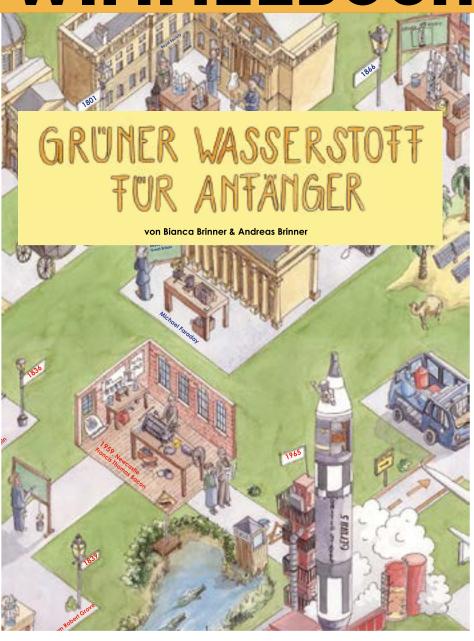
## DAS

# **ERKLÄRBUCH**

ZUM

## WIMMELBUCH



## **INHALT**

KLEINE EINFÜHRUNG IN DIE WELT DES WASSERSTOFFS	Seite 3
ERSTES WIMMELBILD EINFÜHRUNG IN DIE GESCHICHTE DER ERZEUGUNG UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF	Seite 4
ZWEITES WIMMELBILD  DAS FUNKTIONSPRINZIP DER ELEKTROLYSEZELLE UND WIE EIN ELEKTROLYSEBLOCK  AUS VIELEN ZELLEN HERGESTELLT UND GEPRÜFT WIRD	Seite 9
DRITTES WIMMELBILD  DIE FUNKTIONSWEISE UND DER AUFBAU EINES ELEKTROLYSEURS  UND EINER GASERZEUGUNGSANLAGE	Seite 11
VIERTES WIMMELBILD  E-GAS-ANLAGE "ATLANTIS"	Seite 14
FÜNFTES WIMMELBILD  PROJEKT "QUARREE100", VERSORGUNG EINES STADTQUARTIERS ZU 100 %  UND AUSFALLSICHER MIT ERNEUERBARER ENERGIE	Seite 16
SECHSTES WIMMELBILD PROJEKT "KLIMAQUARTIER NEUE WESTSTADT"	Seite 18
SIEBTES WIMMELBILD  ÖFFENTLICHER PERSONENVERKEHR UND VORFELD-TRANSPORTVERKEHR  AM FLUGHAFEN STUTTGART MIT BATTERIE- UND WASSERSTOFFFAHRZEUGEN	Seite 20
ACHTES WIMMELBILD  PROJEKT H2GENESIS – DAS NECKARTAL ZWISCHEN STUTTGART UND ESSLINGEN IST EINE MODELLREGION FÜR GRÜNEN WASSERSTOFF	Seite 23
NEUNTES WIMMELBILD  PROJEKT GREEN HYDROGEN HUB – AUF ENTDECKUNGSREISE DURCH DIE GRÜNE WASSERSTOFFFABRIK DER STADTWERKE STUTTGART AM STUTTGARTER HAFEN	Seite 26

## DAS ERKLÄRBUCH ZUM WIMMELBUCH "GRÜNER WASSERSTOFF FÜR ANFÄNGER"

#### Kleine Einführung in die Welt des Wasserstoffs

Wasserstoff ist das häufigste und leichteste Element im heute bekannten Universum. Es besteht nur aus einem Proton als Kern und einem Elektron, das diesen Kern umkreist.

Die Materie in unserem Universum besteht zu 75% aus Wasserstoff und zu 23% aus Helium. Die restlichen 2%, also alle anderen Elemente, sind aus Wasserstoff und Helium durch die Verschmelzung von Atomkernen im Inneren der Sterne entstanden: Alle auf der Erde vorkommenden Elemente wurden im Inneren von Sternen so schon vor Jahrmilliarden gebildet.

Die Sterne bestehen am Anfang ihrer Entwicklung aus Wasserstoff und Helium. Bei der Kernfusionsreaktion im Inneren der Sterne (Kernverschmelzung in den Sternen bei sehr hohen Drücken und Temperaturen) verschmelzen vier Wasserstoffatome zu einem Heliumatom. In jeder Sekunde werden so in unserer Sonne etwa 400 Millionen Tonnen Wasserstoff zu Helium "verschmolzen". Dabei werden riesige Energiemengen frei, die in den Weltraum abgestrahlt werden.

Unsere eigene Sonne "scheint" mit einer Leistung von 380 Trilliarden Kilowatt. Davon bekommt die Erde in jeder Sekunde 175 Billionen Kilowatt ab. Ein Kilowatt ist die Leistung, die eine durchschnittliche Herdkochplatte hat.

Wasserstoff ist schon lange ein wichtiger Rohstoff für die chemische und erdölverarbeitende Industrie, hauptsächlich zur Herstellung von Düngemitteln und Kunststoffen sowie zur Verarbeitung von Erdöl zu schadstoffarm verbrennenden Kraftstoffen und hochwertigen Chemieprodukten.

Darüber hinaus wird Wasserstoff zum Schweißen und Schneiden im Maschinenbau, für viele Reinigungsprozesse in der Metallurgie, als Schutzgas in der Elektronik, als Kühlmittel in der Elektrotechnik oder auch zur Fetthärtung in der Lebensmittelindustrie benötigt.

Die Verwendung von Wasserstoff zur Nutzung als chemischer Rohstoff hat die Entwicklung der Wasserstofftechnik in den letzten 100 Jahren entscheidend bestimmt. Der heutige Weltbedarf an Wasserstoff beträgt etwa 500 Milliarden Kubikmeter pro Jahr, davon benötigen wir in Deutschland etwa 19 Milliarden Kubikmeter. Es wird erwartet, dass der Bedarf an Chemie-Wasserstoff und auch der für die Energieerzeugung stark zunehmen.

Wasserstoff wird heute nahezu ausschließlich aus fossilen Rohstoffen mit fossiler Energie und Wasser hergestellt. Nur etwa 4 % des benötigten Wasserstoffs für die chemische Industrie werden heutzutage durch Elektrolyse aus Wasser erzeugt.

#### Und was ist nun grüner Wasserstoff?

Wasserstoff wird grüner Wasserstoff genannt, wenn er ausschließlich durch Wasserelektrolyse und mit erneuerbarer Energie hergestellt wird.

#### **ERSTES WIMMELBILD**

## EINFÜHRUNG IN DIE GESCHICHTE DER ERZEUGUNG UND NUTZUNG VON WASSERSTOFF



Diese Wimmelbuchseite zeigt einige wichtige Forscher, Entwickler und Projekte zur Geschichte der Wasserstofferzeugung mit Elektrolyse sowie der Stromerzeugung aus Wasserstoff mit der Brennstoffzelle. Die Geschichte beginnt mit der ersten Entdeckung der Wasserelektrolyse im Jahr 1800 und reicht bis heute. Der obere blaue Wimmelbildweg ab 1800 zeigt den Entwicklungspfad der Elektrolyse mit den wichtigsten Entdeckern. Der untere rote Weg ab 1836 zeigt einige Entwicklungsstationen und Forscher der Brennstoffzelle.

#### Geschichte der Wasserstofferzeugung mit Elektrolyse

Wasserstoff- und Sauerstoffgas durch die Zersetzung von Wasser mit elektrischem Strom zu erzeugen nennt man "Elektrolysereaktion" oder auch elektrochemische Reaktion. Man kann sie auch umkehren, also Wasserstoff- und Sauerstoffgas, z.B. aus der Luft, wieder zu Wasserdampf zusammensetzen und dabei elektrischen Strom gewinnen. Diese umgekehrte elektrochemische Reaktion nennt man "Brennstoffzellenreaktion". Da bei uns Wasserstoff fast ausschließlich als Wasser und nicht als Gas vorkommt, wurde vor über 220 Jahren zuerst die mit Wasser arbeitende Elektrolysereaktion entdeckt. Erst rund 40 Jahre später, nachdem man Wasserstoffgas erzeugen und speichern konnte, wurde auch die umgekehrte Brennstoffzellenreaktion entdeckt.



Am Anfang dieser Entdeckungsreise steht die Erfindung des Italieners **ALESSANDRO GIUSEPPE ANTONIO ANASTASIO VOLTA** aus Como, der um das Jahr 1800 die sogenannte Volta'sche Säule entdeckt hat. Das ist der Vorläufer der heutigen Batterie. Diese Volta'sche Säule erzeugt elektrische Gleichstromenergie und ist der erste elektrochemische Apparat. Ohne Gleichstrom hätte man wahrscheinlich nicht die Elektrolysereaktion entdecken können. Die Erfindung der Volta'schen Säule war so bedeutend, dass Alessandro Volta seine Erfindung 1801 dem französischen Kaiser Napoleon Bonaparte in

Paris vorführte und auch dem berühmten britischen Wissenschaftler Sir Josef Banks, Präsident der Royal Society in London, in einem Brief genau beschrieb. Viele andere berühmte Forscher sind dadurch auf die Erfindung von Alessandro Volta aufmerksam geworden und haben daraufhin mit der Volta'schen Säule Experimente gemacht.



Zwei dieser Forscher waren der britische Chirurg **ANTHONY CARLISLE** aus Stillington und der Chemiker **WILLIAM NICHOLSON** aus London. Sie haben gemeinsam im Jahr 1800 in London die Experimente von Alessandro Volta wiederholt und Gleichstrom mit zwei Drähten durch ein mit Wasser und etwas aufgelöstem Salz gefülltes Rohr geleitet. Dabei entdeckten die beiden zufällig das Prinzip der Wasserelektrolyse, weil an den beiden Drähten zwei Gase entstanden und als kleine Blasen aus dem Wasser aufstiegen.



Der deutsche Physiker und Philosoph **JOHANN WILHELM RITTER** aus dem winzigen Örtchen Samitz bei Haynau hat ebenfalls im Jahr 1800 eine verbesserte Elektrolysezelle gebaut, indem er über die Drähte, die in ein größeres Wassergefäß eingetaucht waren, jeweils ein in das Wassergefäß getauchtes Gassammelrohr befestigt hat, mit dem er beide Gase auffangen konnte. Er stellte fest, dass sich an dem einen Draht doppelt so viel Gas wie am anderen sammelte. Mit jedem der beiden Gase hat er einen chemischen Versuch durchgeführt und herausgefunden, dass das Gas, von dem doppelt so viel erzeugt wurde,

Wasserstoff war und das andere Gas Sauerstoff.



Der berühmte britische Naturforscher und Experimentalphysiker **MICHAEL FARADAY** aus Newington hat sich ab 1832 mit Elektrolyse-experimenten beschäftigt. Er hat die Strommenge und die Menge des erzeugten Stoffs in einer genau festgelegten Zeitspanne gemessen. Dabei hat er festgestellt, dass es einen konstanten Zusammenhang zwischen Strommenge und Stoffmenge gibt, selbst wenn man Elektrolyse mit anderen Stoffen als Wasser macht. Dieser Zusammenhang heißt heute ihm zu Ehren Faraday-Konstante. Mit 96.485 Amperesekunden Strommenge werden zum Beispiel bei der Wasserelektrolyse immer

600 Trilliarden Atome Wasserstoff erzeugt. Diese Gasmenge nennt man in der Chemie ein Mol Wasserstoff. Darüber hinaus hat Michael Faraday zwei chemische Gesetze als Grundlage für die Erklärung der Elektrolysefunktion formuliert, die man heute Faraday'sche Gesetze nennt. Er hat auch die wichtigsten Begriffe der Elektrolyse namentlich festgelegt, wie zum Beispiel Elektrolyse, Anode, Kathode, Elektrolyt und viele mehr.



Der deutsche Chemiker **AUGUST WILHELM VON HOFMANN** aus Gießen hat sich eigentlich nicht sehr viel mit der Elektrolyse selbst beschäftigt, sondern viele chemische Verbindungen analysiert und entdeckt. Er war ein sehr guter Chemieprofessor, zuletzt an der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin, die heute Humboldt-Universität heißt. Für seine Chemievorlesungen hat er viele eigene Experimente entwickelt. Dabei ist 1866 der Hofmann'sche Zersetzungsapparat entstanden, der auf dem Prinzip einer Wasserelektrolysezelle beruht und heute noch zum Beispiel im Chemieunterricht in der Schule genutzt wird. August

von Hofmann hat sich sehr verdient gemacht um die einheitliche Ausbildung von Chemikern, hat Lehrbücher für die Ausbildung geschrieben und gründete im Jahr 1867 die Deutsche Chemische Gesellschaft.



Im deutsch-saudi-arabischen Projekt **HYSOLAR** (englisch: HYdrogen from SOLAR energy, also Wasserstoff aus Sonnenenergie) wurde von 1985 bis 1995 für die wissenschaftliche Erforschung von Elektrolyse und Brennstoffzelle und die technische Anlagenentwicklung parallel an Universitätsinstituten und Forschungseinrichtungen in Deutschland und Saudi-Arabien gearbeitet. Die Forschungsthemen waren Wasserstofferzeugung mit sonnenenergiebetriebener Elektrolyse, Entwicklung von Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff sowie Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Elektrochemie. Drei

Sonnenenergie-Elektrolyseanlagen wurden entwickelt, gebaut und betrieben: eine 2-Kilowatt-Forschungsanlage in Jeddah/Saudi-Arabien, eine 10-Kilowatt-Forschungsanlage in Stuttgart/Deutschland und eine 350-Kilowatt-Produktionsanlage bei Riyadh/Saudi-Arabien. Nach Projektende wurde die 10-Kilowatt-Anlage bis zum Jahr 2005 und die 350-Kilowatt-Anlage bis zum Jahr 2000 weiter betrieben.

#### Geschichte der Wasserstoffbrennstoffzelle

Die Geschichte der Brennstoffzelle beginnt erst fast vier Jahrzehnte nach der Entdeckung des Prinzips der Elektrolyse, der intensiven Beschäftigung mit den Grundlagen der Elektrochemie und der Entdeckung weiterer Elektrolyseprinzipien über die Wasserelektrolyse hinaus, zum Beispiel die Chlor- oder Kupferelektrolyse.



Die Entdeckungsreise der Brennstoffzelle hat der deutsche Chemiker und Physiker **CHRISTIAN FRIEDRICH SCHÖNBEIN** aus Metzingen begonnen. Er baute als Professor an der Universität Basel die erste Brennstoffzellen-Versuchsapparatur aus einem gläsernen U-Rohr, gefüllt mit Salzsäurelösung, in dem an beiden offenen Enden jeweils ein Platindraht eingetaucht war. Beide Drähte wurden mit Gas in der Lösung umspült: der eine Draht mit Wasserstoff und der andere mit Sauerstoff. Zwischen den Drähten konnte Schönbein im Jahr 1838 eine elektrische Spannung messen und hatte damit das Brennstoff-

zellenprinzip entdeckt, also die Umkehrung der Elektrolysereaktion. Aus den beiden Gasen entsteht auf der Sauerstoffseite durch die Reaktion von zwei Atomen Wasserstoff mit einem Atom Sauerstoff wieder ein Molekül Wasser. 1838 und 1839 hat Christian Schönbein seine Versuchsergebnisse veröffentlicht, zum Beispiel in einem Artikel eines britischen Magazins.



Der britische Jurist und Physikochemiker **WILLIAM ROBERT GROVE** aus Swansea las die Artikel von **CHRISTIAN SCHÖNBEIN** zum Brennstoffzelleneffekt. Er führte eigene Experimente mit einer selbst entwickelten Versuchsapparatur durch und veröffentlichte auch seine Versuchsergebnisse. Ab November 1839 begann ein reger Wissensaustausch zwischen den beiden und dem berühmten Naturforscher **MICHAEL FARADAY** zum Thema Brennstoffzelle. Die nannte man zu der Zeit noch Gasbatterie. Im Jahr 1842 hat dann **WILLIAM GROVE** den ersten Brennstoffzellenapparat mit vier Zellen gebaut und betrieben.

Mit diesem Apparat konnte er zum ersten Mal elektrischen Strom durch eine elektrische Last fließen lassen, also elektrische Energie aus Wasserstoff und Sauerstoff erzeugen.



In Europa war man sehr bald begeistert von der Brennstoffzelle zur Stromerzeugung in der Hoffnung, damit Kohle und Dampfmaschinen ersetzen zu können. Der berühmte französische Science-Fiction- und Romanschriftsteller **JULES VERNE** aus Nantes hat 1874 den Roman "Die geheimnisvolle Insel" veröffentlicht. Darin sagt der Ingenieur Cyrus Smith in einem Gespräch, dass die Kohlevorräte sehr endlich sind und deshalb das Wasser, zerlegt in seine Bestandteile Wasserstoff- und Sauerstoffgas, die Kohle der Zukunft sein wird und diese neue "Kohle" zur unerschöpflichen und bezüglich ihrer Intensität

ganz ungeahnten Quelle der Wärme und des Lichts werden wird. Damit beschreibt Jules Verne sowohl das Elektrolyse- als auch das Brennstoffzellenprinzip, ohne beide direkt zu nennen.

Zwischen 1870 und etwa 1940 wurde sowohl experimentell als auch theoretisch viel an der Brennstoffzelle geforscht und viele neue Entdeckungen wurden gemacht. Insbesondere wurden neben der Brennstoffzelle mit flüssigen Elektrolyten auf Wasserbasis zur internen Ionenleitung und Wasserstoff als Brennstoff auch weitere wichtige Brennstoffzellenarten entwickelt und vermessen. Dabei kamen andere Brennstoffe und feste Membranstrukturen zur Ionenleitung und hauchdünne Elektroden zum Einsatz. Die praktische Umsetzung zur Nutzung der Brennstoffzelle kam jedoch nicht voran.



Ab 1932 arbeitete der britische Ingenieur **FRANCIS THOMAS BACON** aus Billericay mit seinem Team am berühmten King's College in Cambridge an der Entwicklung und technischen Realisierung der alkalischen Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle ursprünglich für den U-Boot-Einsatz. Nach über 20 Jahren Entwicklungszeit stellte er 1959 das erste praktisch verwendbare 5-Kilowatt-Brennstoffzellensystem vor. Die Patente dazu wurden an die amerikanische Firma Pratt & Whitney lizensiert, die daraus ein langlebiges alkalisches Brennstoffzellensystem für die **APOLLO-RAUMSCHIFFE** des Mondlandeprogramms

(1966 – 72) entwickelte, das zugleich elektrische Energie und Wärme für den Raumschiffbetrieb, Wasser für die Luftbefeuchtung und Trinkwasser für die Astronauten bereitstellte. Es wurden insgesamt 34 Apollo-Raumschiffe gebaut. 21 Raumschiffe sind im Weltraum geflogen, davon gingen neun Flüge zum Mond.



Der Vorläufer des Apollo-Raumschiffs war das zweisitzige **GEMINI-RAUMSCHIFF**, das nur für den Flug in der Erdumlaufbahn konstruiert war. Von diesem Modell sind zwölf Raumschiffe gebaut worden und zwischen 1964 und 1966 im Weltraum geflogen. Ab Gemini 5 im Jahr 1965 waren alle Raumschiffe dieses Namens für die Energie- und Wasserversorgung mit Wasserstoff-Sauerstoff-Membran-Brennstoffzellen ausgerüstet.

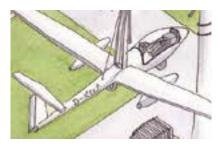


Parallel zur Entwicklung von Brennstoffzellen für die Raumfahrtprogramme der NASA wurde auch an der Brennstoffzellennutzung in Elektrofahrzeugen für den Straßenverkehr geforscht. 1966 benötigte ein Entwicklungsteam des amerikanischen Autoherstellers General Motors (GM) aus Detroit nur zehn Monate, um das erste Brennstoffzellenauto, den **GM ELECTROVAN**, zu entwickeln und zu bauen. Wegen der ersten Ölkrise ab 1973 ist die Weiterentwicklung und Realisierung der erneuerbaren Energie sowie die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff als sogenannter Sekundärenergieträger zur großtechnischen

Energieversorgung schnell vorangekommen. Im Verkehr war vor allem die Entwicklung und Nutzung von Straßenfahrzeugen mit Brennstoffzelle von hohem Interesse, insbesondere in Europa und Nordamerika. Viele Autobauer stellten ab 1990 Prototypen und Vorserienfahrzeuge mit verschiedenen Antriebskonzepten auf Brennstoffzellenbasis vor. Ab 2003 entstanden parallel auch die ersten Forschungsfahrzeuge, um die Technologie unabhängig zu erforschen, zu entwickeln und Ergebnisse für andere Anwendungen bereitzustellen.



Im Jahr 2005 wurde zum Beispiel vom **DEUTSCHEN ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DLR)** in Stuttgart im Rahmen des Projektes **HYLITE** und auf der Basis eines bereits existierenden Elektrofahrzeugs ein Brennstoffzellenantrieb entwickelt, zugelassen und der Öffentlichkeit vorgestellt, der aus vielen neu entwickelten Komponenten von teilnehmenden Firmen der Automobilzulieferindustrie gebaut wurde.



Parallel zu dieser Entwicklung begann auch am **DLR** in Stuttgart zusammen mit dem Segelflugzeughersteller **LANGE AVIATION** in Zweibrücken die Entwicklung eines brennstoffzellenbetriebenen Motorseglers: Das Forschungsflugzeug **DLR ANTARES H2** konnte von einem Piloten gesteuert mit Brennstoffzellenleistung direkt vom Boden abheben. 2009 startete dieses Flugzeug mit dem Testpiloten des Flugzeugherstellers am Hamburger Flughafen zu seinem Erstflug.

### DAS FUNKTIONSPRINZIP DER ELEKTROLYSEZELLE UND WIE EIN ELEKTROLYSEBLOCK AUS VIELEN ZELLEN HERGESTELLT UND GEPRÜFT WIRD



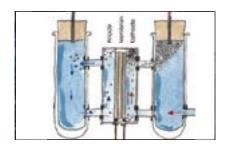
#### **Elektrolyseblock und Blockfabrik**

Dieses Wimmelbild zeigt, wie eine Elektrolysezelle aus Strom und flüssigem Wasser Wasserstoff- und Sauerstoffgas erzeugt. Für 1.000 Liter Wasserstoff und 500 Liter Sauerstoff braucht man etwas mehr als 800 Gramm flüssiges Wasser.



Unten rechts im Wimmelbild sieht man einen großen schweren **ELEKTROLYSEBLOCK** mit vielen einzelnen Zellen auf seinem blauen Haltegestell. In jeder Zelle wird Wasserstoff und Sauerstoff produziert. Bis zu 300 Zellen können heute in einem Block eingebaut sein. Hinter der Bildklappe erklären wir das **FUNKTIONSPRINZIP DER ELEKTROLYSE** anhand einer einzelnen Elektrolysezelle etwa in der Bildmitte. In dieser Zelle gibt es zwei Stromelektroden. Die eine heißt Anode und ist mit dem Pluspol der gelben Batterie verbunden. Die Batterie ist die Stromquelle für den Elektrolysebetrieb. Die andere Elektrode nennt man

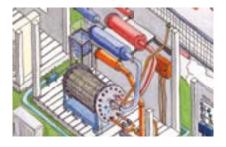
Kathode. Sie ist mit dem Minuspol der Batterie verbunden.



An der Anode wird der Sauerstoff produziert und an der Kathode der Wasserstoff. Beim Sauerstoff sieht man weniger Gasbläschen als beim Wasserstoff. Das liegt daran, dass immer zwei Teile Wasserstoff und ein Teil Sauerstoff aus zwei Molekülen Wasser hergestellt werden, egal wie viel Strom fließt und Gas erzeugt wird. In der Zelle ist zwischen Anode und Kathode noch eine Membran eingezeichnet. Die sorgt in jeder Zelle dafür, dass sich die Gasbläschen der beiden Gase nicht mischen. Beide Gase sammeln sich oben in der Zelle, weil sie leichter als Wasser sind. Die beiden Gase werden dann in zwei Gasabtrennungs-

behälter abgeführt, sammeln sich dort und können dann einzeln gespeichert oder direkt genutzt werden.

Im Bild ist in der roten Gasflasche der Wasserstoff und in der dunkelblauen Flasche der Sauerstoff gespeichert. In den beiden Behältern der Gasabtrennung ist der Wasservorrat für die Elektrolyse enthalten, der von außen nachgefüllt werden kann. Immer, wenn man die Energiequelle einschaltet, fließt sofort elektrischer Strom durch die Zelle, und es wird sofort Gas produziert. Wenn man den Strom wieder ausschaltet, hört die Gasproduktion sofort wieder auf. Damit man sehr viel Gas erzeugen kann, werden viele Elektrolysezellen zu einem Elektrolyseblock zusammengebaut. Das wird in einer Blockfabrik gemacht, wie sie im Wimmelbild gezeigt ist.



Aus den vielen Einzelteilen wie Stromelektroden, Membrane, Bleche, Gehäuseeinzelteile, Dichtungen und schwere Deckel, die Endplatten heißen, werden am Fließband ein Block nach dem anderen zusammengebaut, mit den Endplatten abgedichtet und auf ein Haltegestell montiert – von Hand für wenige Blöcke oder mit Robotern für sehr viele Blöcke. Wenn ein Block fertig ist, wird von einer unabhängigen Prüfstelle getestet, ob er dicht ist und alles eingebaut wurde. Nach der Verpackung kann er dann zu einer Elektrolyseanlage transportiert werden. Einzelne Blöcke werden nicht direkt abtransportiert, sondern

noch in der Fabrik auf ihre Funktion, Haltbarkeit und Sicherheit in einer fabrikeigenen Elektrolyseblock-Testanlage ausprobiert. Im Wimmelbild ist diese unten links mit einem Elektrolyseblock gezeigt.

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Elektrolyseblöcke (ebz-group.com)
  https://www.ebz-group.com/leistungsportfolio/elektrolysebloecke
- EBZ Gruppe steigt in die Entwicklung und Produktion von Elektrolyseblöcken ein (ebz-group.com)

https://www.ebz-group.com/ebz-gruppe/aktuelles/news/ebz-gruppe-steigt-in-die-entwicklung-und-produktion-von-elektrolysebloecken-ein

PowerPoint-Präsentation (bw-elektrolyse.de)
 <a href="https://www.bw-elektrolyse.de/fileadmin/user\_upload/Veranstaltungen/20220408">https://www.bw-elektrolyse.de/fileadmin/user\_upload/Veranstaltungen/20220408</a> Unterlagen ElyFab-BW Workshop-exp.pdf

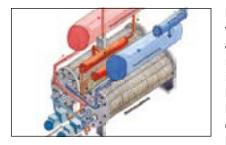
#### DRITTES WIMMELBILD

## DIE FUNKTIONSWEISE UND DER AUFBAU EINES ELEKTROLYSEURS UND EINER GASERZEUGUNGSANLAGE



#### **Elektrolyseur und Gasfabrik**





Stell dir vor, du hast einen Elektrolyseblock, wie er im vorigen Wimmelbild zusammengebaut wurde, und du willst mit ihm Wasserstoff und Sauerstoff erzeugen. Dann musst du um den Elektrolyseblock herum noch eine Menge Einzelteile und Apparate stellen und sie mit dem Elektrolyseblock verbinden-ungefähr so, wie es in dem kleinen Bild mit der Elektrolysezelle gezeigt ist, nur viel größer. Diese neue Maschine mit dem Elektrolyseblock als wichtigstem Teil heißt ELEKTROLYSEUR. Alle Einzelteile und Apparate sind in einem gemeinsamen Gehäuse eingebaut. Unten rechts im Wimmelbild ist diese **ELEKTROLYSEMASCHINE** erklärt. Damit möglichst viel Wasserstoff- und Sauerstoffgas aus Wasser erzeugt werden kann, hat diese Maschine sogar zwei Elektrolyseblöcke nebeneinander. Wenn man die Bildklappe auf der Elektrolysemaschine öffnet, sieht man die wichtigsten Teile der Maschine und wie die Gase und das Wasser in dem Elektrolyseur fließen. Der Elektrolyseur hat zwei getrennte Gaskreisläufe, jeweils einen für Wasserstoff und Sauerstoff und einen dritten Kreislauf für das Wasser. In den beiden Elektrolyseblöcken kommen die drei Kreisläufe zusammen. Solche Elektrolyseure können heute in einer Fabrik in großer Stückzahl hergestellt werden.



Das große Wimmelbild zeigt eine Gaserzeugungsfabrik, die sogar drei Elektrolyseure haben soll. Der **ERSTE ELEKTROLYSEUR** ist schon fertig und in Betrieb. Der **ZWEITE ELEKTROLYSEUR** ist noch geöffnet, es werden gerade die Elektrolyseblöcke geliefert und eingebaut. Für den **DRITTEN ELEKTROLYSEUR** wird gerade das Fundament fertiggebaut und die ersten Teile des Gehäuses sind schon aufgestellt. In der Gasfabrik sind um die drei Elektrolysemaschinen herum alle anderen Apparate einzeln aufgestellt, die gebraucht werden, damit die Elektrolyseure Gas erzeugen können. Der Bau einer solchen Gasfabrik und ihr Betrieb

werden natürlich auch nach festen Vorschriften und Gesetzen regelmäßig überwacht.





Das Wasser, das die Elektrolyseure in Wasserstoff und Sauerstoff umwandeln, muss immer wieder nachgefüllt werden. Dieses Wasser wird genauso wie bei der Herstellung von Trinkwasser gereinigt und ein Vorrat davon angelegt. Der dazu notwendige Apparat heißt WASSER-**REINIGUNG**. Wenn das Wasser, das die Gasfabrik bekommt, schon so sauber wie Trinkwasser ist, muss nur noch der Kalk herausgefiltert werden, damit die Elektrolysezellen nicht verstopfen. Für den Elektrolysebetrieb brauchen wir elektrischen Strom. Der Strom kann ganz aus der Nähe kommen, zum Beispiel von Sonnen- oder Windenergie-Kraftwerken. Das nennt man direkte Stromkopplung, weil der Strom direkt dort erzeugt wird, wo er gebraucht wird. Wenn das nicht geht, kann man die Gasfabrik auch an das Stromnetz anschließen. Dieser Netzstromanschluss ist im Bild neben der Wasserreinigung aufgestellt und heißt **STROMVERSORGUNG**. Jeder Elektrolyseur hat ein eigenes elektrisches Gerät, das den Strom so umwandelt, dass er immer die richtige Stärke für die Elektrolyseblöcke hat. Dieses Gerät heißt GLEICHRICHTER und funktioniert wie ein großes Netzteil für dein Handy oder deinen Computer, nur viel stärker. Mit dem Gleichrichter

kann man genau steuern, wie viel elektrischer Strom in den Elektrolyseblock fließt und damit auch, wie viel Gas erzeugt wird. Im Gehäuse neben dem **ERSTEN ELEKTROLYSEUR** sieht man einen solchen Gleichrichter.



Damit der Wasserstoff und Sauerstoff sicher verwendet werden können, dürfen die beiden Gase kein Wasser, keine kleinen Partikel und anderen Gasreste aus dem Wasser mehr enthalten. Deswegen werden sie separat in zwei **GASREINIGUNGEN** gereinigt. Das Gehäuse der **WASSERSTOFFGASREINIGUNG** in unserem Bild ist offen, damit man sehen kann, was alles eingebaut ist.



Jetzt sind die beiden Gase fertig für die Nutzung und können in großen **GASTANKS** gespeichert oder mit einer Gasleitung weiter transportiert werden. Damit möglichst viel Gas in jeden Speicher oder in die **PIPE-LINE** passt, wird jedes Gas einzeln mit einer Maschine namens Gaskompressor unter Druck gesetzt. Das bedeutet, dass die Gasmoleküle mechanisch enger zusammengepresst werden, damit mehr Gas in einen Speicher oder die Pipeline passt.



Ein gutes Beispiel sind die **SAUERSTOFFFLASCHEN**, die der **KRAN-KENWAGEN** im Bild gerade abholt. Eine heute übliche Gasflasche hat 50 Liter Gasinhalt bei dem Druck unserer Atmosphäre, die wir einatmen. Wenn in der Flasche Sauerstoff ist und ein Mensch ungefähr zwei Liter Sauerstoff pro Minute braucht, dann enthält die Flasche für 25 Minuten Sauerstoff für einen Menschen. Mit dem Gaskompressor können die Moleküle soweit zusammengepresst werden, dass die Flasche zweihundert Mal so viel Sauerstoff unter Druck aufnehmen kann. Die Flasche enthält dann also Sauerstoff für fast dreieinhalb

Tage für einen Menschen. Die Flasche muss natürlich entsprechend stabil gebaut sein, um den Druck auszuhalten, und der Sauerstoff wird langsam über einen Druckminderer abgegeben, sodass der Druck zum Atmen derselbe Druck ist, wie ihn unsere Atmosphäre hat.

In einer Pipeline ist der Druck für den Wasserstoff nicht so hoch wie in der Flasche, sondern nur etwa dreißig bis siebzig Mal so hoch wie der Atmosphärendruck.

Aber die Elektrolysemaschine macht noch mehr: Sie wird beim Arbeiten warm und diese Wärme können wir zum Heizen nutzen. Man nennt das Nahwärme. So hilft uns die Maschine, nicht nur Gase zu produzieren, sondern auch unser Zuhause warm zu halten!

Das heißt, dass die Gasfabrik aus elektrischem Strom und Wasser drei verschiedene Dinge herstellt: Wasserstoff zur Energiespeicherung (als Kraftstoff für Fahrzeuge oder als chemischen Rohstoff für Kunststoffe oder Medikamente), Sauerstoff (beispielsweise zum Atmen) und Wärme (zum Heizen oder für Warmwasser).

#### **ZUM WEITERLESEN:**

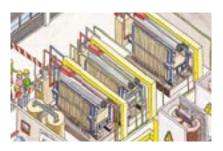
- Ecoclean EcoLyzer Home https://ecolyzer.com/de/
- ZSW: Die Elektrolyse geht in Serie (zsw-bw.de)
   <a href="https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/die-elektrolyse-geht-in-serie.html">https://www.zsw-bw.de/presse/aktuelles/detailansicht/news/detail/News/die-elektrolyse-geht-in-serie.html</a>
- Ecolyzer BW: Elektrolyseur aus Forschungsprojekt startet Regelbetrieb H2-news.de https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/ecolyzer-bw-elektrolyseur-ausforschungsprojekt-startet-regelbetrieb/

#### VIERTES WIMMELBILD

### **E-GAS-ANLAGE** "ATLANTIS"



In der Nähe der Stadt Werlte in Niedersachsen wurde ab 2012 die erste moderne Gaserzeugungsanlage für Wasserstoff, Sauerstoff aus der Elektrolyse mit erneuerbarer Energie und zur Herstellung von künstlichem Erdgas aus Wasserstoff und biologischem Kohlenstoffdioxid aus einer danebenstehenden Biogasanlage gebaut. Ein Jahr später wurde "Atlantis" in Betrieb genommen. Das künstliche Erdgas wird in eine normale Erdgaspipeline eingespeist, weil es chemisch keinen Unterschied zwischen künstlichem und fossilem Erdgas gibt.





Im Wimmelbild sieht man alle wichtigen Teile dieser Anlage. Auf der rechten Seite in der Mitte sind in einem eigenen Gebäude DREI GROßE ELEKTROLYSEURE mit DREI GROßEN GLEICHRICHTERN, einer WASSERREINIGUNGSANLAGE in einem separaten Raum und ZWEI GROßEN GASKOMPRESSOREN in einem weiteren Raum daneben aufgebaut. Neben den Gaskompressoren sieht man einen stehenden WASSERSTOFFBEHÄLTER. Heute ist in der Anlage viel los, denn gerade ist Tag der offenen Tür mit Besichtigung. Im ersten Stock des Gebäudes neben dem Behälter ist der große KONTROLLRAUM MIT FENSTERN, dort können die Mitarbeiter und Besucher direkt auf die Elektrolyseure und die Besuchergruppe vor einem Elektrolyseur schauen.



Gegenüber von der Wasserreinigung und den Gaskompressoren in der linken unteren Hälfte des Wimmelbilds sind die **DREI GROßEN ROTEN WASSERSTOFFSPEICHER (H<sub>2</sub>-SPEICHER)** und ein grüner Behälter für **STICKSTOFFGAS (N<sub>2</sub>)** aufgestellt. Stickstoff wird gebraucht, wenn man die Elektrolyseanlage reparieren will. Mit Stickstoffgas werden alle Behälter und Leitungen vor dem Öffnen gereinigt.





Gegenüber vom Kontrollraum ist ein hoher Turm mit einem halb so hohen Gebäudeteil daran aufgebaut. Hier wird in dem HOHEN STE-HENDEN BEHÄLTER, der eine Art grobe Sandschüttung mit Nickelbeschichtung der Körner enthält, unter Druck Wasserstoffgas und Kohlenstoffdioxidgas eingeleitet. Unter dem Druck und hoher Temperatur, etwa so hoch wie in einem Backofen, entsteht aus den beiden Gasen reines Erdgas, METHAN genannt, und Wasserdampf. Der Wasserdampf wird beim Gaskühlen in flüssiges Wasser verwandelt und kann in der Elektrolyse wiederverwendet werden. Das künstliche Erdgas wird in eine Pipeline eingeleitet. Bei dieser Methanerzeugung entsteht Wärme mit hoher Temperatur, die in einer Gastrennungsanlage (oben links im Wimmelbild zu sehen und AMINWÄSCHE genannt) dazu benutzt wird, das Kohlenstoffdioxid vom Biogas zu trennen. Biogas aus Pflanzen- und Fleischabfällen ist eigentlich auch nichts weiter als hauptsächlich Methan und ein großer Anteil von Kohlenstoffdioxid. Beide Methangase, das Biomethan und das künstliche Erdgas, können direkt als Ersatz für fossiles Erdgas genutzt werden.



Da sehr viel Wärme erzeugt wird, gibt es eine **WÄRMEZENTRALE**, ganz links in der Bildmitte, die die Wärme verteilt und auch für den Betriebsbeginn Wärme aus Strom mit einer Art Tauchsieder erzeugen kann. Die Wärme aus der Methanerzeugung wird nicht nur für die Aminwäsche sondern auch für die Erwärmung der Biogasbehälter zur Gaserzeugung und für die Gebäudeheizung der E-Gas- und der Biogasanlage genutzt.

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Atlantis Plants: Germany | HY2GENhttps://www.hy2gen.com/plants-atlantis
- E-Gas-Anlage im industriellen Maßstab wasserstoff-niedersachsen.de
   <a href="https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/e-gas-anlage-im-industriellen-massstab/">https://www.wasserstoff-niedersachsen.de/e-gas-anlage-im-industriellen-massstab/</a>
- movingpower POWER-TO-GAS WERLTE
  <a href="https://www.movingpower.at/projekte/power-to-gas-werlte/">https://www.movingpower.at/projekte/power-to-gas-werlte/</a>
- NET2017\_Goetze.pdf (efzn.de)

  <a href="https://www.efzn.de/fileadmin/Sites/EFZN/Images/Ereignisse/2017-11-NET10/Vortraege/">https://www.efzn.de/fileadmin/Sites/EFZN/Images/Ereignisse/2017-11-NET10/Vortraege/</a>

  NET2017 Goetze.pdf
- synthetisches-erdgas-aus-werlte-data.pdf (ihk.de)
  <a href="https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/1067990/522a673da42afeb01e02a8f-3d4c261e8/synthetisches-erdgas-aus-werlte-data.pdf">https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/1067990/522a673da42afeb01e02a8f-3d4c261e8/synthetisches-erdgas-aus-werlte-data.pdf</a>

## PROJEKT "QUARREE100", VERSORGUNG EINES STADTQUARTIERS ZU 100 % UND AUSFALLSICHER MIT ERNEUERBARER ENERGIE



Der Stadtteil **RÜSDORFER KAMP** der Stadt Heide in Schleswig-Holstein ist schon über 570 Jahre alt. Rüsdorf wurde zum ersten Mal im Jahr 1447 erwähnt. Das Dorf Heide ganz in der Nähe hat sich seit seiner Gründung 1434 kontinuierlich vom Dorf zur Stadt entwickelt und ist immer näher an Rüsdorf herangewachsen. Rüsdorf ist dagegen ein Dorf geblieben. 1925 wurden Rüsdorf und Heide vereinigt und sind seitdem die Stadt Heide mit dem Stadtteil Rüsdorfer Kamp. Zwischen der Innenstadt von Heide und Rüsdorf wurde 1877 bis 1878 die **BAHNLINIE** gebaut, die heute **VON HAMBURG NACH WESTERLAND AUF DER INSEL SYLT** an der Grenze zu Dänemark führt. Die Stadt Heide ist nur 20 Kilometer von der Nordsee entfernt.



Das Rüsdorfer Kamp mit seinem dörflichen Charakter und über 500 Bewohnern war zwischen 2017 und 2024 als Beispiel für ein typisches Stadtviertel einer mittelgroßen Stadt in Deutschland Teilnehmer an einem Stadtentwicklungsprogramm zur Einführung von erneuerbarer Energie in eine zentrale Stadtviertel-Energieversorgung mit Strom und Wärme für alle. Das Stadtviertel mit vielen alten Häusern verändert sich nur langsam. Es erneuert und vergrößert sich mit Hausrenovierungen, dem Bau neuer Häuser und neu hinzukommenden Bewohnern. Die Stadtviertel-Energieversorgung muss deshalb so gemacht sein,

dass sie mitwächst, sich mit neuen Energiequellen erweitern lässt und zuverlässig ist. Das wurde in den sieben Entwicklungsjahren in dem Projekt QUARREE100 mit BETEILIGUNG DER STADT HEIDE UND DER BEWOHNER DES RÜSDORFER KAMPS gemacht. Dafür wurden regelmäßig Treffen und Feste am grünen INFO-CONTAINER des Projekts QUARREE100 veranstaltet, zum Beispiel auch auf dem Boßelplatz für den friesischen National-Ballsport (Boßeln), wie hier im Wimmelbild zu sehen ist.

16





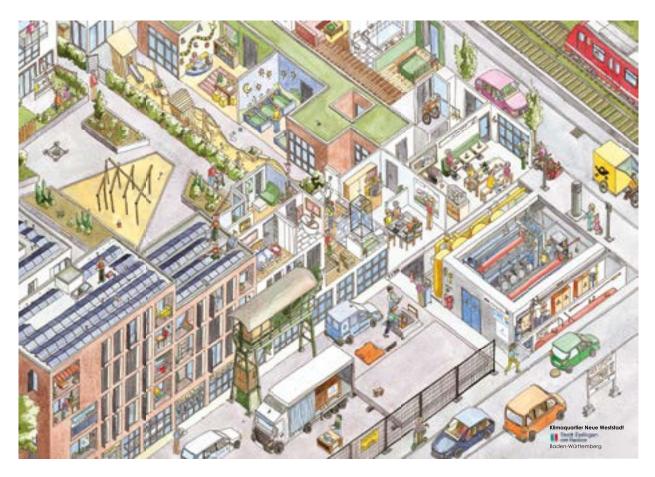
Für das Stadtviertel wurde ein neues, erweiterbares **STROM- UND EIN** WÄRMENETZ geplant. Beides wird mit der neuen ENERGIE-VERSORGUNGSZENTRALE an der BAHNLINIE oben rechts im Wimmelbild verbunden. Alle Häuser des Viertels, von den ältesten Kapitänsund Bauernhäusern an der Rüsdorfer Straße guer durch das Stadtviertel bis zu den neuesten Wohnhäusern an der Berliner Straße ganz oben in der Mitte des Wimmelbildes, können ihre Heizwärme aus der Energiezentrale bekommen und ihre PHOTOVOLTAIKANLAGEN auf den Dächern an das Stadtviertel-Stromnetz anschließen lassen. In der Energiezentrale gibt es eine GROß-WÄRMEPUMPE mit WÄRME-SPEICHER, ein BLOCKHEIZKRAFTWERK und einen Gaskessel für besonders kalte Tage zur Wärmeversorgung des Stadtviertels. Elektrische Energie kann von den **PHOTOVOLTAIKANLAGEN** im Stadtviertel, von den Windkraftanlagen rund herum oder aus dem öffentlichen Netz kommen und in einem Batteriespeicher zwischengespeichert werden. Elektrische Energie, die nicht gebraucht wird, kann auch mit einer Elektrolyseanlage als WASSERSTOFFGAS GESPEICHERT werden. Mit dem Blockheizkraftwerk kann Erdgas oder Biogas von außen oder

selbst gespeicherter Wasserstoff zur Strom- und Wärmeerzeugung genutzt werden. Da die Energiezentrale im Rüsdorfer Kamp steht und eigene Räume hat, kann sie auch erweitert oder umgebaut werden. Funktioniert mal eine Energiequelle für Strom oder Wärme nicht, ist immer noch ein Ersatz vorhanden, der sofort einspringen kann.

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- QUARREE100 region-heide.de https://www.region-heide.de/projekte/quarree100.html
- Rüsdorfer Kamp / QUARREE100 heide.de
  <a href="https://www.heide.de/rathaus-buergerservice/bauprojekte-und-stadtentwicklung/ruesdorfer-kamp-quarree100.html">https://www.heide.de/rathaus-buergerservice/bauprojekte-und-stadtentwicklung/ruesdorfer-kamp-quarree100.html</a>
- QUARREE100 Universität Bremen (uni-bremen.de) https://www.uni-bremen.de/res/forschung/quarree100

### PROJEKT "KLIMAQUARTIER NEUE WESTSTADT"





Das neueste und modernste Stadtviertel von Esslingen am Neckar ist das Klimaquartier "Neue Weststadt Esslingen" auf dem Gelände des alten Güterbahnhofs nahe am Zulauf des Roßneckar-Kanals in den Neckar. Das Klimaquartier besteht aus zwei Teilen: Der eine Teil umfasst das Wohnquartier aus drei Wohnblöcken mit Innenhöfen und fast 450 Wohnungen, mehr als zwanzig Gewerbeflächen und einer Kindertagesstätte. Der andere Teil besteht aus dem Erweiterungsbau der Esslinger Hochschule für Technik. In Zukunft kann das Klimaquartier auf drei Flächen noch um einen weiteren Wohnblock, ein Büro- und

Geschäftsgebäude und ein Hochschulgebäude erweitert werden.

Das Klimaquartier "Neue Weststadt Esslingen" ist ab 2018 im Rahmen des öffentlich geförderten Forschungsprojekts "Klimaneutrales Stadtquartier mit zukunftsfähigem Energiekonzept" als eines von sechs Forschungsvorhaben des Förderprogramms "Solares Bauen/ Energieeffiziente Stadt" entstanden.

Dieses neu gebaute Stadtquartier hat auf allen Dächern Photovoltaikanlagen und produziert dadurch eigenen Strom. Zudem wird Windstrom von der Schwäbischen Alb eingebunden. Ökogas dient als Erdgasersatz und die Wohnblöcke werden zusätzlich mit selbst produziertem und gespeichertem Wasserstoff über Blockheizkraftwerke, Gaskessel sowie mit Wärmepumpe mit Strom und Wärme versorgt. Wohnblock D und die Hochschule nutzen auch die Abwärme der Elektrolyseanlage. Die Blockheizkraftwerke zur Strom-/ Wärmeversorgung der Wohnblöcke können sowohl mit Ökogas als auch Wasserstoff oder einer Mischung davon

betrieben werden. Deshalb ist die Strom- und Wärmeversorgung sehr ausfallsicher. Die Bewohner verfügen über eigene Elektrofahrzeuge oder können über ein internes Carsharing-Modell Elektro- und Wasserstofffahrzeuge mieten, die alle ihre Energie von der Energieversorgung des Klimaquartiers bekommen können. Dadurch reduziert sich der Kohlenstoffdioxidausstoß jedes Bewohners für Wohnen und Mobilität auf unter eine Tonne Kohlenstoffdioxid pro Jahr. Das ist ein Spitzenwert!





Der größte und komplizierte Teil der Strom- und Wärmeversorgung im Quartier ist in einer eigenen ENERGIEZENTRALE zusammengefasst, die man im rechten mittleren Teil des Wimmelbilds mit abgenommenem Deckel sieht. Normalerweise ist die Energiezentrale nicht sichtbar und ganz leise, denn sie ist unterirdisch aufgebaut. Sie befindet sich teils unter dem Quartiersplatz, teils unter dem großen WOHNBLOCK DESIRO. Er ist wie alle Gebäude im Quartier nach einer alten Lokomotive benannt als Bezug zum ehemaligen Güterbahnhof. Auf dem Platz soll später noch das Büro- und Geschäftshaus zwischen Desiro und dem ersten Hochschulgebäude gebaut werden. In der Energiezentrale gibt es unter dem öffentlichen Platz eine komplette Wasserstofferzeugungsanlage mit einer 1.000-KILOWATT-DOPPEL-ELEKTROLYSE-ANLAGE und einem WASSERSTOFFSPEICHER. Von diesem Teil ist der Deckel abgenommen, damit man hineinsehen kann. Tatsächlich gibt es diesen Deckel wirklich und er ist auch abnehmbar, damit alle Apparate von oben eingebaut werden konnten und später einmal, wenn notwendig, getauscht werden können. Der zweite Teil der Energiezentrale ist hinter der Klappe im Wimmelbild verborgen und hat keine

Apparate, die man von oben einbauen muss. Er ist deshalb im Gebäudekeller neben der Tiefgarage platziert. Dort sind die **WÄRMESPEICHER**, ein **BLOCKHEIZKRAFTWERK**, **GASKESSEL**, **WASSERAUFBEREITUNG**, **STEUERUNG UND DIE ELEKTRO- UND WÄRMEVERSORGUNG** für alle Wohnungen und Geschäfte in diesem Wohnblock eingebaut. Die anderen zwei Wohnblöcke haben auch jeweils eine Energiezentrale im Keller allerdings ohne Wasserstofferzeugung und -speicherung.

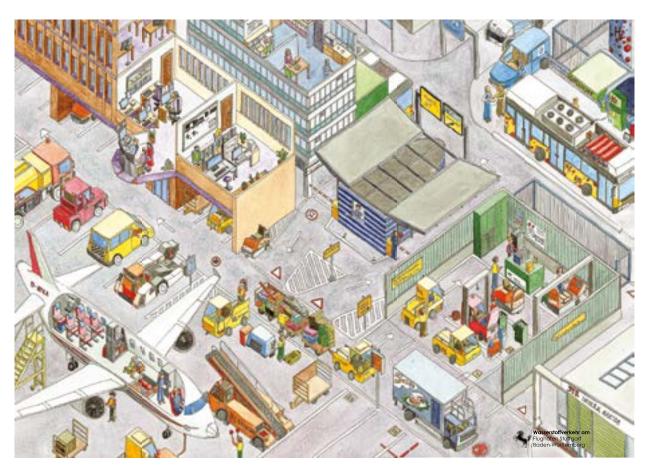
Der Wasserstoff selbst wird aktuell über eine sogenannte Gasregel- und Messanlage der Stadtwerke Esslingen in das Erdgasnetz eingespeist. Zukünftig soll der erzeugte Wasserstoff zusätzlich an die Industrie und Mobilität verkauft werden

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Neue Weststadt | Esslingen https://www.esslingen.de/wohnen-und-bauen/stadtentwicklung/neue-weststadt
- Neue Weststadt Klimaneutrales Stadtquartier Klimaquartier in Esslingen (neue-weststadt.de)
  <a href="https://neue-weststadt.de/">https://neue-weststadt.de/</a>
- EGS-plan Neue Weststadt Klimaquartier<a href="https://egs-plan.de/projekt/neue-weststadt">https://egs-plan.de/projekt/neue-weststadt</a>
- Green Hydrogen Esslingen (green-hydrogen-esslingen.de)
  <a href="https://green-hydrogen-esslingen.de/">https://green-hydrogen-esslingen.de/</a>

#### SIEBTES WIMMELBILD

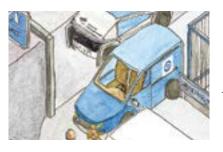
### ÖFFENTLICHER PERSONENVERKEHR UND VORFELD-TRANSPORTVERKEHR AM FLUGHAFEN STUTTGART MIT BATTERIE- UND WASSERSTOFFFAHRZEUGEN





Am **FLUGHAFEN STUTTGART**, der direkt an der Autobahn nach München liegt, kommen alle Arten von Personenverkehr zusammen: Autos, Busse, Züge, S-Bahnen und natürlich **FLUGZEUGE**. Dort gibt es schon seit 2009 eine **ÖFFENTLICHE WASSERSTOFFTANKSTELLE** für Autos, Busse und LKWs, dort kann jeder sein Brennstoffzellenfahrzeug selbst betanken. Die Wasserstofftankstelle ist in der oberen rechten Ecke des Wimmelbilds zu sehen. Dort tankt gerade ein **BRENNSTOFFZEL-LENBUS MIT DEN ROTEN WASSERSTOFFFLASCHEN** auf dem Dach.





Ein WEIßES ZWEISITZIGES LEICHTBAU-BRENNSTOFFZELLEN-FAHRZEUG hat gerade getankt und fährt jetzt Richtung Autobahn. Gerade ist auch ein PRÜFER MIT SEINEM BLAUEN DIENSTAUTO MIT MESSAUSRÜSTUNG an der Tankstelle und prüft die Behälter für den Wasserstoff und die Tanksäulen. Das passiert regelmäßig, damit die Technik für alle sicher ist.

Schritt für Schritt soll der Busverkehr in Stuttgart mit Batterie- und Brennstoffzellenbussen ausgerüstet werden. Seit 2003 mit Beginn

des europaweiten Projekts namens CUTE (Clean Urban Transport for Europe) werden in Stuttgart Batterieund Brennstoffzellenbusse im normalen Linieneinsatz mit dem starken Höhenunterschied von 150 Metern zwischen dem Stuttgarter Talkessel und dem Flughafen auf der Filderhöhe getestet.

Auf dem Flughafenvorfeld sind die Passagier-Busflotte und die Gepäcktransportschlepper zwischen Terminals und Flugzeugen seit Ende 2018 elektrisch unterwegs. Für die Batterieladung sind auf dem Vorfeld viele Schnellladesäulen verteilt, sodass jeder Bus und Transportschlepper auch in kurzen Pausen seine Batterie nachladen kann.



Vom DLR Forschungszentrum im Stuttgart wurde schon ab 2011 das **DLR-FORSCHUNGSFLUGZEUG AIRBUS A320 D-ATRA** mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellensystem für die Stromversorgung am Boden und mit einem neu entwickelten elektrischen Bugradantrieb ausgerüstet und getestet, mit dem das Flugzeug selbstständig ohne Push-Back-Fahrzeug und ohne Turbinenbetrieb von seinem AußenStandplatz oder vom Terminal zur Rollbahn fahren kann. Im Wimmelbild in der linken unteren Ecke ist dieses Flugzeug mit einem Blick ins Innere zu sehen.



Ecke des Wimmelbilds gezeigt wird.

Um dieses Flugzeug herum stehen einige Brennstoffzellenfahrzeuge, die am Stuttgarter Flughafen immer wieder schon seit dem Jahr 2000 erprobt werden, wie die GELBEN GEPÄCKSCHLEPPER, das ORANGE-FARBIGE FAHRZEUG MIT DEM GEPÄCKFÖRDERBAND für das Flugzeuggepäck oder auch das WEIßE NIEDRIGE PUSH-BACK-FAHRZEUG, um ein Flugzeug rückwärts auf das Vorfeld schieben zu können. Solche Spezialfahrzeuge werden für Reparaturen und Wartung nicht zur Werkstatt gebracht, sondern die BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUG-WERKSTATT ist im Flughafen, wie hier in der rechten unteren



Die jüngste Wasserstoffaktivität am Stuttgarter Flughafen ist der Aufbau eines Forschungszentrums bis Ende 2024, das **HYDROGEN AVIATION CENTER**, das die Räume und Ausrüstung für Unternehmen und Entwicklungsinstitute zur Verfügung stellt, um neue Konzepte für den emissionsfreien, wasserstoffelektrischen Flugverkehr zu erforschen, zu entwickeln und in der realen Flughafenumgebung zu testen. Wenn man genau auf das Wimmelbild schaut, findet man ein Hinweisschild auf dieses H<sub>2</sub>-Exzellenz-Zentrum.

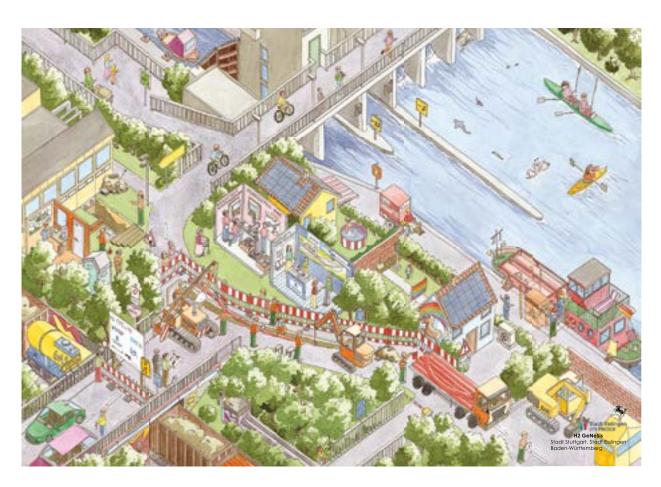
#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Elektrische Busflotte am Flughafen Stuttgart e-mobil BW GmbH
   <a href="https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/elektrische-busflotte-am-flughafen-stuttgart">https://www.e-mobilbw.de/service/meldungen-detail/elektrische-busflotte-am-flughafen-stuttgart</a>
- DLR-Airbus A320 ATRA rollt erstmals mit brennstoffzellen-betriebenem Bugrad
   <a href="https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2011/20110706">https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2011/20110706</a>
   dlr-airbus-a320-atra-rollt-erstmals-mit-brennstoffzellen-betriebenem-bugrad
- dieBrennstoffzelle.de Presse-Ecke
   <a href="http://www.diebrennstoffzelle.de/nachrichten/DaimlerChryslerbergibtdreiBZ-BusseandieStuttgarterStraenbahnenAG.shtml">http://www.diebrennstoffzelle.de/nachrichten/DaimlerChryslerbergibtdreiBZ-BusseandieStuttgarterStraenbahnenAG.shtml</a>
- Wasserstoffbus fährt Linie | pro-physik.de Das Physikportal
   https://pro-physik.de/nachrichten/wasserstoffbus-faehrt-linie
- Brennstoffzellenhybridbus | SSB (ssb-ag.de)
  https://www.ssb-ag.de/unternehmen/projekte/busprojekte/brennstoffzellen-hybridbus/
- Brennstoffzellenbusse für Stuttgart | H2Rivers

  https://www.h2rivers.de/h2rivers/brennstoffzellenbusse#:~:text=Brennstoffzellen%2DBusse%

  20f%C3%BCr%20Stuttgart,Mitte%202023%20im%20regul%C3%A4ren%20Linieneinsatz
- Neuer Brennstoffzellenbus in Gaisburg angeliefert SSB AG (ssb-ag.de)
  <a href="https://www.ssb-ag.de/unternehmen/presse/detail/neuer-brennstoffzellenbus-in-gaisburg-angeliefert/">https://www.ssb-ag.de/unternehmen/presse/detail/neuer-brennstoffzellenbus-in-gaisburg-angeliefert/</a>
- Pressemitteilungen (flughafen-stuttgart.de)
  <a href="https://www.flughafen-stuttgart.de/newsroom/pressebereich/pressemitteilungen/2023/exzellenzzentrum-fuer-wasserstoff-entsteht-am-flughafen-stuttgart/">https://www.flughafen-stuttgart.de/newsroom/pressebereich/pressemitteilungen/2023/exzellenzzentrum-fuer-wasserstoff-entsteht-am-flughafen-stuttgart/
- Safe Light Regional Vehicle (SLRV) (dlr.de)
  <a href="https://www.dlr.de/de/fk/forschung-transfer/projekte/innovative-fahrzeugkonzepte/ngc-safe-light-regional-vehicle">https://www.dlr.de/de/fk/forschung-transfer/projekte/innovative-fahrzeugkonzepte/ngc-safe-light-regional-vehicle</a>
- Still-Schlepper Flughafenvorfeldfahrzeug mit wasserstoffbetriebenem Brennstoffzellenantrieb (pdf) https://elib.dlr.de/69287/1/2011-04-04 ABri HMI-Vortrag 2010.pdf

## PROJEKT H2-GENESIS – DAS NECKARTAL ZWISCHEN STUTTGART UND ESSLINGEN IST EINE MODELLREGION FÜR GRÜNEN WASSERSTOFF



In einigen Jahren soll es in ganz Deutschland Leitungen geben, in denen Wasserstoff transportiert wird. Eine dieser Leitungen soll im Projekt H2-GeNeSiS zwischen dem Hafen der Landeshauptstadt Stuttgart und Esslingen am Neckar gebaut werden. Das Ziel des Projekts ist also der erste Aufbau einer grünen innerstädtischen Modellregion ohne Luftverschmutzung basierend auf Wasserstoffgas. Wasserstoff, der mit grünem, lokal erzeugtem Strom im **NECKARTAL** aus Wasser hergestellt wird, wird in den beiden Städten in allen Lebensbereichen genutzt. Er kommt als Erdgasersatz zur Strom- und Wärmeerzeugung zum Einsatz. Wasserstoff ist der Treibstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge zum Beispiel für die **BUSSE DER STUTTGARTER STRAßEN-BAHNEN AG (SSB)**. Und er wird auch als chemischer Rohstoff in der Industrie zum Beispiel für die Metall-, Kunststoff- und Medikamentenindustrie, gebraucht.

Die **STADTWERKE ESSLINGEN UND DIE STADTWERKE STUTTGART** haben viel Erfahrung mit dem Bau von Leitungen – ob für Wasser, Wärme oder Erdgas. Deshalb planen und werden sie ihre Anteile an der neuen Wasserstoffleitung selbst bauen.

Im Neckartal ist das verbindende Element zwischen den WASSERSTOFFHERSTELLERN MIT ELEKTROLYSE und den WASSERSTOFFNUTZERN WIE TANKSTELLEN, BÜROGEBÄUDEN UND INDUSTRIEUNTERNEHMEN die neue WASSERSTOFFPIPELINE. Die Pipeline ist so etwas wie der Wasserstoff-Marktplatz, der die Hersteller von Wasserstoff als Anbieter mit den Verbrauchern, sozusagen den Kunden, verbindet.

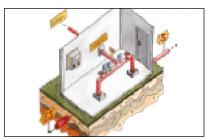
Die Pipeline verbindet nicht nur Anbieter und Kunden, sondern ist gleichzeitig auch der große Speicher für Wasserstoff. Die Wasserstoffhersteller brauchen keine Riesenspeicher bei ihren Elektrolyseanlagen und die Kunden müssen keine eigenen Großspeicher in ihren Fabriken aufbauen.





Im Wimmelbild in der Mitte ist nur ein kleiner Ausschnitt der langen Pipeline gezeigt: das Gelände an der Grenze zwischen Stuttgart und Esslingen an der HEDELFINGER NECKARBRÜCKE. Das Stadtgebiet von Stuttgart ist auf der rechten Seite des Wimmelbilds und das Stadtgebiet von Esslingen auf der linken Seite. Weil die fertige Pipeline unterirdisch verlegt ist, zeigt das Wimmelbild den BAU DER ROTEN PIPELINE an dieser Stelle. ROHRSTÜCKE werden mit dem LKW angeliefert und provisorisch mit einem Spezialbagger in einem AUSGEBAGGERTEN GRABEN zusammengelegt. Im Graben werden die ROHRSTÜCKE ZUSAMMENGESCHWEIßT und dann wird das FERTIGE PIPELINESTÜCK mit einem ähnlichen Bagger in den Graben gelegt und mit Isolierung, Sand und Kieselsteinen geschützt und der Graben wieder zugeschüttet.





Im Bild zwischen Pipelinegraben und Neckar steht ein kleines Betongebäude an der Straße. Darin wird gerade eine ABZWEIGSTELLE FÜR DIE PIPELINE MIT MESSINSTRUMENTEN UND VENTILEN zusammengebaut. Rechts daneben steht ein AUSSTELLUNGSCONTAINER, in dem sich alle Interessenten darüber informieren können, was hier gerade gebaut wird: die neue Pipeline für grünen Wasserstoff. Hinter der Klappe auf der rechten unteren Bildseite kann man sehen, wie der FERTIGE PIPELINE-ABZWEIG mit seinen Rohrstücken und den vielen Ventilen und Messinstrumenten aussieht. Der Abzweig ist dafür gebaut, dass man auch mit einem Schiff Wasserstoff, der auf dem Neckar transportiert wird, mit einer Art Tankstelle entweder in die Pipeline einleiten oder Wasserstoff aus der Pipeline abholen kann.



Die **TANKSTELLE MIT GASSCHIFF** sieht man in der rechten Wimmelbildecke neben der Klappe. Für die Schiffsent- und -beladung funktioniert diese spezielle Tankstelle in beide Richtungen. In Richtung der Tankstelle am Neckar fährt auch gerade auf der Uferstraße ein modernes **PEDELEC-LASTENFAHRRAD MIT BRENNSTOFFZELLE** für die Stromerzeugung.

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Wasserstoff-Gesamtsystem entlang des Neckars als Basis für eine Skalierung der Wasserstoffwirtschaft – H2-GeNeSiS Stuttgart (region-stuttgart.de) https://h2genesis.region-stuttgart.de/
- Modellregion H2-GeNeSiS | Plattform H2BW (plattform-h2bw.de)
  <a href="https://www.plattform-h2bw.de/projekte-im-land/efre-modellregionen-gruener-wasserstoff/modellregion-h2-genesis">https://www.plattform-h2bw.de/projekte-im-land/efre-modellregionen-gruener-wasserstoff/modellregion-h2-genesis</a>
- Modellregion Grüner Wasserstoff H2-GeNeSiS | Zukunftsenergien Region Stuttgart (region-stuttgart.de)
   <a href="https://zukunftsenergien.region-stuttgart.de/modellregion-gruener-wasserstoff-h2-genesis">https://zukunftsenergien.region-stuttgart.de/modellregion-gruener-wasserstoff-h2-genesis</a>
- ZSW: H2-Genesis Wasserstoff-Gesamtsystem entlang des Neckars (zsw-bw.de) https://www.zsw-bw.de/projekt/wasserstoff-efuels/h2-genesis-wasserstoffgesamtsystem-entlang-des-neckars.html
- H2-GeNeSiS EFRE 2021-2027 (efre-bw.de) https://2021-27.efre-bw.de/projektbeispiel/h2-genesis/

### PROJEKT GREEN HYDROGEN HUB – AUF ENTDECKUNGSREISE DURCH DIE GRÜNE WASSERSTOFFFABRIK DER STADTWERKE STUTTGART AM STUTTGARTER HAFEN







Willkommen in der GRÜNEN WASSERSTOFFFABRIK "GREEN HYDRO-GEN HUB STUTTGART" - oder einfach abgekürzt GH2S! Hier wird aus Wind, Sonnenstrom, Wasser und viel Technik etwas ganz Besonderes gemacht: Wasserstoff. In der rechten oberen Ecke des Wimmelbilds siehst du den Kern der Wasserstofffabrik, DREI GROßE ELEKTROLY-**SEURE**. Sie verwandeln Wasser mithilfe von Strom in Wasserstoff- und Sauerstoffgas. Das klingt kompliziert, aber stell dir vor: Man kann dadurch Strom praktisch unbegrenzt als Wasserstoffgas speichern. Und man kann den Wasserstoff wieder mit Sauerstoff in Wasser zurückverwandeln, und dabei den Strom wieder zurückgewinnen. Es ist also Stromspeicherung, die keinen Schmutz in der Luft hinterlässt. Der Strom, den die Elektrolyseure in Stuttgart nutzen, kommt von Windrädern und Sonnenkraftwerken-also direkt aus der Natur! Außerdem gibt es hier einen speziellen **TESTELEKTROLYSEUR**. Damit werden vom wissenschaftlichen und technischen Personal des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) Versuche gemacht, damit man mit noch weniger Strom und für weniger Geld Wasserstoff erzeugen kann.





Doch was passiert eigentlich mit dem Wasserstoff, nachdem er erzeugt wurde? Auch das kannst du auf der rechten Seite entdecken. Zuerst geht der Wasserstoff zur **ABFÜLLSTATION**, wo er in **TANKS** zwischengelagert wird. Aus diesen Tanks werden **GASTRANSPORT-LKWS BELADEN**, die Wasserstoffnutzer in der Umgebung beliefern. Wenn du genau hinsiehst, kannst du einen LKW, der gerade beladen wird, und einen weiteren auf der Straße vor dem GH2S erkennen! Manchmal wird mehr Wasserstoff erzeugt, als gebraucht wird. In diesem Fall wird er in sehr **GROßEN SPEICHERN** gespeichert, bis er später wieder benötigt wird, oder er wird in die Stuttgarter Wasserstoffpipeline eingeleitet.



Im **KONTROLLGEBÄUDE** vor den Elektrolyseuren behalten die Mitarbeitenden der Stadtwerke die ganze Anlage im Blick und können alles steuern. Von hier aus wird auch die Wasserstoffeinleitung in die neue Pipeline kontrolliert, die den Wasserstoff zur Tankstelle der Busse der SSB bringt. Diese Busse fahren mit sauberem Wasserstoff durch die Stadt. Die Pipeline versorgt auch ein Bürogebäude der Stadtwerke Stuttgart und eine Tankstelle für Lastkraftwagen. An der Brücke unten rechts im Bild siehst du einen kleinen Teil der **ROTEN WASSERSTOFFPIPELINE**, die von der Wasserstofffabrik kommt und hier über den Neckar führt.

Wenn du mehr über Wasserstoff erfahren möchtest, kannst du gerne das Besucherzentrum besuchen. Hier können Kinder und Erwachsene viele spannende Dinge lernen und interessante Vorträge anhören.



In der linken unteren Ecke des Wimmelbilds siehst du den **ENERGIE-CAMPUS** der Stadtwerke Stuttgart. Hier arbeiten viele fleißige Menschen daran, die Welt grüner und sauberer zu machen. Ganz oben in der Bildmitte kannst du sogar einen **WASSERSTOFF-GASBALLON** entdecken. Damit kannst du das ganze GH2S von oben sehen-ein fantastischer Ausblick!

Die grüne Wasserstofffabrik GH2S zeigt, wie wir die Kraft der Natur nutzen können, um unsere Welt besser zu machen. Und das Beste

daran: Alles passiert so sauber, dass es gut für die Umwelt ist. Wir wünschen dir viel Spaß auf deiner Entdeckungsreise! Trau dich, mach einen Besuch im EnergieCampus!

#### **ZUM WEITERLESEN:**

- Green Hydrogen Hub (stadtwerke-stuttgart.de)
  https://www.stadtwerke-stuttgart.de/partner-der-energiewende/h2g/
- 10-MW-Elektrolyse in Stuttgart: Stadtwerke geben grünes Licht H2.news.de https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/10-mw-elektrolyse-instuttgart-stadtwerke-geben-gruenes-licht/
- Grünes Licht für Stuttgarter Wasserstofferzeugung | energate messenger | (energate-messenger.de)
   <a href="https://www.energate-messenger.de/news/246645/gruenes-licht-fuer-stuttgarter-wasserstofferzeugung">https://www.energate-messenger.de/news/246645/gruenes-licht-fuer-stuttgarter-wasserstofferzeugung</a>

## DIE PROJEKTKARTE DES WIMMELBUCHS



Dieses Bild zeigt eine Karte von Deutschland und in verschiedenen Farben alle Bundesländer. Um Deutschland herum sind die Nachbarländer von Deutschland mit ihren Landesfahnen und den Grenzen mit Deutschland und untereinander zu sehen.

Die roten Punkte zeigen die Landeshauptstädte der Bundesländer (kennst du alle Stadtnamen?) und auch die Städte mit den Wasserstoffprojekten auf den Wimmelbuchseiten. Für jedes Projekt gibt es ein rotes Rechteck mit Projektname, ganz kurzer Projektbeschreibung, Stadtname und Abkürzung des Bundeslandes, in dem die Stadt liegt. Die Projektnamen findest du auf den Wimmelbuchseiten.

Wir wünschen dir viel Spaß beim Betrachten der Wimmelbuchseiten, beim Entdecken der vielen Einzelheiten und auch beim Lesen dieses kleinen Buches. Es ist dafür gemacht, dir ein wenig Unterstützung dabei zu geben zu verstehen, was auf den Wimmelbildern zu sehen ist!

#### **Impressum**

© 2025 Bianca Brinner & Andreas Brinner

Alle Rechte der Verarbeitung, auch durch Film, Funk und Fernsehen, fotomechanische Wiedergabe, Tonträger jeder Art, auszugsweisen Nachdruck oder Einspeicherung und Rückgewinnung in Datenverarbeitungsanlagen aller Art, sind vorbehalten.

Bianca Brinner, Andreas Brinner | Erklärbuch zum Wimmelbuch "Grüner Wasserstoff für Anfänger"

1. Auflage, 2025 | Steinbeis-Edition | biancazeichnet

KONZEPT: Bianca Brinner & Andreas Brinner

TITELBILD: Bianca Brinner ILLUSTRATIONEN: Bianca Brinner

TEXT: Andreas Brinner

VERLAG: Steinbeis-Edition | Steinbeis-Stiftung | Adornostr. 8 | 70599 Stuttgart

SCAN DER WIMMELBILDER: Eckermann Printservices | Mollenbachstr. 14 | 71229 Leonberg

www.steinbeis-edition.de | edition@steinbeis.de www.biancazeich.net | biancazeichnet@gmx.de

227443-2025-01