

Grüner Wasserstoff – physikalisch-chemische Grundlagen

Prof. Dr. Axel Donges



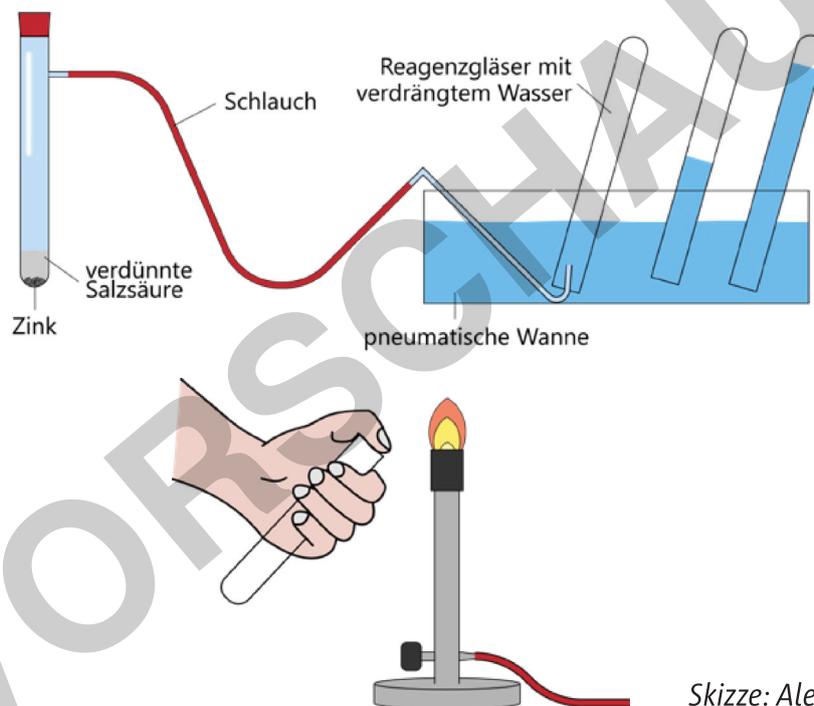
© Andriy Onufriyenko/Moment

In diesem Unterrichtsmaterial setzen sich die Schülerinnen und Schüler mit grünem Wasserstoff auseinander. Sie untersuchen dessen nachhaltige Produktion und nähern sich den Themen Speicherung und Transport. Schließlich erörtern sie, wie grüner Wasserstoff als Brenn- oder Kraftstoff eingesetzt werden kann. Diese Einheit bietet für die Lernenden einen physikalisch-chemischen Zugang zu zentralen Themen des Klimawandels.

In Worten: Wasserstoff (H_2) verbrennt bei Sauerstoffzufuhr (O_2) zu Wasser (H_2O). Bei der Knallgasreaktion wird pro verbranntem Kilogramm Wasserstoffgas eine Energie von 39,3 kWh/kg (= spezifischer Brennwert h^1) frei, wenn das entstehende Wasser kondensiert und auf 25 °C abgekühlt wird.

Lehrerversuch: Knallgasprobe

Mithilfe eines **Kippschen Apparates** (gefüllt mit Zink und verdünnter Salzsäure) wird Wasserstoffgas erzeugt: $\text{Zn} + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$. Mithilfe einer pneumatischen Wanne wird das Wasserstoffgas in einem umgedrehten Reagenzglas aufgefangen. Verschließt man die Öffnung des Reagenzglases unter Wasser mit dem Daumen, so kann der aufgefangene Wasserstoff nicht entweichen. Wird dann das Reagenzglas einer Brennerflamme genähert und gleichzeitig die Öffnung freigegeben, ist eine leise „Explosion“ zu hören.



Skizze: Alexander Friedrich

Aufgabe

- Ermittle durch Internetrecherche die spezifischen Brennwerte von Benzin und Erdgas und vergleiche diese mit dem spezifischen Brennwert von Wasserstoff.
- Berechne die Menge an Wasserstoff (in kg), welche ein Auto benötigt, um eine Strecke von $s = 100$ km zu fahren. Nimm folgende Kenndaten als gegeben an: Das Auto verbraucht 7,0 Liter auf 100 km und die Dichte von Benzin ist $\rho = 740 \text{ kg/m}^3$.

¹ Der spezifische Brennwert h ist die Wärmeenergie, die durch Verbrennung, Kondensation und Abkühlung des Wasserdampfs auf 25 °C von einem Kilogramm Brennstoff entsteht.

M2 Gewinnung von Wasserstoff



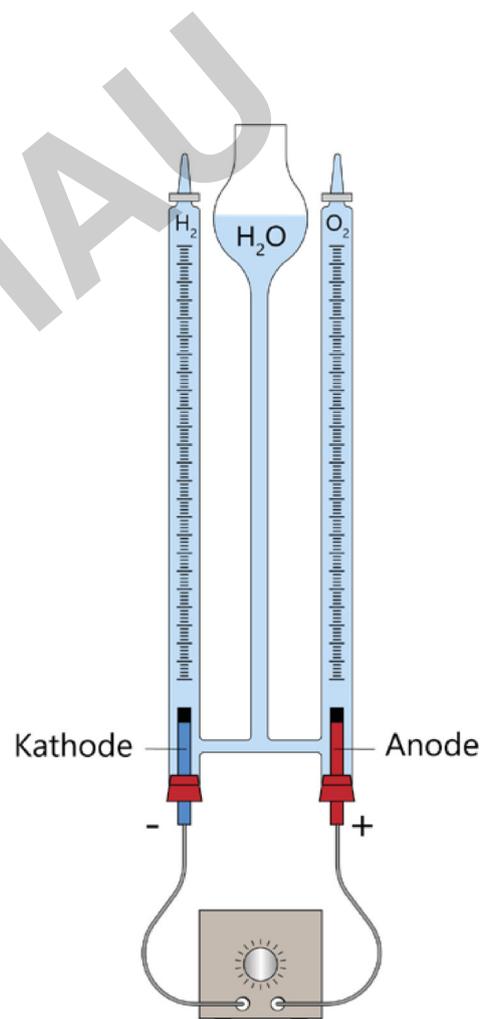
Chemische Gewinnung

Molekularer Wasserstoff entsteht bei der **Reaktion verdünnter Säuren mit unedlen Metallen** (z. B. Salzsäure mit Zink: $\text{Zn} + 2 \text{HCl} \longrightarrow \text{ZnCl}_2 + \text{H}_2$) oder durch die **Zersetzung von Wasser durch Alkalimetalle** (z. B. Natrium: $2 \text{Na} + 2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{NaOH} + \text{H}_2$). Diese Methoden eignen sich jedoch nur für das Labor, nicht für die industrielle Herstellung. Im industriellen Maßstab wird molekularer Wasserstoff durch **Dampfreformierung** oder durch **partielle Oxidation** hergestellt. Diese beiden Methoden werden im Weiteren nicht näher erläutert.

Elektrolyse von Wasser

Eine alte und effiziente Methode zur Wasserstoff-Gewinnung ist die **Elektrolyse**. Dabei wird (flüssiges) Wasser mithilfe von elektrischem Strom letztendlich in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt: $2 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$ (umgekehrte Knallgasreaktion). Im Detail laufen die folgenden Reaktionen ab (siehe Bild rechts, **Hofmannscher Wasserzersetzungsgenerator**):

1. Ein Teil des flüssigen Wassers ist dissoziiert, d. h. $8 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4 \text{OH}^-$.
2. Die H_3O^+ -Ionen wandern zur negativen Kathode, wo die H_3O^+ -Ionen Elektronen aufnehmen: $4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4 \text{e}^- \longrightarrow 2 \text{H}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Dabei entsteht molekularer gasförmiger Wasserstoff, der in der linken Röhre aufsteigt.
3. Die OH^- -Ionen wandern zur positiven Anode und geben an diese Elektronen ab: $4 \text{OH}^- \longrightarrow \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^-$. Dabei entsteht molekularer gasförmiger Sauerstoff, der in der rechten Röhre aufsteigt.
4. In Summe gilt also $8 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 4 \text{H}_3\text{O}^+ + 4 \text{OH}^- \longrightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$.



Skizze: Alexander Friedrich

© RAABE 2023

Bei der Wasserelektrolyse wird mithilfe elektrischer Energie Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zersetzt. Der Wirkungsgrad des Prozesses liegt zwischen 60 % und 85 %.

- Auf der linken Seite wird **Wasserstoff auf die Anode** gegeben. Dort wird der molekulare Wasserstoff in Protonen (H^+) und Elektronen (e^-) zerlegt: $\text{H} \longrightarrow \text{H}^+ + \text{e}^-$. Die positiven Protonen wandern durch die Membrane zur Kathode. Die Elektronen werden von der Anode aufgenommen.
- Auf der rechten Seite wird **Sauerstoff auf die Kathode** geleitet. Der molekulare Sauerstoff nimmt Elektronen auf (die die Kathode abgibt) und wird in zweifach negativ geladene Sauerstoffatome (O^{2-}) zerlegt: $\text{O}_2 + 4 \text{e}^- \longrightarrow 2 \text{O}^{2-}$. Die O^{2-} -Ionen können die Membran nicht durchdringen und nicht zur Anode gelangen.
- Die Anode nimmt ständig Elektronen auf und die Kathode gibt ständig Elektronen ab. Daher wandern die überschüssigen Elektronen über eine elektrische Leitung von der Anode durch einen **elektrischen Verbraucher** zur Kathode.
- Die positiven Protonen und die negativen Sauerstoffionen vereinigen sich zu **Wasser** ($2 \text{H}^+ + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}$), welches die Zelle auf der rechten Seite wieder verlässt.
- Letztendlich läuft die Knallgasreaktion $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ in der Brennstoffzelle langsam ab, weshalb im Verbraucher (z. B. dem Elektromotor eines Autos) Energie freigesetzt wird. Der Wirkungsgrad für die Umwandlung der im Wasserstoff chemisch gespeicherten Energie in die im Verbraucher freigesetzte elektrische Energie variiert je nach Bauart zwischen 35 % und 70 %.

Aufgabe

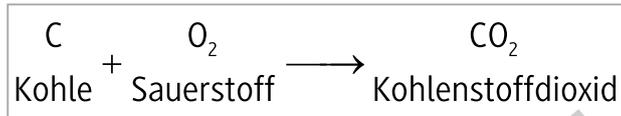
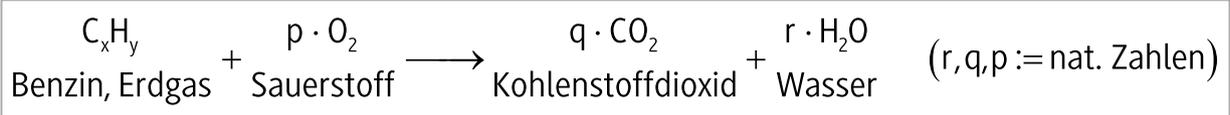
- a) Berechne die frei werdende elektrische Energie W einer Wasserstoff-Brennstoffzelle, wenn diese 2 kg Wasserstoff bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 50 \%$ umsetzt.
- b) Berechne die Menge an Wasser in Kilogramm, die bei dieser Reaktion frei wird.



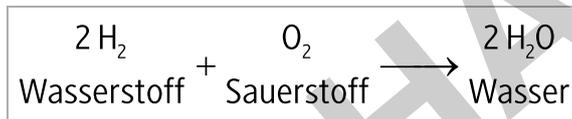
M4 Grüner Wasserstoff

Wasserstoff vs. fossile Brennstoffe

Die **Verbrennung von fossilen Brennstoffen** (Benzin, Erdgas, Kohle) läuft im Wesentlichen nach den folgenden Schemata ab:



Die **Verbrennung von Wasserstoff** genügt dem Schema:



Der Unterschied ist sofort klar: Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entsteht das umweltschädliche **Treibhausgas CO₂** (Kohlenstoffdioxid), das für die Erderwärmung mitverantwortlich ist. Bei der Verbrennung von Wasserstoff entsteht dagegen kein CO₂. Eine Substitution fossiler Brennstoffe durch Wasserstoff ist daher umwelttechnisch sinnvoll.

Nachhaltige Gewinnung von Wasserstoff

„Grün“ ist Wasserstoff jedoch erst dann, wenn er nachhaltig, d. h. ohne Verwendung fossiler Brennstoffe hergestellt wird. Konkret heißt das: Grüner Wasserstoff entsteht durch Elektrolyse und die dazu notwendige elektrische Energie stammt aus regenerativen Quellen (Solarstrom, Windenergie). Ob mit Atomstrom erzeugter Wasserstoff auch „grün“ ist (da CO₂-frei erzeugt) wird kontrovers diskutiert.



© Andriy Onufriyenko/Moment

Lösungen

Lösung (M1)

- a) Der spezifische Brennwert von Benzin liegt bei 11,9 kWh/kg. Der spezifische Brennwert von Erdgas liegt im Bereich 8,9 kWh/kg bis 12,5 kWh/kg, ist also ähnlich wie der von Benzin. Der Brennwert von Wasserstoff liegt bei 39,3 kWh/kg. Der spezifische Brennwert von Wasserstoff ist somit das 3,3-fache des spezifischen Brennwertes von Benzin bzw. das 3,1- bis 4,4-fache des spezifischen Brennwertes von Erdgas.
- b) 7,0 Liter Benzin haben eine Masse von $m = \rho \cdot V = 740 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,007 \text{ m}^3 = 5,18 \text{ kg}$. Damit benötigt das Auto für eine Strecke von $s = 100 \text{ km}$ $m = 5,18 \text{ kg}$ Benzin oder $m_{\text{H}_2} = \frac{5,18 \text{ kg}}{3,3} = 1,57 \text{ kg}$ Wasserstoff.

Lösung (M2)

Es werden $W = 100 \text{ kWh}$ an elektrischer Energie bei der Elektrolyse umgesetzt. Bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 80 \%$ entsteht somit Wasserstoff mit einem Brennwert von $H = \eta \cdot W = 80 \text{ kWh}$. Wasserstoff hat einen spezifischen Brennwert von $h = 39,3 \text{ kWh/kg}$.

Somit werden $m = \frac{H}{h} = \frac{80 \text{ kWh}}{39,3 \text{ kWh/kg}} = 2,03 \text{ kg}$ Wasserstoff erzeugt.

Lösung (M3)

- a) In $m = 2 \text{ kg}$ Wasserstoff steckt eine chemische Energie (Brennwert) von $H = h \cdot m = 39,3 \text{ kWh/kg} \cdot 2 \text{ kg} = 78,6 \text{ kWh}$. Bei einem Wirkungsgrad von $\eta = 50 \%$ wird die Hälfte, also $W = 39,3 \text{ kWh}$, in elektrische Energie umgewandelt.
- b) Ein Sauerstoffatom ist 16-mal schwerer als ein Wasserstoffatom: $m_{\text{O}}/m_{\text{H}} = 16$. Dann gilt gemäß der Reaktionsgleichung $2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \longrightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$ für das Massenverhältnis

$$\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2}} = \frac{m_{\text{H}_2} + m_{\text{O}}}{m_{\text{H}_2}} = \frac{2 \cdot m_{\text{H}} + m_{\text{O}}}{2 \cdot m_{\text{H}}} = \frac{2 + \frac{m_{\text{O}}}{m_{\text{H}}}}{2} = \frac{2 + 16}{2} = 9.$$

Das gebildete Wasser hat demnach die 9-fache Masse des umgesetzten Wasserstoffs, d. h. $m_{\text{H}_2\text{O}} = 16 \cdot 2 \text{ kg} = 32 \text{ kg}$.