

Projekt – Wasserstoff als Energieträger

Konzeptidee und Materialentwicklung: Marc Hörnig, Anton Kürzinger, Sophia Schwabe
(bearbeitet durch das Autorenteam)

Inhaltsverzeichnis

Projekt – Wasserstoff als Energieträger	1
Einleitende Bemerkungen	2
Eckdaten	2
Kurzbeschreibung.....	3
Lehrplanbezug und Vorwissen.....	4
Sachlogische Strukturierung des Lerngegenstandes.....	5
Problemstellung und Lehrziele	6
Problemlöseprozess und methodische Feinplanung	8
Zeitbedarf.....	10
Erkenntnisunterstützende Mittel	13
Literaturverzeichnis.....	45

Einleitende Bemerkungen

Das folgende Projekt wurde im Rahmen des Moduls „Fachdidaktik II: problem- und anwendungsorientierter Chemieunterricht“ in der Lehrveranstaltung „Projektlernen“ von Studierenden erarbeitet. Dabei wurde das Thema von einer Kooperationsschule in Dresden mit Bezug zu einem konkreten Lernbereich des sächsischen Lehrplans im Fach Chemie vorgegeben, ebenso wie durch organisatorischen Rahmenbedingungen im „LernLaborFarbe“ der TU Dresden. Nach der Konzeption des Projektes und dessen Erprobung mit einer Klasse der Kooperationsschule erörterten die Studierenden ihr Konzept und die damit verbundenen didaktischen Überlegungen zusammenhängend in einem schriftlichen Beleg. Das nachfolgende OA-Material basiert auf den Erarbeitungen der Studierenden und wurde um einige Ausführungen ergänzt.

Im Folgenden werden die zentralen Eckdaten des Projektes, eine Kurzbeschreibung dargestellt, sowie Erläuterungen zu den grundlegenden didaktischen Überlegungen an den Inhalten des Beitrages „An authentischen Problemen Lehren lernen. Ein hochschuldidaktischer Ansatz zur Entwicklung (über-)fachlicher Kompetenzen“ gespiegelt. Dadurch wird der theoretische Ansatz des Artikels beispielhaft untersetzt.

Eckdaten

Konzept	Wasserstoff als Energieträger
Fächer	Chemie
Problemstellung	Die Schülerinnen und Schüler setzen sich mit der Technologie wasserstoffbetriebener Kraftfahrzeuge (Brennstoffzelle) in Abgrenzung zu batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen hinsichtlich ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile auseinander. Dafür nehmen die Lernenden die Rolle von Ingenieurinnen und Ingenieuren eines fiktiven Fahrzeugkonzerns ein, um einen Richtungsentscheid über die zukünftige technologische Ausrichtung des Konzerns zu fällen.
Inhalte	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Wasserstoff ▪ Darstellung und Identifikation von Wasserstoff ▪ Gefahren im Umgang, Transport, Lagerung ▪ Brennstoffzelle ▪ großtechnische Herstellung von Wasserstoff ▪ Aspekte nachhaltiger Entwicklung am Beispiel alternativer Antriebstechnologien
Lehrplanbezug (Sachsen)	Gymnasium: Kl. 8, LB 2, WP 1 Oberschule: Kl. 9, LB 2
Zeitbedarf	bis zu 6h
Material	Briefe mit Arbeitsauftrag, Beamer/digitale Tafel, Arbeitsblätter, Versuchsanleitungen, Plakate und Gestaltungsmittel für Präsentationen; Internetzugang

Kurzbeschreibung

Themen der nachhaltigen Entwicklung gewinnen im naturwissenschaftlichen Unterricht zunehmend an Bedeutung. Dabei gilt es Schülerinnen und Schüler bewusst zu machen, welche Bedeutung chemisches Wissen für das Verständnis und die Bewertung von Themen gesamtgesellschaftlicher Relevanz, wie z.B. Klimawandel oder die Verkehrswende hat. Im Projekt „Wasserstoff als Energieträger“ setzen sich Lernenden forschend mit den Eigenschaften von Wasserstoff als möglicher alternativer Brennstoff für moderne Antriebstechnologien auseinanderzusetzen und beteiligen sich dadurch am Diskurs über Herausforderungen und Potentiale verschiedener nachhaltiger Antriebe als Alternative zum Verbrennermotor. Auch der Vergleich zu Technologien der Elektromobilität wird dabei thematisiert.

Dafür versetzen sich die Schülerinnen und Schüler in die Rolle von Ingenieurinnen und Ingenieuren eines fiktiven Fahrzeugkonzerns, welche der Konzernleitung auf Basis naturwissenschaftlich-experimenteller Erkenntnisse eine Empfehlung über die zukünftige, wirtschaftliche Ausrichtung des Unternehmens geben sollen. Zentrale Bestandteile sind dabei das Finden und Diskutieren von sinnvollen Kriterien für die Bewertung der Technologien „Brennstoffzelle“ und „batteriebetriebenes Elektroauto“, die experimentelle Darstellung von Wasserstoff sowie die Auseinandersetzung mit Herausforderungen bei der Lagerung, dem Transport, der Speicherung sowie der Herstellung von Wasserstoff. In Gruppen erarbeiten die Lernenden dafür u.a. experimentell Wissen über Eigenschaften von Wasserstoff und trainieren in einem Vortrag vor einer fiktiven Konzernleitung ihre kommunikativen und argumentativen Fähigkeiten. Dadurch wird die Bedeutung naturwissenschaftlichen Wissens für die Bewertung gesellschaftlicher Schlüsselprobleme deutlich und den Schülerinnen und Schülern wird ermöglicht, sich selbstständig notwendiges Wissen zu erarbeiten sowie am Diskurs über Potentiale und Herausforderungen alternativer Antriebstechnologien, wie der Brennstoffzelle, zu partizipieren.

Lehrplanbezug und Vorwissen

Für das erarbeitende Unterrichtskonzept in Form eines Projektes wurde folgender Lernbereich aus dem sächsischen Lehrplan Klasse 8 Chemie (Gymnasium) vorgegeben:

Wahlbereich 1: Wasserstoff als Energieträger

<p>Kennen der Möglichkeiten zur Nutzung von Wasserstoff als Energieträger</p> <p>experimentelles Durchführen der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff in einer Brennstoffzelle</p> <p>Einblick in die Etappen des Solar-Wasserstoff-Konzepts gewinnen</p> <p>Kennen der Gefahren bei Umgang, Transport und Lagerung von Wasserstoff</p>	<p>Raketentechnik, alternative Antriebstechnologien auf Wasserstoffbasis</p> <p>Nachweis des Reaktionsprodukts, Vergleich mit der Knallgasreaktion</p> <p>Bedeutung regenerativer Energien, Umweltbilanz</p> <p>⇒ Bildung für nachhaltige Entwicklung</p> <p>Sicherheitsbestimmungen</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 1. Staatsministerium für Kultus Freistaat Sachsen (2019): Lehrplan Gymnasium Chemie, S. 13

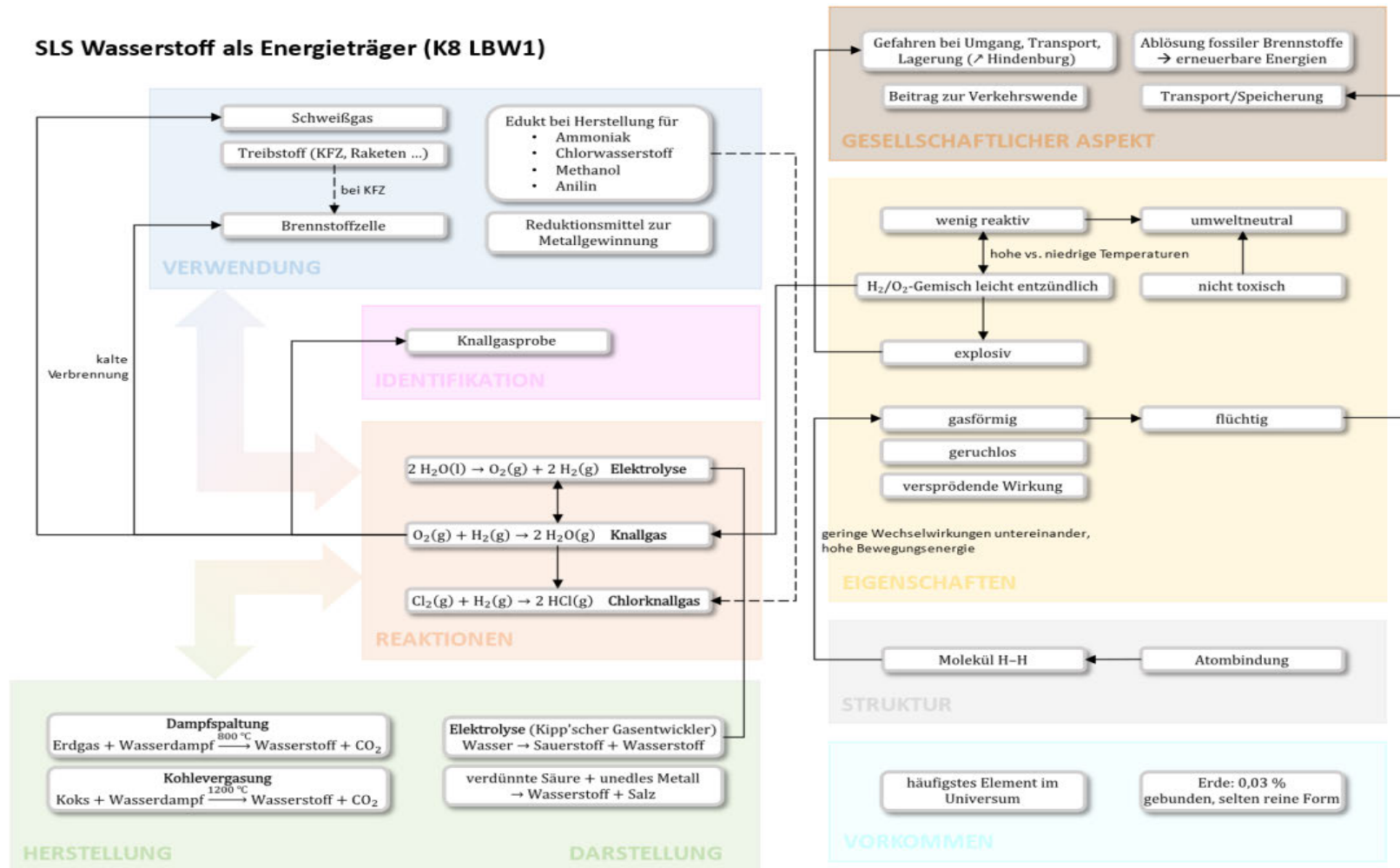
Dieser Wahlbereich knüpft inhaltlich an den obligatorischen Lernbereich 2 „Wasser – eine chemische Verbindung“ an (SMK 2019, S. 10). In diesem setzen sich die Lernenden mit Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Wasser auseinander und lernen die Bildung und Zersetzung von Wasser sowie Wasserstoff als unpolare Molekülverbindung kennen. Am Beispiel des Wasserstoffmoleküls werden hierbei der Begriff der chemischen Bindung sowie Modellvorstellungen zum Atombau mit Hilfe des Schalenmodells erarbeitet. Eigenschaften von Wasserstoff sowie die Identifikation dieses Gases durch die Knallgasprobe werden ebenfalls thematisiert und können aufbauend im Wahlpflichtbereich vertieft werden. Im Wahlbereich werden insbesondere Verwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff als Energieträger und damit einhergehende Herausforderungen auf naturwissenschaftlicher Ebene fokussiert. Dies schließt technische Anwendungen in Form der Brennstoffzelle sowie des Solar-Wasserstoffkonzeptes ein und ist eng mit nachhaltiger Entwicklung und der Nutzung regenerativer Energien verknüpft. Die Analyse und sachlogische Strukturierung der Inhalte erfordert folglich die ganzheitliche Auseinandersetzung mit der naturwissenschaftlichen, technischen und gesellschaftswissenschaftlichen Betrachtungsebene des Themas.

Die zu Grunde liegenden Reaktionsaspekte (Redoxreaktionen, Elektrolyse) sind den Schüler:innen noch nicht bekannt, bzw. werden im sächsischen Lehrplan für Gymnasien formal erst im Lernbereich 4 „Reaktionen von Metallen mit Nichtmetallen“ (SMK 2019 S. 11f.) eingeführt. Der Wahlpflichtbereich lässt sich entsprechend flexibel in den Unterrichtsgang der Klasse 8 anpassen, je nachdem welche Konzepte und Zusammenhänge ausführlicher betrachtet werden sollen.



Sachlogische Strukturierung des Lerngegenstandes

Von den Studierenden wurde folgende Inhalte und Zusammenhänge für den Wahrpflichtbereiches identifiziert und für das Projekt sachlogisch strukturiert:



Die Studierenden wählen für ihre Erarbeitungen einen Kontext nachhaltiger Entwicklung: „Wasserstoff als Energieträger“ aus und strukturieren entsprechende technische und naturwissenschaftliche Zusammenhänge sachlogisch. Ausgangspunkt ist dabei das gesellschaftliche Schlüsselproblem, alternative Energieträger für Antriebstechnologien von Kraftfahrzeugen zu finden. Dabei wird, wie im Lehrplan ausgewiesen, die Bedeutung von Wasserstoff als regenerativer Energieträger herausgestellt und die Diskussion um Herausforderungen und Potentiale möglicher technischer Anwendungen aufgegriffen. Auf technischer Ebene fokussieren die Studierenden daher die Wasserstoff-Brennstoffzelle als alternative Antriebstechnologie von Autos.

Problemstellung und Lehrziele

Die Projektmethode als didaktische Großform ist problemorientiert. Das bedeutet, die methodische Feinplanung des Konzeptes orientiert sich an einer übergeordneten Problemstellung, welche in die Lebenswelt der Lernenden eingebettet ist und zur aktiven und selbstständigen Auseinandersetzung mit den Lerngegenständen anregt. Dafür ist es notwendig, den Lernprozess der Lernenden ausgehend von der Problemstellung durch das Ableiten von Teilfragen zu antizipieren.

Auf Basis der sachlogischen Strukturierung wurde folgende Problemstellung abgeleitet, die bereits eine entsprechende Inszenierung in Form eines Rollenspiels enthält (siehe dazu ausführlich „Erkenntnisunterstützende Mittel“):

„Liebe Ingenieurinnen und Ingenieure,

in den letzten Jahren ist die Überlegung, auf alternative Antriebstechnologien umzusteigen, immer größer geworden. Verbrennungsmotoren, welche mit Benzin oder Diesel arbeiten, rücken immer weiter aus dem Bild, da sie klimaschädigendes Kohlendioxid sowie Stickoxide ausstoßen und nichtnachwachsende Rohstoffe für die Herstellung des Treibstoffes verbraucht werden.

Unser Konzern SMW (Sächsische Motoren Werke) möchte seinen neuen Standort in Zwickau ausbauen und dabei auf alternative Antriebstechnologien setzen. Der Vorstand steht nun vor dem Problem, ob sich SMW wie ein Großteil der Konkurrenz auf die Elektroautos spezialisiert oder vielmehr den Ausbau der Wasserstoff-Brennstoffzelle als Autoantrieb favorisieren sollte.

Der Vorstand hat für diese Frage das Ingenieurteam des Forschungsinstitutes für technische Innovation der SMW einberufen, welches nun abwägen soll, inwiefern die Spezialisierung auf die Wasserstofftechnologie unter Berücksichtigung aller relevanten Aspekte vorteil- oder nachteilhafter wäre als der Einsatz batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Erarbeiten Sie hierfür sämtlich notwendige Inhalte, um eine Entscheidung zwischen den beiden Antriebstechnologien fällen zu können und diese schließlich der Institutsleitung zu präsentieren.“

Die Problemstellung stellt im ersten Absatz den Lebensweltbezug für die Lernenden her und ordnet das zu behandelnde Thema in das gesellschaftlich relevante Schlüsselproblem der Verkehrswende auf Basis regenerativer Antriebstechnologien ein.

Im zweiten Absatz wird die Problemstellung in Form eines Rollenspiels inszeniert. Die Schülerinnen und Schüler übernehmen am Projekttag die Rolle von Ingenieurinnen und Ingenieuren, welche Möglichkeiten für die wirtschaftliche Neuausrichtung eines Unternehmens bewerten sollen (Ausgangszustand). Der dritte Absatz konkretisiert die Problemstellung in Form eines Arbeitsauftrages, welcher die Grundlage für die Strukturierung des Lernprozesses darstellt und ein entsprechendes Lernprodukt als Zielorientierung für den Projekttag angibt (Zielzustand). Aus diesem Arbeitsauftrag ergeben sich folgende Teilfragen, die für die Lösung des Problems geklärt werden müssen:

- Welche technischen Anwendungen gibt es in Bezug auf wasserstoffbetriebene und batteriebetriebene Antriebstechnologien?
- Welche Kriterien sind für eine Bewertung der Technologien im Kontext der Firma relevant?
- Welches Wissen über die Technologien benötigen wir, um eine Bewertung und folglich auch eine Entscheidung begründen zu können?
- Wie präsentieren wir die Entscheidung und Argumente überzeugend der Institutsleitung?

Die Klärung der Teilfragen erfordert die Erarbeitung von (fächerübergreifendem) Fachwissen und Zusammenhängen, welche in der sachlogischen Strukturierung ausgewählt wurden. Zusätzlich zum Fachwissen ist für die Problembearbeitung Handlungswissen notwendig, das sich mit Hilfe der (idealisierten) Phasen eines Problemlöseprozesses weiter strukturieren lassen. Die Antizipation von Handlungs- und Fachwissen im Sinne einer Problemlösung ist Ausgangspunkt für die methodische Feinplanung des Projektes und der Erarbeitung erkenntnisunterstützender Mittel und Medien (siehe unten). Unter Berücksichtigung der zu erarbeitenden Bildungsinhalte und der ausgewählten methodischen Überlegungen lassen sich die nachfolgenden Lehrziele für das Projektkonzept formulieren:

Lehrziele

Die SuS bearbeiten kooperativ die Problemstellung und planen ihren Lernprozess durch Teilaufgaben, die für die Problemlösung bearbeitet werden müssen, selbstständig.

Die SuS positionieren sich zur Bedeutung alternativer Antriebstechnologien für Kraftfahrzeuge im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung.

Die SuS nehmen am gesellschaftlichen Diskurs über Wissenschaft und Technik teil und bewerten verschiedene Antriebstechnologien von Kraftfahrzeugen nach selbst gewählten Kriterien.

Die SuS treffen im Kontext der Probleminszenierung eine Entscheidung für eine Antriebstechnologie und begründen diese unter Nutzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse.

Die SuS präsentieren und begründen ihre Entscheidung unter Nutzung verschiedener Medien und Erkenntnisse.

Die SuS erläutern mit Bezug zum Themenbereich „Wasserstoff als Energieträger“ Verwendungsmöglichkeiten, Eigenschaften, Bau und Reaktionen von Wasserstoff.

Die SuS schließen mit Hilfe von Experimenten zu Eigenschaften und der Reaktivität von Wasserstoff auf Potentiale und Herausforderungen der wasserstoffbasierten Antriebstechnologie einer Brennstoffzelle.

Problemlöseprozess und methodische Feinplanung

Wie im Beitrag beschrieben, werden im vorgestellten fachdidaktischen Ansatz Unterrichtsplanungen konsequent ausgehend vom Lernprozess der Lernenden gedacht. Lernen als Problemlösen lässt sich dabei (idealisiert) in Form verschiedener Phasen eines Problemlöseprozesses strukturieren. Das für die Problemlösung relevante Wissen lässt sich dabei in handlungsbezogenes und fachbezogenes Wissen differenzieren:

Tabelle 1 Strukturierung eines Problemlöseprozesses und des dazu erforderlichen Wissens (adapt. nach Niethammer 2020, S. 103).

Handlungsbezogenes Wissen	Fachbezogenes Wissen
<i>Richten</i> = Analyse der Problemstellung ▪ Welche Ziele sollen erreicht werden?	Jeder Schritt im Problemlöseprozess setzt bestimmtes Wissen voraus und kann Potential bieten, neues Wissen zu erschließen. Die Klärung von Teilfragen und Perspektiven erfordert in der Regel fachspezifisches Wissen und Methoden. Problemanalyse, -strukturierung und Kontrolle erfordern die Verknüpfung von Fachperspektiven und damit fächerübergreifendes Wissen.
<i>Orientieren</i> = Analyse der Situation ▪ Welche Teilfragen müssen gelöst werden? (Strukturierung des Problems) ▪ Welche Perspektiven auf die Problemstellung sind dabei erforderlich (z.B. technisch, naturwissenschaftlich, etc.)? ▪ Welches Vorwissen besteht bereits?	
<i>Entwurf und Entscheidung</i> für methodisches Vorgehen ▪ Welche Methoden sind für die Klärung von Teilfragen geeignet (z.B. Experimente, Recherche, etc.) ▪ Müssen weitere Methoden erschlossen werden?	
<i>Durchführen</i> = Umsetzung des methodischen Vorgehens	
<i>Kontrolle</i> und Zusammenführung der Ergebnisse im Abgleich mit Zielstellung	

Für die Projektmethode ist hierbei zusätzlich zu berücksichtigen, dass ein konkretes Lernprodukt zu erstellen ist, welches im Allgemeinen bereits das Ziel des Projektes vorgibt. Darüber hinaus kann auch der Ausgangszustand, d.h. das Vorwissen der Lernenden in der Problemszenierung des Projektes reaktiviert und damit vorgegeben werden. Um den die Lernenden bei der Problemlösung zu unterstützen, können für die einzelnen Phasen und zu erarbeitenden Fachinhalte unterstützende Materialien und

Medien bereitgestellt und ggf. auch bereits in der Probleminszenierung eingearbeitet werden (siehe Abschnitt erkenntnisunterstützende Mittel). Im Beispiel des Projektes „Wasserstoff als Energieträger“ wurde der Problemlöseprozess wie in Tabelle 2 dargestellt antizipiert und methodisch untersetzt.

Tabelle 2. Phasen des Problemlöseprozesses im Projekt "Wasserstoff als Energieträger"

Phase im Problemlöseprozess	Relevantes Fachwissen
Richten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analyse des Arbeitsauftrages und formulieren der Zielstellung: (argumentative) Entscheidung und Präsentation einer alternativen Antriebstechnologie für den Konzern
Orientieren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erarbeiten von Kriterien zur Bewertung von Antriebstechnologien am Beispiel Elektroauto ▪ Transfer - Formulieren noch zu klärender Teilfragen: ▪ Eigenschaften von Wasserstoff; Gefahren zu Umgang, Transport und Lagerung; Brennstoffzelle (Funktionsweise); Wasserstoffproduktion (verschiedene Arten, nachhaltige Methoden); spezielle Herausforderung von Wasserstoffautos
Entwerfen und Entscheiden	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entwicklung eines Handlungs- und Zeitplanes zur Klärung der Teilfragen ▪ Sichten des verfügbaren Materials ▪ Aufteilung von Aufgaben
Durchführen 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recherchen zu identifizierten Aspekten
Feedback Runde in Form eines Teammeetings	
Durchführen 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ experimentelle Erkundung zur Identifikation (Knallgasprobe) und Darstellung von Wasserstoffs (Hoffmansch'scher Wasserersetzer); technischen Anwendung (Brennstoffzelle) und großtechnische Nutzung (Solar-Wasserstofftechnologie)
Kontrollieren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entscheidung für eine Antriebstechnologie auf Basis gesammelter Erkenntnisse ▪ Erstellen der Präsentation für den Institutsvorstand
Präsentation der Projektergebnisse mit Abschlussdiskussion und Entscheidung des Vorstandes SMW	

Die Probleminszenierung erfolgt im Beispiel mit Hilfe eines Rollenspiels. Die Schülerinnen und Schüler werden vom Vorstand eines fiktiven Automobilkonzerns mit einem Arbeitsauftrag konfrontiert (siehe erkenntnisunterstützende Mittel). In der sich anschließenden Phase *Richten* bestimmen die Schülerinnen und Schüler in kleineren Arbeitsgruppen das zu erarbeitende Lernprodukt. In der *Orientierungsphase* werden für die Bewertung relevante Kriterien formuliert, welche Grundlage für das Aufstellen weiterer Teilfragen sind. Da diese Phase herausfordernd sein kann, wird die Phase mit einem Mystery zu Elektroautos unterstützt. In diesem Material werden Vor- und Nachteile von Elektroautos angegeben, die mit Hilfe von Pfeilen und Prompts verknüpft werden müssen. Dabei können sich aus dem zu erstellenden Wirkungsgefüge Kriterien für die Bewertung von Antriebstechnologien erheben, die auch für die Bewertung von Wasserstoffautos relevant sein können. Mit Hilfe der so abgeleiteten Kriterien werden Teilfragen formuliert, welche die Phasen *Entwerfen* und *Entscheiden* strukturieren. In dieser stellen die Gruppen einen Plan für ihr weiteres Vorgehen auf, Sichten zur Verfügung stehendes Material und wählen Experimente aus, die Sie in ihrem Bewertungsprozess unterstützen können. Aus organisatorischen Gründen wurde das Projekt so geplant, dass zunächst eine Recherchephase (*Durchführen 1*) stattfindet, an die sich dann eine Experimentierphase (*Durchführen 2*) anschließt. Um formativ auf evtl. bestehende Fragen und Lücken im Erkenntnisprozess der Lernenden einzugehen, wurde ein zusätzlicher Fixpunkt mit Kontrollmöglichkeit in Form eines „Teammeetings“ für die einzelnen Gruppen ergänzt. In diesem Treffen stellen die Lernenden ihre bisherigen Ergebnisse vor, sammeln noch offene Fragen und werden ggf. durch andere Lernende oder die Lehrkraft auf Aspekte aufmerksam gemacht, die sie bei ihren Recherchen eventuell noch nicht berücksichtigt hatten. Durch diese Inszenierung wird der Gedanke des Rollenspiels noch einmal besonders betont. Grundsätzlich lassen sich bei günstigen Rahmenbedingungen (Betreuung der Experimente, Zeit, Räumlichkeiten) die beiden Durchführungsphasen auch stärker auf die individuellen Bedürfnisse der Lernenden anpassen. In der *Kontrollphase* werden Erkenntnisse aus der Durchführung systematisiert und die beiden Antriebstechnologien innerhalb der Gruppen nach den ausgewählten Kriterien verglichen und bewertet. Anschließend können die Lernenden sich für eine Antriebstechnologie entscheiden und ihre Präsentation für das Gespräch mit der Institutsleitung vorbereiten. In der Präsentation stellen sie neben ihrer Entscheidung auch die Gründe und Argumente für diese dar und beziehen sich dabei auf ihre Rechercheergebnisse und Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen. Für die Gestaltung der Präsentation kann z.B. ein Moderationskoffer bereitgestellt werden. Das Projekt endet damit, dass sich der Vorstand (gespielt von Studierenden/Lehrkraft) auf Basis der Präsentationen eine Antriebstechnologie für die weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit auswählt.

Zeitbedarf

Da die Gruppen ihren Problemlöseprozess im Projekt individuell planen und durchlaufen, wird auf die Angabe eines detaillierten Verlaufsplanes an dieser Stelle verzichtet. Im Folgenden ist daher der Zeitbedarf für die einzelnen Projektabschnitte bei Erprobung an der TU Dresden angegeben. Je nach inhaltlicher Fokussierung und Auswahl der Experimente kann das Projekt zeitlich gekürzt oder um andere Inhalte ergänzt werden.

Zeit	Phase	Material
10 min	Einführung, Vorstellung der Studierenden, Gruppeneinteilung 6 Gruppen à 4 bis 5 SuS, Gruppenname	4er-Tische, Namensschilder
20 min	„Präsentieren“ der Aufgabenstellung	Briefe (Problemstellung)
20 min	Orientierungsphase → Absprachen in den Gruppen, Konzept zur Vorgehens-/Erarbeitungsweise	Problemstellung
20 min	Mystery → Wirkungsgefüge des Elektroautos erstellen	Umschläge mit Schnipseln, Papier/Plakate zum Aufkleben
20 min	Grundlagen Wasserstoff → Eigenschaften, Internetrecherche	Tablets
20 min	Sicherheitsaspekt/Transport/Lagerung → Beurteilung der Gefahren, Logistik, evtl. poröse Stoffe	Tablets
40 min	Brennstoffzelle → Funktionsweise, modellhafte Betrachtung der Redoxreaktion	Tablets, IB
50 min	Wasserstoffproduktion → Elektrolyse/Dampfspaltung/Kohlevergasung/Darstellung, Aspekt Strommix Deutschland, erneuerbare Energien	Tablets, IB, Video zu Herstellungsmethoden
30 min	Herausforderungen des Wasserstoffautos → Verkehrsinfrastruktur, Verfügbarkeit, Ressourcenbedarf	Tablets



10 min	Team-Meetings Arbeitsstandsüberprüfung und Klärung ausstehender Aspektuierung	
20 min	Experiment „Knallgasprobe“ → Herstellung H ₂ mit Salzsäure und Zink, Knallgasprobe (evtl. O ₂ -Nachweis?)	Versuchsanleitung
15 min	Experiment „HOFFMANN'scher Wasserersetzer“ → Elektrolyse von Wasser	Versuchsanleitung
15 min	Experiment „Hydro-Car“ → Brennstoffzelle	Versuchsanleitung
10 min	Experiment „Solar-Wasserstofftechnologie“ → Aspekt Solarenergie, Elektrolyse, Brennstoffzelle	Versuchsanleitung
30 min	Sichtung der Materialien ggf. Erstellen von Präsentationsmaterialien	Präsentationskoffer
60 min	Präsentation → jede Gruppe ca. 10 min	
20 min	Abschlussdiskussion, Entscheidung des Vorstandes	
90 min	Pausenzeit	
6:30 h		

Erkenntnisunterstützende Mittel

Sächsische Motorenwerke AG · Winterkornstr. 1 · 08058 Zwickau

A0 01FE E2AE 00 0000 0057
IM 17.01.19 0,80 Deutsche Post



Forschungsinstitut für technische Innovation
Dr.-Ing. S. Schwabe
Winterkornstr. 5
08058 Zwickau

Datum: 27.01.2020

Innovationsforschung zum Wasserstoffbetrieb von Kraftfahrzeugen

Liebe Ingenieurinnen und Ingenieure,

in den letzten Jahren ist die Überlegung auf alternative Antriebstechnologien umzusteigen immer größer geworden. Verbrennungsmotoren, welche mit Benzin oder Diesel arbeiten rücken immer weiter aus dem Bild, da sie klimaschädigendes Kohlendioxid, Stickoxid ausstoßen und nichtnachwachsende Rohstoffe für die Herstellung des Treibstoffs verbraucht werden.

Unser Konzern SMW (Sächsische Motoren Werke) möchte seinen neuen Standort in Zwickau ausbauen und dabei auf alternative Antriebstechnologien setzen. Der Vorstand steht nun vor dem Problem, ob sich SMW wie ein Großteil der Konkurrenz auf die Elektroautos spezialisiert oder sich auf die Wasserstoffautos fokussiert.

Der Vorstand hat für diese Frage das Ingenieurteam des Forschungsinstituts für technische Innovation der SMW einberufen, welches nun abwägen soll, inwiefern die Spezialisierung auf die Wasserstofftechnologie unter Berücksichtigung aller relevanten Aspekte vorteil- oder nachteilhafter wäre als die Technologie batteriebetriebener Elektrofahrzeuge. Erarbeiten Sie hierfür sämtliche notwendigen Inhalte, um eine Entscheidung zwischen den beiden Antriebstechnologien fällen zu können und diese schließlich der Institutsleitung zu präsentieren.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Hubertus Scheuer
Vorstandsvorsitzender der SMW AG

Abbildung 2: Anschreiben mit Problemstellung

Verbrennungsmotoren haben einen Wirkungsgrad von ca. 40%

Während des Fahrbetriebs stoßen E-Autos keine Schadstoffe aus.

Elektromotoren haben einen Wirkungsgrad von ca. 90%

Die Bremsenergie kann bei Elektromotoren genutzt werden, um die Batterie aufzuladen.

Seit 2019 gibt es eine EU-Verordnung, die vorschreibt, dass Elektroautos Warngeräusche geben müssen, um die Sicherheit der Passanten zu schützen.

E-Autos fahren geräuschärmer als Benzin. Jedoch werden sie von Fußgängern und Fahrradfahrer*innen schnell überhört, wodurch ein erhöhtes Unfallpotenzial entsteht.

Die Betankung (Laden) nimmt teilweise sehr viel Zeit in Anspruch

Je nach Batteriegröße liegen die Reichweiten bei 100-600km

Die Elektrotankstellen werden nach und nach in Deutschland ausgebaut.

Die Herstellung eines E-Autos mit einer 90 kWh-Batterie verursacht 22.635 Kg CO₂

Die Herstellung eines Diesel Autos verursacht 9995 Kg CO₂

Die Herstellung eines Wasserstoffautos verursacht 16.491 Kg CO₂

Teilweise können alte Batterien von Elektroautos als stationäre Stromspeicher genutzt werden. (z.B. bei Solarzellen)

Die Kosten der Batterien sinken von Jahr zu Jahr. Allerdings sind diese immer noch das teuerste Element an einem Elektroauto. Pro Kilowattstunde (kWh) werden ca. 230€ benötigt. Bei einem e-Golf machen dies bereits ca. 7000€ aus.

Für die Herstellung der Batterien werden seltene Metalle, wie Lithium und Kobalt gebraucht. Die Gewinnung ist teilweise sehr umweltschädlich und die Arbeiter (stellenweise auch Kinder) müssen unter menschenunwürdigen Bedingungen arbeiten.

Für die Entsorgung der Batterien gibt es noch kein einheitliches System und das Recycling ist sehr teuer.

Die Lebensdauer der Batterien beträgt 100'000 bis 160'000km, was ca. 8-10 Jahren entspricht

Für den Kauf eines Elektroautos bekommen die Käufer eine Prämie von 4000€ und es gibt weitere Steuervergünstigungen.

An Ladesäulen kann im Schnelllademodus innerhalb von 30 Minuten 80% der Batterie aufgeladen, jedoch schädigt dies die Batterie mehr.

Die Elektroautos sind nur so sauber, wie der Strom, den sie nutzen.

Geringere Betriebskosten als Benzin oder Diesel, da der Strom günstiger ist und an öffentlichen Plätzen häufig kostenlos getankt werden kann.

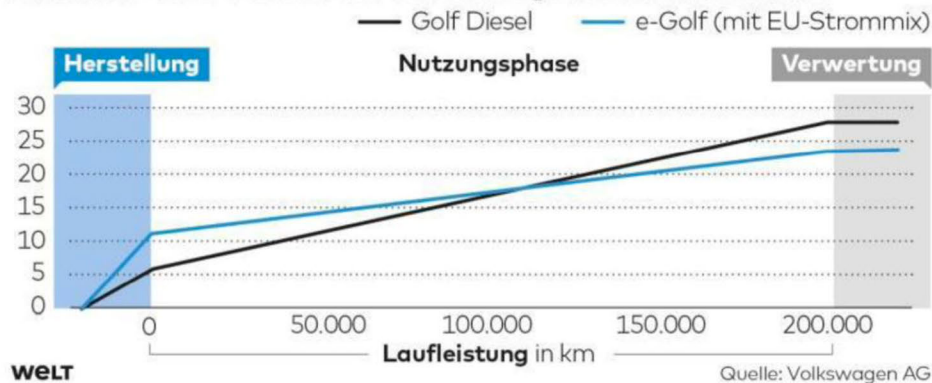
Vordergründig sind Kurzstreckenfahrer potenzielle Käufer für Elektroautos.

Weniger Verschleiß an Autoteilen als bei Verbrennungsmotoren.

Ein Elektroauto mit einer gewöhnlichen Steckdose zuhause aufzuladen dauert ca. 24h.

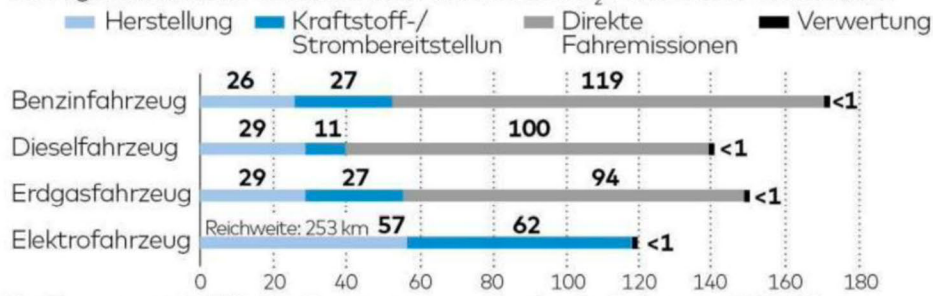
Überholmanöver nach 100.000 Kilometern

Klimabilanz von e-Golf und Golf Diesel in CO₂-Emission in Tonnen/km



Herstellung von Elektrofahrzeugen ist klimaschädlich

Heutige Klimabilanz verschiedener Antriebe in CO₂-Emission in Gramm/km



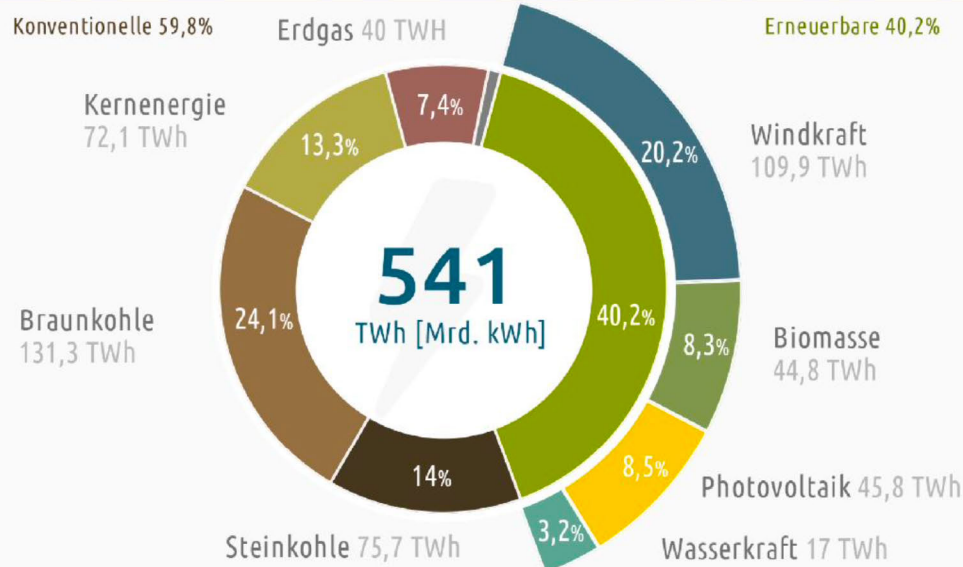
Treibhauspotenzial (GWP) CO₂-Emission in Gramm/km über den Lebensweg (200.000 km) eines Kompaktklassefahrzeugs für das Jahr 2017 mit unterschiedlichen Antriebskonzepten. Basis für die Berechnung der Nutzungsphase ist der WLTP-Fahrzyklus.

WELT

Quelle: Volkswagen AG

DER STROMMIX IN DEUTSCHLAND 2018 [NETTO]

Anteil der Energieträger an der Nettostromerzeugung in Deutschland



Daten: Fraunhofer ISE 01|2019

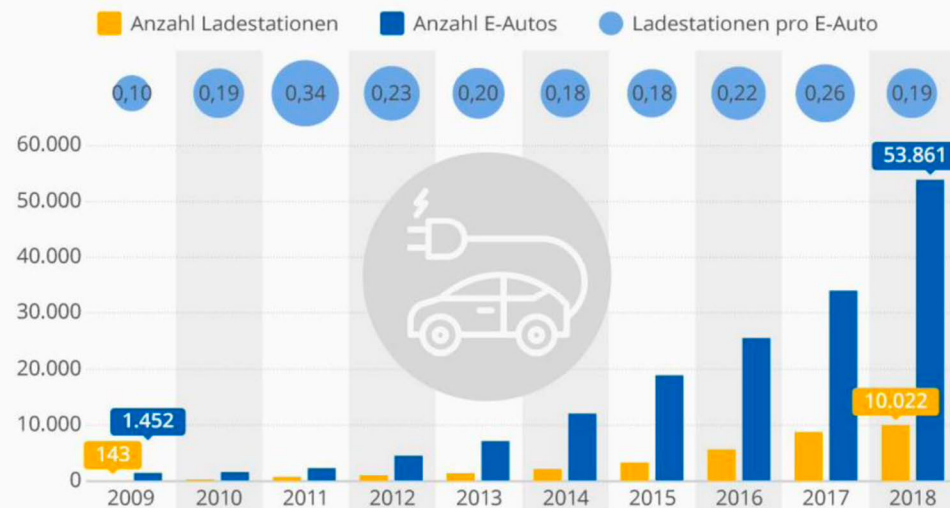
1-stromvergleich.com/_7te

CC BY ND

STROM-REPORT

Zu wenig Ladestationen für E-Autos in Deutschland

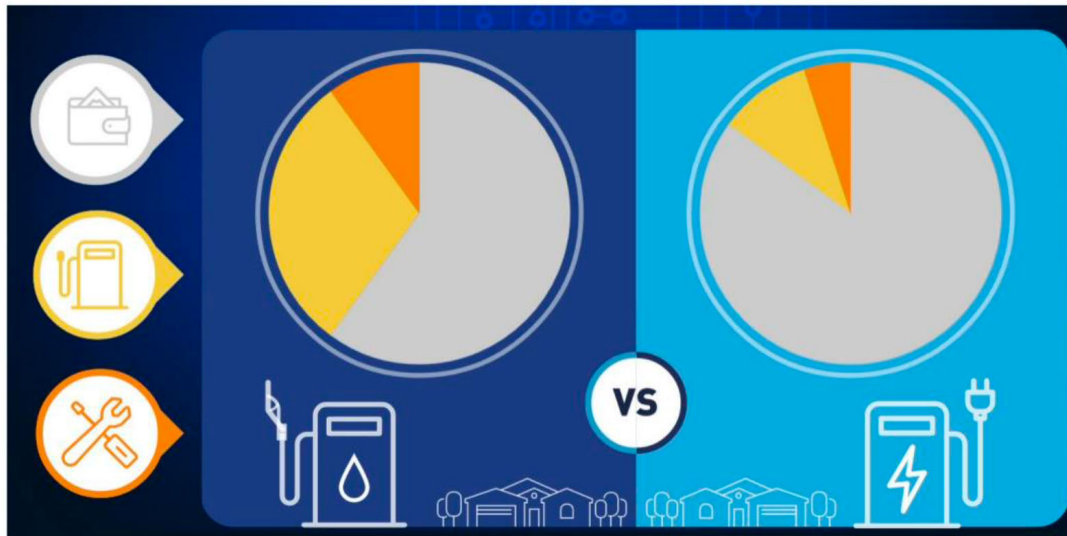
Anzahl der Ladestationen für E-Autos, zugelassene E-Autos und Ladestationen pro E-Auto



@Statista_com

Quelle: iwd

statista



Anschaffungskosten Tankkosten Reperaturkosten

PSA Learn Modul











			
 BEV 0 - 100%	 BEV 24 h	 BEV 17 h	 BEV 7,4 kW : 7h30 11 kW : 5h
PHEV 0 - 100%	 PHEV 6h30 / 7h	 PHEV 3h30 / 4h	 PHEV 7,4 kW : 1h30 / 1h45

Abbildung 3_: Mystery leer



Vorteile

Während des Fahrbetriebs stoßen E-Autos keine Schadstoffe aus.

Elektromotoren haben einen Wirkungsgrad von ca. 90%

Besser
als

Seit 2019 gibt es eine EU-Verordnung, die vorschreibt, dass Elektroautos Warngeräusche geben müssen, um die Sicherheit der Passanten zu schützen.

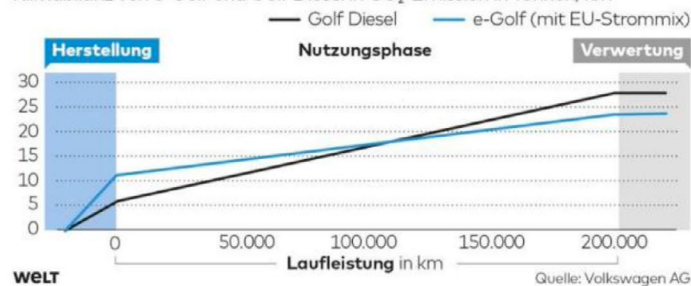
Verbrennungsmotoren haben einen Wirkungsgrad von ca. 40%

Da

Die Bremsenergie kann bei Elektromotoren genutzt werden, um die Batterie aufzuladen.

Überholmanöver nach 100.000 Kilometern

Klimabilanz von e-Golf und Golf Diesel in CO₂-Emission in Tonnen/km



Erst nach ca. 100'000km
klimafreundlicher

Nachteile

E-Autos fahren geräuschärmer als Benzin. Jedoch werden sie von Fußgängern und Fahrradfahrer*innen schnell überhört, wodurch ein erhöhtes Unfallpotenzial entsteht.

Herstellung
klimaschädlicher als bei
anderen Antrieben

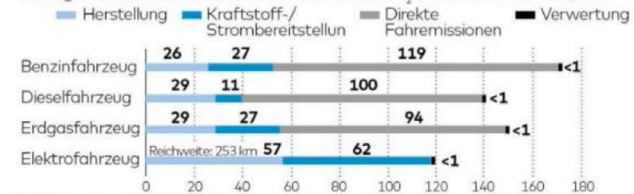
Die Herstellung eines E-Autos mit einer 90 kWh-Batterie verursacht 22.635 Kg CO₂

Die Herstellung eines Wasserstoffautos verursacht 16.491 Kg CO₂

Die Herstellung eines Diesel Autos verursacht 9995 Kg CO₂

Herstellung von Elektrofahrzeugen ist klimaschädlich

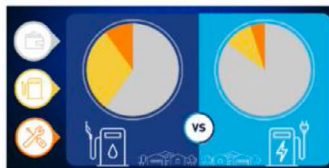
Heutige Klimabilanz verschiedener Antriebe in CO₂-Emission in Gramm/km



Treibhauspotenzial (GWP) CO₂-Emission in Gramm/km über den Lebensweg (200.000 km) eines Kompaktklassefahrzeugs für das Jahr 2017 mit unterschiedlichen Antriebskonzepten. Basis für die Berechnung der Nutzungsphase ist der WLTP-Fahrzyklus.

WELT

Quelle: Volkswagen AG



Werden zwar günstiger, aber sind trotzdem teuerstes Teil des Autos

Die Kosten der Batterien sinken von Jahr zu Jahr. Allerdings sind diese immer noch das teuerste Element an einem Elektroauto. Pro Kilowattstunde (kWh) werden ca. 230€ benötigt. Bei einem e-Golf machen dies bereits ca. 7000€ aus.

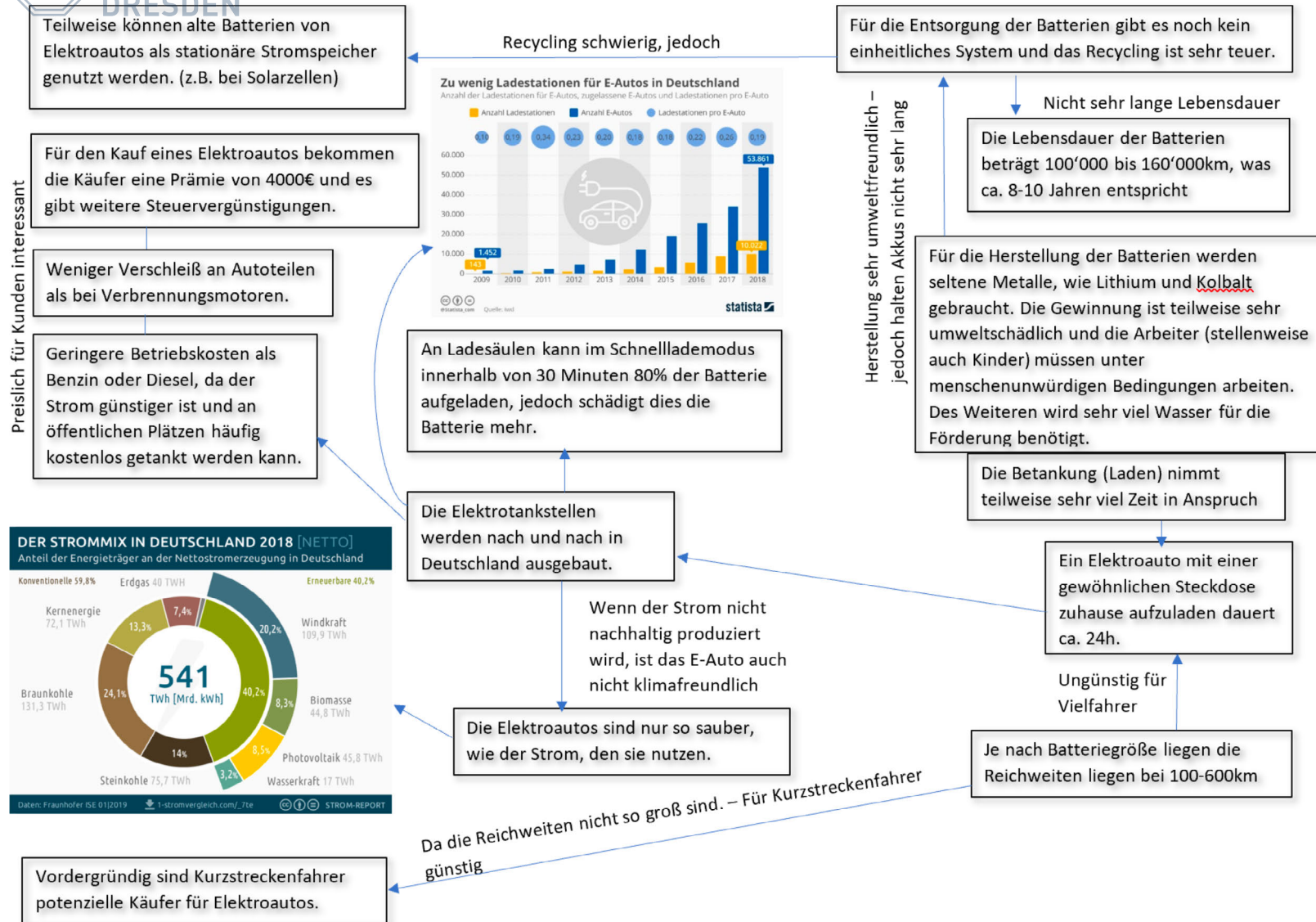
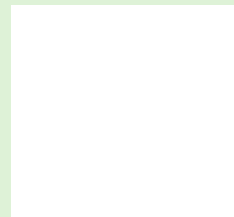


Abbildung 4: Mystery Erwartungsbild

SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau



Nachrichten-Archiv



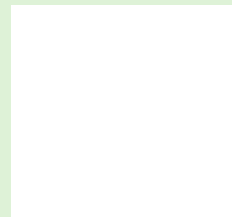
SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)

E-Mail: schwabe@smw.de

Telefon: +49 375 123456-78

Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

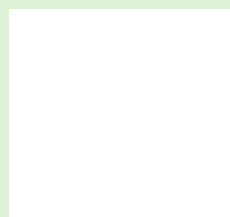


Presse-Archiv



SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau



Video-Archiv



SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG

Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau



Brennstoffzelle

Allgemein

In einer Brennstoffzelle wird chemische Energie in einem sog. galvanischen Element durch das regelmäßige Zuführen eines Brennstoffs (Wasserstoff) mit einem Oxidationsmittel (Sauerstoff) in elektrische Energie umgewandelt. Im Gegensatz zu einer Batterie ist die Energie in der Brennstoffzelle nicht gespeichert. Während des Betriebs wird Wasserstoff zusammen mit Sauerstoff kontinuierlich zugeführt. Wasserstoff reagiert mit Sauerstoff zu Wasser, das aus der Brennstoffzelle laufend entnommen wird. Die Reaktionsgleichung entspricht der Knallgasreaktion, die Reaktion verläuft aber nicht explosionsartig, sondern geregelt. Man spricht von einer „kalten Verbrennung“.



SCAN ME!

Funktionsweise

Anders als im Chemieunterricht kommt es durch das besondere Funktionsprinzip der Brennstoffzelle nicht zur Knallgasreaktion. Dafür verantwortlich ist der spezielle Aufbau einer Brennstoffzelle. Sie besteht nämlich grundlegend aus zwei Elektroden und einer dazwischen liegenden Trennschicht. Letztere ist entweder eine halbdurchlässige Membran oder ein Elektrolyt (Ionenleiter). Dabei werden die beiden Elektroden als Anode und Kathode bezeichnet.

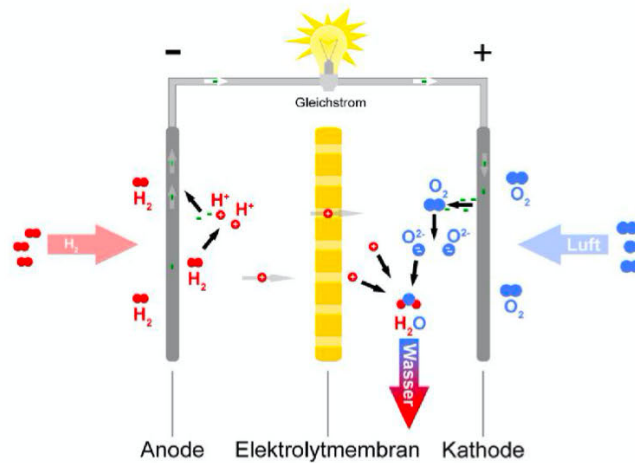
Ein Katalysator trennt die Wasserstoffmoleküle auf der Anodenseite in positive Wasserstoffionen (auch *Protonen* genannt) und negative Elektronen. Während die Elektronen über einen Leiter zur Kathode fließen und dabei elektrische Spannung, also Strom, entsteht, diffundieren die Wasserstoffionen in Richtung Kathode.

Die Wasserstoffionen vereinen sich an der Kathode mit den Sauerstoffmolekülen. Diese Vereinigung wird schließlich als „kalte Verbrennung“ bezeichnet. Dabei entsteht Wasser und Wärme wird frei. Letztere steht bspw. einer Heizungsanlage für die Warmwasserbereitung und Heizwärme zur Verfügung. Die als Gleichstrom produzierte elektrische Energie (aus der Wanderung der Elektronen von der An- zur Kathode) kann bspw. in Wechselstrom umgewandelt und so im Haushalt genutzt werden.

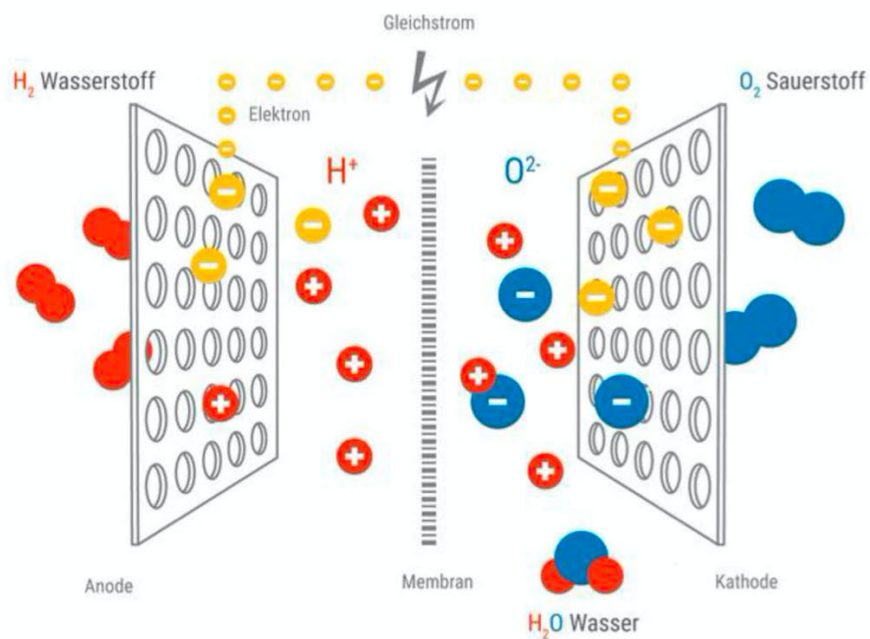
SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
 E-Mail: schwabe@smw.de
 Telefon: +49 375 123456-78
 Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

Abbildungen



Die kalte Verbrennung in einer Brennstoffzelle



SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

Hydrocar

Aufgabe

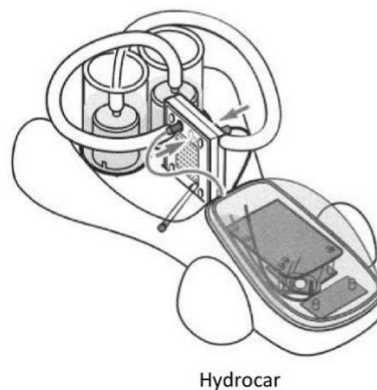
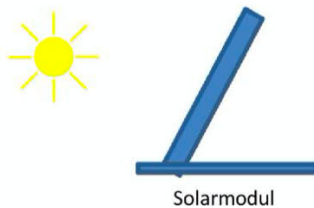
Bringen Sie das Auto mithilfe der im Labor ausliegenden Anleitung zum Fahren. Die Räder sowie die Brennstoffzelle sind bereits montiert und die Schläuche zurechtgeschnitten.

Versuchsanleitung

(↗ siehe Anleitung zum Hydrocar)

Die Tanks sind mit dest. Wasser zu befüllen. Als „Sonne“ wird der Halogenstrahler oder die direkte Sonneneinstrahlung genutzt. Alternativ können zur schnellen Befüllung der Tanks die Batterien genutzt werden.

Versuchsskizze



Geräte/Chemikalien

- Solarmodul
- Hydrocar, incl. Schläuche
- ggf. Batterien im Batteriefach, Schraubenzieher
- Verbindungskabel
- Halogenstrahler oder Sonne
- Spritze
- dest. Wasser

SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

Solar-Wasserstoff-Technologie

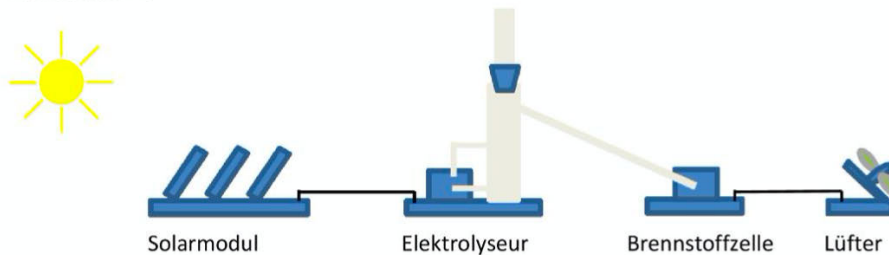
Aufgabe

Optimieren Sie die Solar-Wasserstofftechnologie hinsichtlich der maximalen Leistung des Verbrauchers. Überprüfen Sie Ihre Prognosen experimentell.

Versuchsanleitung

Bauen Sie hierfür das komplette System auf, das aus Solarmodul, Elektrolyseur, Brennstoffzelle und Lüfter besteht (siehe Skizze). Die Tanks des Elektrolyseurs sind mit dest. Wasser zu befüllen. Als „Sonne“ nutzen Sie einen Halogenstrahler. Achten Sie darauf, dass alle Schlauchklemmen geöffnet sind. Überprüfen Sie nun die Funktionalität des Systems.

Versuchsskizze



Geräte/Chemikalien

- Solarmodul
- Elektrolyseur mit Gasableitungsrohren
- Brennstoffzelle
- Lüfter
- Verbindungskabel
- Stativmaterial
- Halogenstrahler oder Sonne
- Schlauchstücke und Schlauchklemmen
- dest. Wasser

SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)

E-Mail: schwabe@smw.de

Telefon: +49 375 123456-78

Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

Darstellung und Nachweis von Wasserstoff

Aufgabe

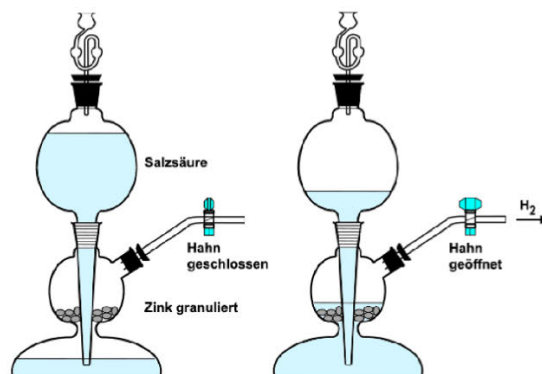
Stellen Sie Wasserstoff durch die Reaktion von verdünnter Salzsäure mit Zink dar. Weisen Sie das Reaktionsprodukt mittels Knallgasprobe nach.

Versuchsanleitung

Geben Sie Zinkgranalien in die mittlere Kugel des Apparates. Der Stopfen mit dem Ableitungsrohr wird bei geöffnetem Hahn aufgesetzt. Füllen Sie nun in die obere Kugel 20-prozentige Salzsäure ein, bis der Flüssigkeitsspiegel etwas unterhalb der seitlichen Öffnung steht. Schließen Sie dann den seitlichen Hahn und lassen Sie die Reaktion (Gasentwicklung) einsetzen. Der entstehende Gasdruck drückt die Salzsäure zurück und unterbricht die chemische Reaktion, bis durch Wasserstoffentnahme die Salzsäure erneut mit Zink in Kontakt tritt.

Entnehmen Sie mit einem kalten Reagenzglas durch Öffnen des Hahnes Wasserstoff aus der Apparatur (mit der Öffnung des Reagenzglases nach unten). Führen Sie das Reagenzglas mit dessen Öffnung an die rauschende Flamme des Bunsenbrenners. Wiederholen Sie den Vorgang.

Versuchsskizze



Geräte/Chemikalien

- KIPP'scher Gasentwickler
- Bunsenbrenner
- Reagenzgläser
- Zinkgranalien
- verdünnte Salzsäure (20 %)

SÄCHSISCHE MOTORENWERKE AG
Forschungsinstitut für technische Innovation

Frau Dr.-Ing. S. Schwabe (Institutsleiterin)
E-Mail: schwabe@smw.de
Telefon: +49 375 123456-78
Postadresse: Winterkornstraße 5, 08058 Zwickau

Elektrolyse von Wasser

Aufgabe

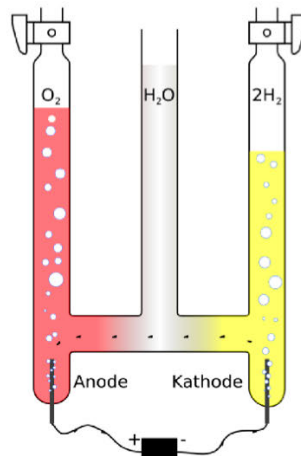
Führen Sie die Elektrolyse von Wasser durch. Weisen Sie die Reaktionsprodukte nach.

Versuchsanleitung

Befüllen Sie den HOFMANN'schen Wasserersetzer mit 10-prozentiger Salzsäure. Regulieren Sie dabei den Flüssigkeitspegel durch Öffnen der Hähne. Schließen Sie bei geschlossenen Hähnen die Spannungsquelle an. Berücksichtigen Sie dabei, welche der Elektroden als Kathode, welche als Anode wirkt. Aktivieren Sie die Spannungsquelle.

Entnehmen Sie nach der Entstehung ausreichenden Reaktionsproduktes die beiden Gase mit je einem Reagenzglas. Überprüfen Sie Ihre Vermutung bzgl. der Identität beider Gase, indem Sie die Knallgas- bzw. Glimmspanprobe durchführen.

Versuchsskizze



Geräte/Chemikalien

- HOFMANN'scher Wasserersetzer
- Spannungsquelle
- Kabel mit ggf. Krokodilklemmen
- Bunsenbrenner
- Holzspan
- verdünnte Salzsäure (10 %)

Hydrocar

Aufgabe

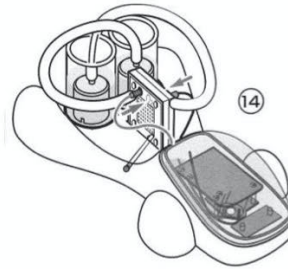
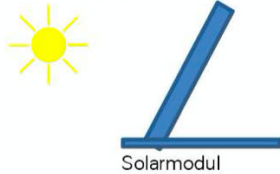
Bringen Sie das Auto mit Hilfe der in OPAL (Gruppe 4_Hydrocar_Montagehandbuch) zur Verfügung gestellten und im Praktikum ausliegenden Anleitung zum Fahren. Die Räder sowie die Brennstoffzelle sind bereits montiert und die Schläuche zurechtgeschnitten.

Versuchsanleitung

siehe Anleitung zum Hydrocar

Die Tanks sind mit dest. Wasser zu befüllen. Als „Sonne“ wird der Halogenstrahler oder die direkte Sonneneinstrahlung genutzt. Alternativ können zur schnellen Befüllung der Tanks die Batterien genutzt werden.

Versuchsskizze:



Hydrocar

Geräte/Chemikalien

Solarmodul
 Hydrocar, incl. Schläuche
 ggf. Batterien im Batteriefach, Schraubenzieher
 Verbindungskabel
 Halogenstrahler oder Sonne
 Spritze

dest. Wasser

Arbeitsschutz

Tätigkeit mit Gefahrstoffen: **Ja**, folgende GefahrstoffEinstufung nach GESTIS

Wasserstoff H₂



Signalwort: „Gefahr“

H220: Extrem entzündbares Gas.

P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.

Protokoll

Versuch/Tätigkeiten

Hydrocar

Beobachtungen

Durch den „Ladevorgang“ mit dem Solarmodul bzw. den Batterien kann eine Gasentwicklung beobachtet werden. Bei Aktivierung der Brennstoffzelle gerät das Hydrocar in Bewegung.

Auswertung

Der „Ladevorgang“ dient der Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch Elektrolyse. Bei der Elektrolysereaktion handelt es sich um eine Redoxreaktion:

Anodenreaktion (Oxidation): $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{H}^+ + \text{O}_2 + 4 \text{e}^-$ bzw. $2 \text{O}^{2-} \rightarrow \text{O}_2 + 4 \text{e}^-$

Kathodenreaktion (Reduktion): $4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2$

Gesamtreaktion: $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$

Wie aus der Reaktionsgleichung ersichtlich, entstehen Wasserstoff und Sauerstoff in einem stöchiometrischen Verhältnis von 2:1.

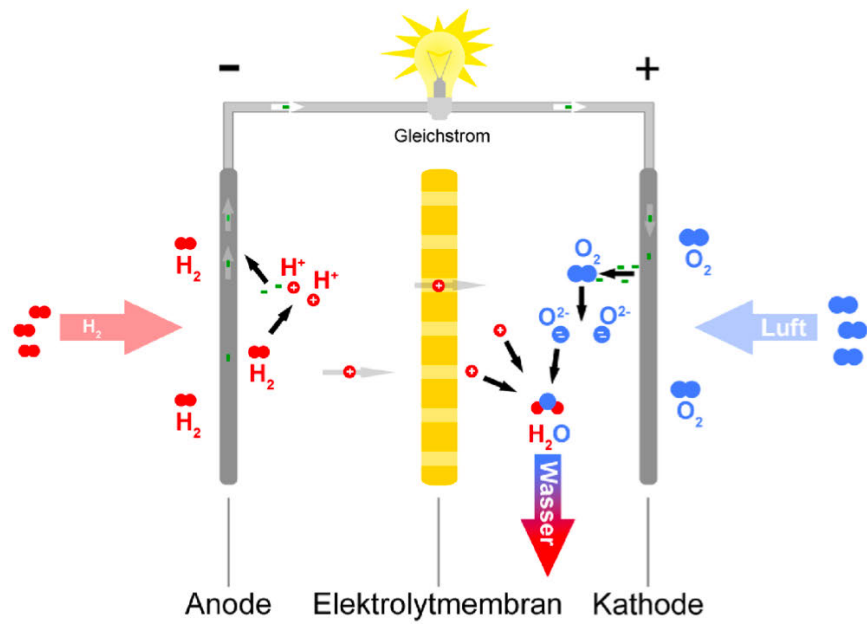
Die Bewegung des Hydrocars deutet auf einen Stromfluss hin, welcher den Motor des Autos antreibt. Der Stromfluss ist auf die Umkehrreaktion der Elektrolyse zurückzuführen, welche mithilfe der Brennstoffzelle realisiert wird:

Anodenreaktion (Oxidation): $2 \text{H}_2 \rightarrow 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$

Kathodenreaktion (Reduktion): $\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ bzw. $\text{O}_2 + 4 \text{e}^- \rightarrow 2 \text{O}^{2-}$

Gesamtreaktion: $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$

Reaktion und Stromfluss werden in folgender Grafik verbildlicht:



Solar-Wasserstofftechnologie

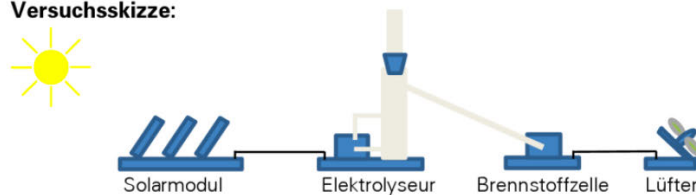
Aufgabe

Optimieren Sie die Solar-Wasserstofftechnologie hinsichtlich der maximalen Leistung des Verbrauchers. Überprüfen Sie Ihre Prognosen experimentell.

Versuchsanleitung

Bauen Sie hierfür das komplette System auf, das aus Solarmodul, Elektrolyseur, Brennstoffzelle und Lüfter besteht (siehe Skizze). Die Tanks des Elektrolyseurs sind mit dest. Wasser zu befüllen. Als „Sonne“ nutzen Sie einen Halogenstrahler. Achten Sie darauf, dass alle Schlauchklemmen geöffnet sind. Überprüfen Sie nun die Funktionalität des Systems.

Versuchsskizze:



Geräte/Chemikalien

Solarmodul
 Elektrolyseur mit Gasableitungsrohren
 Brennstoffzelle
 Lüfter
 Verbindungskabel
 Stativmaterial
 Halogenstrahler oder Sonne
 Schlauchstücke und Schlauchklemmen

dest. Wasser

Arbeitsschutz

Tätigkeit mit Gefahrstoffen: **Ja**, folgende Gefahrstoffeinstufung nach GESTIS

Wasserstoff H₂



Signalwort: „Gefahr“

H220: Extrem entzündbares Gas.

P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.

P381: Bei Undichtigkeit alle Zündquellen entfernen.

P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

Sauerstoff O₂



Signalwort: „Gefahr“







H270: Kann Brand verursachen oder verstärken; Oxidationsmittel.

P220: Von brennbaren Materialien entfernt aufbewahren.

P370+P376: Bei Brand: Undichtigkeit beseitigen, wenn gefahrlos möglich.

Gefahren durch Einatmen: Nein
 Gefahren durch Hautkontakt: Nein
 Brandgefahr: Nein
 Explosionsgefahr: Ja (wenn H₂ und O₂ zusammenkommen und eine Zündquelle in der Nähe ist)
 Sonstige Gefahren: Nein
 Substitution notwendig: Nein

Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung:

DGUV Regel 113-018							Weitere Maßnahmen
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> ¹⁾

1) Protonenaustauschmembran ggf. anfeuchten

H₂ und O₂ bilden zusammen explosives Gasgemisch, Gase vollständig verbrauchen bzw. restliche Gase nacheinander entweichen lassen, dabei lüften und darauf achten, dass keine Zündquelle in der Nähe ist

Schülerversuch oder Lehrerdemonstration

Der Versuch kann sowohl als Lehrerdemonstrationsexperiment oder im Stationsbetrieb auch als Schülerversuch durchgeführt werden. Es besteht keine Tätigkeitsbeschränkung.

Entsorgung

Die Gase Wasserstoff und Sauerstoff werden in der Regel vollständig verbraucht. Müssen Sie doch entsorgt werden, werden sie nacheinander in die Atmosphäre geleitet (s. auch weitere Maßnahmen).

Das Wasser aus dem Elektrolyseur im Ausguss entsorgen. Apparatur vollständig trocknen lassen.

Protokoll

Versuch/Tätigkeiten

Solar-Wasserstofftechnologie

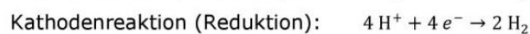
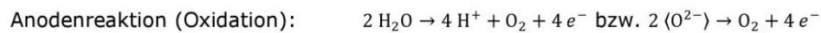
Beobachtungen

Durch Beleuchtung des Solarmoduls kommt es zur Gasentwicklung in der Brennstoffzelle. Der mit der Brennstoffzelle verbundene Propeller gerät in Bewegung.

Auswertung

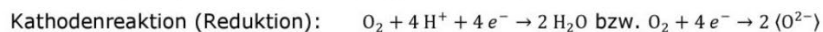
Mithilfe des Solarmoduls wird die Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff durch Elektrolyse in der Brennstoffzelle realisiert. Die Leistung kann insbesondere durch die Positionierung der Lampe beeinflusst werden und ist dabei von der Entfernung und dem Einfallswinkel abhängig. Je geringer die Entfernung zwischen Lampe und Solarmodul, desto höher ist die Ausbeute der Elektrolyse je Zeiteinheit und damit die Leistung. Hinsichtlich des Einfallswinkels wird die größte Leistung bei orthogonalem Lichteinfall erreicht.

Bei der Elektrolysereaktion handelt es sich um eine Redoxreaktion:

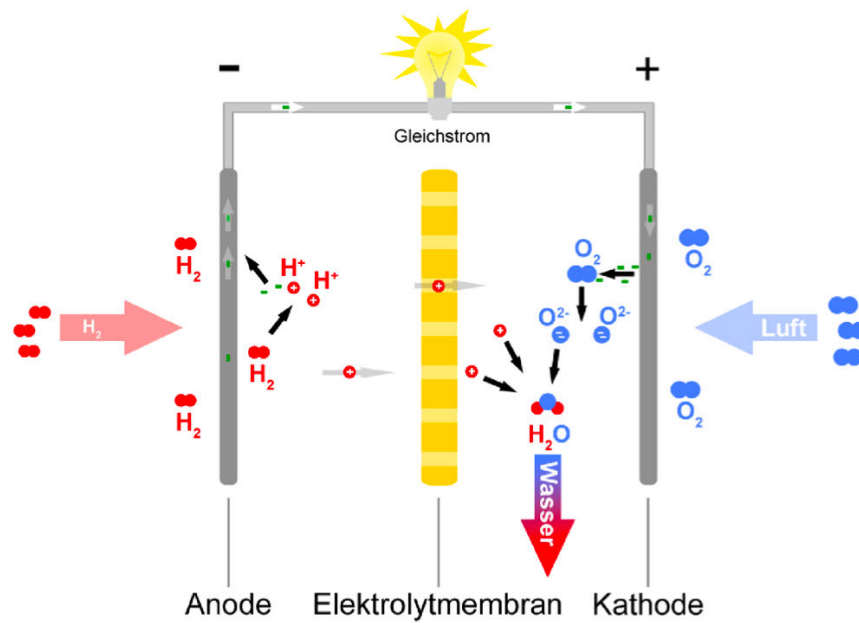


Wie aus der Reaktionsgleichung ersichtlich, entstehen Wasserstoff und Sauerstoff in einem stöchiometrischen Verhältnis von 2:1.

Die Aktivierung des Propellers deutet auf einen Stromfluss hin, welcher den Motor antreibt. Der Stromfluss ist auf die Umkehrreaktion der Elektrolyse zurückzuführen, welche mithilfe der Brennstoffzelle realisiert wird:



Reaktion und Stromfluss werden in folgender Grafik verbildlicht:



Gefährdungsbeurteilung

Versuch/Tätigkeiten

Darstellung und Nachweis von Wasserstoff

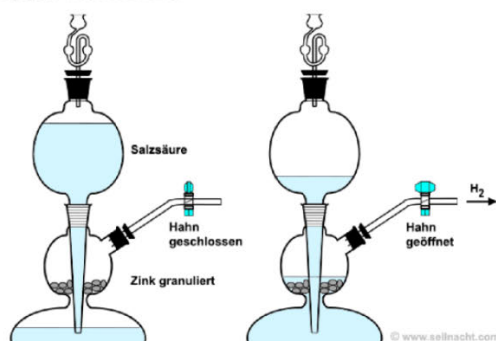
Geräte

- KIPP'scher Gasentwickler
- Bunsenbrenner
- Reagenzgläser

Chemikalien

- Zinkgranalien
- verdünnte Salzsäure (20 %)

Apparaturskizze



Aufgabe

Stellen Sie Wasserstoff durch die Reaktion von verdünnter Salzsäure mit Zink dar. Weisen Sie das Reaktionsprodukt mittels Knallgasprobe nach.

Durchführung

Geben Sie Zinkgranalien in die mittlere Kugel des Apparates. Der Stopfen mit dem Ableitungsrohr wird bei geöffnetem Hahn aufgesetzt. Füllen Sie nun in die obere Kugel 20-prozentige Salzsäure ein, bis der Flüssigkeitsspiegel etwas unterhalb der seitlichen Öffnung steht. Schließen Sie dann den seitlichen Hahn und lassen Sie die Reaktion (Gasentwicklung) einsetzen. Der entstehende Gasdruck drückt die Salzsäure zurück und unterbricht die chemische Reaktion, bis durch Wasserstoffentnahme die Salzsäure erneut mit Zink in Kontakt tritt.

Entnehmen Sie mit einem Reagenzglas durch Öffnen des Hahnes Wasserstoff aus der Apparatur (mit der Öffnung des Reagenzglases nach unten). Führen Sie das Reagenzglas mit

dessen Öffnung an die rauschende Flamme des Bunsenbrenners. Wiederholen Sie den Vorgang.

Gefahrstoffe**Salzsäure**

nach GHS (aus GESTIS):

Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290

Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1B; H314

Spezifische Zielorgan-Toxizität (einmalige Exposition), Kategorie 3; H335



Signalwort: „Gefahr“

H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.

H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

H335: Kann die Atemwege reizen.

P260: Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen.

P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.

P303+P361+P353: BEI BERÜHRUNG MIT DER HAUT (oder dem Haar): Alle kontaminierten Kleidungsstücke sofort ausziehen. Haut mit Wasser abwaschen oder duschen.

P304+P340+P310: BEI EINATMEN: Die Person an die frische Luft bringen und für ungehinderte Atmung sorgen. Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.

P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

Wasserstoff

nach GHS (aus GESTIS):

Entzündbare Gase, Kategorie 1; H220

Gase unter Druck, verdichtetes Gas; H280



Signalwort: „Gefahr“

H220: Extrem entzündbares Gas.

H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.

P381: Bei Undichtigkeit alle Zündquellen entfernen.

P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

Hinweis: Wasserstoff steht im Versuch nicht unter Druck, sodass jeweilige H- und P-Sätze irrelevant sind.

Zink

nach GHS (aus GESTIS):

Gewässergefährdend, Akut Kategorie 1; H400

Gewässergefährdend, Chronisch Kategorie 1; H410



Signalwort: „Gefahr“

H410: Sehr giftig für Wasserorganismen mit langfristiger Wirkung.

P273: Freisetzung in die Umwelt vermeiden.

Tätigkeitsbeschränkungen und Ersatzstoffprüfung

Für 20-prozentige Salzsäure liegt ein Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4 vor. (DGUV Regel 113-013 Nr. 896) Der Einsatz von Zinkgranalien ist ohne Einschränkungen erlaubt (ausgenommen Versuche im Primarbereich, bei denen eine Gefährdung nach RiSU I-3.6.2 vorliegt, DGUV Regel 113-013 Nr. 1030). Ebenso ist der Umgang mit Wasserstoff ab der Jahrgangsstufe 5 erlaubt.







Schutzmaßnahmen

Der Versuch darf als Schülerexperiment mit Schutzbrille durchgeführt werden. Kontakt mit der Salzsäure ist zu vermeiden. Zündquellen von der Versuchsanordnung fernhalten. Für die Knallgasprobe nur abgekühlte Reagenzgläser verwenden.

Entsorgung

Die Zinkgranalien werden nach Verwendung mit Wasser gespült, getrocknet und zur Wiederverwendung aufbewahrt. Die Salzsäure wird neutralisiert und dem Abfluss zugeführt. Die Zinkchloridlösung wird auf einen pH-Wert von 8 eingestellt. Den entstandenen Niederschlag lässt man absetzen. Die überstehende Lösung kann in den Ausguss gegeben werden. Der Niederschlag kommt in den Schwermetallsalzabfallbehälter. Wasserstoffrückstände werden durch Entlüften des Systems entsorgt.

Schutzmaßnahmen als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung

DGUV Regel 113-018			 Abzug	 Geschlossenes System		 Lüftungs- maßnahmen	weitere Maßnahmen
X	X						X ¹⁾

x¹⁾ siehe blaue Hervorhebungen

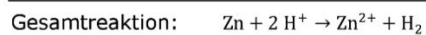
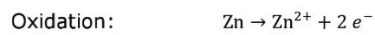
Beobachtungen

Nach Zugabe der Salzsäure zum Zink ist eine Gasentwicklung zu beobachten. Durch die Knallgasprobe wird das entstehende Gas positiv als Wasserstoff nachgewiesen.

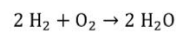
Auswertung

Durch Reaktion des unedlen Metalls Zink mit (verdünnter) Salzsäure entsteht Wasserstoff.

Die Redoxreaktion lautet:



Die Knallgasreaktion stellt die Verbrennungsreaktion von Wasserstoff mit Luftsauerstoff dar:



Gefährdungsbeurteilung

Versuch/Tätigkeiten

Elektrolyse von Wasser

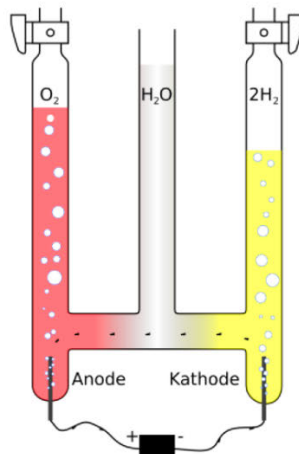
Geräte

- HOFMANN'scher Wasserersetzer
- Spannungsquelle
- Kabel mit ggf. Krokodilklemmen
- Bunsenbrenner
- Reagenzgläser
- Holzstab

Chemikalien

- verdünnte Schwefelsäure (10 %)

Apparaturskizze



Aufgabe

Führen Sie die Elektrolyse von Wasser durch. Weisen Sie die Reaktionsprodukte nach.

Durchführung

Befüllen Sie den HOFMANN'schen Wasserersetzer mit 10-prozentiger Schwefelsäure. Regulieren Sie dabei den Flüssigkeitspegel durch Öffnen der Hähne. Schließen Sie bei geschlossenen Hähnen die Spannungsquelle an. Berücksichtigen Sie dabei, welche der Elektroden als Kathode, welche als Anode wirkt. Aktivieren Sie die Spannungsquelle bei ca. 7 V. Entnehmen Sie nach der Entstehung ausreichenden Reaktionsproduktes die beiden Gase mit je einem Reagenzglas. Überprüfen Sie Ihre Vermutung bzgl. der Identität beider Gase, indem Sie die Knallgas- bzw. Glimmspanprobe durchführen.

Hierfür wird der Wasserstoff zuerst in ein Reagenzglas geleitet und mit der Reagenzglasöffnung nach unten an die rauschende Brennerflamme gehalten. Dann hält man einen glimmenden Holzstab an die Öffnung der Sauerstoffseite und öffnet den Hahn.

Gefahrstoffe**Schwefelsäure**

nach GHS (aus GESTIS):

Korrosiv gegenüber Metallen, Kategorie 1; H290

Ätzwirkung auf die Haut, Kategorie 1A; H314



Signalwort: „Gefahr“

H290: Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.

H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

P280: Schutzhandschuhe/Schutzkleidung/Augenschutz/Gesichtsschutz tragen.

P301+P330+P331: BEI VERSCHLUCKEN: Mund ausspülen. KEIN Erbrechen herbeiführen.

P305+P351+P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Eventuell vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

P308+P310: BEI Exposition oder falls betroffen: Sofort GIFTINFORMATIONSZENTRUM oder Arzt anrufen.

Wasserstoff

nach GHS (aus GESTIS):

Entzündbare Gase, Kategorie 1; H220

Gase unter Druck, verdichtetes Gas; H280



Signalwort: „Gefahr“

H220: Extrem entzündbares Gas.

H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

P210: Von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellen fernhalten. Nicht rauchen.

P377: Brand von ausströmendem Gas: Nicht löschen, bis Undichtigkeit gefahrlos beseitigt werden kann.

P381: Bei Undichtigkeit alle Zündquellen entfernen.

P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

Hinweis: Wasserstoff steht im Versuch nicht unter Druck, sodass jeweilige H- und P-Sätze irrelevant sind.

Sauerstoff

nach GHS (aus GESTIS):

Oxidierende Gase, Kategorie 1; H270

Gase unter Druck, verdichtetes Gas; H280



Signalwort: „Gefahr“

H270: Kann Brand verursachen oder verstärken; Oxidationsmittel.

H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

P244: Ventile und Ausrüstungsteile öl- und fettfrei halten.

P220: Von brennbaren Materialien entfernt aufbewahren.

P370+P376: Bei Brand: Undichtigkeit beseitigen, wenn gefahrlos möglich.

P403: An einem gut belüfteten Ort aufbewahren.

Hinweis: Sauerstoff steht im Versuch nicht unter Druck, sodass jeweilige H- und P-Sätze irrelevant sind.

Tätigkeitsbeschränkungen und Ersatzstoffprüfung

Für 10-prozentige Schwefelsäure liegt ein Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4 vor. (DGUV Regel 113-013 Nr. 896) Der Umgang von Wasserstoff und Sauerstoff ist ebenso für Schülerinnen und Schüler ab der Jahrgangsstufe 5 erlaubt.







Schutzmaßnahmen

Der Versuch darf als Schülerexperiment mit Schutzbrille durchgeführt werden. Kontakt mit der Schwefelsäure ist zu vermeiden. Zündquellen von der Versuchsanordnung fernhalten. Für die Knallgasprobe nur abgekühlte Reagenzgläser verwenden. Außerdem zuerst die Knallgasprobe durchführen, um bei der Glimmspanprobe nicht versehentlich den Wasserstoff zu entzünden.

Entsorgung

Die Schwefelsäure wird neutralisiert und dem Abfluss zugeführt. Wasserstoff- und Sauerstoffrückstände werden durch Entlüften des Systems entsorgt.

Schutzmaßnahmen als Ergebnis der Gefährdungsbeurteilung

DGUV Regel 113-018			 Abzug	 Geschlos- senes System		 Lüftungs- maßnahmen	weitere Maßnahmen
X	X						X ¹⁾

x¹⁾ siehe blaue Hervorhebungen

Beobachtungen

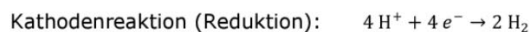
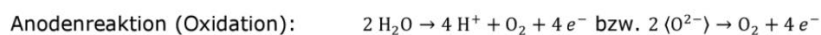
Nach Anschluss der Spannungsquelle ist an beiden Elektroden eine Gasentwicklung zu beobachten. Das Verhältnis der entstehenden Gase beträgt 2:1, wobei an der Kathode das doppelte Volumen an Gas entsteht wie an der Anode. Durch die Knallgasprobe wird das in doppelter Menge entstehende Gas als Wasserstoff nachgewiesen, das andere Gas als Sauerstoff durch die Glühspanprobe.

Auswertung

Die Elektrolyse von Wasser führt zu dessen Zersetzung in Wasserstoff und Sauerstoff. Die Verwendung von verdünnter Schwefelsäure dient dabei lediglich der besseren Leitfähigkeit und stellt Protonen zur Verfügung.

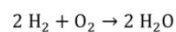
Die positiv geladenen Protonen/Hydroniumionen, die sich in der Nähe der negativ geladenen Elektrode, der Kathode, befinden, werden dabei durch die negative Ladung angezogen und dort unter Wasserstofffreisetzung entladen (kathodische Reduktion). Im Bereich der positiv geladenen Elektrode, der Anode, werden dem Wasser Elektronen entzogen (anodische Oxidation). Die oxidierten Wasserteilchen sind instabil und zerfallen unter Freisetzung von Sauerstoff und Bildung von Protonen/Hydroniumionen. [Die Hydroniumionen müssen nicht durch die Lösung zur Kathode wandern, sie geben vielmehr ihre positive Ladung über eine Umorientierung der Wasserstoffbrückenbindungen durch die Lösung bis zur Kathode weiter. Vgl. GROTHUß-Mechanismus.]

Bei der Elektrolysereaktion handelt es sich folglich um eine Redoxreaktion:



Wie aus der Reaktionsgleichung ersichtlich, entstehen Wasserstoff und Sauerstoff in einem stöchiometrischen Verhältnis von 2:1.

Die Knallgasreaktion entspricht der Umkehrreaktion der Elektrolyse. Die Verbrennung von Wasserstoff erfolgt mit dem Luftsauerstoff:



Die positive Glühspanprobe dient als Indiz für Sauerstoff.

Literaturverzeichnis

Niethammer, M. (2020). Der Lernprozess als Bezugspunkt didaktischen Handelns. In: Pospiech, Niethammer, Wieser und Kuhleemann (Hrsg.): Begegnungen mit der Wirklichkeit: Chancen für fächerübergreifendes Lernen an außerschulischen Lernorten., Bern: hep, s. 95-104.

Staatsministerium für Kultus Freistaat Sachsen (2019): Lehrplan Gymnasium Chemie. file:///C:/Users/s7028122/Downloads/lp_gy_chemie_2019-4.pdf [aufgerufen am 05.06.2023]