Doppelseite zur Unterrichtsplanung

Das Themenfeld 12 wird, wie jedes Themenfeld des Chemielehrplans, in Form einer Themenfeld-Doppelseite dargestellt. In den einzelnen Rubriken finden sich neben den verbindlichen Teilen auf der linken Seite auch fakultative Elemente rechts.

| | | |
|---|--------------|---|
| Themenfeld-Titel | | Erschließung des Themenfeldes durch Kontextorientierung |
| Intention | | |
| Kompetenzen | | Differenzierungsmöglichkeit |
| Beitrag zur Entwicklung der Basiskonzepte | Fachbegriffe | Bezüge |

Die Planung beginnt mit der Auswahl eines den Intentionen des Themenfeldes entsprechend geeigneten Kontextes. Anregungen dazu geben die Rubriken der Themenfeld-Doppelseite, aktuelle Ereignisse, Medienberichte, regionale Gegebenheiten, die Sammlung in der Schule oder besondere Interessen von Lehrkräften und der Lerngruppe. Ein Kontext ist dann geeignet, wenn er

- einen Ausschnitt aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler darstellt,
- die Intentionen des Themenfeldes transportieren kann,
- Anlass bietet, die Basiskonzepte zu bearbeiten,
- Aktivitäten für die vorgesehene Kompetenzentwicklung ermöglicht,
- in einem angemessenen Zeitrahmen zu bearbeiten ist.

Wichtig ist die Gestaltung der einführenden Lernsituation. Sie soll den Unterricht zügig in die Richtung der vorgesehenen fachlichen Inhalte führen, d. h. die Gedanken und Fragen von Schülerinnen und Schülern in diese Richtung lenken. Nicht alle Äußerungen und Fragen lassen sich sinnvoll in den Chemieunterricht integrieren. Hier steuert die Lehrkraft, um die Inhalte in Beziehung zu anderen Naturwissenschaften und zu gesellschaftlichen Belangen zu setzen und gleichzeitig ein Ausufern zu verhindern.

Einführende Lernsituationen im Themenfeld 12 können sein:

- Präsentation von verschiedenen käuflichen Batterien und Akkumulatoren
- Geschichte der Entdeckung der galvanischen Elemente

Besonders interessant für den Chemieunterricht sind die Äußerungen und Fragen, die durch die Weiterentwicklung der Basiskonzepte erläutert, erklärt oder beantwortet werden können. Soweit wie möglich wirken Schülerinnen und Schüler an der Identifizierung der zu bearbeitenden Inhalte mit.

Daraus ergibt sich die Motivation, diese Inhalte zu erarbeiten, d. h. Informationen zu beschaffen, zu experimentieren, Erklärungszusammenhänge herzustellen usw.

Das Ergebnis der Planung kann eine Übersicht sein. Die folgende Tabelle zeigt Zusammenhänge zwischen authentischen Schülerfragen einer 10. Klasse und fachlichen Inhalten des Themenfeldes.

| Kontextfragen zur Erschließung | Fachlicher Inhalt |
|--|---|
| <p>Wie sind Batterien aufgebaut?</p> <p>Wie funktionieren sie?</p> <p>Welche chemischen Reaktionen laufen dort ab?</p> | <p>Oxidation, Reduktion</p> <p>Elektronenübertragung</p> <p>Donator-Akzeptor-Prinzip</p> <p>Halbzelle, galvanisches Element</p> |
| <p>Warum gibt es unterschiedliche Bauarten, Größen, Leistung?</p> <p>Wie stark ist eine Batterie?</p> <p>Hat die Größe etwas mit der Stärke zu tun?</p> <p>Welches ist die stärkste Batterie?</p> <p>Welche Spannungen werden erreicht?</p> <p>Wovon hängt die Spannung ab?</p> <p>Bis zu welchen Kapazitäten reichen Batterien?</p> <p>Wann ist eine Batterie leer?</p> | <p>Spannung</p> <p>Kapazität</p> <p>Energieinhalt</p> <p>Redoxreihe</p> |
| <p>Was genau ist ein Akkumulator?</p> | <p>Redoxreaktionen, Umkehrbarkeit</p> |
| <p>Wie genau funktioniert die Umwandlung in elektrische Energie?</p> <p>Wie speichert ein Akku die Energie?</p> | <p>Galvanische Elemente und Redoxreihe</p> <p>Prinzip der Nutzung von Redoxreaktionen</p> <p>Donator-Akzeptor-Prinzip</p> |
| <p>Gibt es verschiedene Akkus?</p> | <p>Anwendungsbereiche, Anforderungen</p> |
| <p>Wie funktioniert der Lithium-Ionen-Akku?</p> <p>Warum nimmt man gerade Lithium?</p> <p>Wieso ist der Lithium-Ionen-Akku besser als andere?</p> <p>Warum brennt der Lithium-Ionen-Akku?</p> | <p>Redoxreihe</p> <p>Redoxpotenzial</p> <p>Interkalation</p> |
| <p>Welche Batterie ist für welches Gerät passend?</p> | <p>Spannung, Kapazität, Energieinhalt und technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit)</p> |
| <p>Wie wirtschaftlich sind Batterien oder Akkus überhaupt?</p> <p>Sind Batterien oder Akkus von Billiganbietern gut, oder soll man mehr Geld ausgeben?</p> <p>Werden Batterien recycelt?</p> | <p>Technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit)</p> <p>Kriterien zur Nachhaltigkeit bzw. Umweltverträglichkeit</p> |
| <p>In welchen Bereichen werden Akkus verwendet?</p> | <p>Effiziente und ortsunabhängige Nutzung von Energie (E-Mobilität)</p> |

Schülerinnen und Schüler formulieren weitere Fragen, die im Rahmen des Unterrichts thematisiert werden können, deren Beantwortung allerdings oft tiefergehend in die Inhalte der Physik bzw. der Chemie der Sekundarstufe 2 eindringt, was als nicht abprüfbares Fachwissen durchaus angesprochen werden kann (siehe auch Onlinematerial Info_FAQs).

Bei der Gestaltung der Erarbeitungsphasen achtet die Lehrkraft auf den Zusammenhang zum Kontext, auf die Möglichkeit zur Kompetenzentwicklung für alle Schülerinnen und Schüler und nutzt die Differenzierungsvorschläge der Themenfeld-Doppelseite. Absprachen mit den Lehrkräften anderer Fächer werden durch die Rubrik „Bezüge“ erleichtert.

Wichtige Hinweise zum Sprachgebrauch:

Die Kopplung von zwei Halbzellen zu einem elektrochemischen Element wird fachsprachlich als galvanisches Element bezeichnet, wobei die Begriffe galvanisches Element und galvanische Zelle synonym verwendet werden. Auch die Begriffe Halbzelle und Halbelement sind synonym, aber der Begriff Halbelement ist eher ungebräuchlich.

Schaltet man mehrere galvanische Elemente in Reihe, so entsteht ein Aufbau, den man als Batterie bezeichnet. Umgangssprachlich wird allerdings schon ein einzelnes galvanisches Element als „Batterie“ bezeichnet.

Außerdem steht der umgangssprachliche Begriff „Batterie“ für einen nicht wiederaufladbaren elektrochemischen Energiespeicher. Fachlich werden diese als Primärelement bezeichnet, wohingegen wiederaufladbare galvanische Elemente (oder die Kopplung mehrerer) als Sekundärelemente bezeichnet werden. Die Fachsprache nutzt ebenso wie die Umgangssprache auch den Begriff Akkumulator für die Sekundärelemente, gleichgültig, ob diese zu Batterien verschaltet sind, wie z. B. in Bleiakkumulatoren üblich.

| Fachsprache | | Umgangssprache |
|---|---|----------------|
| Fachbegriff | Bedeutung | Begriff |
| Galvanische Zelle bzw. galvanisches Element | Kombination aus 2 Halbzellen | Batterie |
| Primärelement | Galvanisches Element, das nicht wiederaufladbar ist | Batterie |
| Batterie | Kopplung mehrerer galvanischer Elemente | Batterie |
| Sekundärelement = Akkumulator | Wiederaufladbares galvanisches Element (bzw. Kopplung mehrerer) | Akkumulator |

Die Beachtung dieser Abweichungen der Fachsprache von der Alltagssprache ist für den Unterricht relevant, um bei der Definition bzw. Erklärung der Funktionsweise und der Unterschiede klare Trennungen vornehmen zu können. Dies ist mit dem umgangssprachlichen Begriff Batterie nicht möglich. Lediglich beim Akkumulator stimmt die fachliche Bedeutung mit der Umgangssprache überein.

Durch die Gegenüberstellung der Begriffe wird eine Anschlussfähigkeit der Fachsprache an die Umgangssprache ermöglicht.

Kompetenzen

Die folgende Übersicht zeigt einige Zusammenhänge zwischen den unterrichtlichen Aktivitäten und den Kompetenzbereichen.

| Die Schülerinnen und Schüler können ... | | TF 12 | Schülerinnen und Schüler ... |
|--|-----------------------|-------|---|
| ... naturwissenschaftliche Konzepte zur Problemlösung nutzen. | Umgang mit Fachwissen | | ... führen Versuche zu galvanischen Elementen und der Redoxreihe durch, protokollieren sie und werten sie aus. |
| ... mit Geräten, Stoffen, Verfahren umgehen. | | ■ | |
| ... Fachwissen strukturieren und Erklärungszusammenhänge herstellen. | Erkenntnisgewinnung | ■ | ... wenden das Akzeptor-Donator-Prinzip auf verschiedene Redox-Reaktionen an. |
| ... naturwissenschaftlich untersuchen, experimentieren. | | ■ | |
| ... modellieren. | | | |
| ... naturwissenschaftliche Erkenntnisse bzw. den naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess reflektieren. | Kommunikation | | ... nutzen Modellzeichnungen und Formelsprache zur Darstellung von Elektronenübergängen. |
| ... Informationen sachgerecht entnehmen. | | | |
| ... sach- und adressatengerecht präsentieren und dokumentieren. | | ■ | |
| ... naturwissenschaftlich argumentieren und diskutieren. | Bewertung | | ... bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit) und Kriterien zur Nachhaltigkeit anwenden. |
| ... Bewertungskriterien festlegen und anwenden. | | ■ | |
| ... Handlungsoptionen erkennen und aufzeigen. | | | |
| ... Sachverhalte naturwissenschaftlich einordnen und (multiperspektivisch) bewerten. | | | |

Abb. 5: Kompetenzentwicklung im Themenfeld 12

Beitrag zur Entwicklung der Basiskonzepte sowie Fachbegriffe

Kompetenzerwerb geschieht immer im Zusammenhang mit fachlichen Inhalten.

Fachinhalte werden nach dem Lehrplan immer in Basiskonzepte eingebunden, um den Schülerinnen und Schülern über die Jahre hinweg einen systematischen Aufbau der Konzepte der Chemie zu ermöglichen. In den beiden Rubriken „Beitrag zur Entwicklung der Basiskonzepte“ und „Fachbegriffe“ der Themenfeld-Doppelseite werden die Schwerpunkte der Fachinhalte so gesetzt, dass das angestrebte Konzeptverständnis erreicht werden kann. Die verbindlich von den Schülerinnen und Schülern im Unterricht zu verwendenden Fachbegriffe sind explizit aufgeführt.

Ein Schwerpunkt dieses Themenfeldes ist die Weiterentwicklung des **Basiskonzepts Chemische Reaktion**.

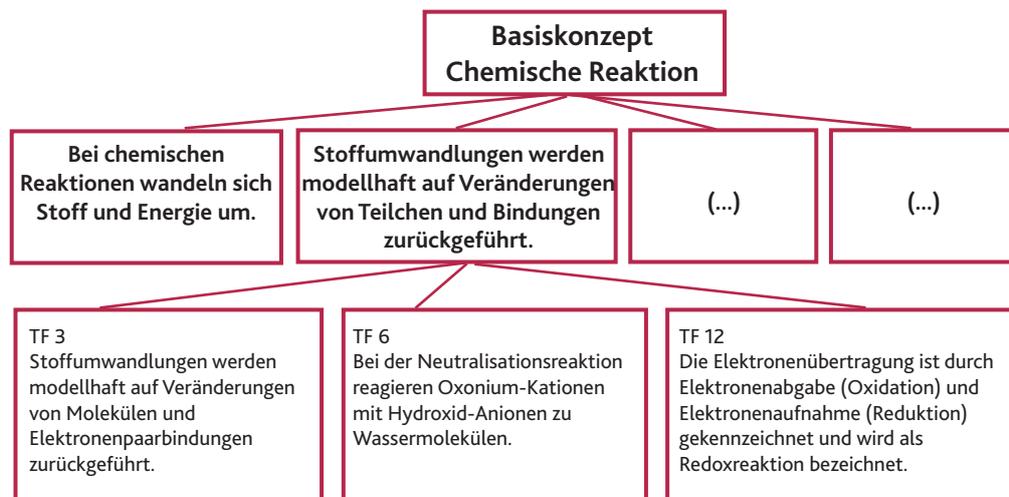


Abb. 6: Entwicklung eines Basiskonzepts über mehrere Themenfelder (siehe Lehrplan S.174)

Anknüpfend an die vorangegangenen Themenfelder werden wichtige Teilkonzepte des Basiskonzepts **Energie** im Themenfeld 12 weiterentwickelt.

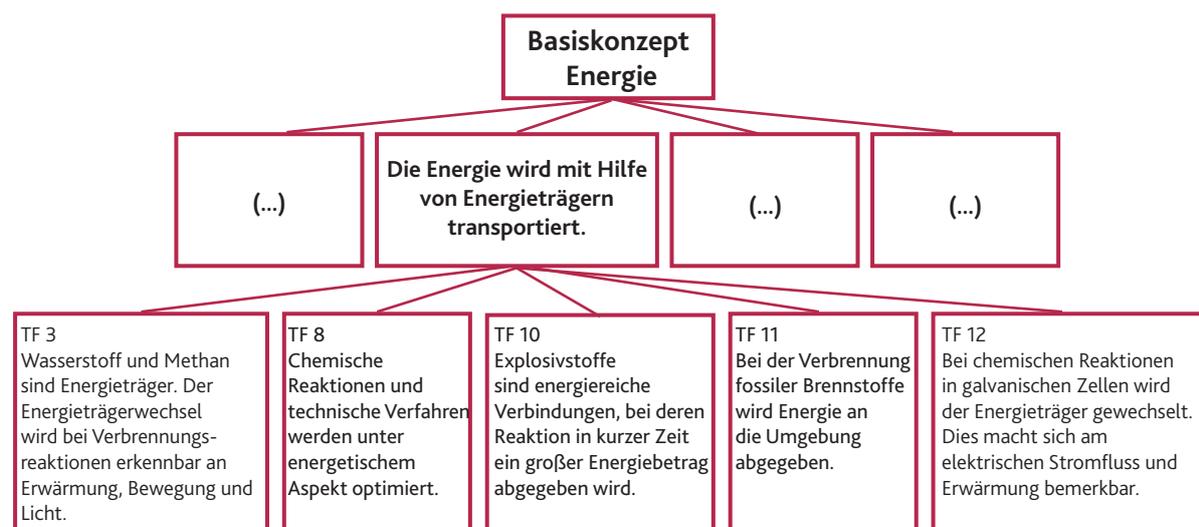


Abb. 7: Entwicklung eines Basiskonzepts über mehrere Themenfelder (vgl. Lehrplan S.182)

Konkret: Zink und Sauerstoff (als Beispiele für sämtliche in Verwendung befindlichen Elektrodenmaterialien von galvanischen Elementen) sind Energieträger. Bei ihrer elektrochemischen Reaktion wird ein Teil der umgesetzten Energie elektrisch nutzbar.

Zusammentragen, Reflektieren, Anwenden

Zum Abschluss der Erarbeitung werden die Ergebnisse zusammengetragen und der Arbeitsprozess reflektiert.

Um Sicherheit zu gewinnen und eigene Kompetenzen zu erleben ist es wichtig, dass Schülerinnen und Schüler die neu gewonnenen Konzepte und Kompetenzen anwenden. Für diesen Schritt eignen sich angemessene Aufgaben (Kapitel 4.1 Üben und Vernetzen).

Konkret: Es stehen Aufgaben bzw. Versuche zum Zink-Silberoxid-Element und zum Zink-Iod-Element zur Verfügung. Des Weiteren gibt es eine Aufgabe zur Bestimmung der maximalen Ladungsmenge einer Knopfzelle.

Im Rahmen der Dekontextualisierung wenden die Schülerinnen und Schüler ihr Wissen in neuen Zusammenhängen an und verankern es nachhaltig. Die Anwendung von Wissen erfolgt auch in anderen als dem ursprünglichen Kontext und wird so zu Konzeptwissen.

Konkret: In dem Spiel Energeticus wird das Themenfeld 12 nicht nur wiederholt und geübt. Im Sinne einer Dekontextualisierung verknüpfen Schülerinnen und Schüler neu Gelerntes über mobile Energieträger mit Kenntnissen aus anderen Themenfeldern. Dabei geht es sowohl um fossile und regenerative Energieträger, als auch um schon bekannte Beispiele von Redoxreaktionen und um Säure-Base-Reaktionen als weiteres Beispiel für das Donator-Akzeptor-Prinzip.

2.4 Überblick über die Kontexte des Themenfeldes

Die Umsetzung des Themenfeldes erfolgt mittels schülernaher, lebensweltlicher **Kontexte**. Jeder Kontext ist spezifisch gegliedert und in der Lage, die Intentionen des Themenfeldes umzusetzen.

Die Vorgaben des Lehrplans im Bereich der Kompetenzen und der Konzepte lassen sich in **Lerneinheiten** gliedern. Dabei entstehen diese „Einheiten“ insbesondere durch die Zugehörigkeit zu einem fachlichen Konzept bzw. durch eine systematische fachliche Betrachtung.

In der praktischen unterrichtlichen Umsetzung ergibt sich, dass die Inhalte der hier vorgestellten Lerneinheiten nicht zwingend zeitlich aufeinanderfolgend behandelt werden müssen. Im Rahmen der Betrachtung verschiedener Kontexte kann es sinnvoll sein, die Inhalte der verschiedenen Lerneinheiten in einer veränderten und in Bezug auf den jeweiligen Kontext angepassten Reihenfolge zu unterrichten.

Die Grafik zeigt Zugangsmöglichkeiten zur Planung des Themenfeldes, ausgehend von verschiedenen Kontexten. Der gewählte Kontext beinhaltet, genau wie alle Alternativen, die ausgewiesenen Schwerpunkte der Konzeptentwicklung.

Die rechts abzweigenden Felder stellen mögliche Vertiefungen dar.

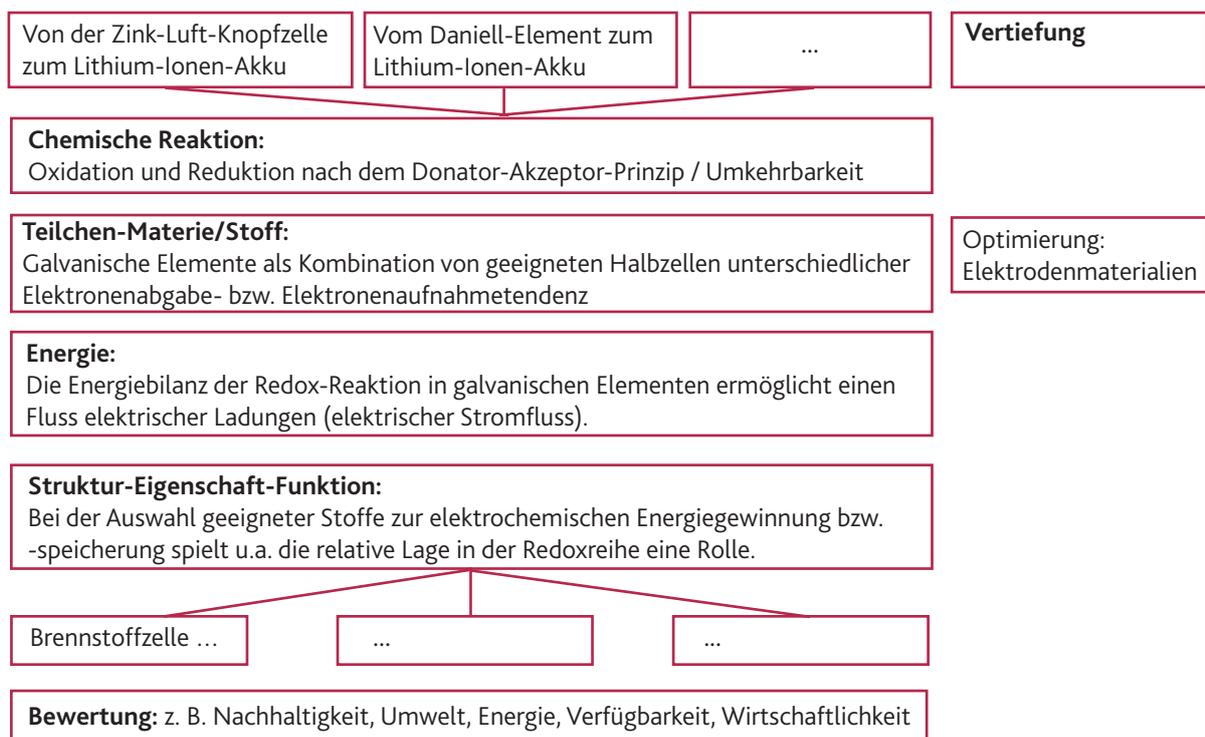


Abb. 8: Struktur des Themenfeldes 12

Kontext: Von der Zink-Luft-Knopfzelle zum Lithium-Ionen-Akku

Schülerinnen und Schüler begegnen einer Vielzahl kommerzieller „Batterien“, sei es durch die Bestandsaufnahme mobiler Energiequellen in der Schultasche, durch bereitgestellte reale Beispiele oder durch Abbildungen. Daraus ergeben sich Fragen, die den Aufbau und die Funktionsweise betreffen und auch deren Möglichkeiten und Grenzen.

Im Unterricht wird zunächst auf die Zink-Luft Knopfzelle fokussiert. Der Aufbau wird an einer aufgesägten Knopfzelle und einer schematischen Schnittzeichnung erarbeitet. Schülerinnen und Schüler entwickeln daraus einen Modellversuch, den sie aufbauen und durchführen. Sie weisen entstehende Hydroxid-Ionen nach und klären die ablaufenden Reaktionen.

Im nächsten Schritt soll die Zink-Luft Knopfzelle optimiert werden. Das Ziel ist es, eine höhere Spannung zu erreichen. Schülerinnen und Schüler führen Versuche zu galvanischen Elementen durch. Die Variation des Elektrodenmaterials führt zur Redoxreihe/Spannungsreihe der Metalle und erlaubt den Lernenden, Vorhersagen über die Spannung zu treffen. Theoretische Überlegungen zur Spannungsreihe lassen Lithium als das optimale Anodenmaterial erscheinen. Allerdings ist eine Herausforderung zu meistern: Als Alkalimetall reagiert Lithium mit Wasser, so dass es nicht zusammen mit einem wässrigen Elektrolyten einsetzbar ist. Es ist also ein Lösungsmittel notwendig, das keine Protonen abgibt. Ein Experimentierset ermöglicht die praktische Demonstration im Modellversuch.

Etlche Fragen der Schülerinnen und Schüler aus der Begegnungsphase zielen auf energetische Eigenschaften der galvanischen Elemente. Bei energetischen Betrachtungen beschreiben und vergleichen sie galvanische Elemente mithilfe von Kenngrößen. Im Hinblick auf Spannung, Energie und Stromstärken baut der Unterricht auf Vorkenntnissen aus dem Physikunterricht auf.

Auf der Grundlage der erworbenen Kenntnisse wendet sich der Unterricht der Bewertung zu. Am Beispiel des Lithiums werden die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ökologie, Ökonomie und Soziales) thematisiert und die Bedeutung chemischer Kenntnisse für solche Bewertungen herausgearbeitet (siehe Lerneinheit 4).

Abschließend sind einige Übungen oder ein Spiel sinnvoll, um eine Vernetzung im Sinne einer Dekontextualisierung zu leisten.

Kontext: Vom Daniell-Element zum Lithium-Ionen-Akku

Die Präsentation historischer elektrochemischer Energiespeicher führt zu zahlreichen Schülerfragen, die den Aufbau und die Funktionsweise betreffen.

Über Fällungsreaktionen leitet sich ab, dass die beiden Halbzellen räumlich voneinander getrennt werden müssen.

Das Daniell-Element eignet sich besonders für die unterrichtliche Erarbeitung eines galvanischen Elements. Ein Modellversuch ist für Schülerinnen und Schüler möglich, Animationen stehen im Internet zur Verfügung und die Herstellung eines Stop-Motion-Clips bewirkt eine intensive Auseinandersetzung mit der Theorie.

Die Idee der Optimierung im Sinne einer Erhöhung der Spannung führt auch in diesem Kontext zur Spannungsreihe, zum Lithium, zu energetischen Betrachtungen und zu einer Bewertung der Nachhaltigkeit aus der Sicht der Chemie.

2.5 Differenzierungsmöglichkeiten

Die Hinweise in dieser Rubrik der Lehrplan-Doppelseite beziehen sich sowohl auf unterschiedlich leistungsstarke Lerngruppen als auch auf das leistungsdifferenzierte Arbeiten innerhalb einer Lerngruppe. Der mit „G“ gekennzeichnete Abschnitt reduziert das Themengebiet auf ein grundlegendes Verständnis, der mit „V“ gekennzeichnete Abschnitt zeigt mögliche Vertiefungen und Erweiterungen, um leistungsstärkeren Schülerinnen und Schülern gerecht zu werden.

In jedem Kontext zum Themenfeld 12 passt die Lehrkraft den Unterricht in Bezug auf die Gewichtung von Stoff- und Teilchenebene an.

Die Differenzierung erfolgt beispielsweise über die Anzahl und die Komplexität der ausgewählten Beispiele. Auch die eingesetzten Materialien und die Aufgabenformulierungen sind wichtige Möglichkeiten zur Differenzierung.

Grundverständnis:

Einfache Untersuchungen galvanischer Elemente (z. B. Daniell-Element) nach Anleitung sind ausreichend.

Leistungsschwächere Schülerinnen und Schüler erwerben ein grundlegendes Verständnis des Donator-Akzeptor-Prinzips, wenn eine in einer einfachen Reaktionsgleichung dargestellte Redoxreaktion in ihre Teilprozesse zerlegt und modellhaft auf der Teilchenebene dargestellt werden kann.

Vertiefung:

Einem erweiterten Verständnis entspricht es, wenn Untersuchungen zu galvanischen Elementen theoriegeleitet entworfen und auf praktisch-experimenteller Ebene optimiert werden können.

Schülerinnen und Schüler zerlegen Redoxreaktionen in ihre Teilprozesse und erklären sie modellhaft auf der Teilchenebene. Das Donator-Akzeptor-Prinzip stellen sie mit Formeln und Reaktionsgleichungen dar. Im günstigsten Fall gelingt der selbständige Transfer auf weitere Beispiele galvanischer Elemente.

Schulspezifische Differenzierung:

Insbesondere für Berufsreife-Klassen ist der Erwerb von Grundkenntnissen über Redoxreaktionen wünschenswert und unverzichtbar. Gerade dieses Themenfeld enthält durch seine Aktualität und Gesellschaftsrelevanz wichtige Kenntnisse und Prinzipien für die Erforschung neuer chemischer Energiespeicher.

Dazu schreibt der Lehrplan (S. 60): *„Zu beachten ist, dass die Schülerinnen und Schüler, die mit der Berufsreife die Schule nach der Klasse 9 verlassen, die Themenfelder 9-12 in der Regel so nicht kennen lernen. Daher werden zentrale Elemente aus diesen Themenfeldern in die Themenfelder 1-8 integriert. Die Zeit dafür kann durch eine Reduzierung der Tiefe bei der Behandlung der Teilchenebene in den Themenfeldern 1-8 gewonnen werden (siehe auch Kapitel 5.3 Zur Arbeit mit dem Lehrplan Chemie).“*

Möglichkeiten für die Integration ausgewählter Elemente des Themenfeldes 12 bieten sich beispielsweise in folgenden anderen Themenfeldern:

Themenfeld 3: Heizen und Antreiben

Im Kontext zukünftiger moderner Energiespeicher für die Mobilität sind nach dem Unterricht zur Brennstoffzelle Anknüpfungspunkte zu Batterien und Akkumulatoren gegeben.

Themenfeld 4: Vom Erz zum Metall

Anknüpfend an die Verwendung von Metallen auf der Basis ihrer Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit) kann sich deren Einsatz in mobilen Energiespeichern anschließen.

Themenfeld 11: Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima

Die Auswirkungen fossiler und regenerativer Energieträger auf das Klima kann genutzt werden, um alternative Energiequellen und den steigenden Bedarf an mobiler Energie zu betrachten.

3 ZU DEN LERNEINHEITEN

Die im Kapitel 2.4 vorgeschlagenen Kontexte lassen sich in **Lerneinheiten** gliedern. Sie entstehen insbesondere durch die Zugehörigkeit zu einem fachlichen Konzept bzw. durch eine systematische, fachliche Betrachtung.

In der unterrichtlichen Umsetzung ergibt sich, dass die Inhalte der hier vorgestellten Lerneinheiten nicht zwingend zeitlich aufeinanderfolgend behandelt werden müssen. Es kann sinnvoll sein, die Inhalte der verschiedenen Lerneinheiten in einer veränderten und in Bezug auf den jeweiligen Kontext angepassten Reihenfolge zu unterrichten.

Im Zentrum einer jeden Lerneinheit steht die Konzept- und Kompetenzentwicklung.

| Lerneinheiten | | Schwerpunkt der Konzeptentwicklung | Schwerpunkt der Kompetenzentwicklung |
|---------------|---|---|---|
| 1 | Bau und Funktionsweise galvanischer Elemente | Teilchen-Materie/Stoff Chemische Reaktion | Erkenntnisgewinnung Kommunikation |
| 2 | Die Redoxreihe nutzen zur Entwicklung mobiler Energieträger | Struktur-Eigenschaft-Funktion Chemische Reaktion | Erkenntnisgewinnung Umgang mit Fachwissen |
| 3 | Energie mobiler Energieträger | Energie | Erkenntnisgewinnung Umgang mit Fachwissen Bewertung |
| 4 | Nachhaltigkeit bei Bau und Nutzung von galvanischen Elementen | Struktur-Eigenschaft-Funktion | Kommunikation Bewertung |

Nach den im Lehrplan für das Themenfeld 12 festgelegten Schwerpunkten der Konzept- und Kompetenzentwicklung ergeben sich diese vier Lerneinheiten, die grundsätzlich auf beide vorgeschlagenen Kontexte anwendbar sind.

Die unterrichtliche Abfolge der Lerneinheiten richtet sich nach der Sachlogik in der Beantwortung der auftretenden Fragen und kann daher von der numerischen Folge abweichen.

Die in den folgenden Tabellen vorgestellten Lerneinheiten enthalten jeweils entsprechende Materialien online, mit denen sie umgesetzt werden können. Nach der Vorstellung der Lerneinheiten schließen sich zwei exemplarische Unterrichtsgänge (Kapitel 4.2) an.

3.1 Lerneinheit 1: Bau und Funktionsweise galvanischer Elemente

| | | |
|--|---|--|
| <p>Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Zellen werden Elektronen nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip übertragen.</p> <p>Diese Elektronenübertragung ist durch Elektronenabgabe (Oxidation) und Elektronenaufnahme (Reduktion) gekennzeichnet und wird als Redoxreaktion bezeichnet.</p> <p>Chemische Reaktionen im Akkumulator sind umkehrbar.</p> | | |
| <p>Einführende Lernsituationen:</p> <p>Kontext „Von der Zink-Luft-Batterie zum Li-Ionen-Akku“</p> <p>Präsentation von aktuell kommerziell verfügbaren Batterien und Akkumulatoren (z. B. Alkaline-Zink-Braunstein-Batterien, Zink-Luft-Zelle, Silberoxid-Zelle, Lithium-Ionen-Akku, Bleiakku ...) in diversen Bauformen, wie z. B. AA-, AAA-, C-, D- Bautypen und Knopfzellen.</p> <p>Kontext „Vom Daniell-Element zum Li-Ionen-Akku“</p> <p>Präsentation von historischen elektrochemischen Energiespeichern: Von der Leidener Flasche über die Volta-Säule zum Daniell-Element.</p> <p>Sammlung von Schülerfragen:</p> <p>Wie funktioniert eine Batterie?</p> <p>Wie funktioniert der Lithium-Ionen-Akku?</p> | | |
| Kompetenzentwicklung | Schüleraktivität | Fachwissen/Basiskonzept |
| Schülerinnen und Schüler ... | | |
| <p>... wenden das Donator-Akzeptor-Prinzip auf verschiedene Redox-Reaktionen an.</p> <p>... nutzen Modellzeichnungen und Formelsprache zur Darstellung von Elektronenübergängen.</p> | <p>... recherchieren Anwendungen von Knopfzellen.</p> <p>... führen Versuche zu galvanischen Elementen durch.</p> <p>... führen Versuche zur Fällung/Abscheidung von edlen Metall-Ionen mittels unedler Metallatome durch.</p> <p>... bauen einen Modellversuch zum Lithium-Ionen-Akku.</p> | <p>Oxidation, Reduktion</p> <p>Elektronenübertragung</p> <p>Redoxreaktion</p> <p>Donator-Akzeptor-Prinzip</p> <p>galvanisches Element</p> <p>Batterie</p> <p>Akkumulator</p> |
| Material/Medien | | |
| Kontext „Von der Zink-Luft-Batterie zum Li-Ionen-Akku“ | Kontext „Vom Daniell-Element zum Li-Ionen-Akku“ | |
| 01_LE1_ppt_Fotos Batterien | 04_LE1_ppt_Historisches zur Energiespeicherung | |
| 02_LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen | 05_LE1_ppt_Planung_Daniell-Element | |
| 03_LE1_SV_Zink-Luft-Batterie mit Freiburger Version | 06_LE1_ppt_Daniell-Element_für_Stop Motion Clip (einschließlich Anleitung) | |

| | |
|--|---|
| | 07_LE1_mp4_Stop Motion Clip_Daniell-Element |
| | 08_LE1_SV_Fällungsreihe |
| | 09_LE1_SV_Daniell-Element |
| | 10_LE1_AB_Fehler-Suchbilder zum Daniell Element |
| 12_LE1_SV_Lithium-Ionen-Modell-Akku | |
| 13_LE1_ppt_Lithium-Ionen-Akku_Animation zur Teilchenebene | |
| 11_LE1_Info_Galvanische Elemente_Ergänzung (Alkali-Mangan, Zitronenbatterie, $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Zn}$, Li/MnO_2 , Brennstoffzelle, Bleiakкумуляtor) | |

In dieser Lerneinheit geht es um

- den grundsätzlichen Aufbau eines galvanischen Elements und
- die Funktionsweise von Primär- und Sekundärzellen.

Schülerinnen und Schüler lernen exemplarisch die Funktionsweise eines galvanischen Elements an **einem** Beispiel detailliert kennen. In jedem galvanischen Element kommt es durch die Kopplung von Oxidation und Reduktion zu einer Elektronenübertragung, also einer Redoxreaktion. Trotz der großen Vielfalt an galvanischen Elementen liegt immer dasselbe Prinzip zugrunde. Galvanische Elemente unterscheiden sich durch Elektrodenmaterialien und Elektrolyte.

Zusätzliche Materialien: Filme und Animationen zu galvanischen Elementen

- Chemie interaktiv - Animationen für den Chemieunterricht (Bergische Universität Wuppertal, Didaktik der Chemie)

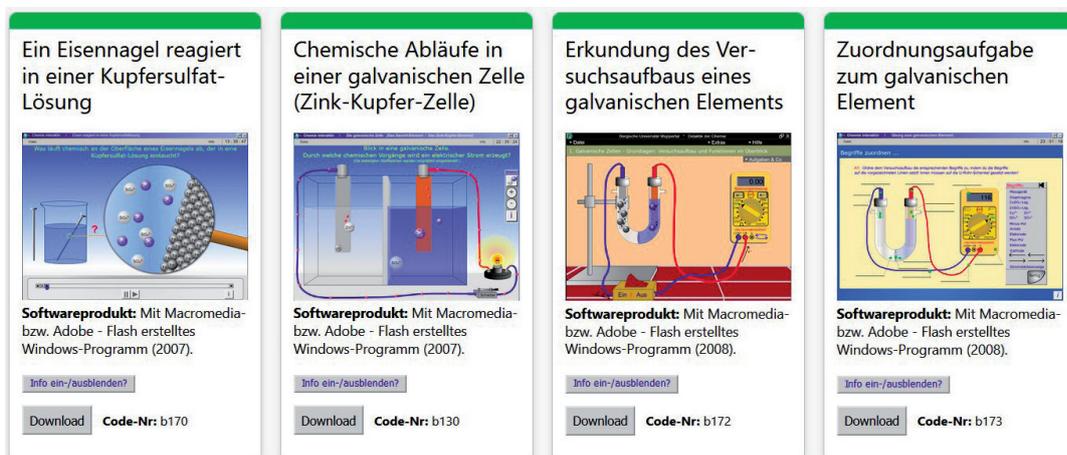


Abb. 9: Beispielhafte Animationen (<https://chemie-interaktiv.net/flashfilme.html>)

- Redoxreaktion Teil 5 - Die Galvanische Zelle I musstewissen Chemie
<https://www.youtube.com/watch?v=gifwGurgfVk> (7 Minuten)

Der Film liefert eine sehr verständliche und gut nachvollziehbare Veranschaulichung der Funktionsweise des Daniell-Elements. Die Erklärung startet mit der lokalen Redoxreaktion der Abscheidung von Kupfer auf Zink und der daraus resultierenden Notwendigkeit, diese in getrennten Halbzellen ablaufen zu lassen. Im weiteren Verlauf werden die Membran und ihre Funktion angemessen vorgestellt.

3.1.1 Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft

Bau und Funktionsweise galvanischer Elemente – allgemein

In dieser Lerneinheit geht es um den grundsätzlichen Aufbau eines galvanischen Elements aus zwei Halbzellen und die prinzipiell ablaufenden Vorgänge im galvanischen Element.

Dabei kommt es zur Elektronenübertragung von der Anode, an der Elektronen abgegeben werden (Oxidation), zur Kathode, an der die Elektronenaufnahme (Reduktion) stattfindet. Zusammen betrachtet, wird dieser Ablauf als Redox-Reaktion bezeichnet und ist ein weiteres Beispiel für das Donator-Akzeptor-Prinzip bei chemischen Reaktionen, neben den Protonenübertragungen im Themenfeld 6.

Chemische Reaktionen sind prinzipiell umkehrbar. Redoxreaktionen im Akkumulator (Sekundärelement) lassen sich auch in der Praxis umkehren, wohingegen nicht wieder aufladbare galvanische Elemente auch als Primärelemente bezeichnet werden. In Primärelementen laufen Reaktionen ab, die bei der Umkehrung, also der Aufladung, nicht wieder den Neuzustand erreichen. Dies betrifft sowohl den Energieinhalt als auch Veränderungen durch nicht zu vernachlässigende Mengen an Nebenprodukten.

Dagegen laufen in Akkumulatoren beim Laden tatsächlich die umgekehrten Prozesse wie bei der Entladung so ab, dass auch ein Ladezustand ähnlich dem Neuzustand erreicht wird. Damit ist eine mehrfache Umladung der Energie vom Träger „Elektrizität“ zum Träger „Chemische Stoffe“ oder im Energieformenkonzept formuliert, eine mehrfache Umwandlung von chemischer in elektrische Energie und zurück möglich.

Übersicht der Begriffe beim Entladen und Laden galvanischer Elemente

Per Definition handelt es sich bei der Anode immer um die Elektrode, an der die Oxidation stattfindet und bei der Kathode immer um die Elektrode, an der die Reduktion abläuft.

Für die Vorgänge des Entladens und Ladens kehren sich die Abläufe (Oxidation und Reduktion) an den Elektroden um, so dass auch die Bezeichnungen der Elektroden (Anode und Kathode) wechseln. Die Tabelle stellt dies am Beispiel des Daniell-Elements dar. Dieses besteht aus der Halbzelle eines Zinkbleches in einer Zink-Ionen-Lösung sowie der Halbzelle eines Kupferbleches in einer Kupfer(II)-Ionen-Lösung.

| | Zink-Halbzelle | Kupfer-Halbzelle |
|---|--|---|
| <u>Entladen</u> eines galvanischen Elements | <p>Oxidation an der Anode</p> $\text{Zn}_{(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-}$ <p>Dies stellt den Minuspol des galvanischen Elements beim Entladen dar.</p> | <p>Reduktion an der Kathode</p> $\text{Cu}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Cu}_{(s)}$ <p>Dies stellt den Pluspol des galvanischen Elements beim Entladen dar.</p> |
| <u>Laden</u> als Umkehrung der Entladung | <p>Reduktion an der Kathode</p> $\text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Zn}_{(s)}$ <p>Das galvanische Element wird mit dem Minuspol des <u>Ladegerätes</u> verbunden.</p> | <p>Oxidation an der Anode</p> $\text{Cu}_{(s)} \rightarrow \text{Cu}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-}$ <p>Das galvanische Element wird mit dem Pluspol des <u>Ladegerätes</u> verbunden.</p> |

Das Beispiel zeigt, dass die Bezeichnungen Anode und Kathode wechseln, aber die Bezeichnungen der Elektroden mit **Pluspol** und **Minuspol** gleich bleiben, weil die Polung beim Entladen aus der Sicht des freiwilligen Ablaufs beim galvanischen Elements betrachtet wird und beim erzwungenen Laden aus der Sicht des anzuschließenden Ladegerätes.

Weil sich die Bezeichnungen der Elektroden als Anode und Kathode ändern, je nachdem, ob entladen oder geladen wird, hat man bei der Bezeichnung „Anoden- und Kathodenmaterialien“ von Akkumulatoren definiert, dass die Bezeichnung Anode und Kathode auf die Entladung bezogen wird. Konkret heißt das für dieses Beispiel, dass das Zink-Halbelement das Anodenmaterial und das Kupfer-Halbelement das Kathodenmaterial darstellt.

Die Elektrodenmaterialien bedingen die Spannung U zwischen zwei Halbzellen. Die Stoffmenge der eingesetzten Materialien bestimmt die Ladungsmenge Q , die maximal übertragen werden kann. Das Produkt der beiden Größen ergibt die enthaltene Energie ($E = U \cdot Q$).

Schaltet man mehrere galvanische Elemente in Reihe, bezeichnet man diesen Aufbau als Batterie. Umgangssprachlich wird ein einzelnes galvanisches Element allerdings oft auch als „Batterie“ bezeichnet.

Im Folgenden werden die Zink-Luft-Knopfzelle, das Daniell-Element und der Lithium-Ionen-Akku vorgestellt. Sie sind Gegenstand der vorgeschlagenen Kontexte. Weitere im Alltag verbreitete galvanische Elemente (Alkali-Mangan, Zitronenbatterie, $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Zn}$, Li/MnO_2 , Brennstoffzelle, Bleiakкумуляtor) sind im Onlinematerial beschrieben.

Die Beschreibung dieser galvanischen Elemente ist gegliedert in

- die ablaufenden chemischen Reaktionen,
- die Besonderheiten, z. B. beim Aufbau und
- eine didaktisch-methodische Einschätzung im Hinblick auf den Unterrichtseinsatz in der Sekundarstufe I.

Die Kenngrößen zur Charakterisierung dieser galvanischen Elemente, also Spannung, maximale Ladungsmenge und die Energiedichte sind Gegenstand der Lerneinheit 3.

In der Lerneinheit 4 werden diese galvanischen Elemente im Hinblick auf die Nachhaltigkeit bei ihrer Herstellung und Nutzung betrachtet.

3.1.2 Primärelemente (Primärzellen)

Die Zink-Luft-Knopfzelle - fachlicher Hintergrund für die Lehrkraft



Weit verbreitet ist die Anwendung des Zink-Sauerstoff-Elements im alkalischen Elektrolyten in Hörgeräten. Die Spannung beträgt 1,4 V und ihre maximale Ladungsmenge beträgt je nach Ausführung der Knopfzelle zwischen 30 und 700 mAh.

Abb. 10: Zink-Luft-Knopfzelle (Ober und Unterseite)

Auf der Unterseite (Abb. 10) sind die Löcher im Gehäuse für den Lufteintritt gut erkennbar. Im geöffneten Zustand (Abb. 12) wird der Hauptbestandteil, das Zink-Granulat in einer Art Paste deutlich. Auch andere Bauteile wie der Separator und die Isolierungen sind erkennbar.

Eine schematische Darstellung des Aufbaus einer Zink-Luft-Knopfzelle zeigt die nachfolgende Abbildung 11. Vereinfachend bleiben sämtliche Sekundärreaktionen in der Abbildung unberücksichtigt. Die beiden ovalen Ausschnittvergrößerungen stellen Hervorhebungen der zentralen chemischen Reaktionen dar.

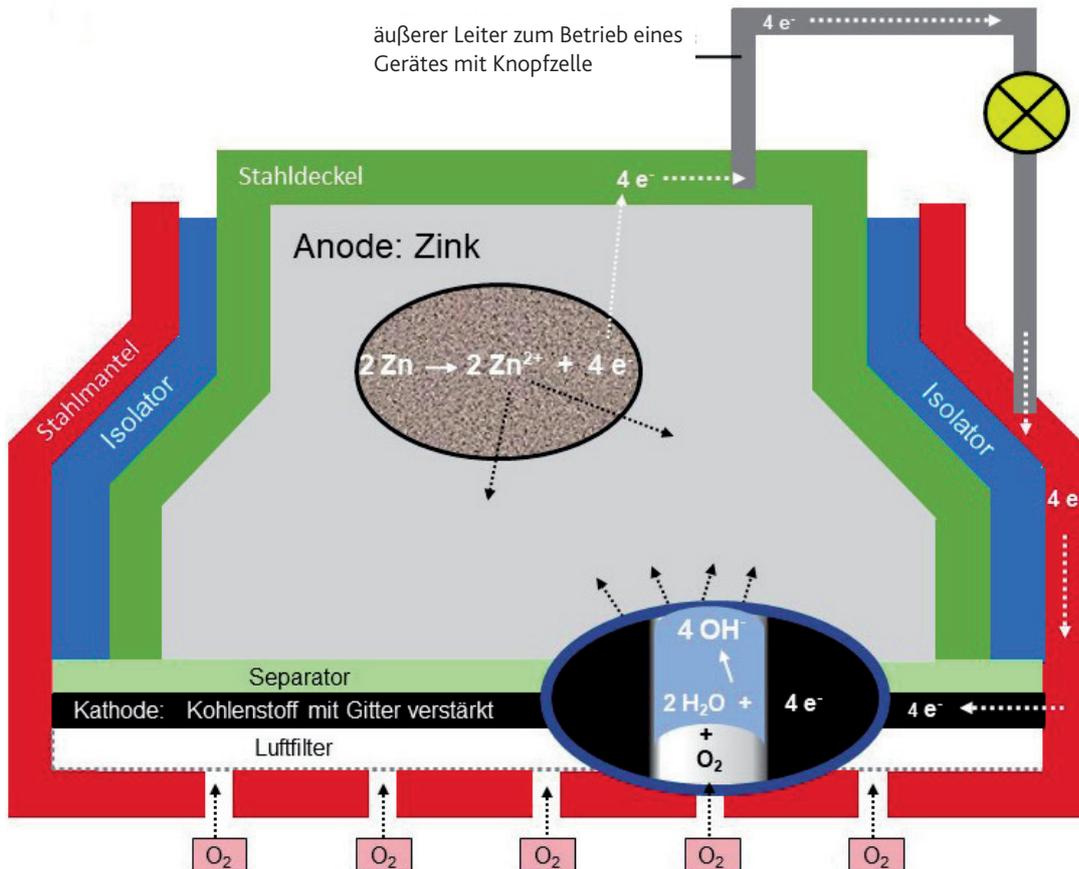


Abb. 11: Schematischer Aufbau einer Zink-Luft-Knopfzelle (mit vereinfachter Anodenreaktion)

| Anodenreaktion am Minuspol | |
|--|--|
| Oxidation | $2 \text{Zn}_{(s)} \rightarrow 2 \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 4 e^{-}$ |
| ... im alkalischen Milieu | $2 \text{Zn}_{(s)} + 8 \text{OH}^{-}_{(aq)} \rightarrow 2 [\text{Zn}^{2+}(\text{OH}^{-})_4]^{2-}_{(aq)} + 4 e^{-}$ |
| Anschließend kommt es zur Bildung von ZnO. | $[\text{Zn}(\text{OH})_4]^{2-}_{(aq)} \rightarrow \text{ZnO} + 2 \text{OH}^{-}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol | |
| Reduktion | $\text{O}_{2(aq)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(l)} + 4 e^{-} \rightarrow 4 \text{OH}^{-}_{(aq)}$ |

Die Besonderheit des Zink-Sauerstoff-Elementes liegt in der Reduktion der Sauerstoff-Moleküle, die auf einer Nachlieferung durch Diffusion von Sauerstoff aus der Umgebungsluft angewiesen ist. Beim Eindiffundieren des Sauerstoffs in die Elektrolyt-Lösung kommt es an der Dreiphasengrenze von Sauerstoff, dem Elektrolyten und dem Aktivkohle- bzw. Grafit-Träger zur Reduktion. Für hohe Stoffumsätze benötigt man eine große Elektrodenoberfläche, deren Poren mit einem Elektrolyten benetzt sein müssen. Diese Gasdiffusionselektrode besteht aus einer dünnen Schicht, die ein leitendes Trägermaterial aus feinteiligem Kohlenstoff enthält und auf dem ein Katalysator zur Beschleunigung der Sauerstoffreduktion aufgebracht ist.



Abb. 12: Aufgesägte Zink-Luft-Knopfzelle

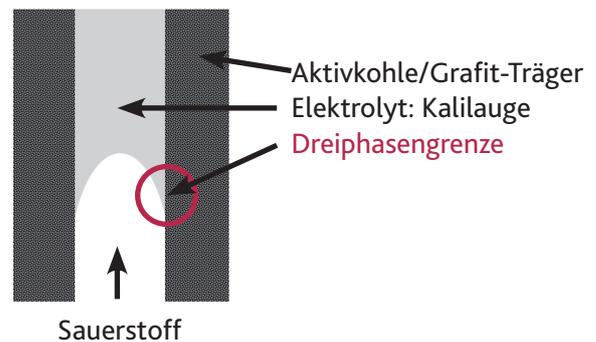


Abb. 13: Darstellung der Dreiphasengrenze im Ausschnitt aus der Kathode „Kohlenstoff mit Gitter verstärkt“

Aus der chemischen Reaktion und der Bauweise folgt, dass die Reduktionsreaktion in ihren Umsätzen von der Diffusion des Sauerstoffs in den Elektrolyten begrenzt wird, so dass sich diese Batterie für die Bereitstellung von geringen Stromstärken bei kontinuierlichem Betrieb über lange Zeiträume besonders eignet.

Die Zink-Luft-Knopfzelle im Unterricht

Die Zink-Luft-Knopfzelle bietet einen ausgezeichneten Alltagsbezug, weil sie ein sehr weit verbreitetes kommerzielles Produkt ist und Schülerinnen und Schüler häufig im persönlichen Umfeld Personen mit Hörgeräten kennen.

Die Oxidation der Zink-Atome und die Reduktion der Sauerstoff-Moleküle sind im Unterricht der Sekundarstufe 1 gut umsetzbar. Schülerinnen und Schüler können Zink-Luft-Knopfzellen gut untersuchen und einen Modellversuch durchführen.

Schülerinnen und Schüler betrachten die Knopfzellen zunächst von außen und nehmen die Löcher zum Durchtritt von Sauerstoff wahr. Mit Hilfe der Abbildung beschreiben sie den Aufbau und die Bestandteile der Zink-Luft-Knopfzelle auf der Stoffebene. Zu diesem Zeitpunkt sind die Ausschnittvergrößerungen mit den Teilreaktionen noch verzichtbar.

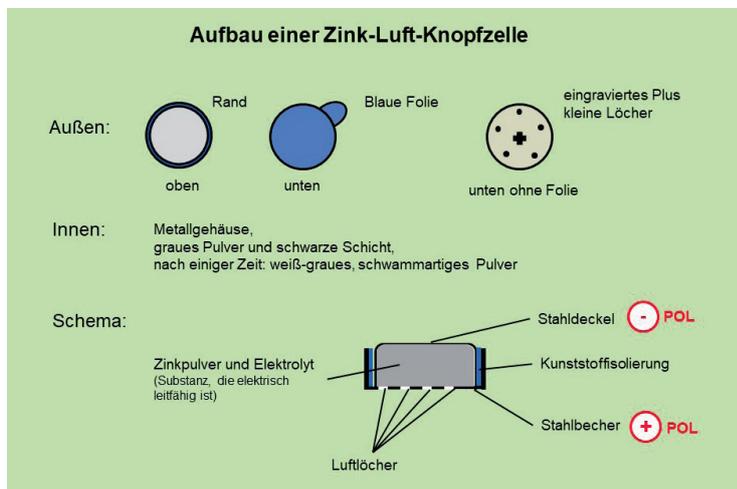
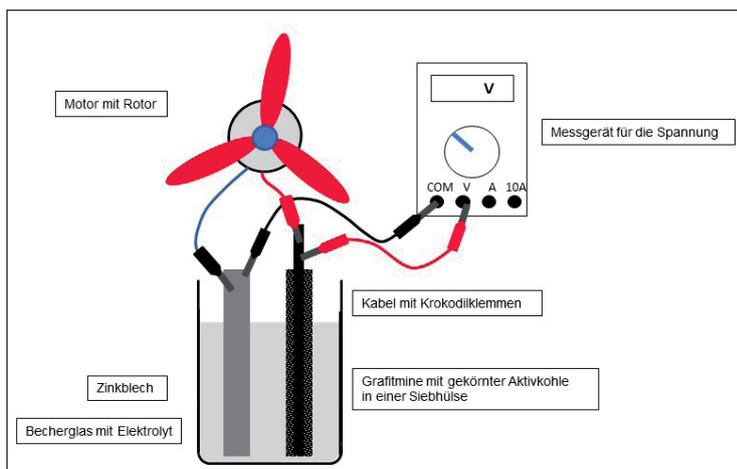


Abb. 14: Mögliches Tafelbild

Aus dem Aufbau der Zink-Luft-Knopfzelle lässt sich im Unterricht ein entsprechender Modellversuch zum Zink-Sauerstoff-Element entwickeln.

Beobachtungen:



Die Flügel des Rotors drehen sich.

Die Spannung beträgt etwa 1,3 V.

Die Kurzschlussstromstärke beträgt zwischen 100 und 300 mA.

Eine nach einiger Zeit entnommene Elektrolytprobe färbt Phenolphthalein leicht pink, bzw. alternativ Bromthymolblau blau.

Abb. 15: Aufbau und Auswertung des Modellversuchs zur Zink-Luft-Knopfzelle

Erkenntnis der Schülerinnen und Schüler:

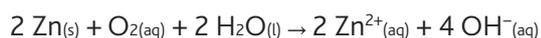
Es findet eine chemische Reaktion statt, bei der chemische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird bzw. die Energie auf den Träger Elektrizität wechselt. Es ist eine alkalische Lösung entstanden, die Hydroxid-Ionen enthält.

Die Auswertung im Hinblick auf die Funktionsweise führt beispielsweise zu folgendem Hefteintrag:

An dem Zinkblech werden von den Zink-Atomen je zwei Elektronen abgegeben und die Zn^{2+} -Ionen gehen in die Elektrolytlösung. Die Elektronen fließen durch das Kabel und den Motor in die Grafit-Elektrode. Dort bewirken sie die Reaktion von Sauerstoff und Wasser zu Hydroxid-Ionen. Die Hydroxid-Ionen gehen ins Wasser über und bilden eine alkalische Lösung, die durch einen Indikator nachweisbar sind.

Didaktisch reduziert betrachtet man bei der Anodenreaktion nur die Zink-Oxidation. Auf die Sekundärreaktionen der Zinkat-Bildung bzw. der weitergehenden Zinkoxid-Bildung wird verzichtet.

Somit ergibt sich für den Unterricht didaktisch reduziert folgende Gesamtreaktionsgleichung für die Redoxreaktion:



Die Lösung von Sauerstoff im Elektrolyten und die (anschließende) Diffusion zur Elektrodenoberfläche vollziehen die Schülerinnen und Schülern nach. Die Reduktionsprodukte des Sauerstoffs, die Hydroxid-Ionen, können bei Verwendung eines zunächst neutralen Elektrolyten nach einiger Zeit mit einem Indikator (z. B. Phenolphthalein) nachgewiesen werden.

Die Rolle des Elektrolyten wird in diesem Zusammenhang je nach Interesse und Leistungsfähigkeit der Lerngruppe thematisiert.

Ist für den Modellversuch die Umsetzung der Sauerstoffreduktion an der Aktivkohle geplant, so bietet es sich an, Kohle- bzw. Grafit-Elektroden mit großem Durchmesser (ca. 10 mm, Laborhandel) zu nutzen. Allerdings ermöglicht dies nur Stromstärken, die für viele Elektromotoren zu gering sind. Eine höhere Stromstärke liefert eine Grafitmine (3-5 mm aus dem Schreibwarenhandel) in einer Siebhülse (handelsüblicher Name: Injektions-Ankerhülsen aus dem Baumarkt) mit Aktivkohle („Freiburger Kohleelektrode“ nach Oetken). Dadurch ergibt sich eine sehr große aktive Oberfläche zur Reduktion des gelösten Sauerstoffs. Meistens ist die Aktivkohle mit Sauerstoff so hoch beladen, dass das Zink-Sauerstoff-Element einen Kleinelektromotor für viele Minuten antreibt.

Hinweis zum Bau der „Freiburger Kohleelektrode“: Immer zunächst die Grafitmine in die Siebhülse stellen. Die Körnung der Aktivkohle sollte so groß gewählt sein (Korngröße 2-3 mm), dass sie nicht durch die Löcher in der Siebhülse passt. Ist die Aktivkohle zu feinkörnig, so rollt man ein Filterpapier zu einer Hülse und steckt diese in die Siebhülse, bevor man die Aktivkohle einfüllt.

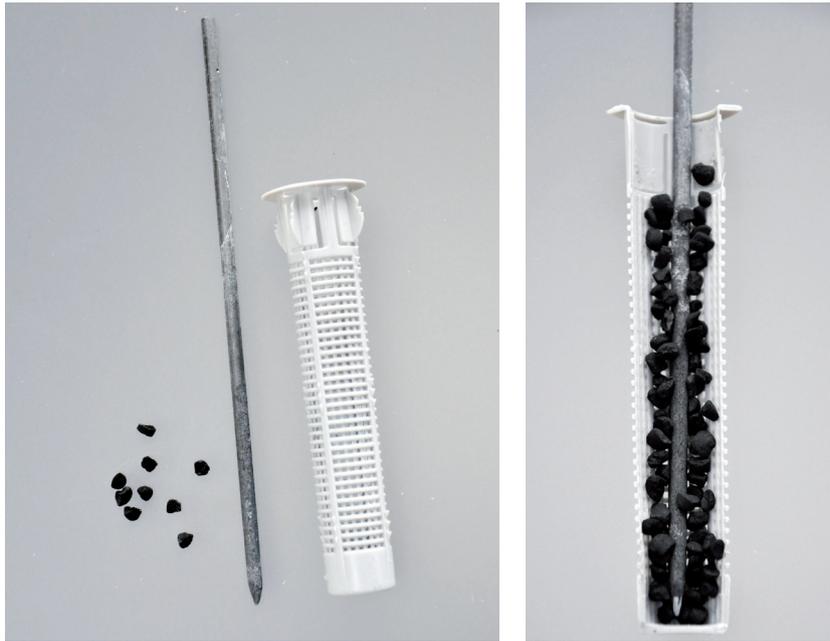


Abb. 16: Bestandteile und Gesamtaufbau der „Freiburger Kohlelektrode“

Dieses galvanische Element stellt einen sehr lohnenden Kontext zum Einstieg in die Thematik der mobilen Energieträger dar. Es besticht durch seinen motivierenden Alltagsbezug und die einfache Handhabung des Modellversuchs durch Schülerinnen und Schüler zur altersgemäßen Deutung und Auswertung der ablaufenden Reaktionen.

Die einfachere Variante mit ausschließlich einer Grafitmine funktioniert grundsätzlich auch, allerdings nur mit einem sehr empfindlichen Motor (Glockenanker Wundermotor, Anlauf bei 0,08 Volt), der mit sehr geringen Stromstärken funktioniert.

Empfehlenswerte weiterführende Informationen sind in folgendem Artikel zu finden: M. Klaus, M. Hasselmann, I. Rubner, B. Mößner und M. Oetken: Metall-Luft-Batterien mit einer neuartigen Kohlelektrode, ChemKon (2014), 21, Nr. 2, 65-71.

Onlinematerial:

LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen

LE1_SV_Zink-Luft-Batterie mit Freiburger Version

Das Daniell-Element - fachlicher Hintergrund für die Lehrkraft



Das Daniell-Element wurde 1836 von John Frederic Daniell erfunden und besteht aus zwei Halbzellen. In einer Halbzelle taucht ein Zinkblech in eine Zink(II)-Ionen-Lösung und in der anderen ein Kupferblech in eine Kupfer(II)-Ionen-Lösung.

Es ist eine historisch bedeutsame elektrochemische Energiequelle und wurde an Telegrafenstationen verwendet.

Abb. 17: Sechs Daniell-Elemente mit äußeren Kupfergefäßen
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NMAH-Daniell_cell_batteries_1836.JPG; Public domain)

Die Spannung beträgt 1,1 V und ihre maximale Ladungsmenge ist von der Ausführung, also von den eingesetzten Mengen an Kupfersulfat bzw. Zink abhängig und kann bis zu 100 Ah betragen.

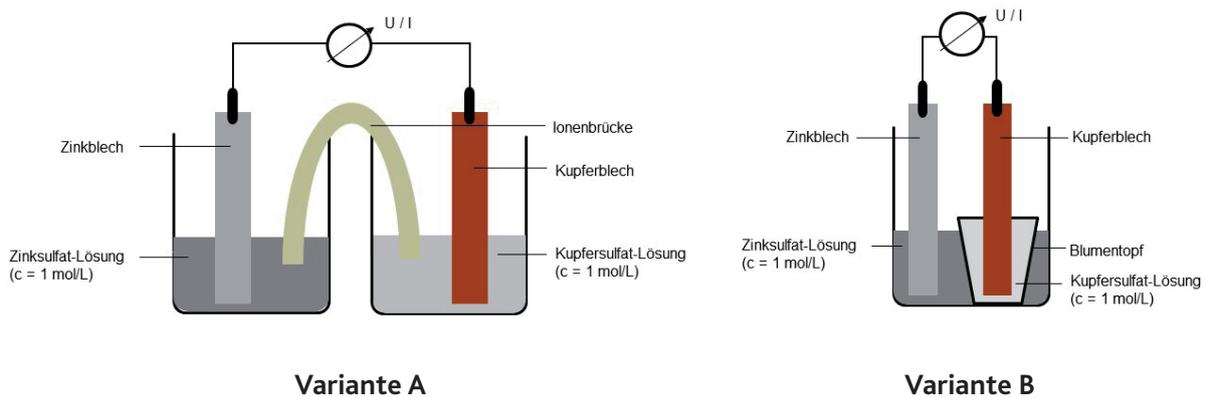


Abb. 18: Aufbau eines Daniell-Elements

Für den Unterricht kommen zwei Varianten vor. Beide Anordnungen sind grundsätzlich identisch. Sie unterscheiden sich nur hinsichtlich der Zelltrennung. Bei der Variante A besteht die Salzbrücke (Ionenbrücke) aus einem getränkten Filterpapier oder einer Glasbrücke mit Fritten an den Enden. Dadurch ist die Ionenwanderung (der Ionenaustausch) zwischen den Halbzellen nicht so gut möglich wie bei der Variante B. Bei dieser steht eine Tonzelle (z. B. ein Tonblumentopf) in einem Becherglas, so dass die Oberfläche des Separators für den Austausch der Ionen viel größer ist. Dies führt dazu, dass die mögliche elektrische Stromstärke größer wird und dieser Aufbau eine höhere entnehmbare Leistung liefert.

Bei beiden Varianten laufen folgende Reaktionen ab:

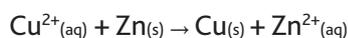
| Anodenreaktion am Minuspol | |
|-----------------------------|---|
| Oxidation | $\text{Zn}_{(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-}$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol | |
| Reduktion | $\text{Cu}^{2+}_{(aq)} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Cu}_{(s)}$ |
| Gesamtreaktion | |
| Redoxreaktion | $\text{Zn}_{(s)} + \text{Cu}^{2+}_{(aq)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}_{(aq)} + \text{Cu}_{(s)}$ |

Das Daniell-Element im Unterricht

Die ablaufenden Reaktionen eignen sich sehr, um den Schülerinnen und Schülern ein Verständnis der Funktionsweise eines galvanischen Elements zu vermitteln, da die beiden Teilprozesse der Oxidation und Reduktion in jeweils einer Halbzelle betrachtet werden.

Die Durchführung ist für den Schülerversuch sehr geeignet. Nachteilig am Daniell-Element ist, dass es in keinem kommerziellen Produkt verwirklicht ist und dadurch der Alltagsbezug fehlt.

Im Kontext „Vom Daniell-Element zum Li-Ionen-Akku“ führen Fällungsversuche mit Metallen zum Daniell-Element hin. Es wird zunächst die Abscheidung des edleren Kupfers aus einer Kupfer(II)-Ionen-Lösung an einem unedleren Metall wie Zink betrachtet. Die wesentliche Redoxreaktion lautet:



Onlinematerial: LE1_SV_Fällungsversuche

Alternativ kann ein Eisennagel verwendet werden. Eine entsprechende Animation der Vorgänge auf der Teilchenebene ist verfügbar unter: https://chemie-interaktiv.net/html5_flash/a170.html

Der wesentliche Schritt zur Konstruktion eines galvanischen Elements besteht in der räumlichen Trennung der Elektronenabgabe (der Zinkatome) und der Elektronenaufnahme (der Kupferionen) (vgl. B.-H. Brand, 2015). Dies gelingt mit zwei elektrochemischen Halbzellen, damit der Elektronenübergang vom unedleren Metall auf die Ionen eines edleren Metalls über einen äußeren Leiter erfolgt (siehe Abb. 18).

Mit dem Onlinematerial LE1_ppt_Planung_Daniell-Element entwickeln Schülerinnen und Schüler den Aufbau eines Daniell-Elements. Diese Erarbeitung thematisiert die Membran bzw. bei anderen Konstruktionen die Ionenbrücke, ohne die kein galvanisches Element funktioniert.

Leistungsstarke Lerngruppen benötigen gegebenenfalls weniger Unterstützung, z. B. anhand geeigneter Impulse seitens der Lehrkraft.

Hier ein Ausschnitt der aufeinander folgenden Schritte:

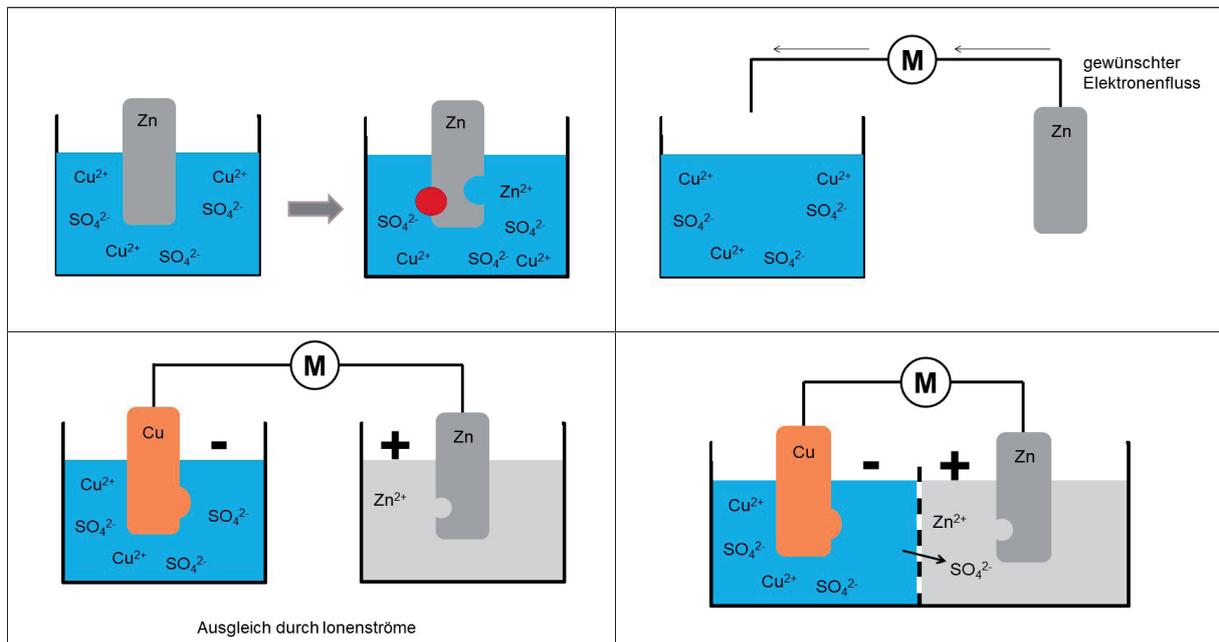


Abb. 19: Auszug (4 von 14 Folien) aus dem Onlinematerial LE1_ppt_Planung_Daniell-Element

Für Schülerinnen und Schüler ist das nicht selbstverständlich. Um diese Notwendigkeit eindrucksvoll zu demonstrieren, eignet sich der Aufbau mit zwei getrennten Halbzellen, wie in Abbildung 18 dargestellt. Wird dann bei funktionierendem Aufbau, z. B. mit einem sich drehendem Motor, die Ionenbrücke entfernt, so stoppt der Motor umgehend.

Möchte man die Notwendigkeit des Ionenaustauschs nicht explizit thematisieren, so bietet sich der Aufbau mit der Tonzelle an.

Die elektrische Leitfähigkeit von ionenhaltigen Lösungen erklären Schülerinnen und Schüler sehr häufig mit dem Fluss von „nackten“ Elektronen durch die Lösung. Damit ist der elektrische Stromkreis für sie logisch geschlossen.

Zwar kennen Schülerinnen und Schüler aus den vorangegangenen Themenfeldern die Ionen als geladene Teilchen, die auch in Lösungen vorliegen. Es fällt ihnen aber häufig schwer, diese im Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit für den Ladungstransport in Lösungen verantwortlich zu machen. Ihre Vorstellung ankernt an dem Gelernten aus dem Physikunterricht. Elektrische Leitfähigkeit wird auf den Elektronenfluss zurückgeführt, was für Metalle korrekt ist, aber den Transfer zu Lösungen offensichtlich erschwert.

Dies ist aus Sicht der Schülerinnen und Schüler verständlich, da sie keine Kenntnisse von den Abläufen an den Elektroden haben. Auch wissen sie nicht, wie die Elektronen an der Anode „entstehen“ und an der Kathode „verschwinden“.

Im Zuge der Erarbeitung der Elektrodenprozesse als Oxidation und Reduktion der Metall-Atome bzw. Metall-Ionen klärt sich für die Schülerinnen und Schüler das „Schicksal“ der Elektronen auf und sie sind in der Lage, die Ionen als wandernde Ladungsträger in einer Lösung zu benennen.

Die nachfolgenden Links sind geeignet, um die Abläufe im Daniell-Element auf der Teilchenebene im Sinne des Lehrplans zu thematisieren:

- Anschauliche Animation der Abläufe im Daniell-Element auf der Teilchenebene
https://chemie-interaktiv.net/html5_flash/a130.html
- Animation und Aufgaben zum Experiment Zink-Kupfer-Element (Daniell-Element)
https://chemie-interaktiv.net/html5_flash/a172.html
- Redoxreaktion Teil 5 - Die Galvanische Zelle I musstewissen Chemie
<https://www.youtube.com/watch?v=gifwGurgfVk>

Schülerinnen und Schüler üben und festigen ihr Verständnis über die Abläufe im Daniell-Element auf Teilchenebene beispielsweise bei der Erstellung eines Stop-Motion-Films. Geeignete Vorlagen liefert das Onlinematerial LE1_ppt_Daniell-Element für Stop Motion Clip.

Das Daniell-Element stellt einen einfachen Zugang zu Redox-Reaktionen mobiler Energieträger dar und bietet eine Alternative zum Zink-Sauerstoff-Element. Es lässt sich auch zur Differenzierung einsetzen.

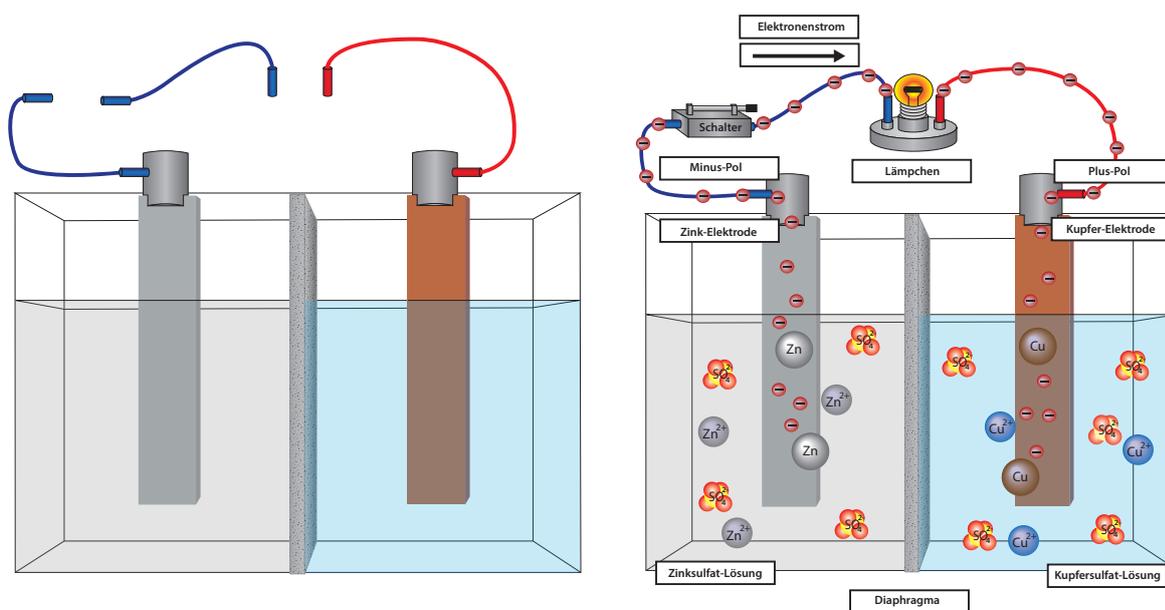


Abb. 20: Auszug Onlinematerial LE1_Daniell-Element für Stop Motion Clip

Weitere handelsübliche Primärzellen sind im Onlinematerial LE1_Info_galvanische Elemente_Ergänzung beschrieben. Sie sind häufig in Lehrbüchern erwähnt und werden didaktisch-methodisch für die Einführung galvanischer Elemente in der Sekundarstufe I im Rahmen dieses Themenfeldes eingeordnet bzw. bewertet. Manche eignen sich für einen vertiefenden Vergleich über grundsätzliche Gemeinsamkeiten der chemischen Abläufe bei galvanischen Elementen.

Für die Zitronenbatterie sei ausdrücklich betont, dass die fachliche Erklärung häufig fälschlicherweise mit einer Säure-Reduktion statt der Sauerstoff-Reduktion erklärt wird. Daher geben wir dem Zink-Sauerstoff-Element im alkalischen bzw. beim Modellversuch im neutralen Elektrolyten bewusst eindeutig den Vorzug, was gezielte Erprobungen im Unterricht auch untermauern.

3.1.3 Sekundärelemente (Sekundärzellen, Akkumulatoren)

Der Lithium-Ionen-Akkumulator – fachlicher Hintergrund für die Lehrkraft

Lithium-Ionen-Akkumulator ist der Oberbegriff für Akkumulatoren auf der Basis von Lithium-Verbindungen. Die reaktiven Materialien sowohl in der negativen als auch in der positiven Elektrode sowie der Elektrolyt enthalten Lithium-Ionen.



Abb. 21: Lithium-Akkumulatoren (links Smartphone, rechts E-Bike)

Im Gegensatz zu den nicht wiederaufladbaren Lithiumbatterien und der Gruppe von Lithiumakkumulatoren, die metallisches Lithium im Aufbau nutzen, tritt in Lithium-Ionen-Akkumulatoren kein metallisches Lithium auf – die Lithium-Ionen werden bei allen heute üblichen Lithium-Ionen-Akkumulator-Typen im Wirtsgitter eines Trägermaterials gebunden. Wenn sich das Wirtsgitter dabei kaum verändert, spricht man von Interkalation. Je nach Typ werden im Rahmen der Herstellung von Akkumulatoren mit einer Speicherfähigkeit der Energiemenge von einer Kilowattstunde etwa 80 g bis 130 g chemisch reines Lithium benötigt.

Es gibt zahlreiche verschiedene Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Sie unterscheiden sich nicht nur in der Größe und Bauform, sondern auch in der chemischen Zusammensetzung ihrer Komponenten und haben auch verschiedene Spannungsbereiche. Wurden früher hauptsächlich Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulatoren vertrieben, so sind es heute die auf Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxiden basierenden sogenannten NMC-Akkumulatoren.

Allen Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist gemeinsam, dass die Zellen gasdicht versiegelt sein müssen und lageunabhängig betrieben werden können. Lithium-Ionen-Akkumulatoren haben eine höhere spezifische Energie als andere Akkumulatortypen. Die spezifische Energie liegt in der Größenordnung von 150 Wh/kg und die Energiedichte in der Größenordnung von 400 Wh/L, womit Lithium-Ionen-Akkumulatoren besonders im Bereich mobiler Anwendungen als elektrischer Energiespeicher interessant sind und den Aufbau von Akkumulatoren geringer Größe und Masse erlauben.

Die ablaufenden Reaktionen lauten für das Entladen des Lithium-Mangan-Akkumulators wie folgt:

An der Anode wandern die eingelagerten Lithium-Ionen aus dem **negativ geladenen Kohlenstoffgitter** in den Elektrolyten und die Elektronen aus dem Kohlenstoff fließen über den elektrischen Leiter durch ein elektrisches Gerät zum Pluspol des galvanischen Elements.

An der Kathode reduzieren die Elektronen die **Mangan(IV)-Ionen im Kristallgitter** zu Mangan (III)-Ionen. Dadurch entsteht ein negativ geladenes Manganoxid-Gitter, welches zum Ladungsausgleich das Hineinwandern der Lithium-Ionen bewirkt.

Die eigentliche Redoxreaktion, also die Elektronenübertragung mit Änderung der Ladung, erfolgt zwischen dem geladenen Kohlenstoff und dem Mangan. Es findet keine Oxidation oder Reduktion der Lithium-Ionen statt.

Im Prinzip handelt es sich bei diesem Akkumulator um einen Einlagerungsmechanismus von Lithium-Ionen, den man auch Interkalation oder Rocking Chair-Mechanismus (Schaukelstuhl-Mechanismus) nennt.

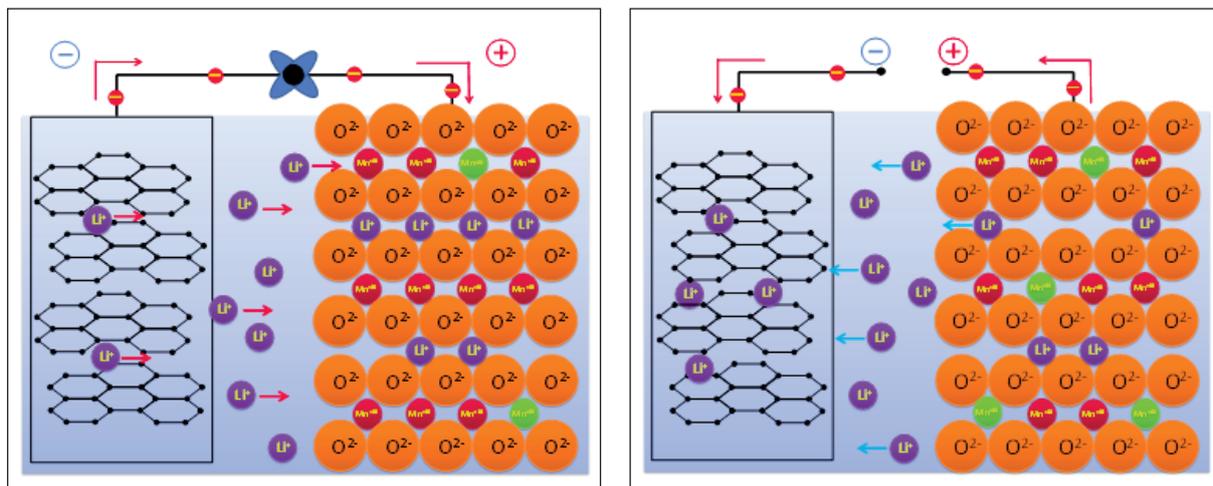


Abb. 22: Abläufe beim Entladen (links) und Laden (rechts) des Lithium-Ionen-Akkumulators (<https://www.der-hedinger.de/experimentier-set-lithium-15-erweiterte-und-las%20110>)

Anmerkung zur schematischen Darstellung: Das „Auftreten“ und „Verschwinden“ der Elektronen sowie die positive Ladung am Kohlenstoffgitter an den Graphitfolien kann mit den Schülerinnen und Schülern im Sinne einer Modellkritik diskutiert werden.

Beim Laden erfolgen alle Prozesse in umgekehrter Richtung.

| Entladen | Laden |
|---|---|
| Anodenreaktion am Minuspol Oxidation | Kathodenreaktion am Minuspol Reduktion |
| $\text{Li}^+_x\text{C}_n^x \rightarrow \text{C}_n + x \text{Li}^+ + x \text{e}^-$ | $\text{C}_n + x \text{Li}^+ + x \text{e}^- \rightarrow \text{Li}^+_x\text{C}_n^x$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol Reduktion | Anodenreaktion am Pluspol Oxidation |
| $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 + x \text{Li}^+ + x \text{e}^- \rightarrow \text{LiMn}_2\text{O}_4$ | $\text{LiMn}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 + x \text{Li}^+ + x \text{e}^-$ |
| Gesamtreaktion (Redoxreaktion) | Gesamtreaktion (Redoxreaktion) |
| $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 + \text{Li}_x\text{C}_n \rightarrow \text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{C}_n$ | $\text{LiMn}_2\text{O}_4 + \text{C}_n \rightarrow \text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4 + \text{Li}_x\text{C}_n$ |

Der Lithium-Ionen-Akkumulator im Unterricht

Die Omnipräsenz dieses Akkumulatortyps in unserer Lebenswelt legitimiert, ja erzwingt förmlich die Thematisierung im Unterricht, auch in der Sekundarstufe 1.

Die Vorgänge an den Elektroden mit der Reduktion des Mangan-Ions und der Oxidation der negativ geladenen Kohlenstoff-Teilchen werden mit den Schülerinnen und Schülern geklärt. Dabei wird deutlich, dass der Namensgeber dieser Akkumulatoren, das **Lithium-Ion**, seine Ladung gar nicht verändert.

Für den Unterricht steht ein sehr praktikabler Modellversuch für einen Lithium-Ionen-Akkumulator von Oetken et al. zur Verfügung. Er besteht, im Unterschied zum kommerziellen Produkt, auf Anoden- wie auf Kathodenseite aus Grafit (Bleistiftmine oder Grafitfolie).

Zur Erklärung dieses Modellversuchs auf der Teilchenebene können folgende, vereinfachte Formelgleichungen genutzt werden. Dabei wird, wie in der Literatur beschrieben, von einem Verhältnis der Lithium-Ionen zu Kohlenstoff-Teilchen von 1:6 ausgegangen.

| Entladen | Laden |
|--|--|
| Anodenreaktion am Minuspol Oxidation | Kathodenreaktion am Minuspol Reduktion |
| $\text{Li}^+\text{C}_6^- \rightarrow \text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^-$ | $\text{C}_6 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Li}^+\text{C}_6^-$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol Reduktion | Anodenreaktion am Pluspol Oxidation |
| $\text{C}_6^+(\text{ClO}_4)^- + \text{e}^- \rightarrow \text{C}_6 + (\text{ClO}_4)^-$ | $\text{C}_6 + (\text{ClO}_4)^- \rightarrow \text{C}_6^+(\text{ClO}_4)^- + \text{e}^-$ |
| Gesamtreaktion (Redoxreaktion) | Gesamtreaktion (Redoxreaktion) |
| $\text{Li}^+\text{C}_6^- + \text{C}_6^+(\text{ClO}_4)^- \rightarrow 2 \text{C}_6 + \text{Li}^+ + (\text{ClO}_4)^-$ | $2 \text{C}_6 + \text{Li}^+ + (\text{ClO}_4)^- \rightarrow \text{Li}^+\text{C}_6^- + \text{C}_6^+(\text{ClO}_4)^-$ |

Hinweis für die Lehrkraft: Bei variabler Elektronenzahl x ergeben sich folgende Reaktionsgleichungen:

| Entladen | Laden |
|---|---|
| Anodenreaktion am Minuspol Oxidation | Kathodenreaktion am Minuspol Reduktion |
| $\text{Li}^+_x\text{C}_n^{x-} \rightarrow \text{C}_n + x \text{Li}^+ + x \text{e}^-$ | $\text{C}_n + x \text{Li}^+ + x \text{e}^- \rightarrow \text{Li}^+_x\text{C}_n^{x-}$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol Reduktion | Anodenreaktion am Pluspol Oxidation |
| $\text{C}_n^{x+}(\text{ClO}_4)^{-x} + x \text{e}^- \rightarrow \text{C}_n + x (\text{ClO}_4)^-$ | $\text{C}_n + x (\text{ClO}_4)^- \rightarrow \text{C}_n^{x+}(\text{ClO}_4)^{-x} + x \text{e}^-$ |
| Gesamtreaktion (Redoxreaktion) | Gesamtreaktion (Redoxreaktion) |
| $\text{Li}^+_x\text{C}_n^{x-} + \text{C}_n^{x+}(\text{ClO}_4)^{-x} \rightarrow 2 \text{C}_n + x \text{Li}^+ + x (\text{ClO}_4)^-$ | $2 \text{C}_n + x \text{Li}^+ + x (\text{ClO}_4)^- \rightarrow \text{Li}^+_x\text{C}_n^{x-} + \text{C}_n^{x+}(\text{ClO}_4)^{-x}$ |

Der Versuchsaufbau besteht aus zwei Graphitminen oder zwei Graphitfolien (Abb. 23), die in eine Elektrolyt-Lösung aus Lithiumperchlorat in einem aprotisch-polaren Lösemittel, wie Propylencarbonat und Diethylcarbonat, tauchen.

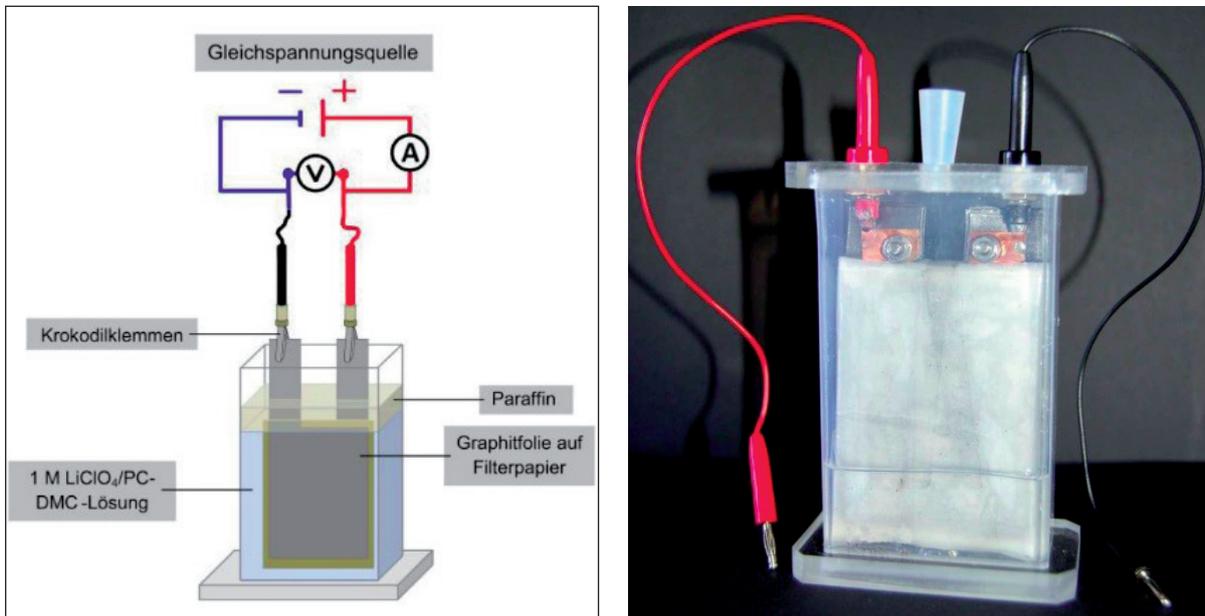


Abb. 23: Schematischer Aufbau einer Dual-Carbon-Cell (links) und fertige, befüllte Dual-Carbon-Cell (rechts) (<https://www.der-hedinger.de/experimentier-set-lithium-15-erweiterte-und-las%20110>)

Der erstmalig zusammengesetzte Akkumulator ist entladen und muss durch eine Ladespannung von etwa 4,5 V über mehrere Minuten aufgeladen werden. Anschließend lässt sich ein Solarmotor betreiben.



Abb. 24: Laden des Modell-Lithium-Ionen-Akkumulators

Eine Animation veranschaulicht Schülerinnen und Schülern auf der Teilchenebene den Ladevorgang, also den Prozess der Einlagerung (Interkalation) der Lithium-Ionen und der Perchlorat-Ionen (Abb. 25, rechtes Schema). Beim Entladen wandern die Ionen aus den Graphitstrukturen heraus in den Elektrolyten (Abb. 25, linkes Schema).

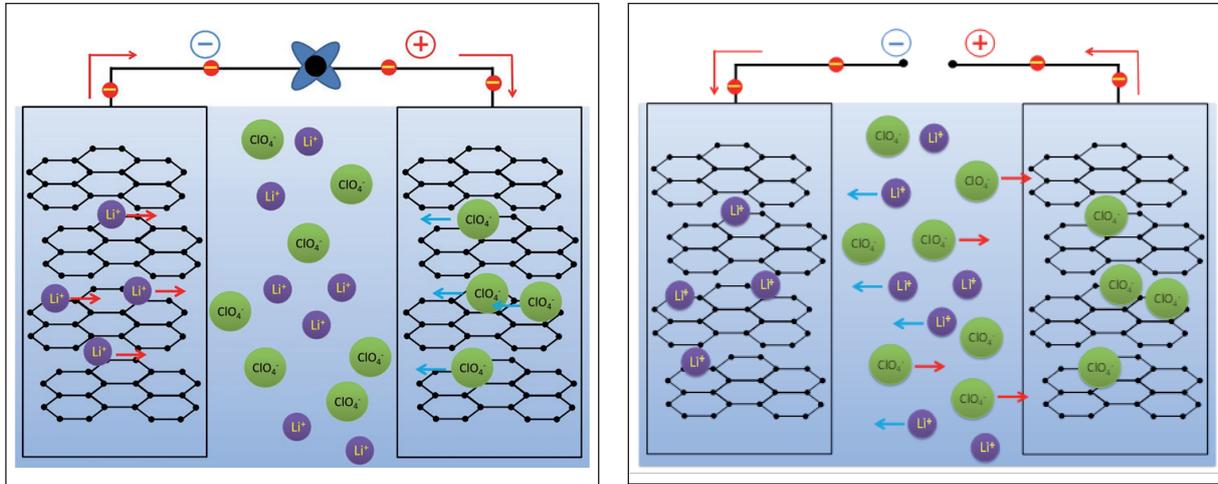


Abb. 25: Abläufe beim Entladen und Laden des Modell-Lithium-Ionen-Akkumulators
(<https://www.der-hedinger.de/experimentier-set-lithium-15-erweiterte-und-las%20110>)

Onlinematerial: LE1_ppt_Li-Ionen-Akku_Animation zur Teilchenebene

Anmerkung zur Animation: Das „Auftreten“ und „Verschwinden“ der Elektronen sowie die positive Ladung am Kohlenstoffgitter an den Graphitfolien kann mit den Schülerinnen und Schülern im Sinne einer Modellkritik diskutiert werden.

Im Kapitel 3.3 Lerneinheit 3 folgen Ausführungen zur Zyklenhaltbarkeit und zum Verschleiß beim Betrieb des Akkumulators.

3.2 Lerneinheit 2: Die Redoxreihe nutzen zur Entwicklung mobiler Energieträger

| | | |
|--|---|--|
| Stoffe unterscheiden sich in ihrer Tendenz zur Elektronenabgabe (Oxidation) bzw. -aufnahme (Reduktion). In der Kombination zweier geeigneter Halbzellen entsteht ein galvanisches Element. | | |
| Einführende Lernsituationen: Schülerfragen aus dem Einstieg in den Kontexten, z. B.: | | |
| Welche Spannungen werden erreicht? | | |
| Wovon hängt die Spannung ab? | | |
| Welches ist die stärkste Batterie? | | |
| Warum nimmt man gerade Lithium? | | |
| Wie funktioniert der Lithium-Ionen-Akku? | | |
| Kompetenzentwicklung | Schüleraktivität | Fachwissen/Basiskonzept |
| Schülerinnen und Schüler ... | | |
| ... führen Versuche zu galvanischen Elementen und der Redoxreihe bzw. Spannungsreihe durch, protokollieren sie und werten sie aus. | ... kombinieren verschiedene Halbzellen (aus Metallen mit ihren Metallsalz-Lösungen) miteinander und messen die Spannungen oder messen die Spannung gegen die Sauerstoff-Halbzelle. | galvanisches Element Redoxreihe Spannungsreihe |
| Material/Medien | | |
| Kontext „Von der Zink-Luft-Batterie zum Li-Ionen-Akku“ | Kontext „Vom Daniell-Element zum Li-Ionen-Akku“ | |
| 21_LE2_SV_Spannungsreihe_analog Zink-Sauerstoff-Element | 22_LE2_SV_Spannungsreihe_analog Daniell-Element | |
| 02_LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen (Folien 13-17) | | |
| 23_LE2_SV_Lithium-Sauerstoff-Element | | |

In dieser Lerneinheit geht es um

- die ausschnittsweise qualitative und gegebenenfalls auch quantitative Ableitung der elektrochemischen Spannungsreihe,
- die Optimierung der Leistungsfähigkeit von galvanischen Elementen durch Variation verschiedener Halbzellen (Redoxpartner) und
- die Verwendung des Alkalimetalls Lithium bzw. seiner Ionen in galvanischen Elementen.

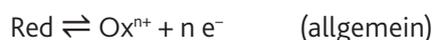
3.2.1 Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft

Reduktions- und Oxidations-Reaktionen (Redox-Reaktionen)

Bei vielen chemischen Reaktionen kommt es auf der Teilchenebene zur Übertragung von Elektronen. Diese erfolgt nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip und bedingt, dass es immer einen Elektronendonator geben muss. Gleichzeitig gibt es einen korrespondierenden Elektronenakzeptor, der die zu übertragenden Elektronen aufnimmt. Es stellt sich ein Gleichgewicht entsprechend dem Massenwirkungsgesetz ein. Die Neigung zur Elektronenübertragung ist von Stoff zu Stoff sehr verschieden und es kommt immer auf den Reaktionspartner an.

Redox-Reaktionen in wässrigen Systemen

Bei galvanischen Elementen handelt es sich in der Regel um wässrige Systeme, mit wichtigen Ausnahmen wie z. B. dem Lithium-Ionen-Akkumulator. Für die ablaufenden Reaktionen in einer Halbzelle formuliert man das elektrochemische Gleichgewicht zwischen der reduzierten und der oxidierten Form:



Ausbildung des Potentials

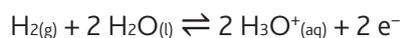
Jedes Metall (Element) besitzt seinen typischen Aufbau aus Protonen, Neutronen und hier besonders wichtig, Elektronen in einer speziellen Verteilung. Zum Herauslösen von Elektronen aus einem Atom ist unterschiedlich viel Energie notwendig. Für jedes Metall liegen Verdampfungsenthalpien (zur Bildung einzelner Atome), Ionisierungsenthalpien und bestimmte Hydratationsenthalpien vor. Daraus ergibt sich ein ganz bestimmtes „Bestreben“, in Lösung zu gehen bzw. sich abzuscheiden. Dieses bezeichnet man auch als Lösungstension (Lösungsdruck). Quantitativ gibt man dies als elektrochemisches Potential an.

Auch Nichtmetalle wie Sauerstoff, Wasserstoff oder Halogene, die in der oxidierten bzw. reduzierten Form im Gleichgewicht an Inertelektroden vorliegen, bilden Potentiale aus.

Bezugspunkt

Da man das elektrochemische Potential einer Halbzelle immer nur im Vergleich zu einer anderen Halbzelle messen kann, werden stets Potentialdifferenzen gemessen. Die Potentialdifferenz ist definitionsgemäß die elektrische Spannung.

Um die Potentiale von Halbzellen zu tabellieren, benötigt man eine Bezugsgröße. Als Nullpunkt verwendet man vereinbarungsgemäß die Standardwasserstoffelektrode (auch als Normalwasserstoff-Elektrode bezeichnet und mit NHE abgekürzt). Sie besteht aus einer wasserstoffumspülten platinieren Platin-Elektrode, die bei 25°C in eine Lösung mit einer Wasserstoff-Ionen-Konzentration von 1 mol/L taucht. Ihr wird definitionsgemäß das Potential 0 V zugeordnet.



Spannungsreihe

In der elektrochemischen Spannungsreihe sind die Elemente samt ihren im Gleichgewicht stehenden Ionen mit dem zugehörigen Potenzial gegenüber der Standardwasserstoffelektrode angeordnet (Standardpotenzial). Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Ausschnitt.

| Element im Redox-Paar, das oxidiert oder reduziert wird | Oxidierte Form | $+ z e^- \rightleftharpoons$ | Reduzierte Form | Standard-Potenzial E° | Bei einem pH-Wert von |
|---|----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------|
| Sauerstoff (O) | $O_2 + 4 H^+$ | $+ 4 e^- \rightleftharpoons$ | $2 H_2O$ | +1,23 V | 0 |
| Sauerstoff (O) | $O_2 + 2 H_2O$ | $+ 4 e^- \rightleftharpoons$ | $4 OH^-$ | +0,40 V | 14 |
| Kupfer (Cu) | Cu^{2+} | $+ 2 e^- \rightleftharpoons$ | Cu | +0,35 V | |
| Wasserstoff (H) | $2 H^+$ | $+ 2 e^- \rightleftharpoons$ | H_2 | +0,0 V | 0 |
| Zink (Zn) | Zn^{2+} | $+ 2 e^- \rightleftharpoons$ | Zn | -0,76 V | |
| Wasserstoff (H) | $2 H_2O$ | $+ 2 e^- \rightleftharpoons$ | $H_2 + OH^-$ | -0,83 V | 14 |
| Lithium (Li) | Li^+ | $+ e^- \rightleftharpoons$ | Li | -3,04 V | |

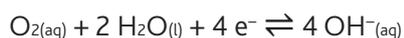
Unterschied zwischen der Redoxreihe und der Spannungsreihe

Definitionsgemäß handelt es sich bei der Redoxreihe nicht (zwingend) um Reaktionssysteme im wässrigen Milieu. Für die Größe der Potenziale in der Spannungsreihe sind in wässrigen Systemen stets auch die Hydratationsenthalpien verantwortlich. Dies ist in Abgrenzung zur Redoxreihe ein Unterschied. Bei der Redoxreihe erfolgt die Ordnung der Stoffe nach den freien Bildungsenthalpien für die Reaktionen von Elementen mit Sauerstoff zu Elementoxiden, z. B. Mg/MgO. Wegen der Hydratationsenthalpien sind Magnesium und Natrium zum Beispiel in der Spannungsreihe gegenüber der Redoxreihe vertauscht angeordnet. Das bedeutet, dass die Redoxreihe nicht gleich der Spannungsreihe ist, die Unterschiede aber sehr gering sind (vgl. Jansen, W.; Flint, A., 2005).

Redox-Systeme von Nichtmetallen

Wie bereits bei der Standardwasserstoffelektrode als Bezugs elektrode beschrieben, ist es möglich, dass auch Gase an Elektroden umgesetzt werden. Dabei nehmen die elektronenableitenden Elektrodenmaterialien wie z. B. Platin an der eigentlichen Reaktion nicht teil und werden als inert bezeichnet. Ihre Funktion entspricht der eines Katalysators.

Für in Wasser gelösten Sauerstoff gilt die Redox-Gleichung:



Das Standardpotenzial beträgt $E^\circ = +0,82 \text{ V}$ bei $\text{pH} = 7$.

Die Potenzialabhängigkeit von der Oxoniumionen-Konzentration lässt sich mit der Nernst-Gleichung beschreiben. Die Redox-Systeme von Nichtmetallen werden entsprechend ihrem Standardpotenzial in die Spannungsreihe integriert.

Redoxsystem gelöster Ionen

Es ist mithilfe einer inerten Elektrode (z. B. Platin oder Grafit) auch möglich, das Potenzial eines Redoxsystems gelöster Ionen, z. B. $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, gegen eine Bezugs elektrode zu messen.

Alkali- und Erdalkali-Metalle als Elektrodenmaterialien, speziell Lithium

Bei der elektrochemischen Spannungsreihe fallen Alkali- und Erdalkali-Metalle mit ihren sehr negativen Standardpotenzialen auf. Daraus lässt sich schließen, dass diese sich grundsätzlich zur Erzeugung hoher Spannungen (Potenzialdifferenzen) und damit für leistungsstarke galvanische Elemente eignen. Allerdings reagieren diese Metalle bereits bei Kontakt mit einem wässrigen Elektrolyten, so dass ihre Reaktion mit Wasser in Konkurrenz zur gewünschten Elektronenübertragungsreaktion tritt. Und da der entstehende Wasserstoff explosiv ist, können wässrige Systeme mit diesen Metallen nicht verwendet werden.

Daher kommen nur Lösemittel in Frage, die keine Protonenabspaltung ermöglichen, so dass keine Reduktion zu Wasserstoff möglich ist. Gleichzeitig sollen sie aber Ionen lösen. Solche Lösemittel bezeichnet man als aprotisch-polar. Sie besitzen stark polarisierende funktionelle Gruppen und weisen ein permanentes Dipolmoment auf. Beispiele sind Ketone (Aceton) und Ester.

Der Einsatz von Lithium in galvanischen Elementen wäre ohne diese aprotisch-polaren Lösemittel nicht möglich.

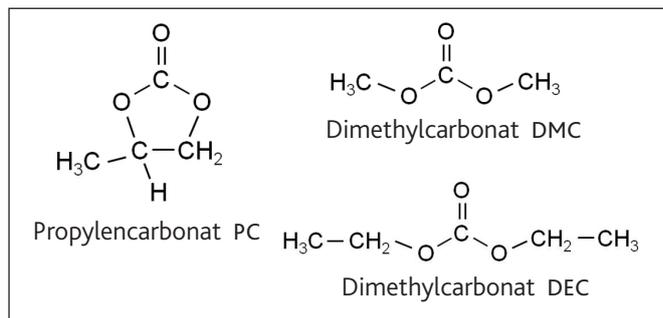


Abb. 26: Struktur aprotisch-polarer Lösemittel, z. B. Ester

Optimierung der Leistungsfähigkeit galvanischer Elemente bedeutet also eine Variation verschiedener Halbzellen (Redoxpartner) mit möglichst weitem Abstand in der Spannungsreihe, damit es zu großen Spannungen (Potenzialdifferenzen) kommt. Des Weiteren lassen sich Spannungen erhöhen, indem man mehrere galvanische Elemente in Reihe schaltet.

Bisweilen tritt eine thermodynamisch zu erwartende Wasserstoffentwicklung nicht bei der theoretischen Zersetzungsspannung auf, sondern erst bei deutlich höheren Elektrolysespannungen. Es liegen dann sogenannte Überspannungen vor, die auf kinetischen Hemmungen von Teilreaktionen am verwendeten Elektrodenmaterial zurückzuführen sind. Aus diesem Grund entsteht z. B. beim Laden eines Bleiakкумуляtors mit 2,2 bis 2,4 V pro Zelle kein Wasserstoff, obwohl die Zersetzungsspannung nur 1,23 V beträgt. Das Überpotenzial von Wasserstoff an Blei-Elektroden ist so hoch, dass die Wasserstoffbildung ausbleibt.

Dieser Effekt tritt aber bei den Alkali- und Erdalkali-Metallen als Elektrodenmaterialien in Wasser leider nicht auf, so dass sich in diesen Fällen Wasserstoff als unerwünschtes Produkt bildet.

Bei einzelnen gebräuchlichen Metallen müssen Besonderheiten beachtet werden, wenn im Unterricht Schülerversuche zur Ableitung der Spannungsreihe durchgeführt werden:

Aluminium

In den Kopplungen von Magnesium, Zink, Eisen und Zinn mit der Sauerstoff-Elektrode nach dem Freiburger Aufbau lässt sich ein Kleinelektromotor betreiben. Bei Kupfer ist die Spannung zu gering. Das entspricht den Erwartungen.

Beim Aluminium gibt es gleich zwei Auffälligkeiten. Zum einen funktioniert der Motor nicht und zum anderen ist, wie oben geschildert, das Potenzial mit etwa $-0,31\text{ V}$ deutlich zu positiv gegenüber dem Literaturwert von $-1,66\text{ V}$. Folglich hätte man auch eine Spannung von über $2,07\text{ V}$ erwarten dürfen.

Experimentell gelingt es auch unter Standardbedingungen nicht, den Literaturwert von $-1,66\text{ V}$ für Aluminium zu messen. Er ist aus energetischen Größen (freie Reaktionsenthalpie) berechnet und nie gemessen worden. Ein zu messendes Potenzial ist immer weniger negativ: $-0,288\text{ V}$ bei Aluminiumsulfat-Lösung ($c = 1\text{ mol/L}$) und $-0,504\text{ V}$ bei Aluminiumchlorid-Lösung ($c = 1\text{ mol/L}$). Die Ursache liegt in der Aluminiumoxid-Schutzschicht, durch die jede Aluminiumoberfläche passiviert vorliegt, was bei der Potenzial-Einstellung berücksichtigt werden muss. Die oben genannten Messwerte entsprechen den in der schulischen Praxis zu erzielenden (vgl. Van der Veer, W. et al., 1996).

Für den Betrieb des Motors würde aber die Spannung genügen, wenn ausreichend Strom fließen könnte. Auch das verhindert die Aluminiumoxid-Schutzschicht, so dass die Stoffumsätze an Aluminium in einer Sulfat-Lösung nicht ausreichen. Verwendet man eine Chlorid-Ionen-Lösung oder eine alkalische Lösung, so wird die Schutzschicht davon angegriffen und man kann sehr leicht einen Motor betreiben.

Eisen

Eisen bildet in Wasser zwei Oxidationsstufen aus. In Wasser gibt es zwischen diesen beiden ebenfalls ein Gleichgewicht:



Beim Eintauchen eines Eisenbleches in eine Eisen(II)-Ionen-Lösung einer Konzentration von 1 mol/L , die nicht völlig sauerstofffrei ist, bildet sich ein Mischpotenzial aus, das auf den drei genannten Reaktionen basiert. Mit einem üblichen Versuchsaufbau in der Schule ist das Standardpotenzial für die Reaktion $\text{Fe}^{2+} + 2\text{ e}^{-} \rightleftharpoons \text{Fe}$ ($E^{\circ} = -0,41\text{ V}$) nicht messbar.

Außerdem benutzt man in der Praxis keine Bleche aus 100% reinem Eisen, sondern üblicherweise Stahlbleche. Diese sind in ihrer Zusammensetzung so beschaffen, dass sie möglichst wenig rosten, was bedeutet, dass ihr Redoxverhalten und ihr Potenzial deutlich verändert ist. In der schulischen Praxis misst man Potenziale von etwa $-0,2\text{ V}$ (vgl. Jansen, W. et al., 1991).

3.2.2 Die Optimierung galvanischer Elemente im Unterricht

Der Schwerpunkt dieser Lerneinheit liegt auf der Erhöhung der Spannung durch Variation der Redoxpartner mit ausschnittsweiser qualitativer ggf. auch quantitativer Ableitung der Spannungsreihe.

Zum Kontext: Von der Zink-Luft-Knopfzelle zum Lithium-Ionen-Akku

Schülerfragen: Welche Spannungen werden erreicht? Wovon hängt die Spannung ab?

Im Unterrichtsgang, in dem das Zink-Sauerstoff-Element im Zentrum steht, planen Schülerinnen und Schüler einfache Versuche und führen sie durch. Sie schalten anstatt des Zinks andere Metalle gegen die Sauerstoff-Halbzelle und messen die Spannung. Im Sinne der Optimierung finden Schülerinnen und Schüler so dasjenige Metall unter den verwendeten, bei dem die größtmögliche Spannung gegenüber der Sauerstoff-Halbzelle besteht. Sie erreichen damit grundsätzlich das Ziel der Optimierung in Bezug auf die Spannung.

Mit den üblichen in der Schule vorhandenen Metallen ergeben sich folgende Messwerte:

| | Mg | Zn | Al | Fe | Sn | Cu | Ag |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| Spannung in Bezug auf die Sauerstoff-Elektrode | 1,98 V | 1,15 V | 0,71 V | 0,63 V | 0,56 V | 0,18 V | -0,02 V bis +0,02 V |

Die unter diesen Bedingungen zu messenden Spannungen weichen von den aus den Standardpotenzialen berechenbaren Spannungen ab. Dies liegt daran, dass keine Standardbedingungen vorliegen und insbesondere die Konzentrationen von 1 mol/L der zu den Metallen korrespondierenden Metallionen nicht erreicht werden. Bei der Sauerstoffelektrode liegt keine Gasumspülung mit Sauerstoff vor und der pH-Wert ist nicht konstant. Ihr Potenzial beträgt unter diesen Bedingungen etwa +0,4 V.

Eine Umrechnung der gemessenen Spannungen (gegenüber der Sauerstoff-Elektrode) in Potenziale gegenüber NHE ist im Unterricht nicht intendiert, zur Veranschaulichung hier aber aus den Versuchsergebnissen berechnet. Diese sachlogische Abweichung ist unter didaktischen Gesichtspunkten in Bezug auf das Ziel einer Abstufung von Redoxpaaren/Halbzellen gegeneinander gut vertretbar.

| | Mg | Zn | Al | Fe | Sn | Cu | Ag |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|-----------------|
| Potenzial gegenüber NHE | -1,58 V | -0,75 V | -0,31 V | -0,23 V | -0,16 V | 0,22 V | 0,40 V ± 0,02 V |

Schülerinnen und Schüler leiten aus diesen Messwerten eine Reihenfolge unter den verwendeten Metallen ab, die sich nach der Größe der Spannung gegenüber der Sauerstoff-Halbzelle ergibt. Die größte Spannung erzielt Magnesium und die niedrigste Spannung Silber. Somit liegt unter diesen Versuchsbedingungen die elektrochemische Spannungsreihe qualitativ bzw. sogar halbquantitativ vor. Die Ausnahme bildet das Aluminium (siehe Kap. 3.2.1).

Grundniveau: Grundsätzlich kann im Unterricht der Sekundarstufe 1 auf den Begriff des Potentials verzichtet werden.

Vertiefung: Sie wird notwendig, wenn man mit den Schülerinnen und Schülern die elektrochemische Spannungsreihe mit den tabellierten Werten betrachtet. Dann ist zu definieren, dass die Spannung die Differenz der Potentiale der beiden beteiligten Halbzellen ist. Im Physik-Unterricht werden im TF 6 „Spannung und Energie“ die Potentiale im hier vorliegenden Sinne bereits thematisiert.

Onlinematerial:

LE2_SV_Spannungsreihe analog Zink-Sauerstoff

LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen

Zum Kontext: Vom Daniell-Element zum Lithium-Ionen-Akku

Schülerfragen: Welche Spannungen werden erreicht? Wovon hängt die Spannung ab?

Wenn im historischen Unterrichtsgang das Daniell-Element zur Optimierung herangezogen wird, stellen Schülerinnen und Schüler verschiedene Halbzellen mit Metallen in ihren Metallsalz-Lösungen zusammen, die sie über Ionenbrücken immer paarweise koppeln und die entsprechende Spannung messen. Setzen Schülerinnen und Schüler die Messwerte dann in Beziehung zueinander, so ergibt sich eine quantitative Abstufung entsprechend der elektrochemischen Spannungsreihe.

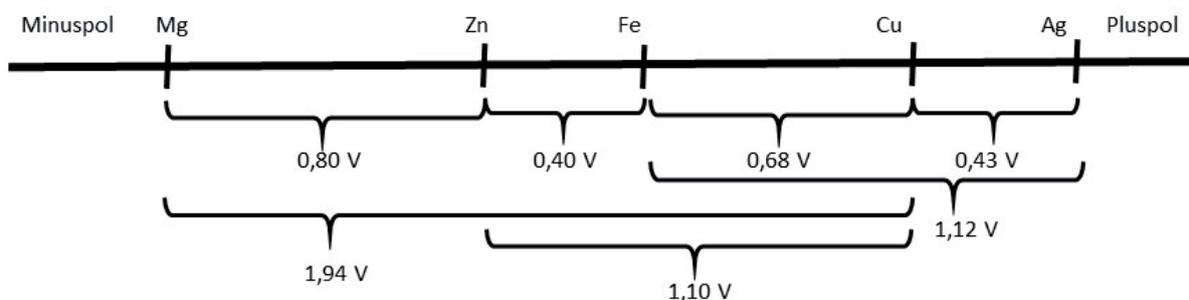


Abb. 27: Gemessene Spannungen U zwischen verschiedenen Halbzellen

Integriert man die Standardwasserstoffelektrode als Nullpunkt und nutzt man Metallsalz-Lösungen der Konzentration 1 mol/L, so ergeben sich nahezu die Standardpotentiale der beteiligten Metalle entsprechend der elektrochemischen Spannungsreihe. Dies ist für das Ziel einer Optimierung galvanischer Elemente nicht zwingend notwendig und dient der vertiefenden Theoriebildung.

Onlinematerial: LE2_SV_Spannungsreihe analog Daniell-Element

Lithium in galvanischen Elementen

Schülerfragen: Welches ist die stärkste Batterie? Warum nimmt man gerade Lithium? Wie funktioniert der Lithium-Ionen-Akku?

In beiden vorgeschlagenen Kontexten führen die Ergebnisse der Optimierung der Spannung zur Frage, welches Metall als Anodenmaterial die größtmögliche Spannung liefert, wodurch das bestmögliche galvanische Element entstehen könnte. Diese Überlegung führt zum derzeit weit verbreiteten Lithium-Ionen-Akkumulator als mobile, wiederaufladbare Energiequelle.

Sollte die elektrochemische Spannungsreihe auf der Basis der selbst durchgeführten Untersuchungen eingeführt worden sein, so nutzen Schülerinnen und Schüler die Parallelen zwischen der Stellung in der Spannungsreihe und der Reaktionsfreudigkeit der Metalle qualitativ, um Vorhersagen über eine mögliche Vergrößerung der Spannung zu treffen. Oder es kommt die Frage nach den Alkalimetallen als Elektrodenmaterialien auf, da diese in den eigenen Untersuchungen der Lernenden bisher ausgespart wurden. In beiden Fällen resultieren interessante Versuche mit den Alkalimetallen, insbesondere mit Lithium.

Möglicherweise ist den Schülerinnen und Schülern das Reaktionsverhalten von Natrium mit Wasser bereits bekannt (Wasserstoffbildung im Themenfeld 6 Säuren und Laugen, gefährliche Stoffe im Themenfeld 10) oder es wird demonstriert. Die heftige Wasserstoffbildung macht anschaulich deutlich, dass der Einsatz von Alkalimetallen in wässrigen Elektrolyten nicht möglich ist.

Eine Fokussierung durch die Lehrkraft auf Lösemittel, die keine Protonenabspaltung zulassen (aprotisch-polare Lösemittel), führt aus dieser Problematik heraus.

Ein einfacher Aufbau eines galvanischen Elements unter Lithium-Beteiligung besteht in der Kopplung von Lithium gegen die Sauerstoff-Elektrode (vgl. „Freiburger Kohleelektrode“ Kapitel 3.1, Lerneinheit 1) in einer Mischung aus protonenfreien Lösemitteln (z. B. Propylencarbonat/Dimethylcarbonat) und mit dem Elektrolyt Lithiumperchlorat (vgl. Rosenberg, D., 2020).

Die Spannung beträgt etwa 3 V. Beim Betrieb eines Motors stellt dieses Element eine Stromstärke von 15 mA bei einer Spannung von etwa 1,9 V zur Verfügung.

| | |
|------------------------------------|---|
| Anodenreaktion am Minuspol | |
| Oxidation | $2 \text{Li} \rightarrow 2 \text{Li}^+ + 2 \text{e}^-$ |
| Kathodenreaktion am Pluspol | |
| Reduktion | $\text{O}_2 + 2 \text{Li}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Li}_2\text{O}_2$ |
| Gesamtreaktion | |
| Redoxreaktion | $2 \text{Li} + \text{O}_2 \rightarrow \text{Li}_2\text{O}_2$ |

Onlinematerial: LE2_SV_Lithium-Sauerstoff-Element

Auf der Basis des Lithium-Sauerstoff-Elements als Primärzelle lässt sich die Wiederaufladung als wünschenswerte Weiterentwicklung thematisieren, um zu einer Sekundärzelle zu gelangen.

Diese Sekundärzelle ist als Lithium-Ionen-Akku bekannt und weit verbreitet. Die unterrichtliche Einbindung des Lithium-Ionen-Akkus mithilfe eines Modellversuchs ist im Kapitel 3.1, Lerneinheit 1, Sekundärelemente, vorgestellt.

Bei entsprechenden Nachfragen besteht die didaktische Herausforderung darin, den Schülerinnen und Schülern zu vermitteln, dass die Lithium-Ionen selbst nicht reduziert werden (vgl. Kapitel 3.1.3), was aufgrund des Gelernten zu erwarten gewesen wäre.

Es wurde und wird aktiv daran geforscht, die potenzialbildenden Prozesse zu identifizieren und zu erklären. Für Schülerinnen und Schüler bietet sich daher die besondere Möglichkeit, wissenschaftlich-technische Entwicklung auch in den nächsten Jahren zu erleben.

Onlinematerial: LE1_SV_Lithium-Ionen-Modell-Akku

Vertiefung für leistungsstarke Schülerinnen und Schüler, auch zum individuellen Weiterforschen

Neben der Erhöhung der Spannung können galvanische Elemente auch bzgl. der maximalen Ladungsmenge („Kapazität“) optimiert werden, damit größere Stromstärken erzielt werden, um beispielsweise Glühlampen zum Leuchten zu bringen. Diese Art der Optimierung erfolgt durch Vergrößerung der Oberflächen.

Sie soll grundsätzlich der Sekundarstufe 2 vorbehalten bleiben, kann aber mit interessierten Schülerinnen und Schülern thematisiert werden, ohne abprüfbares Fachwissen zu werden. Für einzelne Lernende ist es interessant, die Auswirkungen verschieden großer Elektrodenflächen (z. B. bei Zink- bzw. Graphitstab mit Aktivkohlepulver) zu testen. Beim Modellversuch zum Lithium-Ionen-Akkumulator entsteht mit Graphitminen beginnend ein funktionierender Akkumulator, aber mit sehr geringer Betriebsdauer. Bei einer Vergrößerung der Fläche durch die Nutzung von Graphitfolien lassen sich Elektromotoren nach wenigen Minuten Ladezeit passabel betreiben.

Des Weiteren können Schülerinnen und Schülern die Konzentration an Sauerstoff oder die Kupfer-(II)-Ionen-Konzentration erhöhen, um die Auswirkungen auf die Betriebsdauer zu beobachten.

Treten solche Fragestellungen in leistungsstarken Lerngruppen oder bei einzelnen Interessierten auf, so bieten sich diese zum selbstständigen Weiterforschen an. Insbesondere die Elektrochemie ermöglicht das vergleichsweise gefahrlose selbstständige Experimentieren der Schülerinnen und Schüler auch und gerade zu Hause.

3.3 Lerneinheit 3: Energie mobiler Energieträger

| | | |
|---|---|---|
| Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Elementen wird der Energieträger gewechselt. Dies macht sich am elektrischen Stromfluss bemerkbar. | | |
| Einführende Lernsituationen: Schülerfragen aus dem Einstieg in den Kontext, z. B. Wie genau funktioniert die Umwandlung in elektrische Energie? Wie stark ist eine Batterie? Hat die Größe etwas mit der Stärke zu tun? Bis zu welchen Kapazitäten reichen Batterien? Wann ist eine Batterie leer? Warum lädt man nicht jeden Akku so schnell wie möglich? Warum gibt es unterschiedliche Bauarten, Größen, Leistung? Welche Batterie ist für welches Gerät passend? Wieso ist der Lithium-Ionen-Akku besser als andere? | | |
| Kompetenzentwicklung | Schüleraktivität | Fachwissen/Basiskonzept |
| Schülerinnen und Schüler ... | | |
| ... führen Versuche zu galvanischen Elementen und der Redoxreihe durch, protokollieren sie und werten sie aus. ... bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit) und Kriterien zur Nachhaltigkeit anwenden. | ... messen Spannung bzw. Stromstärke beim Betrieb eines galvanischen Elements. ... berechnen und vergleichen Kenndaten von galvanischen Elementen. | Spannung spezifische Energie bzw. Energiedichte Ladezeit Zyklenhaltbarkeit |
| Material/Medien | | |
| 31_LE3_AB_Info_Basiskonntnisse Elektrizitätslehre 32_LE3_AB_Bestimmung Ladungsmenge und spezifische Energie 33_LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten 34_LE3_AB_Knopfzellen Aufgaben und Quartett 35_LE3_Info_Angepasste Nutzung 36_LE3_AB_Zyklenhaltbarkeit_Ladevorgang im Modell | | |

In dieser Lerneinheit geht es um

- den Zusammenhang zwischen Energie und Spannung bei elektrochemischen Reaktionen,
- die vergleichende Betrachtung repräsentativer Kenngrößen zur Beurteilung galvanischer Elemente.

Bei chemischen Reaktionen in galvanischen Elementen wird der Energieträger gewechselt. Dies macht sich am elektrischen Stromfluss während des Betriebes elektrischer Bauteile oder Geräte bemerkbar. Für den Vergleich und die Bewertung von galvanischen Elementen in Bezug auf ihre Spannung, ihre Energie und die möglichen Stromstärken baut der Unterricht auf den Grundlagen und notwendigen Begriffen aus dem Physikunterricht auf.

Das folgende Kapitel erläutert für die Lehrkraft zunächst die fachlichen Hintergründe. Sie dient zur Beantwortung von Schülerfragen im Bereich nicht abzuprüfenden Wissens.

Daran anschließend wird im Kapitel „Kenngrößen galvanischer Elemente im Unterricht“, geleitet durch die Schülerfragen aus der Begegnungsphase, auf die Tiefe der unterrichtlichen Behandlung eingegangen.

3.3.1 Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft

Zusammenhang zwischen Energie und Spannung bei elektrochemischen Reaktionen

Die Änderung der freien Reaktionsenthalpie ΔG^0 bei einer Reaktion wird auch über das Redoxpotential ausgedrückt. Das Redoxpotential stellt ein Maß für die freie Reaktionsenthalpie dar. Aus der freien Reaktionsenthalpie ΔG^0 lässt sich die Potenzialdifferenz ΔE^0 zweier miteinander reagierender Redoxsysteme nach $\Delta G^0 = -z \cdot F \cdot \Delta E^0$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) berechnen. Dabei ist z die Anzahl der beteiligten Elektronen und F die Faraday-Konstante (96485 C/mol). Das negative Vorzeichen stellt sicher, dass bei freiwillig verlaufenden Reaktionen ΔG^0 ein negatives Vorzeichen hat.

Die freie Reaktionsenthalpie ist damit der Teil der Energie, die bei einer elektrochemischen Reaktionsführung zur elektrischen Nutzung bereitsteht.

Mit dem Zusammenhang
$$\Delta E^0 = \frac{\Delta G^0}{-z \cdot F}$$

zeigt sich die Definition der Spannung als Energie pro Ladung.

Die Spannung U als Differenz der Redoxpotentiale (E^0) ist somit ein Maß für die Reaktionsfähigkeit und Freiwilligkeit einer elektrochemisch geführten Reaktion:

$$U = \Delta E^0 = E^0(\text{Red}) - E^0(\text{Ox})$$

Im Weiteren wird von der Spannung U im Sinne der Potenzialdifferenz ΔE^0 gesprochen und das Symbol U statt E bzw. ΔE benutzt. In Abgrenzung zur Größe Energie, die mit dem Buchstaben E symbolisiert wird.

Kenngrößen galvanischer Elemente

Energie

Mit der Energie elektrochemischer Systeme können Energieumloader bzw. Energieumwandler (alltags-sprachlich: Verbraucher) betrieben werden.

Die elektrische Energie oder Energie auf dem Träger „Elektrizität“ ist das Produkt aus Spannung U , Stromstärke I und Zeit t :

$$E = U \cdot I \cdot t = U \cdot Q = I \cdot t$$

Das Produkt aus Stromstärke I und Zeit t stellt die Ladung $Q = I \cdot t$ dar. Die Energie E wird grundsätzlich in der Einheit Joule (J) = Wattsekunde (Ws) angegeben. Allerdings geben Hersteller die enthaltene Energie E oft in der Einheit Milliwattstunden (mWh) an.

Beispiel:

Ein galvanisches Element der Baugröße AA mit dem Aufdruck 4500 mWh trägt (enthält) die Energie $E = 4500 \text{ mWh} = 4,5 \text{ Wh} = 4,5 \text{ Wh} \cdot 3600 \text{ s/h} = 16200 \text{ Ws} = 16200 \text{ J} = 16,2 \text{ kJ}$.

Laut Nährwertangabe trägt (enthält) eine Tafel Schokolade (100 g) die Energie von etwa 2400 kJ/100g.

Entsprechend trägt (enthält) die Masse von 100 g Hartweizengrieß-Nudeln die Energie von etwa $E = 1500 \text{ kJ/100 g}$.

Vergleicht man die beiden Werte, so entspricht der Energieinhalt des galvanischen Elementes dem von 0,675 g Schokolade bzw. 1,08 g Nudeln.

Ist es das Ziel, ein galvanisches Element mit möglichst **großer Energie E** zu konstruieren, so kommt es also darauf an, dass **Spannung U** und **gespeicherte Ladung Q** möglichst groß sind, damit eine entsprechend große Stromstärke I über einen möglichst langen Zeitraum t gewährleistet werden kann.

Spannung

Für große Spannungen sind die Elektrodenpotenziale verantwortlich (siehe Lerneinheit 2). Galvanische Elemente lassen sich somit durch die Angabe der Spannung, die ohne Stromfluss auch Nennspannung oder Ruhesklemmenspannung genannt wird, und die der Potenzialdifferenz der Elektroden entspricht, charakterisieren.

Beispiel:

Leuchtdioden (LED) erfordern je nach Farbe bestimmte Mindestspannungen, damit sie Licht aussenden können. Eine gelbe LED benötigt etwa 1,7 V. Die im galvanischen Element enthaltene Ladungsmenge Q kann noch so groß sein, wenn die Spannung U von 1,7 V nicht erreicht wird, funktioniert die LED nicht. Somit kommt das Zink-Sauerstoff-Element mit etwa 1,4 V oder das Daniell-Element mit 1,1 V nicht in Betracht. Es braucht galvanische Elemente mit größerer Spannung.

Eine mögliche Lösung besteht in der Reihenschaltung von galvanischen Elementen. Schaltet man zwei Daniell-Elemente in Reihe, so erhält man die Spannung von 2,2 V, was zum Betrieb der gelben LED ausreichen würde.



Auf diese Art sind die 4,5-Volt-Flachbatterie und der sogenannte 9-Volt-Block verwirklicht, denn sie enthalten drei bzw. sechs Zink-Mangandioxid-Elemente, die in Reihe geschaltet sind.

Abb. 28: Geöffnete 4,5-Volt-Flachbatterie (links) und geöffneter 9-Volt-Block (rechts)

Die Spannung verändert sich bei Ladungsentnahme (Stromfluss) und wird dann auch als Arbeitsspannung bezeichnet.

Je höher die **Spannung**, desto mehr **Energie** liegt **pro Ladung** vor.

Maximale Ladungsmenge („Kapazität“) eines galvanischen Elements

Damit große Stromstärken I und über einen möglichst langen Zeitraum erzielt werden, muss die gespeicherte Ladung Q groß sein. Große Ladungsmengen Q erzielt man durch hohe umzusetzende Stoffmengen an Elektrodenmaterial und durch eine hohe Anzahl z der pro Mol zu übertragenden Elektronen. Diese maximale Ladungsmenge wird SI-Einheiten-konform in der Dimension Amperesekunden (As) oder Coulomb (C) angegeben (1 As entspricht 1 C). Bei den Herstellerangaben findet sich meistens die Angabe in Milliamperestunden (mAh) oder Amperestunden (Ah).

Leider wird diese maximale Ladungsmenge Q_{\max} oft auch als „Kapazität“ bezeichnet, die man nicht mit der elektrischen Kapazität C verwechseln darf:

Die elektrische Kapazität C eines Kondensators wird in der Einheit Farad angegeben und bezeichnet die pro 1 Volt Spannung gespeicherte Ladung (in Coulomb).

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{bzw.} \quad 1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}$$

Hohe Ladungsmengen Q sind z. B. dann nötig, wenn ein leistungsstarker Verbraucher wie ein Motor betrieben werden soll. Dann genügt es nicht, nur eine möglichst hohe Spannung U zur Verfügung zu stellen, sondern es ist auch notwendig, eine möglichst hohe Stromstärke I , also Ladungsmenge Q pro Zeit t fließen zu lassen, damit der Motor betrieben werden kann.

Allerdings kommt es auch auf den konkreten Anwendungszweck an. Manchmal sind kurzzeitig hohe Stromstärken erforderlich, wie bei dem Starten eines Autos, und in anderen Fällen, wie bei einem Hörgerät, benötigt man nur geringe Stromstärken, die aber kontinuierlich über eine möglichst lange Zeit.

In beiden Fällen sind aus energetischer Sicht hohe Ladungsmengen wünschenswert, die aber in unterschiedlichen Zeiträumen abgerufen werden.

Daher ist es wichtig, die Kinetik der ablaufenden Reaktionen zu kennen, um das galvanische Element geeignet einzusetzen. Ist beispielsweise die Diffusion für den Nachschub ungeladener redoxaktiver Teilchen (z. B. Sauerstoff-Moleküle bei dem Zink-Sauerstoff-Element) hin zur Elektrodenoberfläche verantwortlich, so sind Umsätze begrenzt. Man spricht dann von Diffusionsbegrenzung und es kommt sinnvollerweise nur ein Dauereinsatz mit geringen Stromstärken in Frage.

Die entnehmbare (maximale) Ladung hängt vom Entladungsverlauf ab, also von der Entladestromstärke und von der Entladeschlussspannung. Sie ist die Spannung, bei der die Entladung beendet wird. Um aussagekräftig zu sein, müssen diese Werte mit angegeben sein.

Energiedichte und spezifische Energie

Die in galvanischen Elementen gespeicherte Energie wird nicht immer angegeben. Die Energie pro Masse oder pro Volumen ist jedoch eine typische Kenngröße, die oftmals den Datenblättern der Hersteller zu entnehmen ist.

Grundsätzlich kann man die physikalische Größe Energie auf das Volumen ihres Trägers oder auf die Masse des Trägers beziehen:

- Energie pro **Volumen: Energiedichte**
- Energie pro **Masse: spezifische Energie**

Hinweis: In der Literatur bzw. im Internet liest man auch für die Energie pro Masse den Begriff Energiedichte.

In der Technik ist es von hohem praktischem Interesse, die Energiedichte bzw. spezifische Energie eines Energieträgers, sei es von Treibstoffen wie Benzin oder von galvanischen Elementen, zu kennen. Bei begrenztem Raum bzw. begrenzter zuladbarer Masse (z. B. bei einer Rakete) sind diese Angaben für die erzielbare Reichweite entscheidend.

Die folgende Tabelle bildet ein breites Spektrum spezifischer Energien ab. Dabei fällt auf, dass die elektrochemischen Energiespeicher nur Bruchteile der Energie pro Masse von fossilen Energieträgern oder Kernbrennstoffen enthalten (Auszug aus: <https://www.chemie.de/lexikon/Energiedichte.html>).

Allerdings muss auch die Antriebstechnik berücksichtigt werden, denn vergleicht man die Wirkungsgrade von Elektromotoren mit bis zu 99 % mit denen von Verbrennungsmotoren mit 25-35 %, so schneiden erstere deutlich besser ab. Die Diskrepanz bleibt dennoch erhalten.

| Energieträger | spezifische Energie in kJ/kg |
|--------------------------------------|------------------------------|
| Elektrolytkondensator | 0,05 |
| Doppelschicht-Kondensator | 20 |
| Bleiakkumulator | 110 |
| NiMH-Akku | 220 |
| Kohle-Zink Batterie | 230 |
| Li-Ionen Akku | 360 |
| Alkali-Mangan-Batterie | 450 |
| Li-Polymer-Akku | 550 |
| Zink-Luft-Batterie* | 1.200 |
| Wasserstoff (inkl. Hydridtank)* | ca. 1.190 |
| Trinitrotoluol | ca. 4.000 |
| stärkste Sprengstoffe | ca. 7.000 |
| mitteleuropäische Nutzhölzer | 13.000-20.000 |
| Braunkohle* | 28.470 |
| Steinkohle* | 30.000 |
| Pflanzenöl* | 37.000 |
| Dieselmotortreibstoff* | 39.600 - 43.200 |
| Benzin* | 43.000 |
| Wasserstoff (ohne Tank)* | 119.900 |
| Kernspaltung Natururan (0,72% U-235) | 648.000.000 |
| Kernspaltung U-235 | 90.000.000.000 |
| Kernfusion (Kernwaffe) | 300.000.000.000 |
| Proton-Proton-Reaktion in der Sonne | 627.000.000.000 |
| Umwandlung von Masse in Energie | 90.000.000.000.000 |

Für die mit * gekennzeichneten Energieträger ist der Reaktionspartner jeweils der Sauerstoff, der bei der Bezugsmasse unberücksichtigt bleibt, weil er der Umgebungsluft entnommen wird.

Im Fall des Bleiakkumulators wird die Energie auf die aktiven Massen des Bleis, des Bleidioxids und der Schwefelsäure bezogen. Je nach Betrachtungsweise und Anwendungszweck können auch die sonstigen Bauteile des Akkus mit einbezogen werden (vgl. Hamann 2005, S. 507).

Für das Zink-Sauerstoff-Element bezieht man die Energie lediglich auf die Masse des Zinks und ggf. auf die der weiteren Bauteile, lässt aber den Sauerstoff unberücksichtigt.

Beispiel:

Zur Veranschaulichung kann ein Modellhubschrauber dienen, der zum Fliegen eine Leistung P von etwa 60 W benötigt und lediglich eine Masse von 80 g für einen Akkumulator mitführen darf, da er sonst nicht abhebt.

Nutzt man den NiMH-Akku mit seiner spezifischen Energie von 220 kJ/kg, so kann man knapp fünf Minuten fliegen. Verwendet man dagegen einen Lithium-Polymer-Akku mit 550 kJ/kg, so bleibt der Modellhubschrauber mehr als doppelt so lange in der Luft.

Würde man beabsichtigen, die Energie zum Fliegen aus Braunkohle zu nutzen, so könnte der Hubschrauber – theoretisch – über 10 Stunden fliegen, da die spezifische Energie von Braunkohle etwa das 130-fache vom Wert des NiMH-Akkus beträgt. Allerdings wäre auch ein anderer Antriebsmechanismus notwendig, da der Hubschrauber aufgrund seiner Masse sicher nicht mit einer Leistung von 60 W abheben könnte.

Das Ziel besteht also darin, möglichst **große spezifische Energien** oder **hohe Energiedichten** zu erreichen, damit **lange Betriebszeiten** mobiler Geräte bzw. **große Reichweiten** von Fahrzeugen erzielt werden sowie die **Transportkosten** für den Energieträger möglichst **gering** sind.

Leistung

Die Leistung P eines galvanischen Elementes ergibt sich aus der elektrischen Energie E , die pro Zeit t entnommen werden kann ($P = E / t$). Sie wird in Watt (W) angegeben. Da die Energie E das Produkt aus Spannung U , Stromstärke I und Zeit t ($E = U \cdot I \cdot t$) ist, ergibt sich die Leistung P als das Produkt aus der Spannung U und der Stromstärke I ($P = U \cdot I$).

Die Leistung P eines galvanischen Elements ist daher zunächst unabhängig von der insgesamt enthaltenen Energie E eines galvanischen Elements, denn es geht um die Energiemenge, die pro Zeit entnommen wird. Die Energiemenge, die in einer Zeiteinheit entnommen werden kann, hängt von den chemischen Prozessen im galvanischen Element ab. Die Geschwindigkeiten der Reaktionen steuern die Energieabgabe und damit die Leistung.

Möchte man eine bestimmte Leistung über lange Zeit aus einem galvanischen Element abrufen, ist dies natürlich von der insgesamt enthaltenen Energie eines galvanischen Elements abhängig.

Eine hohe Leistung hängt mit schnell ablaufenden Elektrodenreaktionen, einem raschen Nachschub der Edukte, einem zügigen Abtransport der Produkte an den Elektroden sowie einem geringen Innenwiderstand bei den Ausgleichströmen in der Zelle zusammen.

Ladezeit

Die Ladezeiten sind dann von Bedeutung, wenn mehr Energie benötigt wird, als maximal im Akkumulator enthalten ist, z. B. bei einer langen Reise. Dann muss während der Nutzungszeit wieder aufgeladen werden und dies benötigt Zeit. Grundsätzlich ist die Ladezeit eines Akkus von verschiedenen Faktoren abhängig.

Dazu gehört zuerst die maximale Ladungsmenge (Kapazität) des Akkumulators an sich. Je größer dieser ist, desto länger dauert es. Zudem kommt es auf die Ladeleistung der Ladestation und auf die Ladetechnik an.

Des Weiteren spielt der Innenwiderstand eine Rolle, der direkten Einfluss auf den Ladestrom hat und dieser wiederum die Temperatur beeinflusst. Der Innenwiderstand geht auf die Kinetik der ablaufenden Reaktionen, insbesondere den Elektronenübertritt an der Elektrode zurück, sowie auf eine

möglichst gute, also ungehinderte (Ausgleichs-) Strömung der Ionen im Elektrolyten durch entsprechende Separatoren (Membranen) hindurch.

Kürzere Ladezeiten erfordern höhere Stromstärken und bedeuten stärkeren Verschleiß, was im Konflikt mit der Nutzungsdauer (siehe Zyklenhaltbarkeit) steht. In Abhängigkeit von der gewünschten Anwendung, dem verwendeten elektrochemischen Redoxsystem und der technischen Umsetzung (Klimatisierung, Überwachung) sind in der Praxis die Ladezeiten sehr unterschiedlich.

Die Ladezeit t_{Lade} kann berechnet werden nach

$$t_{Lade} = \frac{\text{maximale Ladungsmenge } Q \text{ (in Ah)}}{\text{Ladestromstärke } I \text{ (in A)}}$$

oder

$$t_{Lade} = \frac{\text{maximale Energie } E \text{ (in kWh)}}{\text{Ladeleistung } P \text{ (in kW)}}.$$

Für Elektroautos gibt es verschiedene Stationen, die unterschiedliche Ladezeiten benötigen bzw. ermöglichen. Elektroautos können an manchen Ladesäulen **schnell** oder **normal** geladen werden. Erfahrungsgemäß betragen Ladezeiten

- bis zu 14 Stunden an der Haushaltssteckdose,
- 2 bis 6 Stunden an der Wallbox,
- 2 bis 4 Stunden an einer öffentlichen Ladesäule (Normalladung) und
- 30 bis 60 Minuten an einer öffentlichen Schnellladesäule.

Bei der Normalladung mit Wechselstrom (AC) stehen verschiedene Ladeleistungen im Bereich von 3 bis 43,6 kW zur Verfügung, was entsprechende Ladezeiten bewirkt. Sie ist vorwiegend in Städten bzw. am Haus üblich.

Mit Gleichstrom (DC) ist eine Schnellladung meist an Autobahnen und auch in Innenstädten möglich. Dort steht bis zu 150 kW Ladeleistung zur Verfügung.

Die Ladezeit ist für die Praxistauglichkeit eines Elektroautos eine relevante Größe, deren Verkürzung sehr intensiv erforscht wird.

Beispiel 1:

Ein Akkumulator eines Laptops besitzt z. B. eine typische maximale Ladungsmenge von 8 Ah. Lädt man diesen Akku mit einer Stromstärke von 1,6 A, so beträgt die Ladezeit:

$$t_{Lade} = \frac{8 \text{ Ah}}{1,6 \text{ A}} = 5 \text{ h}$$

Beispiel 2:

Ein Akkumulator eines Elektroautos besitzt z. B. eine maximale Energie von 41 kWh. Lädt man diesen Akku an der Haus-Steckdose mit der Leistung von 3 kW, so beträgt die Ladezeit:

$$t_{Lade} = \frac{41 \text{ kWh}}{3 \text{ kW}} = 13,7 \text{ h}$$

Im Vergleich weisen öffentliche Gleichstrom-Schnelladesäulen eine Ladeleistung von 50 bis 150 kW auf. Diese verkürzt dann die Ladezeit auf 16 bis 50 Minuten.

Zyklusfähigkeit

Theoretisch lassen sich chemische Reaktionen unendlich oft umkehren. In der Praxis laufen erzwungene Reaktionen zum Laden bei einem Akkumulator nicht zu 100% ab und unter Umständen bilden sich Nebenprodukte (eine Art Verschleiß), die die Ausbeute bei der nächsten Entladung und Aufladung verringern. Dann sinkt mit der Betriebsdauer die maximale Ladungsmenge, die der Akkumulator je Lade-Entlade-Zyklus aufnehmen und abgeben kann. Daher definiert man eine bestimmte Ladungsmenge, z. B. 80% der ursprünglichen maximalen Ladungsmenge eines neuen Akkumulators als Ladungsgrenze.

Die Zyklusfähigkeit gibt an, wie viele Lade-Entlade-Zyklen mit einem Akkumulator möglich sind, bis diese Grenze erreicht ist.

Rechnet man z. B. pro Tag mit einem Lade-Entlade-Zyklus, so lässt sich die Nutzungsdauer des Akkumulators in Jahren abschätzen.

Die Zyklusfähigkeit für einen Akkumulator ist also eine Schätzung, da sie von der Temperatur, von Tiefenentladungen und auch von der Geschwindigkeit des Ladens abhängt. Schnellladungen belasten den Akkumulator, der Verschleiß ist stärker als beim langsameren Laden, weshalb die Anzahl an Lade-Entlade-Zyklen sinkt.

Für eine lange Nutzungsdauer ist es sehr sinnvoll, sich an die Angaben der Hersteller zur Qualitätserhaltung eines Akkumulators zu halten.

Grundsätzlich sollten die Hinweise der Hersteller zum Laden, zur Lagerung und den entsprechenden Temperaturen sehr genau beachtet werden, um den Akku maximal nutzen zu können und die Sicherheit beim Umgang mit den Akkus zu gewährleisten.

3.3.2 Kenngrößen galvanischer Elemente im Unterricht

Zahlreiche Fragen der Schülerinnen und Schüler zielen im Wesentlichen auf energetische Eigenschaften galvanischer Elemente, wie zu Beginn des Kapitel 3.3, Lerneinheit 3, ausgeführt.

Zur systematischen Beantwortung dieser oder ähnlicher Fragen werden im Unterricht folgende Kenngrößen bearbeitet: Spannung U , maximale Ladungsmenge Q_{\max} , spezifische Energie, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit

Grundlagen der Elektrizitätslehre, auf die das Themenfeld 12 aufbaut

Vorab ist es sinnvoll, die im Physikunterricht gelegten Grundlagen für elektrische Schaltungen und die Definitionen der elektrischen Größen Spannung U , Stromstärke I , Ladung Q , Energie E und Leistung P zu aktivieren. Alle diese Begriffe werden bei der Beantwortung der Fragen benötigt. Daher bietet sich ggf. eine Kooperation mit dem Physikunterricht an.

- Schaltkreise müssen geschlossen sein.
- Es gibt grundsätzlich zwei Arten von Schaltungen, Reihenschaltung und Parallelschaltung.
- Beide Arten kommen gemischt in Schaltungen vor.
- Prinzipiell wird die elektrische **Spannung parallel** zu einem elektrischen Bauteil (alltagssprachlich „Verbraucher“) gemessen und die **Stromstärke in Reihe**.

Die Spannung eines galvanischen Elements (einer Batterie) misst man durch Anschließen eines Spannungsmessgerätes. Die Messung erfolgt ohne Stromfluss, weil das Messgerät zur Spannungsmessung einen sehr hohen elektrischen Widerstand besitzt. Das galvanische Element ist somit im Prinzip unbelastet, obwohl der Stromkreis geschlossen ist.

Um ein elektrisches Bauteil (z. B. eine Glühlampe) zu betreiben, wird dieses mit dem galvanischen Element verbunden. Möchte man nun die Stromstärke durch das Bauteil messen, muss das Stromstärkemessgerät in Reihe zum Bauteil an das galvanische Element angeschlossen werden.

Soll dabei gleichzeitig auch die Spannung gemessen werden, schaltet man das Spannungsmessgerät parallel zum Bauteil.

Onlinematerial: LE3_AB_Info_Basiskonntnisse Elektrizitätslehre

Spannung

Schülerfrage: Wie stark ist eine Batterie?

Die Spannung U galvanischer Elemente hängt von den verwendeten Elektrodenmaterialien ab und daraus leitet sich die Spannungsreihe ab (Kapitel 3.1, Lerneinheit 1 und Kapitel 3.2, Lerneinheit 2). Je größer der Unterschied zweier Stoffe bezüglich ihrer Tendenz „Elektronen aufzunehmen“ ist, desto größer wird die Spannung zwischen den beiden Halbzellen sein.

Beispiel:

Bei bekannter Spannungsreihe Zink-Kupfer-Silber leiten Schülerinnen und Schüler ab: Eine galvanische Zelle Kupfer-Zink wird „stärker“ (es besteht eine höhere Spannung), wenn man Kupfer durch Silber ersetzt.

Zur experimentellen Spannungsmessung ohne einen Stromfluss durch einen „Verbraucher“ dient folgender Aufbau.

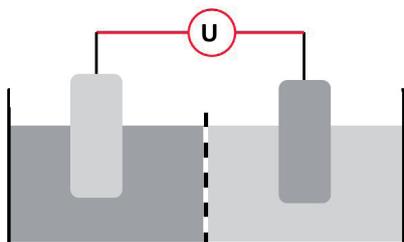


Abb. 29: Aufbau der Schaltung zur Messung der Spannung eines galvanischen Elements ohne Stromfluss

Tiefere Erläuterungen oder Erklärungen zur Entstehung der Potenziale bzw. der daraus resultierenden Spannung bleiben der Sekundarstufe 2 vorbehalten, da sie energetische Gründe haben und im atomaren Aufbau zu suchen sind.

Aus den gemessenen Spannungen erarbeiten die Schülerinnen und Schüler eine Reihung der Redox-Halbzellen und vergleichen sie qualitativ mit der elektrochemischen Spannungsreihe (siehe auch Kapitel 3.2, Lerneinheit 2 einschließlich Onlinematerial).

Onlinematerial:

LE2_SV_Spannungsreihe analog Zink-Sauerstoff

LE2_SV_Spannungsreihe analog Daniell-Element

Maximale Ladungsmenge („Kapazität“) eines galvanischen Elements

Schülerfragen: Bis zu welchen Kapazitäten reichen Batterien? Hat die Größe etwas mit der Stärke zu tun? Wann ist eine Batterie leer?

Die maximale Ladungsmenge Q_{\max} („Kapazität“) hängt primär von den zur Verfügung stehenden Mengen der umzusetzenden Redox-Paare in den Halbzellen ab.

Dabei ist die Abhängigkeit der **entnehmbaren** Ladungsmenge von dem Entladungsverlauf und der Entladeschlussspannung an dieser Stelle für den Unterricht zu vernachlässigen.

Zur experimentellen Bestimmung der Ladung nach $Q = I \cdot t$ muss die Stromstärke I , die z. B. durch einen Motor fließt, über die Zeit t gemessen werden. Dazu dient folgender Aufbau, bei dem Stromstärkemessgerät und Motor in Reihe geschaltet sind. Gleichzeitig wird parallel geschaltet die Spannung gemessen.

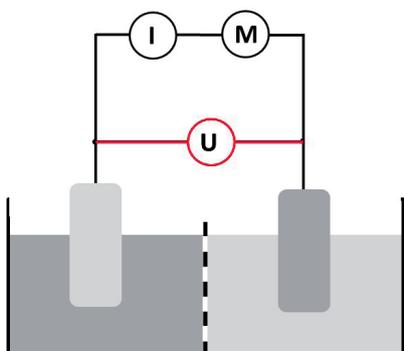


Abb. 30: Aufbau der Schaltung zur Messung der Spannung und der Stromstärke während des Betriebes eines Motors durch ein galvanisches Element

Beim langfristigen Betrieb des galvanischen Elements sinkt die Stromstärke bis auf den Wert Null (die Spannung ist dann auch Null). Dann ist sämtliches Elektrodenmaterial umgesetzt und das galvanische Element entladen.

Für eine solche Langzeitmessung von Stromstärke und Spannung eignet sich besonders die Nutzung eines Messwerterfassungssystems. Der Verlauf von Spannung und Stromstärke in Abhängigkeit von der Zeit ergibt Diagramme der folgenden Art:

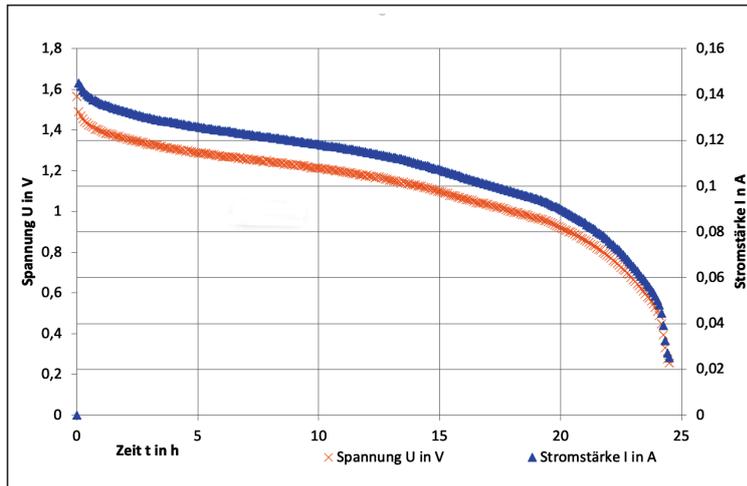


Abb. 31: Zeit-Spannung/Stromstärke-Diagramm beim Entladen eines Zink-Mangandioxid-Elements über einen 10Ω -Widerstand

Die maximale Ladungsmenge $Q_{\max} = I \cdot t$ des untersuchten galvanischen Elements entspricht dann der Fläche unter dem Stromstärke-Grafen. Diese Fläche kann im Unterricht per Überschlagsrechnung ermittelt werden, in diesem Beispiel zu etwa 2,3 Ah (ca. 0,1 A über fast 24 Stunden).

Für Schülerinnen und Schüler wird evident, dass die „Batterie leer“ ist. Chemisch ist das auch der Fall, aber in Abgrenzung zum Alltag ist ein galvanisches Element schon deutlich früher nicht mehr betriebsfähig. Wenn beispielsweise die Spannung zum Funktionieren eines Gerätes mindestens 1,2 V beträgt, wäre der dargestellten Messung zufolge die Batterie bereits nach 10 Stunden auszutauschen und für den Konsumenten „leer“, obwohl noch mehr als die Hälfte der Ladung enthalten ist.

Im Alltag gilt eine Batterie als „leer“, wenn eine bestimmte Spannung unterschritten wird. Das ist auch der Grund, weshalb sich „Batterien ein wenig erholen“, wenn sie einige Zeit nicht genutzt werden. Dabei regeneriert sich das galvanische Element, nicht im Sinne eines Aufladens, sondern die Redox-Partner diffundieren aus entfernteren Kompartimenten zu den Elektroden und stehen dort nun für einen Umsatz zur Verfügung, was aber nur kurzzeitig neue Umsätze liefert, da die Nachdiffusion dann schon stark limitiert ist.

Eine experimentelle Bestimmung der maximalen Ladungsmenge ist nicht das primäre Ziel des Unterrichts, wohl aber die Interpretation der Kurve bzw. des Flächeninhaltes und die Diskussion bzw. die Vergleiche der maximalen Ladungsmengen unterschiedlicher galvanischer Elemente.

Onlinematerial:

LE3_AB_Bestimmung Ladungsmenge und spezifische Energie

LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten

Spezifische Energie

Schülerfrage: Wie stark ist eine Batterie? Hat die Größe etwas mit der Stärke zu tun?

Die spezifische Energie ist auf die Masse der eingesetzten Redox-Partner bezogen. Dabei handelt es sich um die Gesamtmasse der Redox-Partner oder um die Masse des limitierenden Partners (oft auch preisbestimmenden Partners).

Zunächst muss die Energie des galvanischen Elements bestimmt werden und dann lässt sich der Wert auf die eingesetzten (aktiven) Massen beziehen.

Die Energie ist das Produkt aus Spannung, Stromstärke und Zeit: $E = U \cdot I \cdot t$

Daher nutzt man die Messung zur Bestimmung der maximalen Ladungsmenge aus und bildet für jeden Zeitpunkt das Produkt aus der gemessenen Spannung U und der gemessenen Stromstärke I . Diese Berechnung ergibt für jeden Zeitpunkt die elektrische Leistung mit $P = U \cdot I$.

Die Leistung gegen die Zeit aufgetragen führt zu folgendem Diagramm:

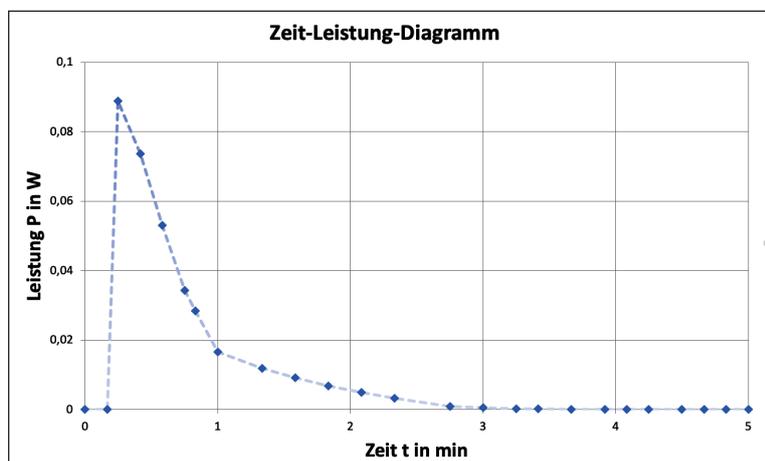


Abb. 32: Zeit-Leistung-Diagramm beim Betrieb eines Motors durch den Modell-Lithium-Ionen-Dual-Carbon-Akkumulator

Die Energie entspricht der Fläche unter dem Grafen nach $E_{\max} = P \cdot t$, und kann überschlagsmäßig abgeschätzt werden. In diesem Fall sind es etwa $E = 3,28 \text{ J}$.

Dividiert man die maximale Energie durch die verwendete (aktive) Masse aus Elektrodenmaterialien sowie Elektrolyt von 50 g, so erhält man die spezifische Energie für das galvanische Element im Modellversuch zu 65,6 J/kg. Im Vergleich zum kommerziellen Lithium-Ionen-Akku mit 360.000 J/kg besteht hier demnach noch Optimierungspotenzial.

Im Unterricht stehen die Interpretationen der Kurve bzw. des Flächeninhaltes und die Diskussion bzw. die Vergleiche von spezifischen Energien unterschiedlicher galvanischer Elemente im Vordergrund, nicht das Messen der Daten.

Onlinematerial:

LE3_AB_Bestimmung Ladungsmenge und spezifische Energie

LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten

Ladezeit

Schülerfrage: Warum lädt man nicht jeden Akku so schnell wie möglich?

Fragen zur Ladezeit können mit Hilfe des Modellversuchs zum Lithium-Ionen-Akku experimentell untersucht werden (vgl. Kapitel 3.1, Lerneinheit 1). Der Schwerpunkt liegt hier aber nicht in der zwar durchaus möglichen experimentellen Bestimmung von Ladezeiten, gerade für diesen Modell-Akkumulator, sondern in der Sensibilisierung der Lernenden für die Problematiken dahinter (z. B. Verschleiß) samt einiger Rechnungen zur Übung.

Onlinematerial: LE3_AB_Aufgaben_Kenndaten vergleichen und bewerten

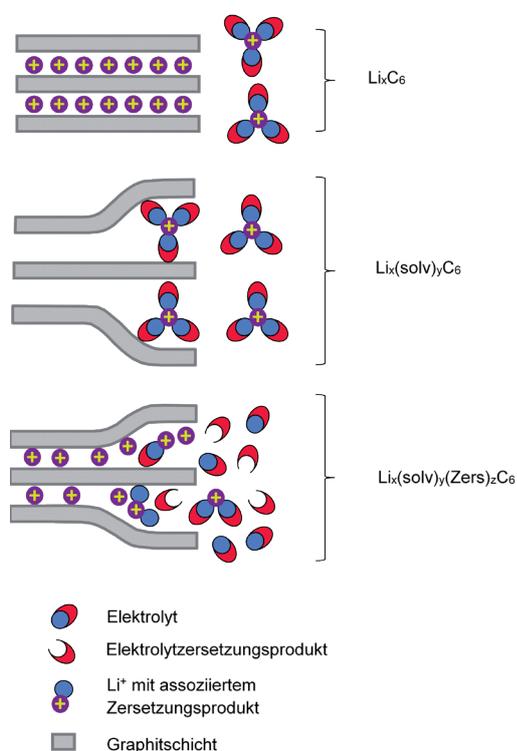
Zyklusaltbarkeit

Schülerfrage: Wie lange hält eine Batterie oder ein Akku?

Die Anzahl der Lade-Entlade-Zyklen hängt von verschiedenen Faktoren ab, die im Kapitel 3.3.1 (Fachliche Hintergrundinformationen für die Lehrkraft) beschrieben sind.

Im Unterricht lässt sich das Kriterium Verschleiß beim Modellversuch zum Lithium-Ionen-Akku im Experiment sehr anschaulich demonstrieren und erkennen.

Bereits nach wenigen Zyklen zeigt sich an den Graphitfolien ein deutliches Aufquellen und Abplatzen von Graphitschichten, auch Exfoliation genannt, was durch das Einwandern der solvatisierten Lithium- bzw. Perchlorat-Ionen zwischen die Kohlenstoffnetzebenen der jeweiligen Graphitelektrode geschieht.



Da die Ionen sehr eng von Lösemittelmolekülen umgeben sind (solvatisiert), müssen sie beim Einwandern zwischen die Graphitschichten ihre Solvathülle abstreifen. Dabei kommt es auch zur Zersetzung der Lösemittelmoleküle.

Wiederholte Lade- und Entladezyklen führen zum Abplatzen von Teilen der Folie, wodurch diese für den Prozess nicht mehr zur Verfügung stehen. Die maximale Ladungsmenge für dieses Element sinkt. Dieses Beispiel veranschaulicht den Schülerinnen und Schülern sehr deutlich die Problematik der Zyklusaltbarkeit des Elements.

Abb. 33: Schematische Darstellung der Intercalation, (<https://www.der-hedinger.de/experimentier-set-lithium-15-erweiterte-und-las%20110>)

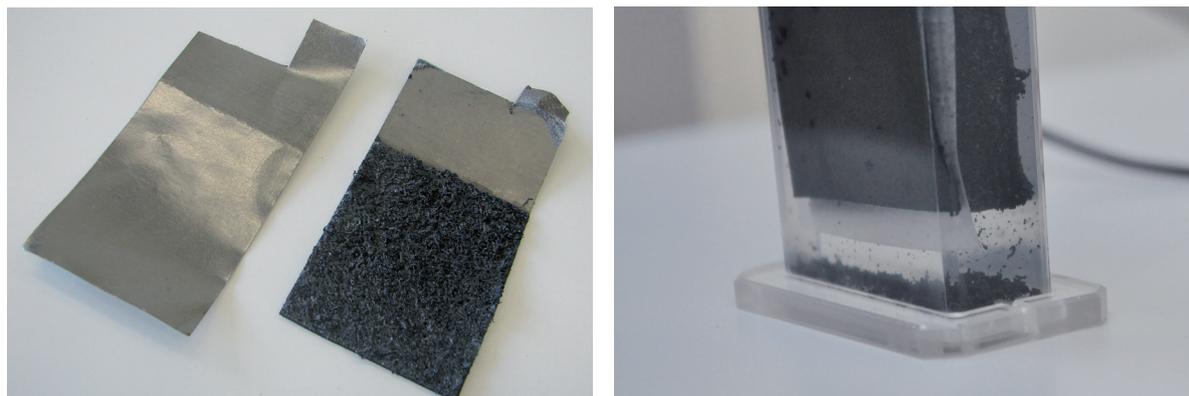


Abb. 34: Neue, unbenutzte Grafitfolie und mehrfach geladene oder entladene Grafitfolie mit deutlich erkennbarer Ablösung der Grafitsschichten

Onlinematerial:

LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten (Vier Aufgaben)

In Aufgabe 1 geht es um zwei fiktive galvanische Elemente, die in Bezug auf Spannung, maximale Ladungsmenge und Energie sowie Preis verglichen werden.

In Aufgabe 2 werden Geräten des Alltags mit ihren Anforderungen (z. B. benötigte Spannung usw.) passende galvanische Elemente aus einer gegebenen Auswahl zugeordnet.

In Aufgabe 3 werden die Ladezeiten eines Laptop-Akku und eines Elektroauto-Akkus für bestimmte Ladebedingungen berechnet.

In Aufgabe 4 werden die Entwicklungen der Kenndaten von Akkumulatoren vom Blei-Akku bis zum Li-Polymer-Akku beschrieben und die heutige Verwendung Lithium basierter Akkumulatoren begründet.

LE3_AB_Aufgaben_Zyklusfähigkeit_Ladevorgang im Modell

In der ersten Aufgabe werden die Faktoren, die die Zyklusfähigkeit beeinflussen, beschrieben und am Beispiel des Modellversuchs zum Lithium-Ionen-Akku im Experiment anschaulich demonstriert. Das auftretende Phänomen der Exfoliation wird auf Teilchenebene erklärt.

Da das Aufladen eines Akkus und dessen Veränderungen nach vielen Ladezyklen komplex sind, kann ein Modell helfen, die Vorgänge zu verstehen. Das Parkplatz-Modell kann den Ladevorgang und dabei auftretenden Verschleiß anschaulich machen.

Angepasste Nutzung galvanischer Elemente zum Betreiben elektrischer Geräte

Schülerfragen: Warum gibt es unterschiedliche Bauarten, Größen, Leistung? Welche Batterie ist für welches Gerät passend?

Die Beantwortung dieser beiden Fragen bedürfen weitergehender physikalischer Betrachtungen und stellen nicht abprüfbares Wissen im Chemieunterricht der Sekundarstufe 1 dar.

Onlinematerial: LE3_Angepasste Nutzung

3.4 Lerneinheit 4: Nachhaltigkeit bei Bau und Nutzung von galvanischen Elementen

| | | |
|--|--|--|
| Bei der Auswahl geeigneter Stoffe (für Batterie oder Akku) zur elektrochemischen Energiegewinnung bzw. Energiespeicherung spielen die Verfügbarkeit der Materialien, die Masse und die relative Lage in der Redoxreihe eine Rolle. | | |
| Einführende Lernsituationen: Mögliche Schülerfragen aus der Begegnungsphase: In welchen Bereichen werden Akkus verwendet? Wie wirtschaftlich sind Batterien überhaupt? Sind Batterien von Billiganbietern gut, oder soll man mehr Geld ausgeben? Werden Batterien recycelt? Was ist so gut an Lithium? Gibt es genug? | | |
| Kompetenzentwicklung | Schüleraktivität | Fachwissen/Basiskonzept |
| Schülerinnen und Schüler ... | | |
| ... bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklenhaltbarkeit) und Kriterien zur Nachhaltigkeit anwenden. | ... recherchieren zum Recycling von Lithium-Akkus. ... wenden das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung auf die Lithiumgewinnung an. ... bewerten den Ersatz von Lithium durch Natrium in Akkus. | Batterie Akkumulator Masse Verfügbarkeit von Metallen |
| Material/Medien | | |
| 41_LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus 42_LE4_ppt_Info_Nachhaltigkeit_Lithiumgewinnung global 43_LE4_AB_Nachhaltigkeit_Lithium aus Portugal 44_LE4_AB_Ersatz von Lithium durch Natrium | | |

In dieser Lerneinheit geht es um

- die Bewertung von galvanischen Elementen in Bezug auf Nachhaltigkeit.

3.4.1 Das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung

Dieses Modell beschreibt als nachhaltige Entwicklung das gleichzeitige und gleichberechtigte Umsetzen von umweltbezogenen, wirtschaftlichen und sozialen Zielen. Bei allen gesellschaftlichen Entscheidungen sollen alle drei Säulen Berücksichtigung finden. Nur auf diese Weise kann die ökologische, ökonomische und soziale Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft sichergestellt und verbessert werden. Sie bedingen dabei einander.

Die drei Säulen der nachhaltigen Entwicklung:

- **Ökologische Nachhaltigkeit:** Ökologisch nachhaltig wäre eine Lebensweise, die die natürlichen Lebensgrundlagen nur in dem Maße beansprucht, wie diese sich regenerieren.
- **Ökonomische Nachhaltigkeit:** Allgemein gilt eine Wirtschaftsweise dann als nachhaltig, wenn sie die Bedürfnisse der gegenwärtigen Generation abdecken kann und nachkommende Generationen nicht belastet.
- **Soziale Nachhaltigkeit:** Ein Staat oder eine Gesellschaft sollte so organisiert sein, dass es möglichst wenig soziale Spannungen gibt, wie z. B. Ungleichheiten bei Wohlstand, Gesundheit, Arbeit und Bildung.

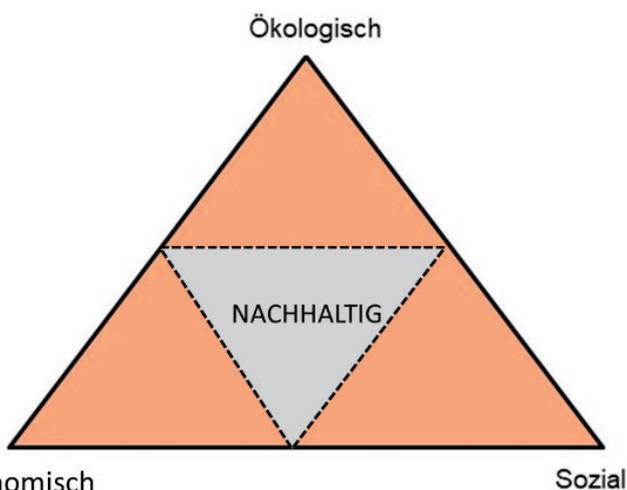


Abb. 35: Nachhaltigkeitsdreieck

Das integrierende Nachhaltigkeits-Dreieck erlaubt die kontinuierliche Zusammenführung der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales und dient der Anschaulichkeit.

(Verändert nach: [https://de.wikipedia.org/wiki/Drei-S%C3%A4ulen-Modell_\(Nachhaltigkeit\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Drei-S%C3%A4ulen-Modell_(Nachhaltigkeit)))

Im Zusammenhang mit den mobilen Energieträgern sind für den Chemieunterricht folgende Kriterien besonders im Blick:

- Die Auswahl geeigneter **Stoffe für galvanische Elemente** aus der Sicht der Chemie
- das Einsparen von **Masse** eines mobilen Energieträgers (-speichers) durch ergiebigeren Ausnutzung des eingesetzten Materials bei vergleichbarem oder sogar gesteigertem Energiegehalt,
- die Beachtung **umwelt- bzw. naturverträglicher Stoffkreisläufe** bei der Gewinnung, Verwendung und dem Recycling der verwendeten Materialien.

Vor dem Hintergrund dieser Kriterien sollen die Schülerinnen und Schüler sensibilisiert und ermutigt werden, die Verantwortung für die Konsequenzen ihrer eigenen Entscheidungen und ihres eigenen Handelns zu übernehmen. Insbesondere eine plausible und überzeugende Argumentation kann zu hohem Umweltbewusstsein führen und durch entsprechendes Handeln die Umwelt schonen.

3.4.2 Kriterien der nachhaltigen Entwicklung im Unterricht

Die Inhalte dieser Lerneinheit zur Nachhaltigkeit können mit den angegebenen Onlinematerialien passgenau und mit angemessenem Zeitaufwand bearbeitet werden. Mit den Materialien werden die Rolle der Chemie und chemischer Kenntnisse bei der Optimierung der Nachhaltigkeit von Entwicklungen und deren Bewertung deutlich.

Dabei ist auch eine Zusammenarbeit mit gesellschaftswissenschaftlichen und geisteswissenschaftlichen Fächern lohnend.

Masse

Schülerfragen: In welchen Bereichen werden Batterien oder Akkus verwendet? Was ist so gut an Lithium?

Bei der Nutzung mobiler elektrochemischer Energieträger geht es immer um eine Abwägung. Es gibt nicht „die Batterie“ oder „den Akkumulator“. Stets sind die Anforderungen mit ihren Randbedingungen für den Einsatz zu beachten.

An erster Stelle steht die Frage nach dem Einsatzgebiet: Wofür soll die Batterie bzw. der Akkumulator verwendet werden? In einer Armbanduhr, einem Hörgerät, als Akku für ein Pedelec oder als Startbatterie für ein Kraftfahrzeug?

Diese Frage führt in der Regel zu den physikalischen Kenngrößen Spannung U und maximale Ladungsmenge Q_{\max} . Für die Spannung sind die Elektrodenmaterialien entscheidend und die maximale Ladungsmenge hängt von den eingesetzten Mengen bzw. Massen ab. Durch technische Weiterentwicklungen wird Material und damit Masse gespart.

Häufig ist es für den Einsatz des galvanischen Elements von Vorteil, die Masse gering zu halten: Ein Laptop mit Bleiakku hätte sicherlich einige Akzeptanzprobleme, da die Masse für eine brauchbare Akkulaufzeit sehr groß würde und dies seinem Zweck als mobiles Arbeits- und Kommunikationsgerät widersprechen würde.

Beispiel:

Ein Laptop besitzt einen Li-Ionen-Akku mit der Energie von $E = 40 \text{ Wh}$ mit einer Masse von $0,25 \text{ kg}$. Wollte man dieses Laptop mit der gleichen Energiemenge durch einen Bleiakku versorgen, so besäße dieser folgende Masse:

Bei einer spezifischen Energie des Bleiakkus von 110 kJ/kg beträgt die Energie umgerechnet etwa

$$E = \frac{110000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = \frac{110000 \frac{\text{W}\cdot\text{s}}{\text{kg}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 30,6 \text{ Wh/kg}$$

Bei einer gewünschten Energie von 40 Wh benötigt man

$$m = \frac{40 \text{ Wh}}{30,6 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} = 1,31 \text{ kg}$$

Die einzusetzende Masse für einen Bleiakku ist mit $1,31 \text{ kg}$ gegenüber $0,25 \text{ kg}$ beim Li-Ionen-Akku etwa fünf Mal so groß, was bei einer Laptopgesamtmassse von 2 kg eine Erhöhung um 153% der Gesamtmassse darstellt.

Die Lithium-Akkus sind also deshalb so gut, weil sie eine hohe Energie im Verhältnis zur relativ geringen Masse besitzen (hohe spezifische Energie), was eine reduzierte Gesamtmasse des Gerätes ermöglicht.

Daher führt Massensparnis zu mehr Mobilität, insbesondere, wenn dazu auch noch größere spezifische Energien möglich werden und die Kosten nicht gegenüber den Vorteilen überwiegen.

Darüber hinaus sind mobile Geräte mit geringerer Masse im Sinne der Nachhaltigkeit ökologisch vorteilhaft, weil sie weniger Energie zu ihrem Transport erfordern.

Grundsätzlich zeigt dies, dass geringere Massen Mobilität fördern oder sogar erst ermöglichen.

Onlinematerial: LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus

Verfügbarkeit

(Umwelt- bzw. naturverträgliche Stoffkreisläufe bei der Gewinnung und Verwendung)

Schülerfrage: Gibt es genug Lithium?

Der Bau eines Akkumulators mit Redoxpartnern geringerer Masse bzw. größerer spezifischer Energie erfordert die Prüfung der geologischen und technischen Verfügbarkeit und der Herstellungskosten.

Im Fall von Lithium wird weltweit das Vorkommen erforscht und die Wirtschaftlichkeit sowie Umweltverträglichkeit der Förderung geprüft. Neben diesen Faktoren spielen auch die Transportwege sowie die Verlässlichkeit der Staaten als Vertragspartner und die sozialen Rahmenbedingungen eine wichtige Rolle.

Die Primärförderung von Lithium stellt ein Oligopol dar. Die drei wichtigsten Unternehmen lieferten 2015 knapp 80 % der globalen Förderung. An dieser Situation wird sich bis 2025 nichts ändern. Ein Onlinematerial (nachfolgend zwei Beispiele) enthält weiterführende Informationen zu globalen Entwicklungen.

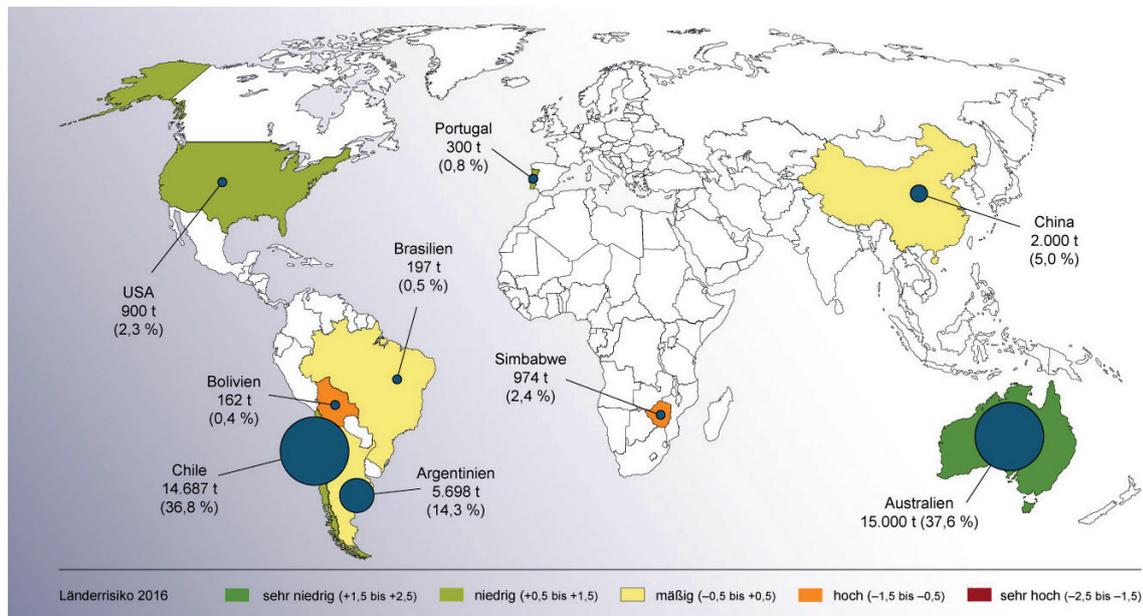


Abb. 36: Weltbergwerksproduktion von ca. 39.920 Tonnen Lithium 2016 (Quelle: Deutsche Rohstoffagentur DERA)

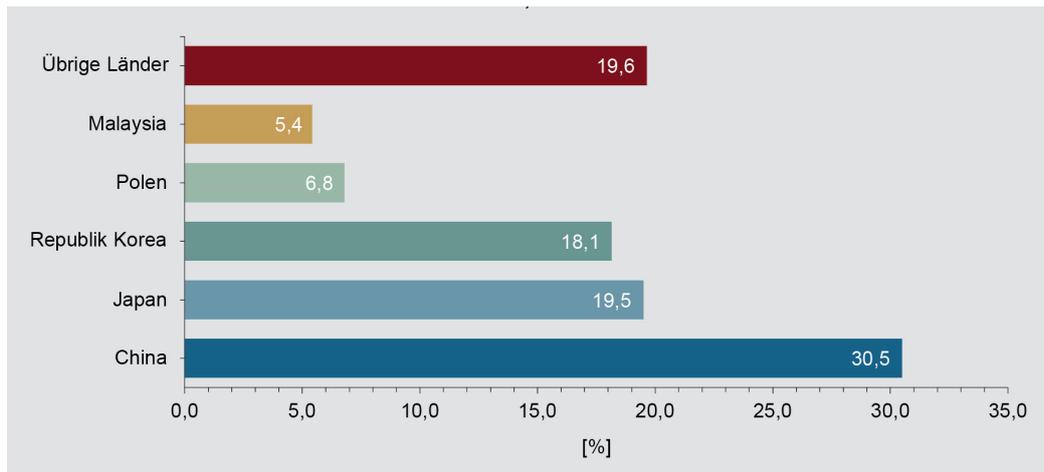


Abb. 37: Herkunft der deutschen Importe von 88,2 Mio. Lithium-Ionen-Batterien im Jahr 2015, (Datenquelle GTIS 2017, Quelle: Deutsche Rohstoffagentur DERA)

Onlinematerial:

LE4_ppt_Info_Nachhaltigkeit_Lithiumgewinnung global

LE4_AB_Nachhaltigkeit_Lithium aus Portugal

Deutschland importiert aktuell (vgl. DERA, Rohstoffinformationen 33, 2017) Lithiumsalze aus Südamerika, USA, Belgien u.a. Die Vorkommen dort sind sehr groß, gemessen am aktuellen Bedarf. Allerdings zeigt der weltweite Bedarf eine steigende Tendenz. Aus geopolitischen Gründen, insbesondere der **Importabhängigkeit**, strebt Deutschland eine Lithiumgewinnung wenigstens teilweise aus eigenen Vorkommen an.

Weltweit zeigen Geothermianlagen zum Teil beachtliche Gehalte an Lithium im Tiefenwasser, so z. B. auch im Tiefenwasser des Oberrheingrabens, einem Korridor zwischen Basel und Frankfurt. In der Geothermianlage Bruchsal wird seit 2010 Tiefenwasser für Wärme und Strom gefördert und nach der thermischen Nutzung wieder in das Reservoir zurückgeführt. Inzwischen wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem sich das im Tiefenwasser gelöste Lithium nachhaltig gewinnen lässt. So könnte bei rund 8 000 Betriebsstunden jährlich in der Geothermianlage in Bruchsal eine Lithiummenge gewonnen werden, die ausreichend ist für die Produktion von etwa 20 000 Auto-Batterien.

Quelle: <https://www.tiefengeothermie.de/news/nachhaltigkeit-im-blick-lithium-aus-dem-oberrheingraben-fuer-batterien>

Erforscht wird auch die Lithiumgewinnung aus Meerwasser. In den Weltmeeren sind ca. 230 Mrd. Tonnen Lithium gelöst. 2018 stellten Forscher eine Extraktionsmethode vor, bei der Lithium über solarbetriebene Elektrolyse aus Meerwasser gewonnen werden kann.

Forschung und Entwicklung: Substituierbarkeit

Der prognostizierte Bedarf an Lithium ist so groß, dass Verknappungen aus verschiedenen, oben genannten Gründen auftreten könnten. Daher wird, in der Forschung auch grundsätzlich immer, über die **Substituierbarkeit** nachgedacht. Würde man das Lithium z. B. durch das Alkalimetall Natrium in Akkumulatoren ersetzen können, so wäre die Frage der Verfügbarkeit als Nadelöhr für Akkumulatoren sofort gelöst. Bei den Natrium-Akkus gibt es seit 2021 Serienproduktionen.

Bei den Untersuchungen zur Spannungsreihe haben Schülerinnen und Schüler Lithium als optimales Anodenmaterial identifiziert. Die Probleme in Bezug auf die Nachhaltigkeit, die in der praktischen Versorgung des rasant wachsenden Weltmarktes für Lithium-Akkus auftreten, legen einen Vergleich mit anderen Metallen nahe. Was käme als Alternative in Frage? Schülerinnen und Schüler nennen z. B. Natrium und diskutieren die chemisch-physikalischen Kenndaten sowie die geopolitischen Faktoren. Dabei gewichten sie die Kriterien und wägen das Für und Wider ab, um letztlich zu einem begründeten, eigenen Standpunkt zu gelangen.

Auch die Metalle Magnesium und Aluminium mit ihren mehrfach geladenen Ionen sind Gegenstand der Forschung und lassen auf weitere Entwicklungssprünge hoffen.

An dieser Stelle zeigt sich der Zusammenhang zwischen chemischen Kenntnissen und den Kriterien der Nachhaltigkeit besonders deutlich. Er wird durch entsprechende Einbettung im Unterricht möglich.

Onlinematerial: LE4_AB_Ersatz von Lithium durch Natrium

Recycling

Schülerfrage: Werden Batterien/Akkus recycelt?

Die Verfügbarkeit zum Beispiel von Lithium leitet zur Problematik der Umweltbelastungen bei der Gewinnung über. Ein steigender Bedarf forciert die Gewinnung und die damit verbundenen Probleme. Ein Teil der Lösung stellt das Recycling dar, bei dem ebenfalls Umweltbelastungen beachtet und vermieden werden müssen.

Seit Jahren gibt es für Batterien und Akkumulatoren in Deutschland ein Sammelsystem und auch eine Rücknahmepflicht des Handels. Dadurch soll der Eintrag in die Umwelt vermieden werden.

Was aber, vor allem auch global betrachtet, mit den gesammelten galvanischen Elementen im Einzelnen geschieht, ob sie einer systematischen Wiedergewinnung relevanter Stoffe (z. B. Silber, Lithium, Zink, Cobalt, Blei, Graphit) unterworfen werden, hängt wiederum von der Gesetzeslage und der Wirtschaftlichkeit ab. Es darf angenommen werden, dass gesammelte galvanische Elemente zumindest sachgerecht und unter Schonung der Umwelt gelagert und z.T. auch verwertet werden.

Seit geraumer Zeit vermeiden die Hersteller toxische Chemikalien, wie z.B. Quecksilber und Cadmium. Solche Substanzen sind auch beim Recycling nur sehr schwer und aufwändig wiederzugewinnen und verteuern es damit, wenn sie es technisch/chemisch nicht gänzlich verhindern. Dann wäre nur noch eine Lagerung möglich, die teuer ist. Die ökonomische Schlussfolgerung ist der Verzicht auf solche Stoffe, was einen ökologischen Fortschritt darstellt.

Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings dürfte in Zukunft steigen. Das Recycling galvanischer Elemente ist deshalb Gegenstand intensiver Forschungen, von denen in den nächsten Jahren wichtige Erkenntnisse zu erwarten sind.

Individuelle Schülerbeiträge auf der Basis angeleiteter Recherche mit ausgewählten Webseiten können die derzeitige Problematik in den Unterricht transportieren.

Onlinematerial: LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus

Wirtschaftlichkeit

Schülerfrage: Wie wirtschaftlich sind Batterien/Akkus überhaupt?

Die Wirtschaftlichkeit ist ein ganz zentraler Aspekt in einer Marktwirtschaft. Sie wird beeinflusst von den Vorgaben des Gesetzgebers, der die Verantwortung für den Schutz von Mensch und Umwelt trägt.

Sind Neugewinnungen durch hohe Umweltauflagen beim Recycling ökonomischer? Erzwingt die Ressourcenverknappung durch einen boomenden Markt das Recycling? Ist das Recycling energetisch sinnvoll?

Solche und ähnliche Fragen müssen die Hersteller abwägen und beantworten.

Auch für den Konsumenten bleibt einiger Spielraum. Denn grundsätzlich lässt sich elektrische Energie elektromagnetisch per Induktion im Generator oder durch Photovoltaik sehr viel günstiger bereitstellen, aber eben nicht speichern. Daher sollte abgewogen werden, ob eine, relativ betrachtet, teure Bereitstellung der mobilen elektrischen Energie wirklich notwendig ist, oder ob die Versorgung mit Netzanschlüssen nicht auch ausreichend wäre.

Ein beispielhafter Vergleich verschiedener galvanischer Primärelemente (Preise Stand März 2021):

| | |
|---|--|
| <p>Varta Electronics SR43 Knopfzelle 386 Technologie: Silberoxid Spannung: 1,55 V maximale Ladungsmenge: 115 mAh Energie: 0,178 Wh Preis pro 1 kWh: 16.770 €</p> | <p>Renata CR2430 Knopfzelle Technologie: Lithium Spannung: 3 V maximale Ladungsmenge: 285 mAh Energie: 0,855 Wh Preis pro 1 kWh: 4.670 €</p> |
| <p>Basetech Mignon (AA)-Batterie Alkali-Mangan Technologie: Alkali-Mangan Spannung: 1,5 V maximale Ladungsmenge: 2650 mAh Energie: 3,975 Wh Preis pro 1 kWh: 50 €</p> | <p>Varta Longlife Max Power LR06 Mignon (AA)-Batterie Alkali-Mangan Technologie: Alkali-Mangan Spannung: 1,5 V maximale Ladungsmenge: 2900 mAh Energie: 4,35 Wh Preis pro 1 kWh: 230 €</p> |

Geht man für die elektrische Energie „aus der Steckdose“ von 0,35 € oder vielleicht auch von 0,50 € pro 1 kWh aus, und vergleicht diesen Preis mit den in der Tabelle dargestellten Preisen für die galvanischen Primärelemente pro 1 kWh, so wird die immense Diskrepanz und das Einsparpotenzial deutlich. Aus ökonomischer Sicht sollten Verbraucher die elektrische Energie aus der Steckdose einer mobilen Energiequelle vorziehen, wo immer das möglich ist.

Schülerfrage: Sind Batterien von Billiganbietern gut, oder soll man mehr Geld ausgeben?

Diese Frage lässt sich grundsätzlich nicht allgemeingültig beantworten, da die Preise für Batterien im Handel schwanken und immer wieder Preisnachlässe erfolgen. Der Vergleich der Primärzellen der Bauform AA oder der Knopfzellen in obiger Tabelle (auf Basis der Preise des Händlers Conrad Electronic, 05.03.2021) legt nahe, dass Billiganbieter bezogen auf die enthaltene Energie bzw. die maximal enthaltene Ladung kostengünstiger sind.

Für viele elektrische Geräte gibt es gar keine Alternative zur Primär- bzw. Sekundärzelle, wie z. B. bei Armbanduhren oder Hörgeräten. Und in diesen Fällen muss relativierend beachtet werden, dass ihr Energieumsatz vergleichsweise gering ist.

Für Lernende kann es sehr erhellend sein, wenn sie zu Hause oder im familiären Umfeld untersuchen, wie oft bzw. ob ein durch galvanische Elemente versorgtes Gerät dauerhaft in unmittelbarer Nähe zu einem Netzanschluss betrieben wird.

Aus diesen Betrachtungen lässt sich ableiten, dass eine lokale Energiebereitstellung durch Photovoltaik mit der Möglichkeit der maximalen Eigenverbrauchdeckung und dem Einsatz von mobilen Energiespeichern (Sekundärelementen) energetisch und wirtschaftlich eine bedenkenswerte umweltschonende Option darstellt.

Wo immer es möglich ist, sollte das Laden mobiler Sekundärelemente mit Solarzellen genutzt werden.

Onlinematerial: LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus

Alle genannten Faktoren führen stets zur Weiterentwicklung galvanischer Elemente, speziell von Sekundärelementen. Es wird deutlich, in welchem komplexen Geflecht aus politischen Entscheidungen, geologisch-geographischen Gegebenheiten und naturwissenschaftlichen Erkenntnissen eine Gesellschaft agieren muss, um stets handlungsfähig sein zu können und zu bleiben. Die gesellschaftliche Relevanz der Chemie für jeden einzelnen Bürger wird deutlich und sorgt bei der Partizipation an gesellschaftlichen Entscheidungen für rationale Entscheidungsgrundlagen.

4 ZUSAMMENFASSUNG

4.1 Üben und Vernetzen

Schülerinnen und Schüler erhalten Gelegenheit, ihren Lernzugewinn zu erfahren. Mit Hilfe von entsprechenden Aufgaben reflektieren sie diesen und werden aufgefordert, ihre Kompetenzen anzuwenden. Dabei erfolgt eine Verankerung in vorhandenen Begriffs- und Wissensnetzen, wodurch das neu erworbene Wissen nachhaltig verfügbar wird. In allgemeines Konzeptwissen überführtes konkretes Einzelwissen hilft, Vorgänge in der Natur, in der Technik und im Alltag zu verstehen, bei neuen Phänomenen und Fragestellungen bekannte Zusammenhänge sowie Strukturen zu erkennen und zur Erklärung heranzuziehen.

Solche Aufgaben können auch bedeuten, individuelle Lücken aufzuzeigen, die durch entsprechende Förderangebote geschlossen werden können. So bietet sich eine Möglichkeit, Kompetenzen, die in den vorangegangenen Themenfeldern entwickelt wurden, zu wiederholen und zu festigen.

Onlinematerialien:

ÜV_AB_Zink-Silberoxid-Element

ÜV_SV_Zink-Iod-Element

ÜV_Spiel_Energeticus

ÜV_AB_Bestimmung maximale Ladungsmenge

4.2 Mögliche Unterrichtsgänge im Überblick

| Kontext: Von der Zink-Luft-Batterie zum Li-Ionen-Akku | | | |
|---|--|--|---|
| Phase/ Stunde | Fachwissen/ Basiskonzept | Kompetenzentwicklung/ Schüleraktivitäten Schülerinnen und Schüler ... | Materialien |
| Einführende Lernsituation: Sammlung von mobilen Energieträgern aus der Lebenswelt (Handy, Laptop, E-Bike ...) oder Fotos davon (Akkus, Brennstoffzellen, Knopfzellen, Batterien) Sammlung von Fragen, z. B: Wo kommt der elektrische Strom her? Wie funktioniert eine Batterie? Wie speichert ein Akku die Energie? Wie genau funktioniert die Umwandlung in elektrische Energie? Wer baut die stärkste Batterie? u.v.a. | | | |
| Kontext: Von der Zink-Luft-Batterie zum Li-Ionen-Akku | | | |
| LE 1 1-3 | Oxidation, Reduktion Elektronenübertragung Redoxreaktion Donator-Akzeptor-Prinzip galvanisches Element Batterie | ... führen einen Modellversuch zur Zink-Luft-Knopfzelle durch. ... führen Versuche zu galvanischen Elementen durch, protokollieren und werten aus. ... wenden das Akzeptor-Donator-Prinzip auf verschiedene Redox-Reaktionen an. ... nutzen Modellzeichnungen und Formelsprache zur Darstellung von Elektronenübergängen. | LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen LE1_SV_Zink-Luft-Batterie mit Freiburger Version LE1_Info_Galvanische Elemente_Ergänzung Chemie interaktiv https://chemie-interaktiv.net/flashfilme.html Redoxreaktion Teil 5 - Die Galvanische Zelle I musstewissen Chemie, https://www.youtube.com/watch?v=gifwGurfvk |
| Erarbeitung 2: Welche Metalle sind am besten geeignet? - Die elektrochemische Spannungsreihe | | | |
| LE 2 4-6 | Redoxreihe Elektrochemische Spannungsreihe | ... kombinieren verschiedene Metalle (bzw. ihre Metallsalz-Lösungen) als Halbzellen und messen die Spannungen gegen die Sauerstoff-Halbzelle. ... bauen ein Lithium-Sauerstoff-Element. | LE2_SV_Spannungsreihe_analog Zink-Sauerstoff-Element LE1_LE2_ppt_Zink-Luft-Batterie und Optimierungen (Folien 13-17) LE2_SV_Lithium-Sauerstoff-Element |

| Erarbeitung 3: Optimierung durch Nutzung der Spannungsreihe | | | |
|--|---|--|---|
| LE 1 LE 2 7-8 | Akkumulator Umkehrbarkeit | ... bauen einen Modellversuch zum Lithium-Ionen-Akku. ... messen Spannung bzw. Stromstärke beim Betrieb eines galvanischen Elements. | LE1_SV_Lithium-Ionen-Modell-Akku LE1_ppt_Lithium-Ionen-Akku_Animation zur Teilchenebene |
| Erarbeitung 4: Kenngrößen galvanischer Elemente | | | |
| LE 3 9-10 | Spannung spezifische Energie bzw. Energiedichte Ladezeit Zyklusfähigkeit | ... berechnen und vergleichen Kenndaten von galvanischen Elementen. ... bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklusfähigkeit) anwenden. | LE3_AB_Bestimmung Ladungsmenge und spezifische Energie LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten LE3_AB_Zyklusfähigkeit_Ladevorgang im Modell LE3_AB_Knopfzellen Aufgaben und Quartett |
| Erarbeitung 5: Nachhaltigkeit bei Bau und Nutzung von galvanischen Elementen | | | |
| LE 4 11-12 | Batterie Akkumulator Masse Verfügbarkeit von Metallen | ... recherchieren zum Recycling von Lithium-Akkus. ... wenden das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung auf die Lithiumgewinnung an. ... bewerten den Ersatz von Lithium durch Natrium in Akkus. | LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus LE4_ppt_Info_Nachhaltigkeit_Lithiumgewinnung global LE4_AB_Nachhaltigkeit_Lithium aus Portugal |
| LE4_AB_Ersatz von Lithium durch Natrium | | | |
| Dekontextualisierung: Üben und vernetzen | | | |
| 13-14 | | ... wenden ihr Wissen in neuen Zusammenhängen an. ... verknüpfen ihr Wissen mit Kenntnissen aus anderen Themenfeldern. | ÜV_SV_Zink-Iod-Element ÜV_AB_Zink-Silberoxid-Element ÜV_AB_Bestimmung maximale Ladungsmenge |

| Kontext: Vom Daniell-Element zum Li-Ionen-Akku | | | |
|--|--|---|--|
| Phase/ Stunde | Fachwissen/ Basiskonzept | Kompetenzentwicklung/ Schüleraktivitäten Schülerinnen und Schüler ... | Materialien |
| <p>Einführende Lernsituation: Zeitleiste von historischen elektrochemischen Energiespeichern: Von der Leidener Flasche über die Volta-Säule zum Daniell-Element (LE1_ppt_Historisches zur Energiespeicherung) Sammlung von Fragen, z. B: Wo kommt der elektrische Strom her? Wie funktioniert eine Batterie? Wie speichert ein Akku die Energie? Wie genau funktioniert die Umwandlung in elektrische Energie? Wer baut die stärkste Batterie? u.v.a..</p> | | | |
| <p>Erarbeitung 1: Über die Fällungsreihe zum galvanischen Element</p> | | | |
| LE 1 1-4 | Oxidation, Reduktion Elektronenübertragung Redoxreaktion Donator-Akzeptor-Prinzip galvanisches Element Batterie | <p>... führen Versuche zur Fällung/Abscheidung von edlen Metall-Ionen mittels unedleren Metallatomen durch.</p> <p>... führen Versuche zu einem galvanischen Element durch, protokollieren und werten aus.</p> <p>... wenden das Akzeptor-Donator-Prinzip auf verschiedene Redox-Reaktionen an.</p> <p>... nutzen Modellzeichnungen und Formelsprache zur Darstellung von Elektronenübergängen.</p> | <p>LE1_ppt_Planung_Daniell-Element LE1_ppt_Daniell-Element_für_Stop Motion Clip (einschließlich Anleitung) LE1_mp4_Stop Motion Clip_Daniell-Element LE1_SV_Daniell-Element LE1_SV_Fällungsreihe</p> <p>LE1_Info_Galvanische Elemente_Ergänzung LE1_AB_Fehler-Suchbilder zum Daniell Element Chemie interaktiv - https://chemie-interaktiv.net/flashfilme.html Redoxreaktion Teil 5 - Die Galvanische Zelle I musstewissen Chemie, https://www.youtube.com/watch?v=gifwGurfvK</p> |
| <p>Erarbeitung 2: Welche Metalle sind am besten geeignet? - Die elektrochemische Spannungsreihe</p> | | | |
| LE 2 5-7 | Redoxreihe Elektrochemische Spannungsreihe | <p>... kombinieren verschiedene Halbzellen (aus Metallen mit ihren Metallsalz-Lösungen) miteinander und messen die Spannungen oder messen die Spannung gegen die sauerstoff-Halbzelle.</p> <p>... bauen ein Lithium-Sauerstoff-Element.</p> | <p>LE2_SV_Spannungsreihe_analog Daniell-Element LE2_SV_Lithium-Sauerstoff-Element</p> |

| Erarbeitung 3: Optimierung durch Nutzung der Spannungsreihe | | | |
|--|---|--|---|
| LE 1 LE 2 8-9 | Akkumulator Umkehrbarkeit | ... bauen einen Modellversuch zum Lithium-Ionen-Akku. ... messen Spannung bzw. Stromstärke beim Betrieb eines galvanischen Elements. | LE1_SV_Lithium-Ionen-Modell-Akku LE1_ppt_Lithium-Ionen-Akku_Animation zur Teilchenebene |
| Erarbeitung 4: Kenngrößen galvanischer Elemente | | | |
| LE 3 10-11 | Spannung spezifische Energie bzw. Energiedichte Ladezeit Zyklusfähigkeit | ... berechnen und vergleichen Kenndaten von galvanischen Elementen. ... bewerten mobile Energieträger, indem sie technische Bewertungskriterien (Energiedichte, Ladezeit, Zyklusfähigkeit) anwenden. | LE3_AB_Bestimmung Ladungsmenge und spezifische Energie LE3_AB_Kenndaten vergleichen und bewerten LE3_AB_Zyklusfähigkeit_Ladevorgang im Modell LE3_AB_Knopfzellen Aufgaben und Quartett |
| Erarbeitung 5: Nachhaltigkeit bei Bau und Nutzung von galvanischen Elementen | | | |
| LE4 12-13 | Batterie Akkumulator Masse Verfügbarkeit von Metallen | ... recherchieren zum Recycling von Lithium-Akkus. ... wenden das Drei-Säulen-Modell der nachhaltigen Entwicklung auf die Lithiumgewinnung an. ... bewerten den Ersatz von Lithium durch Natrium in Akkus. | LE4_AB_Nachhaltigkeit_Masse Wirtschaftlichkeit Recycling von Akkus LE4_ppt_Info_Nachhaltigkeit_Lithiumgewinnung global LE4_AB_Nachhaltigkeit_Lithium aus Portugal |
| Dekontextualisierung: Üben und vernetzen | | | |
| 14-15 | | ... wenden ihr Wissen in neuen Zusammenhängen an. ... verknüpfen ihr Wissen mit Kenntnissen aus anderen Themenfeldern. | ÜV_SV_Zink-Iod-Element ÜV_Spiel Energeticus ÜV_AB_Zink-Silberoxid-Element ÜV_AB_Bestimmung maximale Ladungsmenge |

4.3 Liste der verfügbaren Muster-Gefährdungsbeurteilungen zum TF 12

Spannungsreihe der Metalle

Fällungsreihe der Metalle

Lithium-Ionen-Akku

LITERATURVERZEICHNIS

Brand, B.-H.: Von der Redox-Reaktion zum galvanischen Element, PdN Chemie (2015), 64, Heft 2, S. 36-41.

DERA, Deutsche Rohstoffagentur, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
Rohstoffinformationen 33 (2017): Lithium, Rohstoffinformationen 33 (2017). Lithium (PDF, 6 MB).
Lithium - Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief, (2020): Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief für Lithium (2020) (PDF, 2 MB).
Lithium - Informationen zur Nachhaltigkeit, (2020): Lithium - Informationen zur Nachhaltigkeit (2020) (PDF, 2 MB).

Hamann, C.H.; Vielstich, W.: Elektrochemie, Wiley-VCH Verlag, Weinheim (1998).

Handbuch zum Experimentierset LITHIUM+ erweiterte und überarbeitete Version,
<https://www.der-hedinger.de/experimentierset-lithium-15-erweiterte-und-las%20110>.

Jansen, W.; Flint, A. (2005): Redoxreihe = Spannungsreihe?, ChemKon 12 (4), S. 187.

Jansen, W.; Thiemann, F.: Die Eisen-Halbzelle in der Spannungsreihe der Metalle, PdN-Chemie (1991) 8/40 S. 26-27.

Klaus, M.; Hasselmann M.; Rubner, I.; Mößner, B. und Oetken, M.: Metall-Luft-Batterien mit einer neuartigen Kohlelektrode, ChemKon (2014), 21, Nr. 2, S. 65-71.

Rosenberg, D.; Jansen, W.: Lithium-Sauerstoff-Batterie, CHEMKON 2020, 27, Nr. 3, 136-141.

Rosenberg, D.; Rautenstrauch, H.; Pöhls, C.; Böttger, S.; Busker, M.; Fittschen, U.; Jansen, W. (2018):
Nochmal Zitronenbatterie – eine Klärung, ChemKon 25 (8), S. 343-349.

Van der Veer, W.; de Rijke, P.; Oetken, M.; Jansen, W.: Das Aluminium in der Verdrängungs- und Spannungsreihe der Metalle; CHEMKON 4 (1996), S. 177-183.

AUTORINNEN UND AUTOREN

Barbara Dolch

Pädagogisches Landesinstitut Rheinland-Pfalz

Monika Kallfelz

Görres-Gymnasium, Koblenz

Dr. Maximilian Klaus

Villingen-Schwenningen

Elisabeth Kukula

Frauenlob-Gymnasium Mainz, Mainz

Dr. Holger Kunz

Max-Planck-Gymnasium Trier, Trier

Christian Lauer

Integrierte Gesamtschule und Realschule plus Georg Friedrich Kolb, Speyer

Yvonne Lesiak

Justus-von-Liebig-Realschule plus, Maxdorf-Lambsheim

Heike Nickel

Kurfürst-Ruprecht-Gymnasium, Neustadt an der Weinstraße

Michaela Ostermann

Regino-Gymnasium Prüm, Prüm

Dr. Susanne Pleus

Maria-Ward-Schule, Landau

Cornelia Schäfers

Are-Gymnasium Bad Neuenahr, Bad Neuenahr

Thomas Schemer

Max-Planck-Gymnasium Trier, Trier

Wilhelm Willer

Eduard-Spranger-Gymnasium Landau, Landau

Sofern in der Bildunterschrift nicht anders deklariert, liegen die Urheberrechte beim Pädagogischen Landesinstitut Rheinland-Pfalz oder bei den mitwirkenden Autorinnen und Autoren selbst.



Rheinland-Pfalz

PÄDAGOGISCHES
LANDESINSTITUT

Butenschönstr. 2
67346 Speyer

pl@pl.rlp.de
www.pl.rlp.de