

# Photoreformierung

## Wasserstoff aus Ethanol

### Arbeitsmaterialien

Waage, Ultraschallbad, großes Reagenzglas (Quarzglas), Becherglas, Magnetrührplatte mit Rührfisch (kleine Form), durchbohrter Stopfen, 10-mL Spritze, 1-mL Spritze, Kanüle, Zweivegehahn, Stativmaterial, Highpower-LEDs (365 nm), Gasbeutel mit Septum, Petrischale, Feuerzeug

### Chemikalien

Ethanol-Lösung ( $c = 1 \text{ mol/L}$ )  
 $\text{TiO}_2/\text{Pt}$ -Katalysator  
Seifenlösung

### Versuchsskizze



### Versuchsdurchführung I – Herstellung von Wasserstoffgas

**V 1.1** Führen Sie den Versuch entsprechend der Anleitung Schritt für Schritt durch. Bestrahlen Sie die Suspension für mindestens 30 Minuten.



1

Wiegen Sie 50 mg des  $\text{TiO}_2/\text{Pt}$ -Katalysators in einem großen Reagenzglas ab.



2

Geben Sie eine Ethanol-Lösung ( $c = 1 \text{ mol/L}$ ) zum Katalysator hinzu und füllen Sie das Reagenzglas bis etwa 2 cm unterhalb des Randes auf.



3

Tauchen Sie das Reagenzglas mit der Suspension für 3 Minuten in ein Ultraschallbad.



4

Geben Sie einen Rührfisch zur Suspension hinzu.



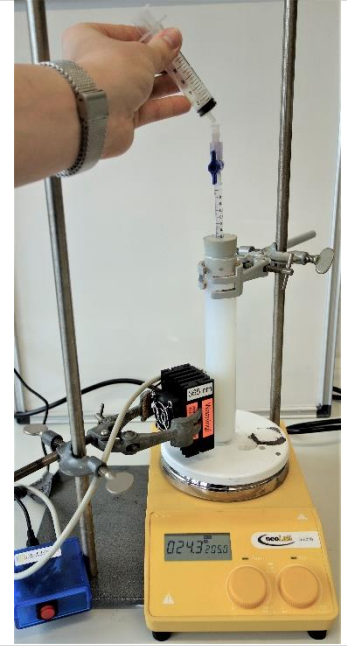
5

Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen, in den eine 1-mL Spritze mit aufgesetztem Zweiwegehahn gesteckt ist.



6

Spannen Sie das Reagenzglas mit dem befestigten Aufsatz in eine Stativklemme über einer Magnet-rührplatte ein.



7

Setzen Sie eine 10-mL Spritze auf den Zweiwegehahn auf. Der Stempel der Spritze sollte nach unten gedrückt sein.



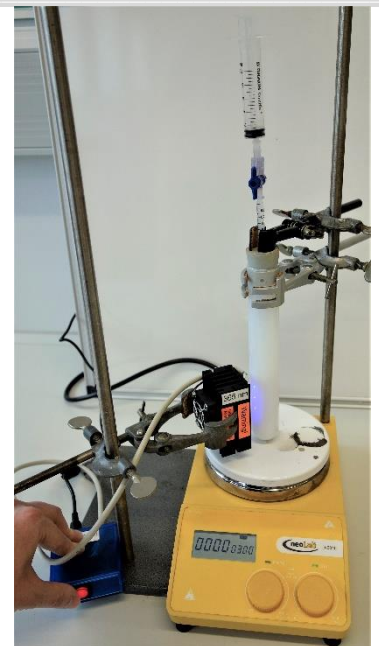
8

Spannen Sie eine weitere Stativklammer unmittelbar über dem Stopfen ein, sodass dieser fest auf den Reagenzglas sitzt.



9

Schalten Sie die Magnet-rührplatte ein (mind. 300 U/min).



10

Schalten Sie anschließend die Highpower-LEDs (365 nm) zur Bestrahlung der Suspension ein (mind. 30 min).

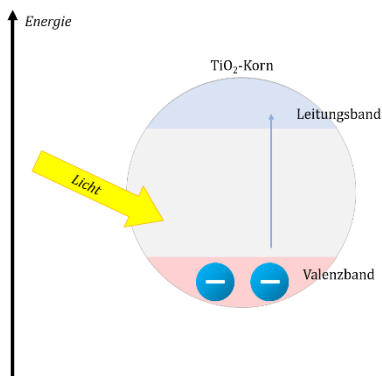
**A 1.3** Lesen Sie zunächst die Info „Photoreformierung“. Ergänzen Sie dann in Abb. 7 die fünf freien Felder mit den entsprechenden Formeln für die Photoreformierung von Ethanol. Benennen Sie zudem, bei welchen Reaktionen es sich um eine Oxidation oder eine Reduktion handelt.

**Info Photoreformierung**

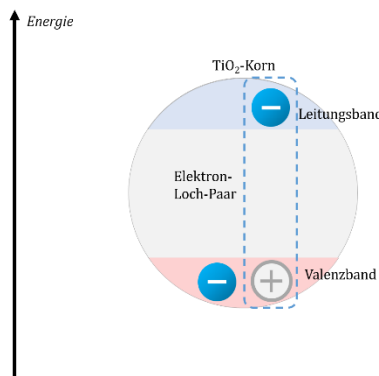
Mit **Photoreformierung** wird ein Prozess bezeichnet, bei dem aus unterschiedlichen Ausgangsstoffen (Substrate) mithilfe eines **Photokatalysators** Wasserstoff gewonnen werden kann.

**Vorgänge am Photokatalysator**

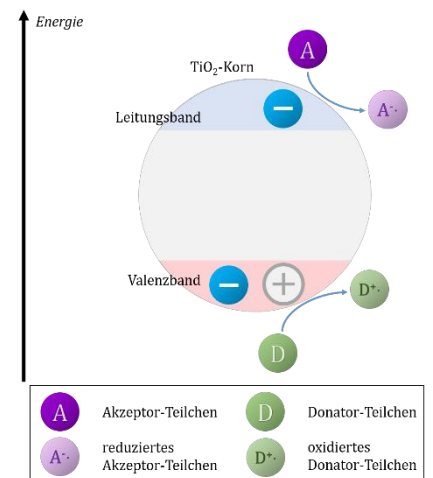
Durch einen Photokatalysator (bspw. Titandioxid,  $TiO_2$ ) wird zunächst Licht absorbiert (Abb. 3). Dabei geht ein Elektron aus dem Valenz- in das Leitungsband über. Es bildet sich ein Elektron-Loch-Paar (Abb. 4). Das Loch im Valenzband wird durch ein Elektron eines Donator-Teilchens gefüllt. Dabei wird der Donator oxidiert. Das Elektron im Leitungsband wird an ein Akzeptor-Teilchen übertragen, welches dadurch reduziert wird (Abb. 5).



**Abbildung 4:** Absorption von Licht durch Photokatalysator



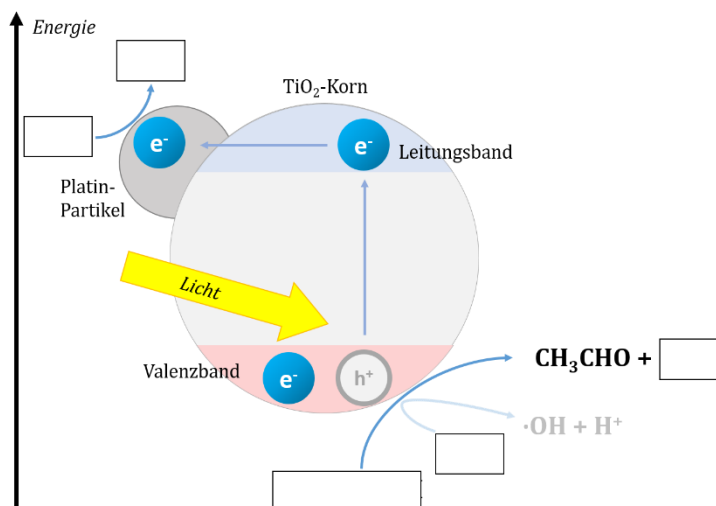
**Abbildung 5:** Elektron-Loch-Paar



**Abbildung 6:** Reduktion und Oxidation am Photokatalysator

**Einsatz eines Co-Katalysators**

Zur Steigerung der Ausbeute von Wasserstoff kann Titandioxid mit geringen Mengen an Metallen (Platin oder Gold) belegt werden. Dadurch können Elektronen vom Leitungsband leichter auf die Metallpartikel übertragen werden, um so eine vorzeitige Rekombination von Elektron-Loch-Paaren zu verhindern. Die Elektronen werden vom Platinpartikel auf Protonen übertragen. Es entstehen Wasserstoff-Moleküle. Um die entstandenen Löcher im Valenzband zu füllen, eignen sich besonders gut solche Substrat-Moleküle, die eine oder mehrere Hydroxy-Gruppen besitzen. Somit können Alkohole, Zucker oder Stärke, aber auch Cellulose genutzt werden. Auch Wasser-Moleküle können Elektronen übertragen, wobei Hydroxy-Radikale ( $\cdot OH$ ) und Protonen gebildet werden. Da die Substrate in wässrigen Lösungen vorliegen, findet diese Reaktion ebenfalls in einem geringen Umfang statt.



können Elektronen übertragen, wobei Hydroxy-Radikale ( $\cdot OH$ ) und Protonen gebildet werden. Da die Substrate in wässrigen Lösungen vorliegen, findet diese Reaktion ebenfalls in einem geringen Umfang statt.

**Abbildung 7:** Photoreformierung von Ethanol

# Wasserstoff – ein CO<sub>2</sub>-neutraler Energieträger?

## Info

Wasserstoffgas lässt sich über verschiedene Wege industriell herstellen. Den unterschiedlichen Produktionsmethoden werden zumeist Farben zugeordnet, je nachdem, welche Mittel eingesetzt und ob bzw. mit wie viel Emission an Kohlenstoffdioxid in die Umwelt zu rechnen ist.

## A 2.1

Vergleichen Sie tabellarisch die „Farben“ des Wasserstoffs, indem Sie den CO<sub>2</sub>-Ausstoß, die eingesetzten Ausgangsstoffe, Herstellungsweg und Einsatz in der Industrie gegenüberstellen.

## A 2.2

Begründen Sie, welcher Farbe Sie die Wasserstoffherstellung durch Photoreformierung zuordnen würden.

## Grüner Wasserstoff

Hierbei handelt es sich um Wasserstoffgas, das durch Elektrolyse von Wasser gewonnen wird. Entscheidend ist allerdings bei diesem industriellen Produktionsweg, dass der Strom zur Elektrolyse aus erneuerbaren Energien (Solar oder Wind) gewonnen wird. Ebenfalls hinzugezählt wird die Herstellung von Wasserstoff durch Fermentation von Biomasse und der Nutzung dieser für mikrobielle Brennstoffzellen. Grüner Wasserstoff wird als CO<sub>2</sub>-neutral klassifiziert. Allerdings werden die genannten Herstellungswegen in der Industrie noch nicht großflächig eingesetzt.

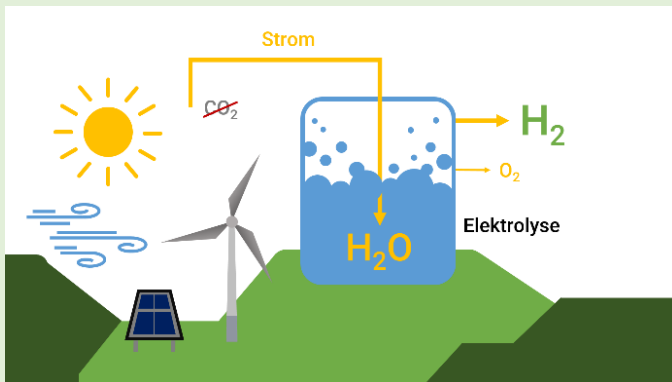


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

## Blauer Wasserstoff

Wasserstoff, dessen Erzeugung mit einem CO<sub>2</sub>-Abscheidungs- und Speicherverfahren verbunden ist (*Carbon Capture and Storage, CCS*), wird als blauer Wasserstoff bezeichnet. Bei der Herstellung werden vor allem Erdgas oder Biogas durch Dampfreformierung zu Wasserstoffgas und CO<sub>2</sub> umgesetzt. Das entstandene CO<sub>2</sub> gelangt jedoch nicht in die Atmosphäre, sondern wird bspw. in ehemaligen Erdöl- oder Erdgasfeldern unter der Erde gespeichert, wodurch dieser Prozess als CO<sub>2</sub>-neutral gilt.

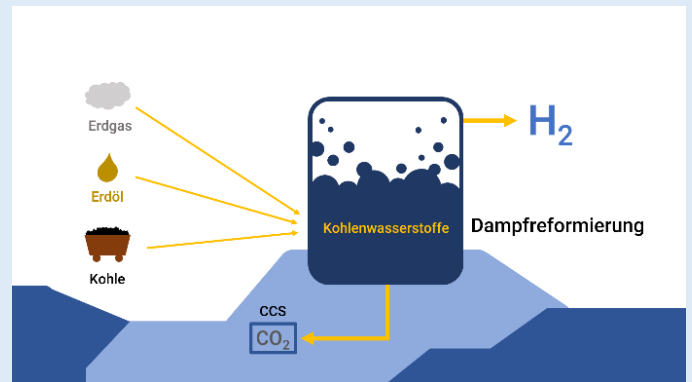


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

## Türkiser Wasserstoff

Türkiser Wasserstoff wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Ausgangsstoff ist Erdgas. Neben Wasserstoff entsteht zudem fester Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoff kann anschließend eingelagert werden. Voraussetzung für die CO<sub>2</sub>-Neutralität dieses Prozesses ist neben der dauerhaften Speicherung des Kohlenstoffs auch die Energieversorgung des Hochtemperaturreaktors durch Einsatz erneuerbarer Energiequellen. Aktuell wird an diesem Produktionsweg weiter geforscht, um ihn in größerem industriellem Maßstab nutzen zu können.

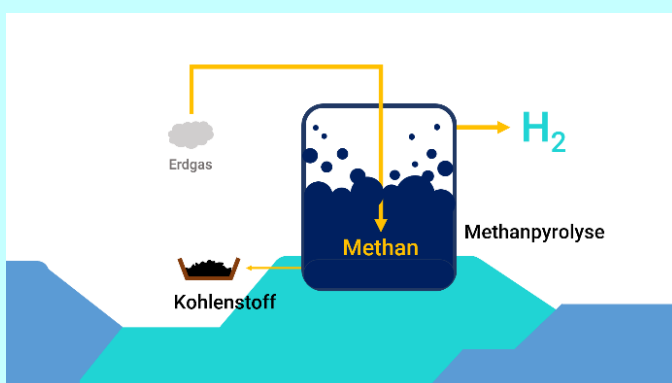


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

## Grauer Wasserstoff

Über Dampfreformierung fossiler Energieträger (Erdgas, Erdöl, Kohle) wird aktuell ein Großteil des industriell hergestellten Wasserstoffs gewonnen. Mithilfe eines Katalysators wird bei hohem Druck (15 - 25 bar) und hohen Temperaturen (750 °C - 1000 °C) die Produktion durchgeführt. Dieser Wasserstoff wird als grauer Wasserstoff bezeichnet und ist mit einer großen Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Umwelt verbunden.

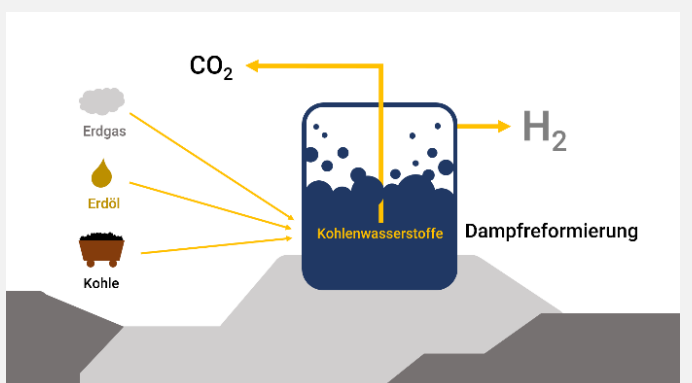


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

V 1.2

Schließen Sie nach der Bestrahlung den Zweiwegehahn. Nehmen Sie nun die 10-mL Spritze mit dem Zweiwegehahn von der 1-mL Spritze ab und setzen Sie eine Kanüle auf den Zweiwegehahn.

Falls sich noch etwas Flüssigkeit in der Spritze befinden sollte, nehmen sie die Kappe der Kanüle ab und halten die Spritze senkrecht nach unten. Öffnen Sie den Zweiwegehahn und entlassen Sie durch vorsichtigen Druck auf den Kolben der Spritze die restliche Flüssigkeit auf ein Papierhandtuch. Schließen Sie nun den Zweiwegehahn wieder.

Lesen Sie die Menge des entstandenen Gases ab und berechnen Sie die Menge an Sauerstoffgas, die benötigt wird, um eine vollständige Knallgasreaktion durchzuführen (*Hinweis: Gehen Sie bei Ihrer Berechnung davon aus, dass es sich bei der Gasprobe um reinen Wasserstoff handelt*)

Entnehmen Sie die berechnete Menge an Sauerstoffgas aus dem bereitgelegten Gasbeutel. Hierfür stechen Sie die Kanüle in das an den Gasbeutel angeschlossene Septum (*gelb*). Öffnen Sie den Zweiwegehahn und ziehen Sie in die Spritze die benötigte Menge an Sauerstoff auf.

Füllen Sie in eine Petrischale etwa 0,5 cm hoch Seifenlösung.

Führen Sie die Kanüle in die Seifenlösung ein und formen Sie eine etwa 0,5 mL große Gasblase (*Abb. 1*).

Zünden Sie mithilfe eines Feuerzeugs die Gasblase.



Abbildung 1: Injektion von Gas in eine Seifenlösung



## Wasserstoff und Mobilität

Seit mehreren Jahren ist der Einsatz von Wasserstoff verstärkt Gegenstand politischer und gesellschaftlicher Diskussionen im Rahmen des Umstiegs von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern. Dabei stehen vor allem elektrische und wasserstoffbasierte Antrieben im Gegensatz. Doch worin liegen überhaupt Vorteile oder Nachteile für die verstärkte Nutzung von Wasserstoff? Und scheint eine Fokussierung auf entweder die eine oder die andere Antriebsvariante im Verkehrssektor sinnvoll?

### A 3.1

Diagramme 1 & 2 zeigen die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb und wasserstoffbasierten Brennstoffzellen in Bezug auf Energieform sowie die Herstellung der Batterien bzw. Brennstoffzellen. Vergleichen Sie die Diagramme 1 & 2 und notieren Sie stichpunktartig die drei Ihrer Meinung nach wichtigsten Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen beider Antriebsformen, die für die nächsten beiden Jahrzehnte angenommen werden.

Legende:

**FCEV:** Fuel Cell Electric Vehicle, *Brennstoffzellenfahrzeug*

**NG:** natural gas/Erdgas, H<sub>2</sub> aus Erdgasdampfreformierung,

**Wind:** H<sub>2</sub> aus Elektrolyse mit Windstrom

**BEV-60kWh:** Battery Electric Vehicle, *Elektroauto*

**PV:** Photovoltaik

**Strommix:** Strom aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energieträgern

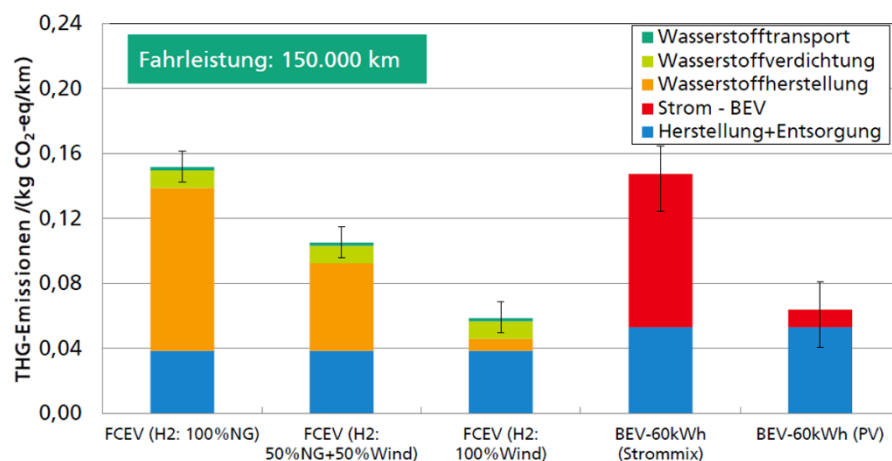


Diagramm 1: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2020-2030)

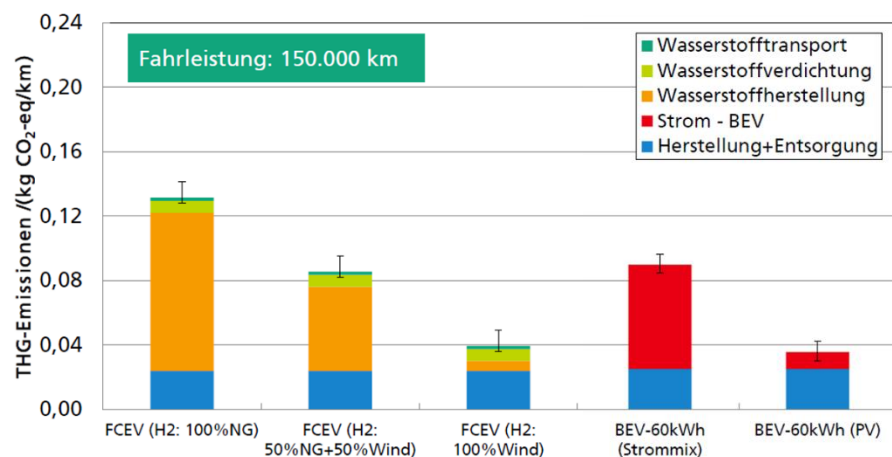


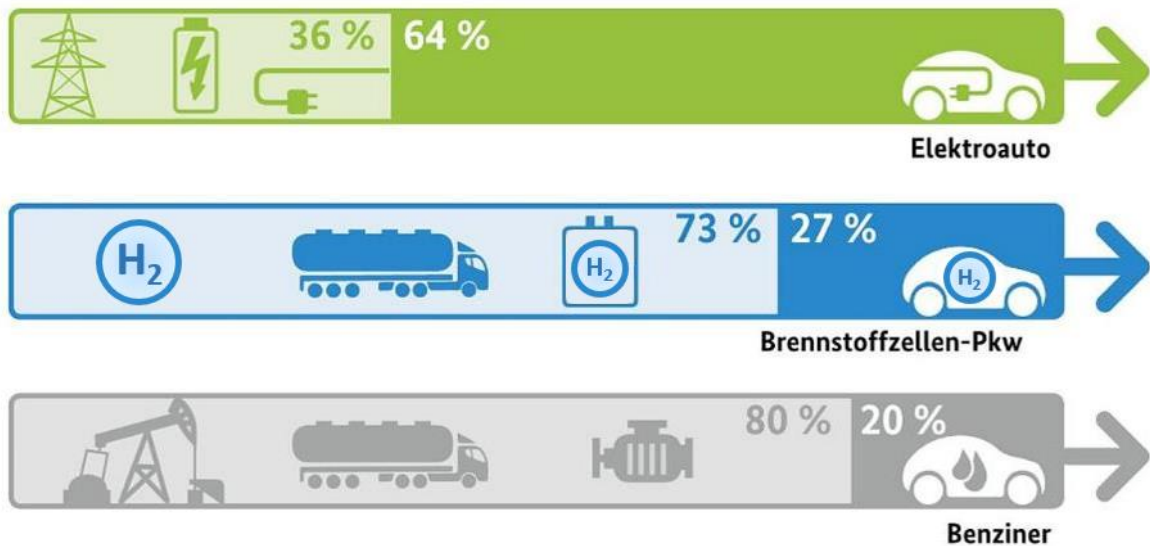
Diagramm 2: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2030-2040)

[1] Quelle: Hebling, C., Sternberg, A., Hank, C.: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg 2019. [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE\\_Ergebnisse\\_Studie\\_Treibhausgasemissionen.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf) (Zugriff: 27.06.2022).

**A 3.2** Beziehen Sie Stellung zu der Aussage, dass wasserstoffbasierte Antriebe (bspw. in Brennstoffzellenautos) gegenüber Elektroantrieben in Zukunft grundsätzlich bevorzugt werden sollten. Nutzen Sie hierfür Ihre Ergebnisse aus **Aufgabe 3.1**, den Infos „**Wirkungsgrade im Vergleich**“ und „**Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**“ sowie die Informationen, die Sie aus dem **Video** erhalten.

**Info** **Wirkungsgrade im Vergleich**

Die Effizienz von Antrieben lässt sich am besten über ihren Wirkungsgrad vergleichen. Dieser zeigt, wie viel der zugeführten Energie für die eigentliche Fortbewegung des Fahrzeugs eingesetzt wird.



Zahlen von Agora Verkehrswende und Öko-Institut, 2017

Der Wirkungsgrad zeigt, wie viel der zugeführten Energie bei der Fortbewegung des Fahrzeugs umgesetzt wird. Bei Strom wird von Primärenergie aus erneuerbaren Energien ausgegangen. Hier wird rechts der Anteil der Energie gezeigt, der tatsächlich zur Fortbewegung genutzt wird, und links der Anteil der Energie, der auf dem Weg von der Energiequelle bis zum Rad (Well-to-Wheel) verloren geht.

Abbildung und Text nach: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?, <https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten> (Zugriff: 02.06.22).

**Info** **Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**

Journalist Jannis Carmesin zum Thema Wasserstoff und Energiewende, Ausschnitt aus dem Artikel „Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?“ der Plattform Quarks der WDR-Doku-Redaktion:

„[...] Während vor einigen Jahren teilweise noch von einer vollständigen Wasserstoffwirtschaft fantasiert wurde, weiß man mittlerweile: Wegen seiner Effizienzprobleme ist Wasserstoff in vielen Einsatzgebieten auch in Zukunft kaum sinnvoll nutzbar.

Als Faustregel gilt: Wo immer sie möglich ist, lohnt sich eher die direkte Nutzung von Strom. Das gilt nach Meinung der meisten Forschenden zum Beispiel für den Pkw: Um eine Strecke X zurückzulegen, braucht ein Wasserstoffauto mit Brennstoffzelle laut dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung mehr als doppelt so viel Primärenergie wie das E-Auto mit Akku. Nutzt man den Wasserstoff für die Produktion von synthetischem Kraftstoff, um damit Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren anzutreiben, ist sogar etwa die fünffache Menge an Energie nötig.

In anderen Bereichen dürfte Wasserstoff hingegen eine Schlüsselrolle für den Klimaschutz einnehmen; etwa dort, wo eine Nutzung von grünem Direktstrom ökonomisch unsinnig oder technisch unmöglich ist und auch sonst wenige klimafreundliche Alternativen bleiben.

Für große Fahrzeuge, die lange Strecken zurücklegen müssen, könnte Wasserstoff zum Beispiel wichtig werden, weil Akkus ihren Energiebedarf mittelfristig nicht decken werden. Logistikunternehmen können sich beispielsweise kaum erlauben, dass ihre Lkw nach wenigen Hundert Kilometern erst einmal eine Stunde an der Ladesäule verbringen müssen, ehe sie weiterfahren können. Frachtschiffe oder Flugzeuge, die den Atlantik überqueren, haben gar überhaupt keine Lademöglichkeit. Für sie könnte die Nutzung von Wasserstoff beziehungsweise synthetischen Kraftstoffen auf Basis von Wasserstoff die einzige umweltverträgliche Alternative zu fossilen Kraftstoffen sein. [...]“

Jannis Carmesin: Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?, Quarks, <https://www.quarks.de/technik/energie/was-die-allzweckwaffe-fuer-die-energie-wende-leisten-kann/> (Zugriff: 02.06.22).

### Video Wasserstoff vs. Elektromobil (1:51 min)



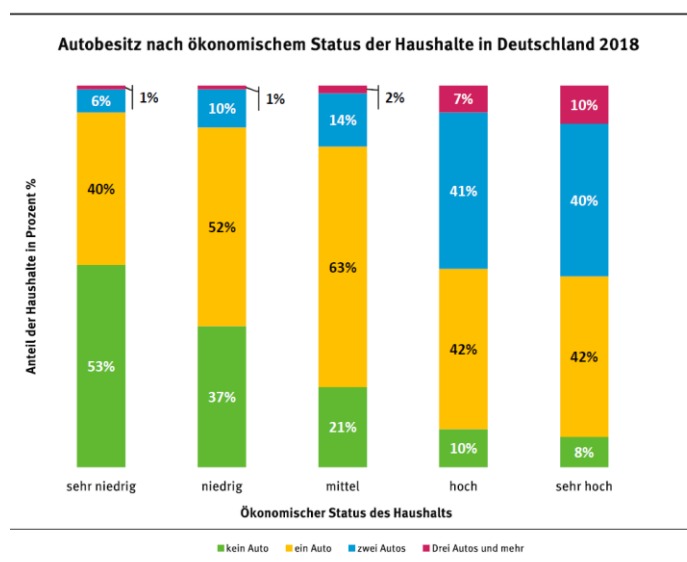
<https://www.ardmediathek.de/video/quarks/wasserstoffauto-gegen-elektromobil/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWQzYjVINTI5LTMzMjktNDNiNi1hNzQ4LWM0NGZkNjQwZDk4Yw>

### Info Brennstoffzellen- und Elektroautos – eine sozial gerechte Verkehrswende?

Neben ökologischen und ökonomischen Blickwinkeln ist eine gesellschaftspolitische Sicht auf die Energiewende notwendig. Hierbei stellt sich unter anderem die Frage, welche soziale Dimension mit der Energiewende im Verkehrssektor einhergeht.

### A 3.3

Vergleichen Sie mithilfe der Materialien auf den folgenden Seiten die Kosten für die Anschaffung und den Unterhalt bei klassischen Verbrennern, Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen. Beziehen Sie Stellung dazu, inwieweit die Energiewende im Individualverkehr für verschiedene Bevölkerungsschichten umsetzbar ist. Geben Sie Vorschläge, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Sorgen der Menschen zu berücksichtigen.



**Diagramm 3:** Autobesitz in Deutschland nach ökonomischem Status der Haushalte 2018

Quelle: Umweltbundesamt, basierend auf Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Bmvi) (2019): „Mobilität in Deutschland – Kurzreport. Verkehrsaufkommen – Struktur – Trends“ (durchgeführt von infas, DLR, IVT und infas 346, S.11)

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/soziale-aspekte-der-verkehrswende#warum-unser-jetziges-verkehrssystem-weder-nachhaltig-noch-gerecht-ist>, Zugriff: 05.12.2022.



	Verbrenner (Benzin)	E-Auto	Brennstoff- zellenauto
durchschnittlicher Anschaffungspreis Kleinwagen	11.415 € - 16.490 €	21.940 € - 30.990 € *	- **
durchschnittlicher Anschaffungspreis Mittelklassewagen	27.990 € - 37.490 €	36.040 € - 47.490 € *	63.900 € - 77.300 €

\* Förderprämien für Elektroautos von bis zu 6570 Euro sind vom Preis abgezogen

\*\* Stand Okt. 2022 gibt es keine in Deutschland zugelassenen Kleinwagenmodelle mit Brennstoffzellenantrieb

**Tabelle 1:** Kosten der Anschaffung von Verbrennern (Benzin), Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich

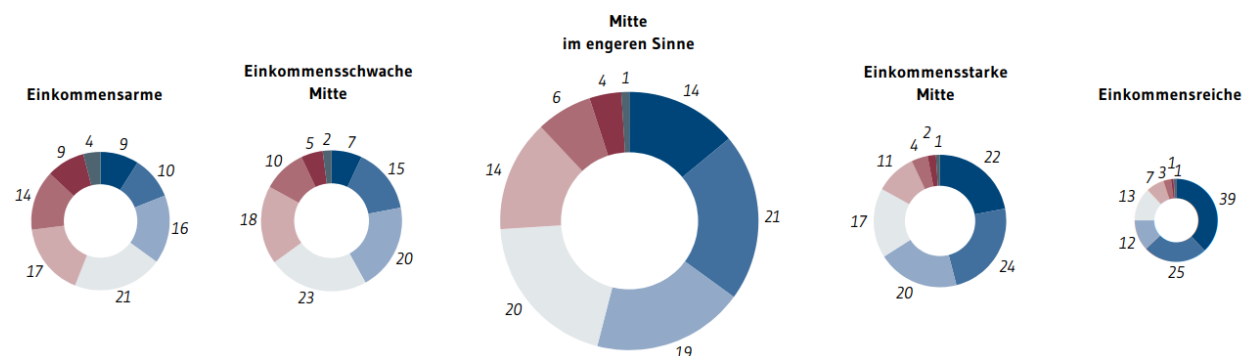
Quelle: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-elektroautos/> Zugriff: 04.01.2023.

		Kleinwagen/Kompaktklasse	Mittel-/Oberklasse
Super	E5	10,90	13,15
Super E10	E10	10,57	12,75
Diesel	B7	9,40	10,59
Strom		7,04	6,61
Wasserstoff	H2	-	10,28

**Tabelle 2:** Energiekostenvergleich für Pkw in €/100 km (Stand: Dez. 2022).

Abbildung nach: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html> (Zugriff: 04.01.2023).

### Stellen die Mobilitätskosten für Ihren Haushalt eine Belastung dar?



Antwortkategorien:

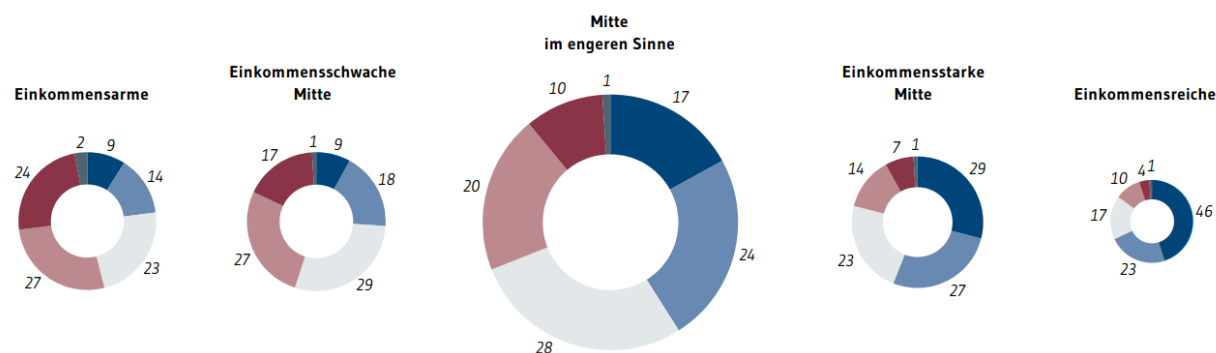
■ überhaupt keine finanzielle Belastung (1) ■ (2) ■ (3) ■ (4) ■ (5) ■ (6) ■ sehr hohe finanzielle Belastung (7) ■ weiß nicht/keine Angabe

Basis: 2021: n = 5.965 | Datenquelle: IASS | Angaben in Prozent | Abweichungen von 100 Prozent rundungsbedingt

**Diagramm 4:** Sorgen der Bevölkerung (2021) (1)

Quelle: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021.

Wie besorgt sind Sie, falls überhaupt, dass künftig die alltäglichen Mobilitätskosten für Ihren Haushalt zu hoch werden könnten?



Antwortkategorien:

■ überhaupt nicht besorgt (1) ■ (2) ■ (3) ■ (4) ■ sehr besorgt (5) ■ weiß nicht/keine Angabe

Basis: 2021: n = 5.965 | Datenquelle: IASS | Angaben in Prozent | Abweichungen von 100 Prozent rundungsbedingt

Diagramm 5: Sorgen der Bevölkerung (2021) (2)

Quelle: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021.

#### Zusatz

Diskutieren Sie auf Basis der von Ihnen bearbeiteten Aufgaben und erarbeiteten Informationen, inwieweit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft angesehen werden kann und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit Wasserstoff in Verkehr und Industrie aus einer ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Perspektive nachhaltig eingesetzt werden kann.

Nutzen Sie hierfür auch die folgenden Informationen:

#### Info

##### Wasserstoff als Weg zur CO<sub>2</sub>-Senkung?

Durch die Umstellung auf erneuerbare Energien kann es gelingen, die energiebedingten Treibhausgasemissionen im Bereich der industriellen Produktion vollständig zu vermeiden. Für den Klimaschutz müssen Industrieprozesse jedoch nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern es muss auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut und weiterentwickelt werden, um auch die rohstoff- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen möglichst weitgehend zu mindern. Für einen effizienten Einsatz von Energie und natürlichen Ressourcen muss wie in den anderen Anwendungsbereichen (Verkehr, Gebäude) überall, wo es technisch möglich ist, erneuerbarer Strom direkt genutzt werden. Wasserstoff sieht das Umweltbundesamt vor allem in der Stahl- und Chemieindustrie. [...]

Für die Eisen- und Stahlerzeugung können die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Hochofenroute praktisch vollständig vermieden werden, wenn eine Umstellung auf gasbasierte Direktreduktionsverfahren erfolgt. Diese kommen bereits zum Einsatz unter Nutzung von Erdgas. Perspektivisch können sie mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Quelle: Umwelt Bundesamt (UBA): Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#Industrie> (Zugriff: 02.06.22).

#### Video

##### Grüner Stahl (5:17 min)



<https://www.ardmediathek.de/video/quarks/gruener-stahl/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWl5YTE5MzkxLWM0MiQtNGZhNS1hZTM0LWM2OWU1NWU3Mzg3Yw>