KULTUSMINISTER KONFERENZ

Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen

Weiterentwicklung der Bildungsstandards in der Sekundarstufe I in den Naturwissenschaften

Illustrierende Lernaufgabe für das Fach Chemie

Kurzbeschreibung

Wasserstoffperoxid katalytisch zersetzt

Diese Aufgabe wurde von Fachexpertinnen und Fachexperten der Länder, überwiegend Lehrkräften, entwickelt. Die Aufgabenentwicklungsgruppe wurde von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Fachdidaktik Chemie beraten. Das Institut zur Qualitätsentwicklung im Bildungswesen hat den Prozess koordiniert.

Zusammenfassung:

Der Forschung zur Katalyse wurden bereits 12 Nobelpreise gewidmet. Allein dies zeigt das Innovationspotential dieser Thematik, die sowohl in den Bildungsstandards der Sekundarstufe I als auch II verankert ist. Lernenden hier frühzeitig Verständnis und Zusammenhänge aufzuzeigen, fördert nicht nur deren Fachkompetenzen, sondern schafft ein Grundvertrauen in Lösungsansätze der Naturwissenschaft Chemie. Die folgende Lernaufgabe widmet sich thematisch der Katalyse und bietet den Lernenden u. a. auch eine fachpraktische Aufgabe.

Kompetenzbereiche und relevante Standards	**Sachkompetenz** *Die Lernenden …* S 1.4 beschreiben den Zusammenhang von äußeren Bedingungen und Stoffeigenschaften. **S 1.5 beschreiben chemische Reaktionen als Einheit von Stoff- und Energieumwandlungen.** S 1.7 beschreiben Möglichkeiten der Beeinflussung chemischer Reaktionen durch Variation von Reaktionsbedingungen. S 2.9 deuten Stoffumwandlungen hinsichtlich des Umbaus chemischer Bindungen. S 3.2 beschreiben chemische Reaktionen stöchiometrisch korrekt unter Verwendung der Formelsprache und stellen Reaktionsgleichungen auf. S 3.3 beschreiben den energetischen Verlauf chemischer Reaktionen.

	Erkenntnisgewinnungskompetenz *Die Lernenden …* E 1.1 erkennen und entwickeln Fragestellungen und Hypothesen, die mithilfe chemischer Kenntnisse und Untersuchungen, insbesondere durch chemische Experimente, zu beantworten bzw. zu prüfen sind. E 1.2 planen Untersuchungen und Experimente zur Überprüfung von Vermutungen und Hypothesen und führen diese fachgerecht durch. E 1.3 vollziehen eigene und fremde Untersuchungen, qualitative und quantitative Experimente mit Blick auf die zu klärende Fragestellung nach. E 1.5 beschreiben in erhobenen oder recherchierten Daten Trends, Strukturen und Zusammenhänge, erklären diese und ziehen geeignete Schlussfolgerungen – auch unter Nutzung digitaler Werkzeuge. E 2.4 wenden mathematische Modelle zur Beschreibung chemischer Sachverhalte an. E 3.2 erkennen das Denken in Modellen und das Experimentieren als zentrale Methoden der Erkenntnisgewinnung in der Chemie. **Kommunikationskompetenz** *Die Lernenden …* K 1.3 wählen mit Blick auf die Fragestellung relevante Informationen aus. K 2.2 wählen aus, auf welche Weise fachliche Inhalte sach-, adressaten- und situationsgerecht weitergeben werden. K 3.2 beschreiben, veranschaulichen oder erklären chemische Sachverhalte strukturiert. K 3.3 argumentieren fachlich folgerichtig. K 3.4 vertreten ihre Standpunkte zu chemischen Sachverhalten fachlich begründet und reflektieren Einwände. **Bewertungskompetenz** *Die Lernenden …* B 2.2 treffen begründete Entscheidungen unter Berücksichtigung fachlicher Kriterien.
Basiskonzepte	Konzept vom Aufbau und von den Eigenschaften der Stoffe und ihrer Teilchen, Konzept der chemischen Reaktion, Energiekonzept

konkrete Inhalte	Wirkung von Katalysatoren
Materialien	M 1 – Echt abgehoben – Chemische Reaktionen für den Raketenstart M 2 – Struktur und Eigenschaften von Wasserstoffperoxid M 3 – Experiment zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid M 4 – Energiediagramm für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid
Abschluss	Mittlerer Schulabschluss (MSA)
Jahrgangsstufe	3. Lernjahr (ab 9. Klasse)
Lernvoraussetzungen	♦ Elektronenpaarbindung ♦ zwischenmolekulare Wechselwirkungen ♦ Energiediagramme ♦ exo- und endotherme Reaktionen ♦ Formelschreibweise ♦ Katalysator ♦ Glimmspanprobe als Nachweis für Sauerstoff
Bearbeitungszeit	90 Minuten
Hilfsmittel	♦ Experimentiergeräte ♦ Schreibutensilien ♦ digitales Endgerät
Differenzierungsmöglichkeit	Erweiternd kann auf homogene und heterogene Katalyse sowie auf die Effektivität verschiedener Katalysatoren eingegangen werden (gegebenenfalls auch fachpraktisch).
fachpraktischer Anteil	ja ☒ nein ☐

1 Aufgabe

Findet euch zur Bearbeitung nachfolgender Aufgaben in einer Kleingruppe von 2 bis 3 Lernenden zusammen. Für die Bearbeitung der Teilaufgabe 1 steht euch Material 1 zur Verfügung, die Materialien 2 bis 4 werden euch erst zur Teilaufgabe 2 zur Verfügung gestellt.

Teilaufgabe 1: Hoch hinauskommen – Das Problem an sich

1.1 Lest den Text aus Material 1 aufmerksam durch.

Erläutert hiernach zwei Einflussfaktoren der Verbrennungsreaktion auf die Schubkraft der Rakete und formuliert die Reaktionsgleichung für die Verbrennungsreaktion von Dodecan.

1.2 Ergänzt die Einträge zur Legende von Abbildung 2 (Material 1) und entwickelt daraufhin zwei Hypothesen, die ihr jeweils in Form eines Aussagesatzes an die markierten Platzhalter ebenfalls in Abbildung 2 notiert.

1.3 Plant ein Experiment zur Überprüfung der von euch aufgestellten Hypothesen. Dokumentiert dieses mit einer beschrifteten Versuchsskizze.

Teilaufgabe 2: „Zauberei“ mit kleinen Kügelchen – Auf dem Weg zur Erkenntnis

2.1 Lest die gegebenen Texte zur chemischen Verbindung Wasserstoffperoxid und schaut euch die Filmausschnitte zu den Abläufen der Zersetzung auf Teilchenebene an (Material 2).

Passt die von euch in 1.2 formulierten Hypothesen an das neu angelesene Theoriewissen an und formuliert gegebenenfalls die Hypothesen um.

2.2 Führt das Experiment mit Wasserstoffperoxid durch (Material 3) und protokolliert eure Ergebnisse.

Prüft, inwiefern das durchgeführte Experiment dem von euch in 1.3 geplanten entsprach und inwiefern es die von euch aufgestellten Hypothesen bestätigt.

Formuliert die Reaktionsgleichung zur Zersetzungsreaktion von Wasserstoffperoxid.

2.3 Wendet euer erworbenes Wissen zur katalysierten Zersetzungsreaktion von Wasserstoffperoxid auf den energetischen Verlauf dieser Reaktion an. Bezeichnet und erläutert die farblich hervorgehobenen Stellen im Energiediagramm unter Einbeziehung der angebotenen Fachbegriffe (Material 4).

Teilaufgabe 3: Für den Nobelpreis nominiert – Erkenntnisstand und Ausblick

3.1 Erklärt unter Einbeziehung eures Experiments und der gegebenen theoretischen Darlegungen zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid die Abläufe im Triebwerk im Detail. Beginnt beim eingebauten Platingeflecht.

3.2 Angenommen, ihr hättet als Erste alle diese Zusammenhänge verstanden, so solltet ihr damit an die Öffentlichkeit gehen. Präsentiert die einzelnen Schritte eurer Erkenntnisgewinnung (u. a. das Aufstellen, Prüfen, Neuausrichten von Hypothesen) vor einem simulierten Nobelpreiskomitee aus Mitschülerinnen und Mitschülern und Lehrperson. Erstellt euch vorbereitend dafür eine Redevorlage mit einigen Stichpunkten.

2 Material für Lernende

Material 1

Echt abgehoben – Chemische Reaktionen für den Raketenstart

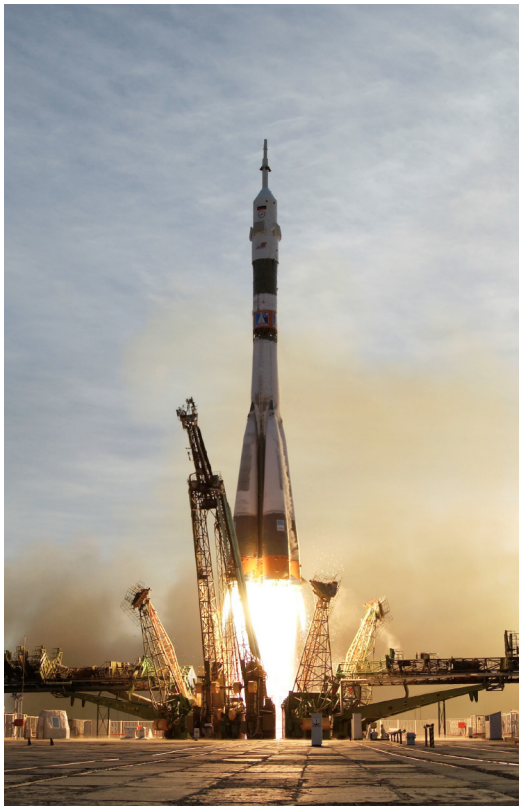
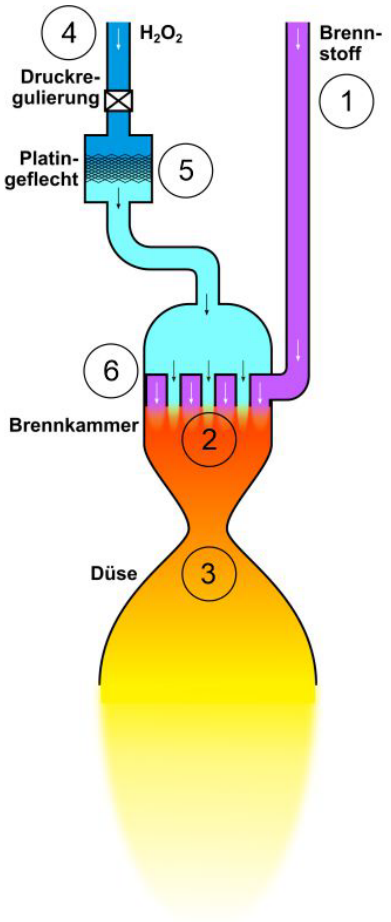


Abbildung 1: Eine Sojuz TMA-5 beim Start. (NASA/Bill Ingalls, 2004).

Das erfolgreiche Abheben einer Weltraumrakete (Abbildung 1) ist jedes Mal ein Grund zum Jubeln im Kontrollraum der Bodenstation. In diesem Moment fällt von den Technikerinnen und Technikern sehr viel Anspannung ab; das Hoffen und Bangen, ob denn alle Triebwerke richtig zünden und die nötige Schubkraft liefern, hat ein Ende. Immerhin ist eine Sojus-Rakete etwa 300 Tonnen schwer und damit vergleichbar mit drei Dieselloks. Diese Masse muss die Erdanziehungskraft überwinden.

Beim Raketenstart wird das sogenannte Rückstoßprinzip ausgenutzt. Das bedeutet: ausströmende Stoffe nach unten zur Erde bewirken eine gegensätzliche Bewegung der Rakete nach oben in den Himmel. Das gelingt nur, wenn der Ausstoß kraftvoller als die Erdanziehung ist. Hier kommt nun die Chemie zum Tragen. Ebenjene ausströmenden Stoffe sind Ergebnis chemischer Reaktionen, hauptsächlich Verbrennungsreaktionen des Brennstoffs (Raketentreibstoff) in der Brennkammer des Raketentriebwerks.

Als Brennstoff bieten sich Kohlenwasserstoffe wie das in Flugzeugen eingesetzte Kerosin an. Dabei handelt es sich um ein Stoffgemisch hauptsächlich aus Alkanen, u. a. dem Dodecan ($C_{12}H_{26}$). Die Verbrennung des Dodecans mit Sauerstoff führt zu den gasförmigen Verbrennungsprodukten Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die Reaktion ist stark exotherm, womit sich die Verbrennungsgase extrem erhitzen und also effektiv ausdehnen. Die Verbrennungsreaktion läuft in der Brennkammer ab. Zwingt man die Verbrennungsgase im Nachgang durch eine Verengung, resultieren enorme Kräfte. In Abbildung 2 ist diese Verengung ersichtlich. Ebenfalls eingezeichnet sind zwei Zuleitungen zur Brennkammer: zum einen die Zuleitung von Brennstoff (Kerosin) und zum anderen die Zuleitung von Wasserstoffperoxid. Mit an Bord der Sojus-Rakete sind beim Start zehn Tonnen reines Wasserstoffperoxid.



Legende zu den dargestellten Vorgängen:

1. Brennstoff (Kerosin) wird über eine Zuleitung aus einem Tank **direkt** in die Brennkammer eingespeist
2.
3.
4. Wasserstoffperoxid wird über Zuleitung aus einem Tank zugeleitet, allerdings nicht direkt in die Brennkammer eingespeist
5.
6. Zusammentreffen und dabei Vermischung des Brennstoffes mit den Stoffen, welche das Platin-geflecht verlassen

Hypothesen auf dem Weg zur Erkenntnis:

Hypothese Nr. 1 (laut Aufgabe1.2) zum Einsatz von Wasserstoffperoxid im Raketenantrieb:

Hypothese Nr. 2 (laut Aufgabe 1.2) zur Funktion des Platingeflechts:

Hypothese Nr. 1 ggf. verändert nach Lösen Aufgabe 2.1:

Hypothese Nr. 2 ggf. verändert nach Lösen Aufgabe 2.1:

Abbildung 2: Prinzipskizze Raketentriebwerk. (IQB e. V., 2024).

Material 2

Struktur und Eigenschaften von Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid-Moleküle (H2O2) haben eine Peroxygruppe (O-O-Gruppe), welche auf die chemischen Eigenschaften Einfluss nimmt. Die Elektronenpaarbindung zwischen den Sauerstoff-Atomen der Peroxygruppe ist leicht spaltbar mit dem Ergebnis, dass jedes Sauerstoff-Atom nach Bindungsbruch über ein einzelnes, ungepaartes Elektron verfügt (homolytische Spaltung). Die entstehenden Teilchen werden Hydroxyl-Radikale genannt. Diese sind sehr reaktiv und reagieren weiter.

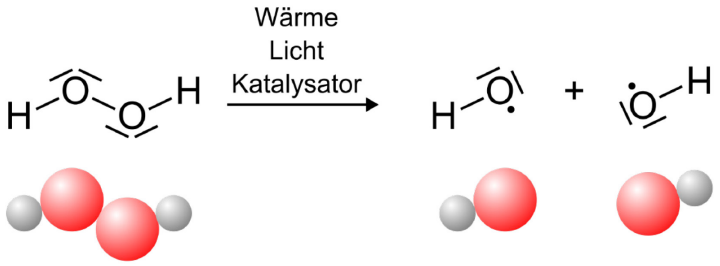


Abbildung 3: Zerfall eines Wasserstoffperoxid-Moleküls in Hydroxyl-Radikale: Strukturformel und vereinfacht als Kugeln. (IQB e. V., 2024).

Reines Wasserstoffperoxid ist unter Standardbedingungen eine farblos-klare Flüssigkeit, die einen Siedepunkt von 150 °C (bei 101,325 kPa) aufweist. Allerdings ist der Umgang mit reinem Wasserstoffperoxid sehr gefährlich und nur unter Einhaltung höchster Sicherheitsbestimmungen möglich. Reines Wasserstoffperoxid neigt zur Zersetzung und ist nicht stabil.

Wasserstoffperoxid und Wasser sind in jedem Verhältnis miteinander mischbar und hierdurch sind handelsübliche Wasserstoffperoxid-Lösungen zugänglich.

Vorgänge auf Teilchenebene bei der Zersetzung von Wasserstoffperoxid

Folgende Animationen veranschaulichen euch die Vorgänge auf Teilchenebene. Die roten Kugeln stehen für Sauerstoff-Atome, die weißen für Wasserstoff-Atome (wie in Abbildung 3). Die Katalysatoroberfläche ist mit grauen Kugeln angedeutet und vereinfacht als flache (statt gewölbte) Oberfläche dargestellt.

Euch wird gezeigt, wie die Wasserstoffperoxid-Zersetzung ohne Katalysator abläuft (Video 1), als zweites bei höherer Temperatur (Video 2), gefolgt von den Vorgängen an der Katalysatoroberfläche (Video 3). Zuletzt werden die Vorgänge von Wasser-Molekülen an der Katalysatoroberfläche simuliert (Video 4): https://iqb-testcenter4.de/#/b6t3d4r

Material 3

Experiment zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid

Geräte:	Chemikalien:
♦ 3 Reagenzgläser ♦ Reagenzglasständer ♦ Spatel, Pipette ♦ Sieb	♦ Wasserstoffperoxid-Lösung $(\omega = 3\,\%)$ ♦ destilliertes Wasser ♦ Platin-Katalysatorkugeln

Durchführung:

Befüllt zwei der drei Reagenzgläser unter Gebrauch einer Pipette mit je 2 mL Wasserstoffperoxid-Lösung und das noch verbleibende Reagenzglas mit 2 mL destilliertem Wasser (Vergleichsprobe).

Teilexperiment 1: Versetzen mit Katalysator

In **Reagenzglas Nr. 1** mit der eingefüllten Wasserstoffperoxid-Lösung und in **Reagenzglas Nr. 2** mit dem eingefüllten Wasser gebt ihr je eine einzelne Platin-Katalysatorkugel.

Zur Wasserstoffperoxid-Lösung von **Reagenzglas Nr. 3** gebt ihr zehn Platin-Katalysatorkugeln. Dieser Versuchsansatz dient dem Nachweis des entstehenden Gases.

Teilexperiment 2: Nachweis des entstehenden Gases

Hilfekarte möglich → zu erfragen bei eurer Lehrperson

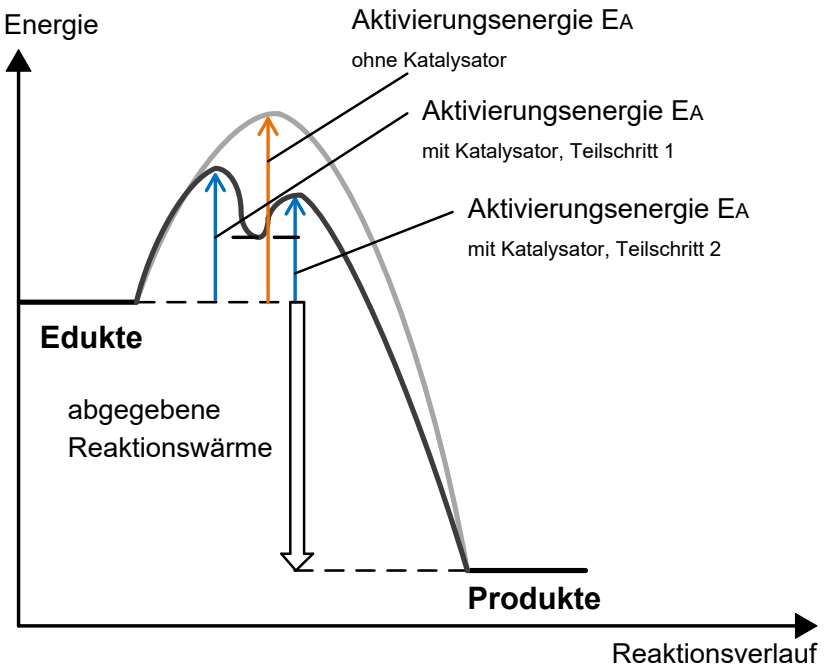
Entsorgung:

Die Platin-Katalysatorkugeln werden in einem Sieb aufgefangen. Die Flüssigkeiten können in verdünnter Form über das Abwasser entsorgt werden.

Material 4

Energiediagramm für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid

Fachbegriffe zur Verwendung: exotherme Reaktion, Energiegehalt der Edukte, Energiegehalt der Produkte, wirksame Teilchenzusammenstöße, Reaktionsgeschwindigkeit, Aktivierungsenergie, Adsorption, Bindungsbruch, Übergangszustand, Zwischenprodukt



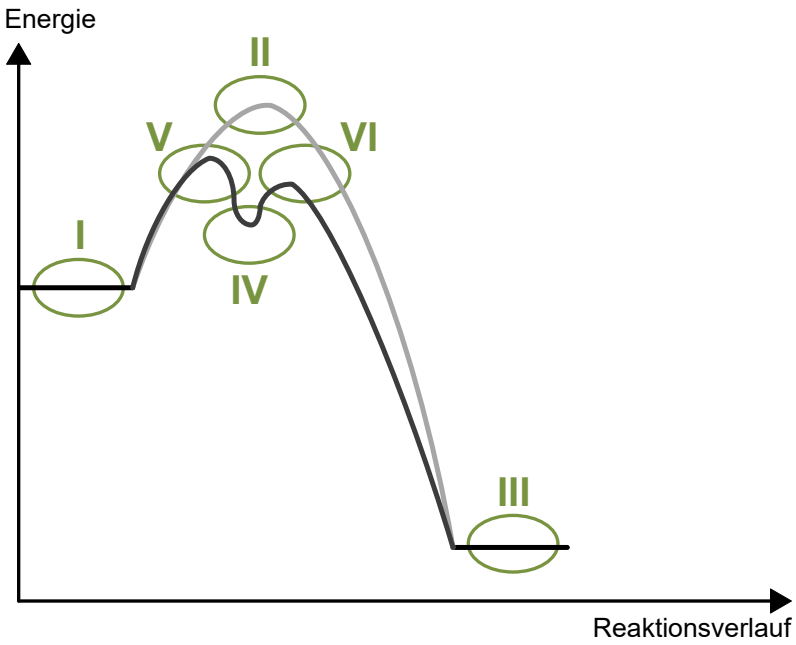


Abbildung 4: Energiediagramm für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid. (Bild unten zeigt Bereiche für Aufgabe 2.3). (IQB e. V. 2024).

3 Weiterführendes Material

Die beiden nachfolgend aufgeführten Materialien sind für die Bearbeitung der Lernaufgabe nicht zwingend notwendig, sondern stellen ein Angebot zur vertiefenden Beschäftigung mit dem Inhaltsbereich Katalyse dar. Sie könnten in der Folgestunde zur Lernaufgabe als Einstieg dienen.

Geschichte zur Wirkung von Katalysatoren

Das achtzehnte Kamel

Als Ali Jussuf ibn Jakub ibn Ibrahim starb, hinterließ er seinen drei Söhnen siebzehn Kamele und ein Testament. Darin verfügte er, dass sein ältester Sohn die Hälfte der Kamele erben sollte, der zweitälteste ein Drittel und der Jüngste ein Neuntel. Aber die siebzehn Kamele ließen sich so nicht aufteilen, wenn man sie nicht schlachten oder verkaufen wollte. Die Brüder baten deshalb nach einigem Streit ihren Imam um Rat.

Dieser legte für geraume Zeit den Finger an die Nase, bevor er sprach: „Gott ist groß und der Letzte Wille eures Vaters ist mir heilig. So heilig, dass ich euch sogar mein einziges Kamel geben werde, um die Teilung eures Erbes zu ermöglichen.“ Jetzt konnten sich die Brüder mühelos einigen: der Älteste zog mit neun Kamelen seiner Wege, der Zweitgeborenen (sic!) mit sechs und der Benjamin mit zweien. Hochzufrieden sah der Imam, dass am Schluss noch eines übrig blieb: sein eigenes. „Gott ist groß“, sprach er und nahm es mit nach Hause.

Text: Neubauer, D. (2016, S. 156)

Chancen von Katalysatoren

2021 wurde erneut ein Forscherteam zur Katalysatorforschung mit dem Nobelpreis geehrt. Einer der Preisträger ist Prof. Dr. Benjamin List, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung. Im folgenden Interview kommt er selbst zu Wort (Kapitel „Innovation 1: Katalysatoren“, ca. 2 Minuten): https://youtu.be/6baVKZeB-VU?t=319&si=J6Q_yWkc9IG-AI_n

4 Hinweise zur Durchführung

Zielsetzung

Im Zentrum vorliegender Lernaufgabe steht das hypothesenprüfende und -generierende Experiment. Durch die Hinführung, Planung, Durchführung sowie Auswertung des Experiments werden die ausgewiesenen Kompetenzen der Sach- und Erkenntnisgewinnung fokussiert.

Didaktische Hinweise

Die Lernaufgabe dient der Systematisierung und Festigung. Sie setzt von den Lernenden viele Vorkenntnisse und experimentelle Fähigkeiten voraus und sucht die Verknüpfung aller Basiskonzepte, die in Sekundarstufe I gelehrt werden.

Um den hypothesengeleiteten Ansatz zur Erkenntnisgewinnung zu ermöglichen, dürfen die Materialien 2 bis 4 den Lernenden nicht von Anfang an zugänglich sein, sondern erst zur Bearbeitung der Aufgabe 2.1 (oder anders gesagt: Teilaufgaben 1.1 bis 1.3 sind ausschließlich mit Material 1 zu lösen).

5 Lösungshinweise und Bezug zu den Standards

Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

- S – Standards der Sachkompetenz,
- E – Standards der Erkenntnisgewinnungskompetenz,
- K – Standards der Kommunikationskompetenz,
- B – Standards der Bewertungskompetenz.

		S	E	K	B
1.1	Lest den Text aus Material 1 aufmerksam durch. Erläutert hiernach zwei Einflussfaktoren der Verbrennungsreaktion auf die Schubkraft der Rakete und formuliert die Reaktionsgleichung für die Verbrennungsreaktion von Dodecan.	1.4 1.5 3.2		1.3 3.2 3.3	

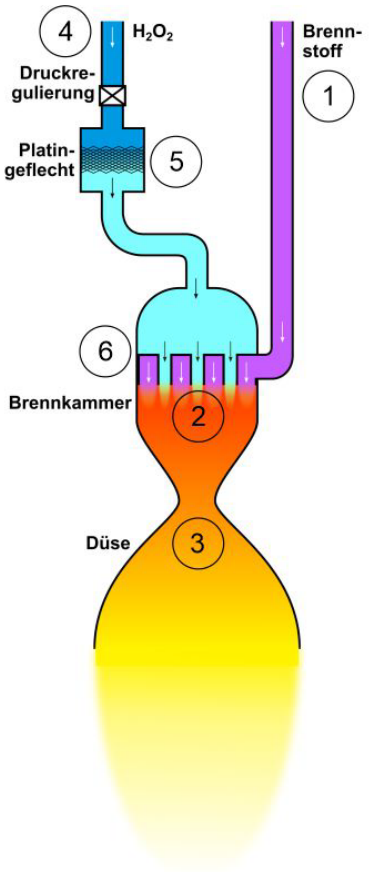
<u>Einflüsse der Verbrennungsreaktion auf die Schubkraft der Rakete:</u>

- Bildung von gasförmigen Reaktionsprodukten aus flüssigem bzw. festem Ausgangsstoff geht mit Erhöhung des Gasdrucks vor der Düsenöffnung einher; je mehr gasförmige Reaktionsprodukte, desto höher der Gasdruck
- Wärmefreisetzung (exotherme Reaktion) erhöht Gasdruck zusätzlich; je stärker exotherm, desto mehr erwärmen sich die Verbrennungsgase und dementsprechend weitere Erhöhung des Gasdrucks
- Je höher der Gasdruck vor der Düsenöffnung, desto höher die Geschwindigkeit des austretenden Gases nach der Düsenöffnung; heißt: verbesserte Schubkraft
- Impulserhaltung begründet Bewegung der Rakete entgegengesetzt zur Austrittsrichtung des Gases

<u>Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Dodecan:</u>

$$2\,C_{12}H_{26} + 37\,O_2 \rightarrow 24\,CO_2 + 26\,H_2O$$

1.2	Ergänzt die Einträge zur Legende von Abbildung 2 (Material 1) und entwickelt daraufhin zwei Hypothesen, die ihr jeweils in Form eines Aussagesatzes an die markierten Platzhalter ebenfalls in Abbildung 2 notiert.	S	E 1.1	K 1.3	B



Legende zu den dargestellten Vorgängen:

1. Brennstoff (Kerosin) wird über eine Zuleitung aus einem Tank **direkt** in die Brennkammer eingespeist
2. *Verbrennung des Brennstoffs nach Zünden, Freisetzung von Wärme (exotherm), hohe Temperaturen, Produkte gasförmig*
3. *Düse (Engstelle) kanalisiert Strömung, Geschwindigkeit austretender Gase erhöht sich, erhöhter Rückstoß*
4. Wasserstoffperoxid wird über Zuleitung aus einem Tank zugeleitet, allerdings nicht direkt in die Brennkammer eingespeist
5. *Platingeflecht „aktiviert" Wasserstoffperoxid, vergrößert Oberfläche, denkbar eine Art „Vernebelung" ???*
6. Zusammentreffen und dabei Vermischung des Brennstoffes mit den Stoffen, welche das Platingeflecht verlassen

Hypothesen auf dem Weg zur Erkenntnis:

Hypothese Nr. 1 (laut Aufgabe1.2) zum Einsatz von Wasserstoffperoxid im Raketenantrieb:

Wasserstoffperoxid ist Brennstoff.

Hypothese Nr. 2 (laut Aufgabe 1.2) zur Funktion des Platingeflechts:

Das Geflecht dient der Zerstäubung.

Hypothese Nr. 1 ggf. verändert nach Lösen Aufgabe 2.1:

Hypothese Nr. 2 ggf. verändert nach Lösen Aufgabe 2.1:

Einträge in roter Schriftfarbe erwartbar von Schülerinnen und Schüler ohne näheres Vorwissen

1.3	Plant ein Experiment zur Überprüfung der von euch aufgestellten Hypothesen. Dokumentiert dieses mit einer beschrifteten Versuchsskizze.	S	E 1.2	K	B

Planen eines Experimentes und Versuchsskizze:

- Die Schülerinnen und Schüler ohne Vorkenntnisse zum Wasserstoffperoxid werden vorschlagen, die Verbrennung von Wasserstoffperoxid – gegebenenfalls an einem

Platingeflecht – zu prüfen. Denkbar ist, dass ein Platingeflecht mit Wasserstoffperoxid benetzt in die Bunsenbrennerflamme gehalten werden soll.

- Die Schülerinnen und Schüler mit Vorkenntnissen werden einen Versuchsablauf naheliegend zu Material 3 planen.

2.1	Lest die gegebenen Texte zur chemischen Verbindung Wasserstoffperoxid und schaut euch die Filmausschnitte zu den Abläufen der Zersetzung auf Teilchenebene an (Material 2).	S	E 1.3 1.5	K 1.3	B

Hypothesen auf dem Weg zur Erkenntnis:

2.2	Führt das Experiment mit Wasserstoffperoxid durch (Material 3) und protokolliert eure Ergebnisse. Prüft, inwiefern das durchgeführte Experiment dem von euch in 1.3 geplanten entsprach und inwiefern es die von euch aufgestellten Hypothesen bestätigt. Formuliert die Reaktionsgleichung zur Zersetzungsreaktion von Wasserstoffperoxid.	S 3.2	E 1.1 1.5	K	B 2.2

Beobachtungen nach Zugabe des Katalysators:

1 2

3 2

- **Reagenzglas Nr. 1** (Wasserstoffperoxid-Lösung mit einer Platin-Katalysatorkugel, in nebenstehendem Foto links): gelinde Gasentwicklung mit kleinen Gasbläschen, die sich an der Oberfläche der Platin-Katalysatorkugel bilden, dort anhaften und aufsteigen; kein Erwärmen der Lösung fühlbar
- **Reagenzglas Nr. 2** (Vergleichsprobe: Wasser mit einer Platin-Katalysatorkugel, jeweils in beiden Fotos rechts): keine Gasentwicklung, kein Erwärmen der Lösung
- **Reagenzglas Nr. 3** (Wasserstoffperoxid-Lösung mit 10 Platin-Katalysatorkugeln, in unterem Foto links): heftige, auch hörbare, Gasentwicklung mit Aufschäumen; Lösung trübt sich infolge der zahlreichen Gasbläschen, kleine Schaumschicht an Flüssigkeitsoberfläche; schwache Erwärmung des Reagenzglases

Abbildung 5: Versuchsergebnisse. (IQB e. V., 2024).

Nachweisreaktion für das entstehende Gas, nach Rücksprache mit der Lehrperson:

- Sauerstoff-Nachweis mit der Glimmspanprobe, positiver Ausgang im Experiment (siehe unteres Foto von Abbildung 5, links)

Nachweisreaktionen mit negativem Versuchsausgang:

- Wasserstoff-Nachweis als Knallgas, negativer Ausgang im Experiment
- Wasserdampf über Färbung von WATESMO, negativer Ausgang im Experiment
- Kohlenstoffdioxid über Erlöschen des Glimmspans, negativer Ausgang im Experiment

(Andere Gase sind nach der Formel von Wasserstoffperoxid nicht zu erschließen bzw. sind den Lernenden nicht bekannt.)

Reaktionsgleichung für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid:

$$2\,H_2O_2 \rightarrow 2\,H_2O + O_2$$

Beurteilung der Hypothesen:

Beide in 2.1 aufgestellten Hypothesen wurden bestätigt.

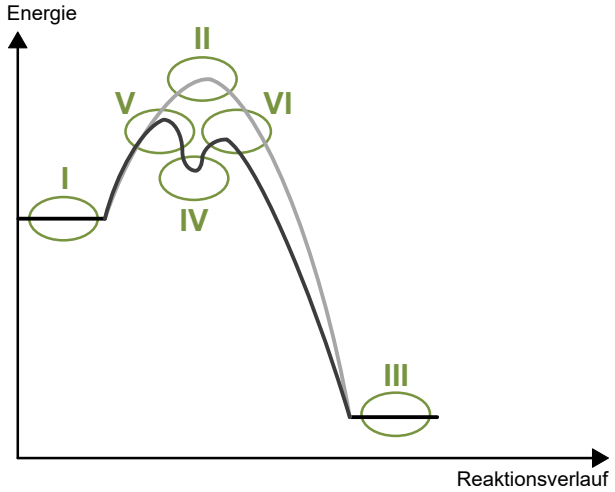
Hilfekarte zu Teilaufgabe 2.2:

Nachweisreaktionen

WASSERSTOFF	**Knallgasprobe** Vorgehen: • Wasserstoff-Gas wird in einem Reagenzglas mit Öffnung nach unten aufgefangen • Reagenzglasöffnung an Brennerflamme halten (nur leicht kippen) Bei positivem Ausgang: „Plopp“-Geräusch nach Entzünden des Wasserstoff-Gases (je nach Anteil Sauerstoff-Gas leiser Ton oder pfeifend) Deutung: Wasserstoff-Gas wird entzündet, verbrennt unter Verpuffung.	**Glimmspanprobe** Vorgehen: • Sauerstoff-Gas wird in einem Reagenzglas mit Öffnung nach oben aufgefangen • Glimmender Holzspan wird in das Reagenzglas gerade nach unten geführt Bei positivem Ausgang: Aufglimmen des Spans bis gelbes Aufflackern, je nach Vol% an Sauerstoff-Gas Deutung: Sauerstoff-Gas fördert die Verbrennung.	**SAUERSTOFF**
WASSER	**WATESMO-Probe** Vorgehen: • WATESMO-Papierstreifen wird mit der Flüssigkeitsprobe benetzt, möglich auch Tröpfchen an Reagenzglaswand • Pinzette zu Hilfe nehmen Bei positivem Ausgang: Blaufärbung des WATESMO-Papiers Deutung: Wasser reagiert unter Farbänderung der auf dem WATESMO-Papier aufgetragenen Substanz (Kupfer(II)-sulfat).	**Kalkwasserprobe** Vorgehen: • Kohlenstoffdioxid-Gas wird in Reagenzglas mit Öffnung nach oben aufgefangen • Mit Einwegpipette wird Gasprobe „aufgesaugt“ und in eine Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser) eingeleitet Bei positivem Ausgang: Trübung der vormals farblos-klaren Lösung Deutung: Kohlenstoffdioxid-Gas fällt in Kalkwasser einen Niederschlag von Calciumcarbonat aus.	**KOHLENSTOFF**

2.3	Wendet euer erworbenes Wissen zur katalysierten Zersetzungsreaktion von Wasserstoffperoxid auf den energetischen Verlauf dieser Reaktion an. Bezeichnet und erläutert die farblich hervorgehobenen Stellen im Energiediagramm unter Einbeziehung der angebotenen Fachbegriffe (Material 4).	S 1.7 2.9 3.3	E 2.4	K	B

Energetischer Verlauf katalysierter und nicht katalysierter Reaktion im Vergleich:



I Energiegehalt der Edukte, hier Wasserstoffperoxid

II Übergangszustand der unkatalysierten Reaktion:

- Reaktionsverlauf führt nach Überwindung einer Energiebarriere (aufzuwendende Aktivierungsenergie der unkatalysierten Reaktion) zum Produkt
- auf Teilchenebene: Teilchen müssen wirksam zusammenstoßen, um zu reagieren (Bindungsbruch und Neuknüpfung von Bindungen), nur Teilchen mit Mindestenergie können reagieren, sind eher wenige, daher Reaktionsgeschwindigkeit gering
- Übergangszustand ist nicht isolierbar

III Energiegehalt der Produkte, hier Wasser und Sauerstoff:

- Zersetzung von Wasserstoffperoxid ist exotherme Reaktion, da Produkte energieärmer als Ausgangsstoff und entsprechend Freisetzung von Wärmeenergie
- Energiegehalt der Edukte und Produkte sind bei katalysierter und unkatalysierter Reaktion gleich, d. h. Katalysator ohne Einfluss auf die abgegebene Wärme

IV Zwischenprodukt:

- Katalysator ermöglicht Zwischenprodukt, hier: Hydroxyl-Radikale, die auf Katalysator-Oberfläche adsorbiert sind (metastabiler Zustand)
- Bildung der Hydroxyl-Radikale in Folge homolytischen Bindungsbruchs der O-O-Bindung des Wasserstoffperoxid-Moleküls, wobei erste Energiebarriere (Aktivierungsenergie) überwunden wurde

V, VI Übergangszustände der katalysierten Reaktion:

- katalysierte Reaktion mit Zwischenprodukt und zwei Übergangszuständen (zweischrittig), dagegen unkatalysierte Reaktion ohne Zwischenprodukt und mit einem Übergangszustand (einschrittig)
- Aktivierungsenergien zum Erreichen der beiden Übergangszustände der katalysierten Reaktion sind kleiner als die Aktivierungsenergie der unkatalysierten Reaktion, d. h. mehr Teilchen sind zu Teilschritten befähigt und überwinden kleinere Energiebarrieren; größere Reaktionsgeschwindigkeit bei katalysierter Reaktion
- Teilchenebene für VI: Bildung der Produkte, indem adsorbierte Hydroxyl-Radikale mit Wasserstoffperoxid zu den Produkten Wasser und Sauerstoff abreagieren

3.1	Erklärt unter Einbeziehung eures Experiments und der gegebenen theoretischen Darlegungen zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid die Abläufe im Triebwerk im Detail. Beginnt beim eingebauten Platingeflecht.	S	E	K 3.2 3.3	B

<u>Erklärung zu den Abläufen im Triebwerk:</u>

- Platin-Netz katalysiert die Zersetzung von Wasserstoffperoxid zu Sauerstoff
- Sauerstoff ist ein Ausgangsstoff für die Verbrennungsreaktion
- Brennstoff und Sauerstoff werden in der Brennkammer zur stark exothermen Reaktion gebracht
- Gasförmige Verbrennungsgase sehr heiß, dehnen sich aus und ermöglichen Rückstoß
- Menge des bereitgestellten Sauerstoffs kann Verbrennungsprozess optimieren, indem mehr Brennstoff in gewisser Zeit zur Reaktion gebracht werden kann (Verbrennungen in reinem Sauerstoff laufen sehr viel schneller ab als in Luft und so entstehen in kurzer Zeit sehr viel mehr Verbrennungsprodukte. Mehr Verbrennungsprodukte bedeuten mehr Schubkraft für die Rakete.)
- Katalysator nimmt Einfluss auf die Schubkraft und damit auf die ins All zu befördernde Nutzlast, von großer Relevanz für Raumfahrttechnik

3.2	Angenommen, ihr hättet als Erste alle diese Zusammenhänge verstanden, so solltet ihr damit an die Öffentlichkeit gehen. Präsentiert die einzelnen Schritte eurer Erkenntnisgewinnung (u. a. das Aufstellen, Prüfen, Neuausrichten von Hypothesen) vor einem simulierten Nobelpreiskomitee aus Mitschülerinnen und Mitschülern und Lehrperson. Erstellt euch vorbereitend dafür eine Redevorlage mit einigen Stichpunkten.	S	E 3.2	K 2.2 3.4	B

<u>Stichpunkte zur Redevorlage, u. a.:</u>

- Weltraumraketen haben wichtige Aufgaben, z. B. Beförderung von Wetter- oder Kommunikationssatelliten
- Transportleistung ist geknüpft an Schubkraft der Rakete, des Raketentriebwerks

- Ausgangslage: Brennstoff der Rakete wird mit Sauerstoff verbrannt, austretende heiße Verbrennungsgase sorgen für Rückstoßkräfte
- Wasserstoffperoxid könnte zur Bereitstellung von Sauerstoff dienen, müsste dazu zersetzt werden
- Zersetzung durch höhere Temperaturen begünstigt (RGT-Regel) bzw. durch einen geeigneten Katalysator (Platin-Katalysatorkugeln im Schülerversuch, Platin-Drahtnetz im Raketentriebwerk)
- Durchgeführter Versuch zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid bestätigte Katalysatorwirkung von Platin-Kügelchen
- Nachweis des freigesetzten Gases nach positiver Glimmspanprobe als Sauerstoff
- Katalysator beschleunigt Zersetzungsreaktion von Wasserstoffperoxid, ermöglicht Übergangszustände und liegt am Ende der Reaktion unverbraucht vor (daher nicht entsorgen, sondern sammeln und erneut nutzen)
- Katalysatorforschung mit Ziel der verbesserten Verbrennungsreaktion und damit einer größeren Schubkraft und schlussendlich mehr Nutzlast

6 Quellenangaben

- Material 1: Copyright Text: IQB e. V. (2024). *Echt abgehoben – Chemische Reaktionen für den Raketenstart.* Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Abbildung 1: Copyright Grafik: NASA/Bill Ingalls. (2004, 14. Oktober). *Eine Sojuz TMA-5 beim Start.* Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Soyuz_TMA-5_launch.jpg
- Abbildung 2: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024). *Pinzipskizze Raketentriebwerk*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Material 2: Copyright Text: IQB e. V. (2024). *Struktur und Eigenschaften von Wasserstoffperoxid.* Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Abbildung 3: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024). *Zerfall eines Wasserstoffperoxid-Moleküls in Hydroxyl-Radikale: Strukturformel und vereinfacht als Kugeln*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Material 3: Copyright Text: IQB e. V. (2024). *Experiment zur Zersetzung von Wasserstoffperoxid.* Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Material 4: Copyright Text: IQB e. V. (2024). *Energiediagramm für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid.* Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Abbildung 4: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024). *Energiediagramm für die Zersetzung von Wasserstoffperoxid*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Abbildung 5: Copyright Grafik: IQB e. V. (2024). *Versuchsergebnisse*. Lizenz: Creative Commons (CC BY). Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de
- Weiterführendes Material: Copyright Text: Neubauer, D. (2016). *Demokrit lässt grüßen. Eine andere Einführung in die Anorganische Chemie.* (1. Auflage). Springer-Spektrum.

Sofern nicht anders gekennzeichnet, liegt das Copyright beim IQB e. V., Lizenz: Creative Commons (CC BY).
Volltext unter: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.de