



**WASSERSTOFF
KOMPASS**



ÜBERGREIFENDE ASPEKTE






Klima und Ressourcen








WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

-  Regulatorischer Rahmen
-  Zielgerichteter H₂-Einsatz
-  Fachkräftesicherung
-  Akzeptanz und Sicherheit
-  **Klima und Ressourcen**

BEREITSTELLUNG

-  H₂-Erzeugung
-  H₂-Import
-  Infrastruktur




INDUSTRIEZWEIGE

-  Stahlindustrie
-  Chemische Industrie
-  Raffinerien
-  Zementindustrie
-  Glasindustrie

MOBILITÄT UND TRANSPORT

-  Kraftfahrzeuge
-  Schifffahrt
-  Luftverkehr
-  Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

-  Gebäudewärme
-  Prozesswärme
-  Stromsystem

GLOSSAR

- 1 Generelle Aspekte zu Klima und Ressourcen**
 - 2 Wasser als Ausgangsstoff
 - 3 Wasserbedarfe für die deutsche Wasserstoffproduktion
 - 4 Nutzung von Salzwasser
 - 5 Rohstoffe für die Wasserelektrolyse
 - 6 Klimawirkung von Wasserstoffemissionen
- 7 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe**
- 8 Literatur**

Klima und Ressourcen

- › Die Versorgung von Elektrolyseuren mit notwendigem Süßwasser wird vor allem in ariden Gebieten eine der wichtigsten Herausforderungen.
- › Elektrolyseure benötigen viele (kritische) Rohstoffe. Die Versorgungssicherheit Deutschlands und der Europäischen Union mit (kritischen) Rohstoffen ist daher auch für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft von herausragender Bedeutung.
- › Wasserstoff ist ein fundamentaler Baustein für eine klimaneutrale Wirtschaft. Gelangt Wasserstoff allerdings in die Atmosphäre, kann er dort die Konzentration vorhandener Treibhausgase erhöhen und so indirekt zur Erderwärmung beitragen.
- › Werden Wasserstoffemissionen global entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf wenige Prozent begrenzt, ist ihr Beitrag zur globalen Erwärmung vernachlässigbar.

Generelle Aspekte zu Klima und Ressourcen

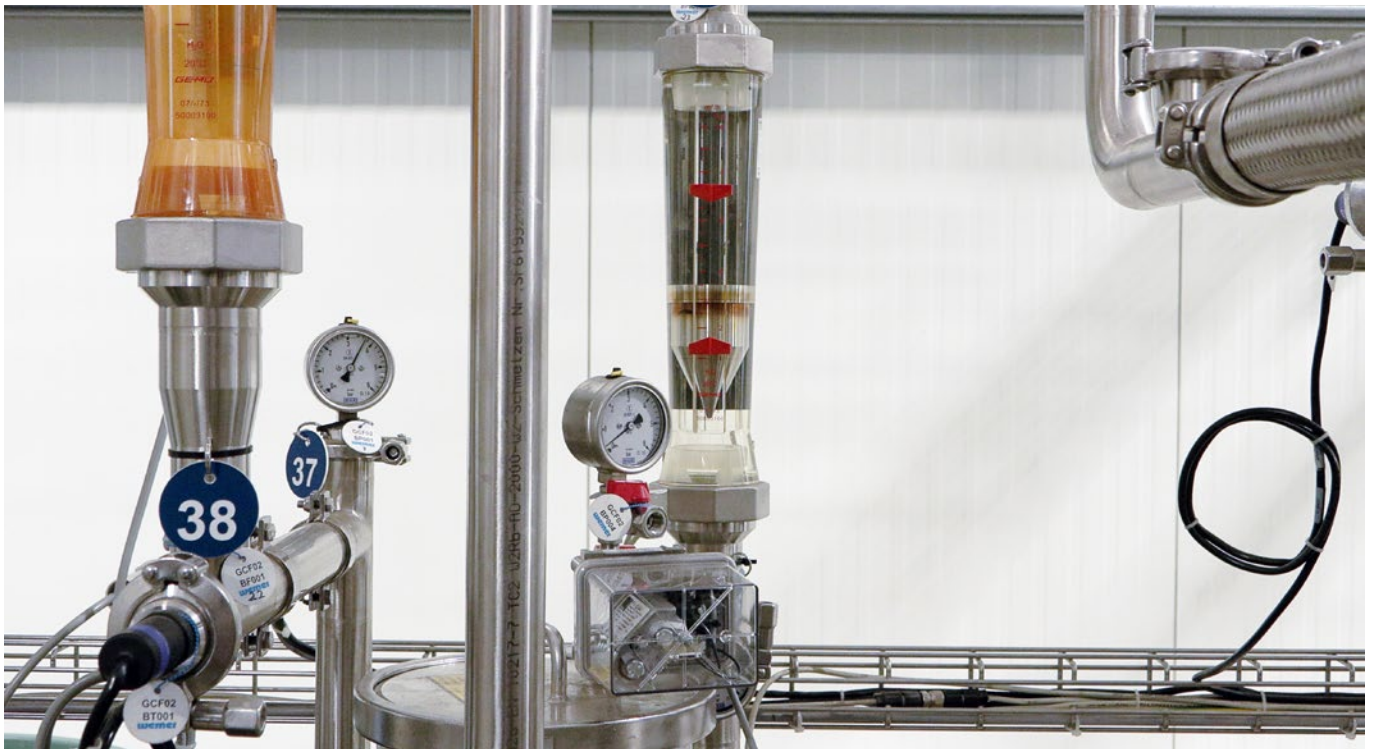
Wasserstoff (H₂) spielt eine entscheidende Rolle bei der Defossilisierung verschiedener Sektoren. Doch auch für Herstellung und Transport von Wasserstoff werden Ressourcen, beziehungsweise Rohstoffe benötigt, unter anderem für den Bau von Produktionsanlagen und Pipelines sowie aufgrund des Wasserbedarfs für die Elektrolyse. Ebenfalls kann ein übermäßiges Austreten von H₂ entlang der verschiedenen Prozesspunkte (sogenannter H₂-Schlupf) nennenswerte klimaschädliche Effekte mit sich bringen, die es daher zu minimieren gilt. Um die positiven Wirkungen einer Wasserstoffwirtschaft zur Geltung zu bringen, gilt es also, die Versorgungssicherheit kritischer Rohstoffe sicherzustellen und negative Umwelteinflüsse so weit wie möglich zu begrenzen.

Wasser als Ausgangsstoff

Die zukünftige Wasserstoffherstellung wird zu großen Teilen über die Wasserelektrolyse stattfinden. Diese verbraucht als Ausgangsstoff Wasser, das im Elektrolyseur mittels Strom in Wasserstoff und Sauerstoff auf-gespalten wird. Grundsätzlich gilt, dass alle Elektrolyseurverfahren hohe Ansprüche an die Wasserqualität haben, um eine optimale Leistung, Effizienz und Lebensdauer des Elektrolyseurs zu gewährleisten.

Besonders sauberes, mineralstoffarmes Reinstwasser benötigt beispielsweise alkalische Elektrolyseure und Protonen-Austausch-Membran-Elektrolyseure (PEM) die zusammen circa 90 Prozent der aktuellen elektrolytischen Erzeugungs-kapazitäten ausmachen (60 Prozent AEL und 30 Prozent PEM). Aus 10 Litern Grundwasser können circa 8 Liter Reinstwasser gewonnen werden.^[1]

Anlage zur
Wasseraufbereitung
© acatech



Wasserbedarfe für die deutsche Wasserstoffproduktion

Zur Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff (H₂) werden circa zehn Kilogramm Reinstwasser benötigt. Dies würde für das Jahr 2030 mit Blick auf das Ausbauziel von 10 Gigawatt Elektrolyseleistung in Deutschland bedeuten, dass bei 4.000 Volllaststunden und einer Effizienz von 70 Prozent pro Elektrolyseur circa 10 Millionen Kubikmeter Süßwasser benötigt würden.^[1]

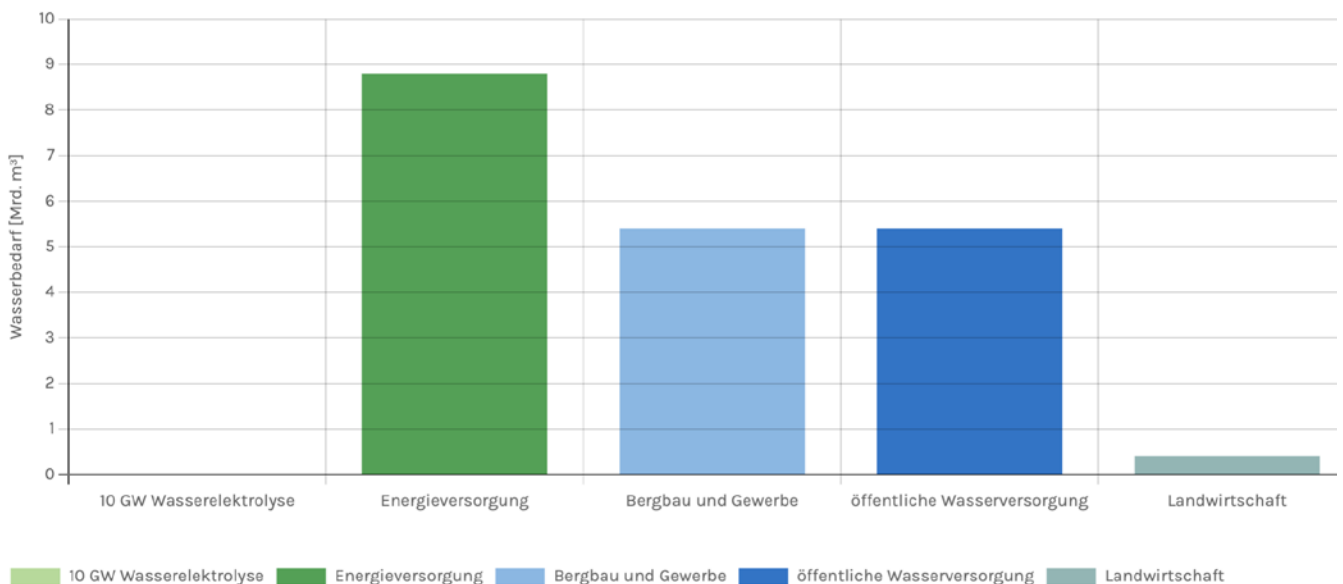
Zum Vergleich: Im Jahr 2019 wurden in Deutschland

- > für die Energieversorgung 8,8 Milliarden Kubikmeter (97 Prozent davon fließen nach Verwendung als Kühlwasser wieder dem Wasserkreislauf zu),
- > im Bergbau und Gewerbe 5,4 Milliarden Kubikmeter,
- > für die öffentliche Wasserversorgung ebenfalls 5,4 Milliarden Kubikmeter
- > und in der Landwirtschaft 0,4 Milliarden Kubikmeter Wasser benötigt.^[1]

Werden bis 2030 die angestrebten zehn Gigawatt Elektrolyseleistung aufgebaut, dann würde also der bundesweite Wasserverbrauch bei gleichbleibenden sonstigen Verbrauchswerten nur marginal höher ausfallen. Allerdings ist davon auszugehen, dass der absolute Wasserverbrauch in den nächsten Jahren durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und den damit einhergehenden Rückgang der Stromproduktion durch fossile Energieträger sinken wird, da weniger Kühlwasser für Kraftwerke benötigt wird.

Wasserverbrauch für verschiedene Anwendungen

Der Wasserbedarf für 10 GW Elektrolysekapazität beträgt bei einem Elektrolysewirkungsgrad von 70% und angenommenen 4000 Volllaststunden nur etwas mehr als ein Promille des aktuellen Wasserbedarfs der Energieversorgung und nur ungefähr ein halbes Promille des gesamten, jährlichen, nationalen Wasserbedarfs.^[1]



Nutzung von Salzwasser

Durch den erwartbaren globalen Zubau von Elektrolyseurkapazitäten, der zu großen Teilen auch in Wüstenregionen stattfinden soll, wird die Nutzung von Meerwasser bei der H₂-Produktion eine wichtige Rolle einnehmen. Da die direkte Meerwassernutzung für Elektrolyseure auf absehbare Zeit nicht möglich sein wird (die Forschung zur großskaligen Salzwasserelektrolyse befindet sich noch im Grundlagenstadium), muss das Meerwasser vor der Nutzung entsalzt und aufbereitet werden. Da mehrere Prozessschritte notwendig sind, um aus Meerwasser Reinstwasser herzustellen, liegt die Ausbeute bei circa vierzig Prozent. Dabei gelingt die Meerwasserentsalzung bereits zu Preisen von circa 0,3 US-Dollar pro Kubikmeter Meerwasser.^[3]

Meerwasser-
Entsalzungsanlage

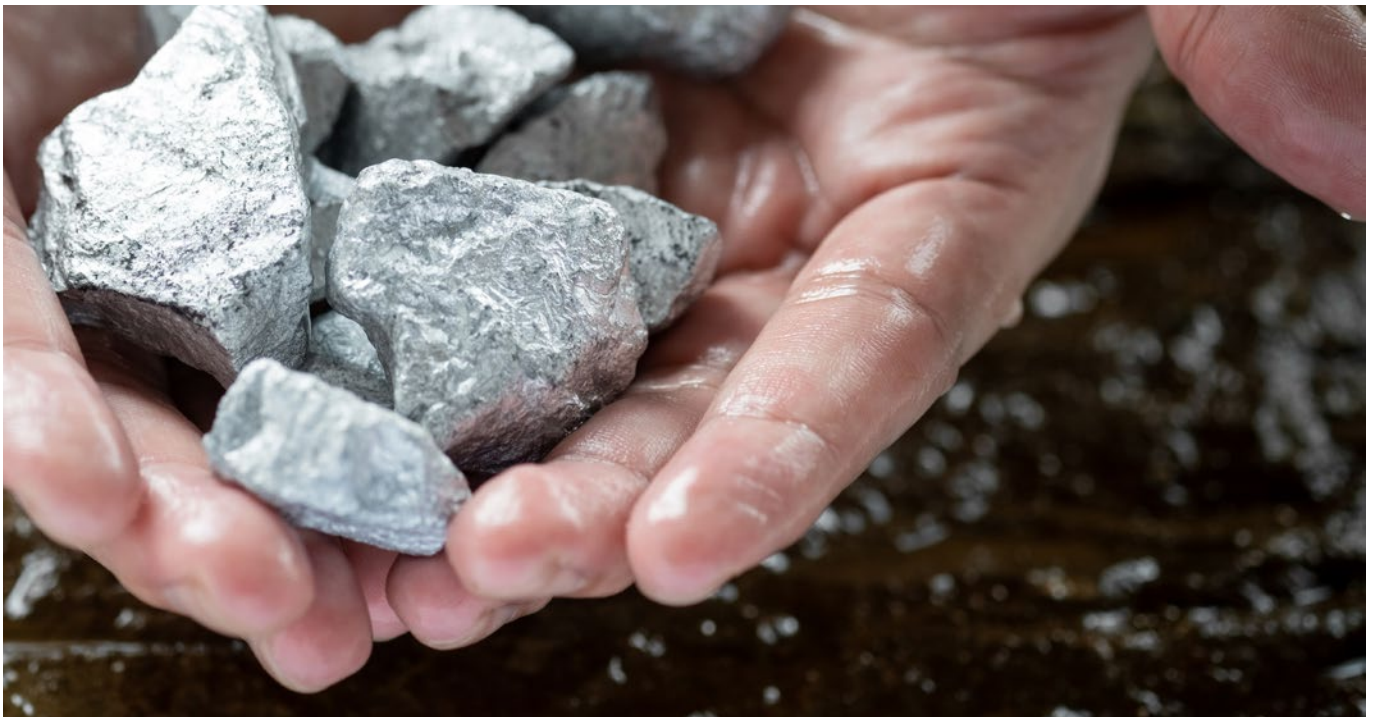


Die dabei anfallende Sole muss möglichst umweltschonend entsorgt werden. Derzeit geschieht die Entsorgung in der Regel durch direktes Wiedereinleiten ins Meer. Die damit verbundenen Umweltschutzanforderungen sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeit. Zudem müssten für die energieintensive Entsalzung erneuerbare Energien stark ausgebaut werden. Im Jahr 2020 wurde nur circa ein Prozent des weltweit entsalzten Wassers mithilfe erneuerbarer Energien bereitgestellt.^[8]

Rohstoffe für die Wasserelektrolyse

Ein Großteil der Wasserstoffherstellung wird zukünftig über die Wasserelektrolyse erfolgen. Die unterschiedlichen, zugrunde liegenden Elektrolyseurtechnologien benötigen unterschiedliche Rohstoffe. Neben gängigen Rohstoffen wie Aluminium, die für den Anlagenbau nötig sind, werden auch erhebliche Mengen seltener Rohstoffe gebraucht.^[5]

Silberglänzende
Erzstücke



Grundsätzlich gilt, dass bei vielen der benötigten Rohstoffe Deutschland und die Europäische Union auf Importe angewiesen sind, da diese Rohstoffe geologisch kaum oder überhaupt nicht in Europa vorhanden sind beziehungsweise nicht wirtschaftlich abgebaut werden können.

Wirtschaftlich besonders wichtige Rohstoffe mit hohem Versorgungsrisiko werden als kritische Rohstoffe bezeichnet. Die EU-Kommission bewertet aktuell dreißig Rohstoffe als kritisch.^[4] Mit dem Critical Raw Materials Act zielt die EU-Kommission auf eine sichere und nachhaltige Versorgung ab. Zu große Abhängigkeiten von einzelnen Lieferländern sollen in diesem Zuge vermieden werden.

Kritische Rohstoffe werden vor allem für den Bau von PEM-Elektrolyseuren, aber auch für neuere, noch nicht ausgereifte Technologien wie die Festoxid-Elektrolyse (SOEC) eingesetzt. Dazu gehören beispielsweise Iridium, Platin, Titan, Scandium, Nickel und Palladium.^[6] Für den Bau von 10 Gigawatt PEM-Elektrolyseuren würden beispielsweise 10 bis 20 Prozent der aktuellen jährlichen Fördermenge an Iridium benötigt.^[5] Somit wird auch das Rohstoffrecycling für die Versorgungssicherheit eine entscheidende Rolle spielen.

Klimawirkung von Wasserstoffemissionen

Wasserstoff (H₂) ist ein sehr kleines und leichtes Molekül, das bei Produktion, Transport und Nutzung leicht durch Materialien diffundieren und anschließend in die Atmosphäre entweichen kann. H₂ ist zwar selbst kein Treibhausgas, verändert aber durch chemische Reaktionen mit anderen Molekülen in der Atmosphäre die Konzentration anderer Treibhausgase wie Methan oder Ozon und hat so eine indirekte Klimawirkung.^[7]

Wolken in
der Atmosphäre



Durch diese drei Mechanismen trägt Wasserstoff indirekt zur Erderwärmung bei:^[7]

- › Hydroxylradikale (OH) in der Atmosphäre reagieren mit Wasserstoffmolekülen (H₂) und diese beiden werden zu atomarem Wasserstoff (H) und Wasserdampf (H₂O). Da OH mit dem hochwirksamen Klimagas Methan reagieren und es so abbauen kann, führt eine geringere Konzentration von OH in der Atmosphäre durch die oben genannte Reaktion von OH und H₂ zu einem verlangsamten Abbau von Methan.
- › Die Entstehung von atomarem H durch die Reaktion von OH und H₂ führt über eine chemische Reaktionskette zur Bildung des hochpotenten Treibhausgases Ozon.
- › Wasserdampf, der in der Stratosphäre durch die Reaktion von OH und H₂ entsteht, verantwortet knapp ein Drittel der Klimawirkung von H₂. Damit die Klimawirkung von Wasserstoffemissionen die herausragende Bedeutung von Wasserstoff für eine klimaneutrale Wirtschaft nicht schmälert, müssen Wasserstoffemissionen quantifiziert und minimiert werden. Bleiben die Wasserstoffemissionen im niedrigen einstelligen Prozentbereich entlang der gesamten Wertschöpfungskette (von der Erzeugung über den Transport bis hin zur Anwendung), dann ist ihr Beitrag zur globalen Erwärmung vernachlässigbar.^[7]

AUSWAHL ÖFFENTLICH GEFÖRDERTER PROJEKTE

- › H₂Mare
<https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/h2mare>
- › GreenH₂Namibia
<https://gh2namibia.com/>

Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Wasserstoffzyklus

- › Aktuell sind die Stärken der einzelnen Quellen und Senken von Wasserstoff nur unzureichend bekannt, was zu großen Unsicherheiten in der Größenordnung der Klimawirkung von Wasserstoffemissionen führt. Hier braucht es mehr Forschung, um Quellen und Senken besser zu quantifizieren.
- › Welchen Einfluss hat Wasserstoff auf chemische Prozesse in der Atmosphäre und wie wirken sich diese auf die globale Erwärmung aus?

Messung von Wasserstoffemissionen

- › Wie viel H₂ geht entlang der gesamten Wertschöpfungskette verloren?
- › Wie stark weichen H₂-Emissionen unter realen Bedingungen von denen unter Laborbedingungen ab? (Faktor »Mensch«)
- › Welche Messtechnik kann kleine H₂-Verluste entlang der gesamten Wertschöpfungskette quantifizieren und lokalisieren?

Reduzierung von Wasserstoffemissionen

- › Entwicklung und Optimierung von Methoden zur Vermeidung von H₂-Emissionen; gegebenenfalls auch zur anschließenden H₂-Rückgewinnung
- › Material- und Technologieentwicklung zur Minimierung von H₂-Verlusten

PUBLIKATION

- › Wasserstoff-Kompass (2022): Rohstoffe für die Elektrolyseur-Produktion
https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/2022-09_Rohstoffe_Elektrolyseurproduktion.pdf

Literatur

- [1] **Saravia et al. (2023):** Genügend Wasser für die Elektrolyse – Wieviel Wasser wird für die Erzeugung von grünem Wasserstoff benötigt und gibt es ausreichende Ressourcen? Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn. <https://www.dvgw.de/leistungen/publikationen/publikationsliste/genuegend-wasser-fuer-die-elektrolyse>
- [2] **Meftah, Mouldi Ben; Mossa, Michele (2018):** Turbulence Measurement of Vertical Dense Jets in Crossflow, Water 2018, 10 (3). https://www.researchgate.net/figure/Schema-of-a-brine-discharge-system-at-a-desalination-plant-2_fig1_323656218
- [3] **El Kharraz, Jauad:** 05.05.2023, Grüner Wasserstoff »Entsalzung wird unglaublich wettbewerbsfähig«, Tagesspiegel Background. <https://background.tagesspiegel.de/energie-klima/entsalzung-wird-unglaublich-wettbewerbsfaehig>
- [4] **Europäische Kommission COM(2020) 474 final:** Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>
- [5] **acatech, DECHEMA (2022):** Rohstoffe für die Elektrolyseurproduktion: Mögliche Engpässe aufgrund von Russlands Konfrontation mit dem Westen, Berlin. https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolyseurproduktion.pdf
- [6] **Bastian et al. (2022):** Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse, DERA Themenheft, Berlin. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%20Themenheft-01-22.pdf?jsessionid=CEF4AF826D5E40112BEA2B4A96D3ED40.1_cid331?__blob=publicationFile&v=2
- [7] **Ocko, I. B./Hamburg, S. P.:** »Climate Consequences of Hydrogen Emissions«. In: Atmospheric Chemistry and Physics, 22: 14, 2022, S. 9349–9368. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022>
- [8] **Nassrullah et al. (2020):** Energy for desalination: A state-of-the-art review, Desalination, 491, 114569. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114569>

Beteiligte Institutionen



DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de



Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbünde und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweise

Titel/ Wolken in der Atmosphäre: AdobeStock: bilanol
Meerwasser-Entsalzungsanlage: AdobeStock: 169169
Silberglänzende Erzstücke: AdobeStock: Phawat

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages