

➔ www.h2-dvgw.de

Gesamtwasserbedarf für die Wasserelektrolyse

Wie groß ist der Wasserfußabdruck
einschließlich der Kühlsysteme?



Wasserstoff ist ein wichtiger Baustein zum Erreichen der Klimaziele und es ist zu erwarten, dass die weltweite Nachfrage steigen wird. Für die Versorgung in Deutschland werden sowohl Importe von klimaneutralem Wasserstoff als auch die heimische Erzeugung eine zentrale Rolle spielen. Ein wichtiger Aspekt bei der Auswahl von Standorten für die Wasserstoffproduktion ist, wie sich die Ansiedlung größerer Elektrolysekapazitäten auf den lokalen oder regionalen Wasserhaushalt auswirken. Denn für die Erzeugung von grünem Wasserstoff sind im Wesentlichen zwei Dinge notwendig: Erneuerbarer Strom und Wasser.

Um den Wasserbedarf einschätzen zu können, hat der DVGW im Jahr 2023 berechnet, welche Mengen an Roh- und Reinstwasser für die Erzeugung eines Kilogramms Wasserstoff mittels Elek-

trolyse notwendig sind [1]. Demnach schwankt der Wasserbedarf mit der Zusammensetzung des Rohwassers und den spezifischen Aufbereitungsverfahren. So sind bei der Verwendung von Oberflächenwasser 12 bis 13 Kilogramm und bei Meerwasser 20 bis 30 Kilogramm Rohwasser notwendig. Diese Mengen wurden dann auf das 10-GW-Ausbauziel gemäß der Nationalen Wasserstoffstrategie in Deutschland hochgerechnet und spezifischen Wasserverbräuchen einzelner Sektoren gegenübergestellt.

Fazit: Bundesweit betrachtet reichen die Wasserressourcen in Deutschland dafür aus. Bei der Bewertung von Elektrolysestandorten ist es jedoch entscheidend, den gesamten Wasserbedarf abzuschätzen, einschließlich der Mengen für die Kühlung der Anlagen. Genau diesem Punkt widmet sich dieses Factsheet.

Für die Wahl eines geeigneten Elektrolysestandortes ist es notwendig den gesamten Wasserbedarf zu kennen. Dieser wird durch die installierte elektrische Leistung und die Anzahl der jährlichen Betriebsstunden der Anlage bestimmt. Daraus lässt sich berechnen, wie viel Wasser für die elektrochemische Reaktion – also für die Spaltung des Wassermoleküls in seine Elemente Sauerstoff und Wasserstoff – verbraucht wird. Weiterhin ist entscheidend, wie viel Wasser die vorgeschaltete Aufbereitung des Rohwassers benötigt. Beides wurde bereits in der vorhergehenden Publikation berücksichtigt [1].

Darüber hinaus müssen die Elektrolyseure gekühlt werden. Denn bei der Reaktion wird Energie in Form von Wärme frei, die abgeführt werden muss, um die Betriebstemperatur stabil im optimalen Bereich zwischen 50 und 90 °C zu halten. Die Ab-

wärme kann zwar energetisch genutzt werden. Ist dies aber am Elektrolysestandort nicht möglich, kommt ein Kühlsystem zum Einsatz. Dafür stehen verschiedene Optionen zur Verfügung, die einen unterschiedlichen Wasserbedarf aufweisen. Ebenso muss betrachtet werden, inwieweit diese Wassermengen verbraucht oder der Quelle wieder zurückgeführt werden.

Wie groß dieser zusätzliche Bedarf und Verbrauch ausfallen kann und die Spannweite dabei ist, das hat der DVGW gemeinsam mit seiner Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT (DVGW-EBI) anhand verfügbarer Literatur unter Berücksichtigung fachkundiger Erfahrungswerte zusammengestellt. Aufbauend auf den Analysen aus dem ersten Factsheet ergeben sich so Bandbreiten für den gesamten Wasserbedarf der Wasserelektrolyse.

Wie viel Elektrolyse ist in Deutschland geplant?

Die Nationale Wasserstoffstrategie legt für das Jahr 2030 ein Ausbauziel von mindestens 10 Gigawatt (GW) Elektrolyseleistung fest. Ausgehend von 4.000 Betriebsstunden im Jahr und einem Elektrolyse-Wirkungsgrad von 70 Prozent entspricht das einer Erzeugung von 28 Terawattstunden (TWh) Wasserstoff im Jahr. Für das Jahr 2045 geht das

Bundeswirtschaftsministerium davon aus, dass die Leistung auf rund 80 bis 100 GW ansteigen könnte (entspricht 190 bis 245 TWh). Die Elektrolysestandorte und somit auch der Wasserbedarf werden aber regional ungleich verteilt sein und sich im Norden Deutschlands konzentrieren.

Je nach Standort und Rahmenbedingungen stehen verschiedene industriell etablierte Kühlverfahren zur Auswahl

Für die Kühlung industrieller Verfahren, und somit auch für die Wasserelektrolyse, stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Diese unterscheiden sich unter anderem in ihren Effizienzen, der Art des eingesetzten Kühlmediums, den benötigten Wassermengen sowie im Wartungsaufwand. Industriell finden bei der Elektrolyse hauptsächlich Kühlverfahren Anwendung, die

Wasser als Kühlmedium verwenden. Hier werden vor allem zwei Verfahren eingesetzt: die Durchlaufkühlung und die Kreislaufkühlung, wobei sich letztere weiter in offene und geschlossene Systeme unterteilen lässt. Alternativ existieren auch Systeme, die Luft als Kühlmedium nutzen.

Kühlverfahren für die Wasserelektrolyse



Wasser



Durchlauf

Das Wasser wird durchgeleitet und nach der Kühlung wieder in seine ursprüngliche Quelle abgeleitet.



Ablauf

Ein Teil der aufgenommenen Wärme wird über einen Kühlturm an die Atmosphäre abgegeben und das verbleibende Wasser abgeleitet.



Kreislauf

Der überwiegende Teil der Wärme wird an die Atmosphäre abgegeben und das Kühlwasser mehrfach genutzt.



Luft

Luftkühlssysteme ähneln dem geschlossenen Kreislauf. In einem Trockenkühlturm wird die Wärme direkt an die Luft übertragen, die an einer Reihe von Rohren vorbeiströmt, die das Kühlwasser enthalten. In der Praxis verbrauchen Trockenkühlssysteme etwa 95% weniger Wasser.

Quelle: DVGW basierend auf [2-10]

Faktoren, die den Wasserbedarf beeinflussen

Wie viel Wasser für die Kühlung der Elektrolyseure benötigt wird, hängt hauptsächlich von folgenden Einflussfaktoren ab:

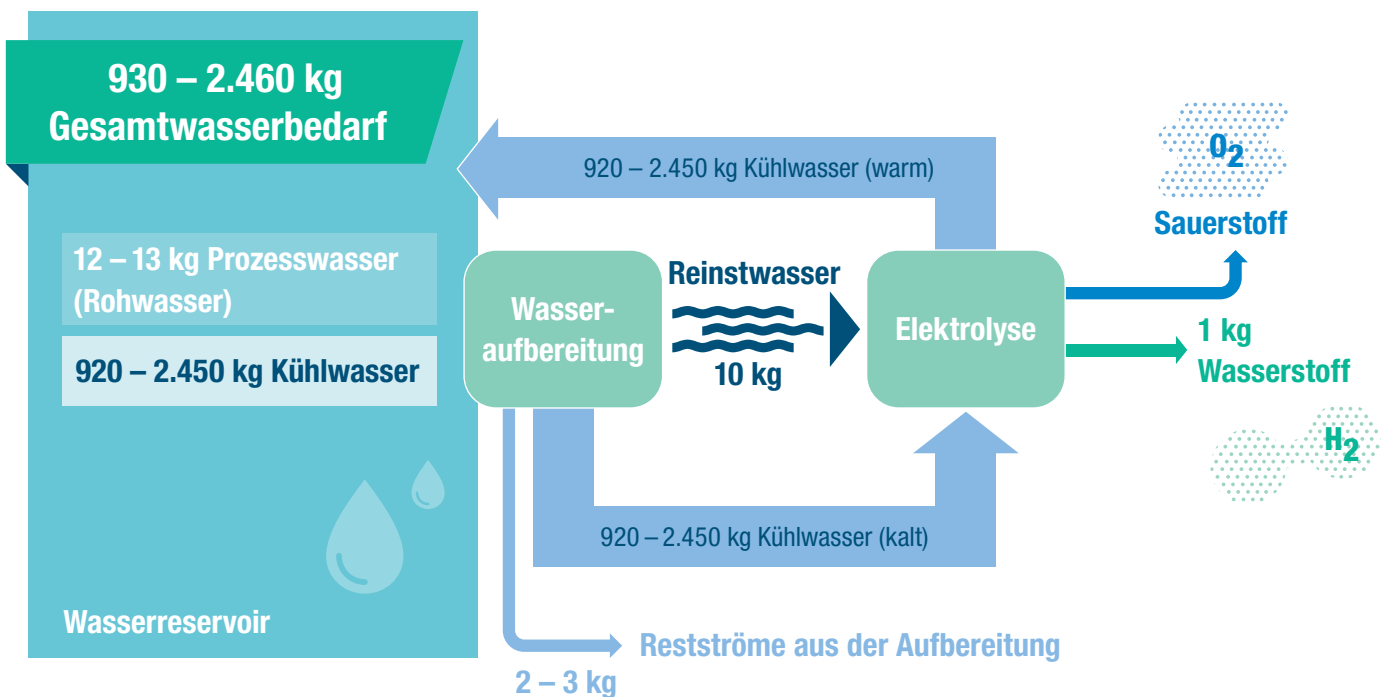
- ➔ Art und Betriebsweise des Kühlverfahrens
- ➔ Art, Zustand, Wirkungsgrad und Betriebsweise des Elektrolyseurs
- ➔ Zusammensetzung des Rohwassers (z. B. Reinheit und Salzgehalt) und Verlust bei der Wasseraufbereitung
- ➔ Klimatische Bedingungen am Standort (z. B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit)

Durchlaufkühlung – hoher Wasserbedarf, minimaler Verbrauch

Bei der Durchlaufkühlung wird der Elektrolyseprozess mit durchgeleitetem Wasser gekühlt. Als Wasserquelle kommen je nach Standort sowohl Oberflächengewässer als auch Meerwasser zum Einsatz. Wird Meerwasser verwendet, ist aufgrund des Eintrags von Salzen und Mikroorganismen ein höherer Wartungsaufwand notwendig. Der Wasserbedarf ist bei den Durchlaufverfahren

groß, weil das Wasser unmittelbar nach der Kühlung wieder in seine ursprüngliche Quelle abgeleitet wird. Auch wenn bei diesem Prozess kaum Wasser verbraucht wird, verändert die Rückleitung durch Wärme und Verdunstung den ursprünglichen Wasserkörper. Vorteilhaft ist, dass aufgrund des schnellen Wasseraustauschs auf den Einsatz von Chemikalien in der Regel verzichtet werden kann.

Schematische Darstellung des Wasserbedarfs je Kilogramm Wasserstoff mit einer Durchlaufkühlung



Quelle: DVGW basierend auf [2 - 10]

Annahmen, die den Mengenangaben und grafischen Darstellungen zugrundeliegen

- ➔ Nutzung von Oberflächenwasser oder teilaufbereitetem Wasser
- ➔ Erwärmung des Kühlwassers um 5 bis 10 °C
- ➔ übliche Betriebsweisen für das Kühlsystem und den Elektrolyseur mit einem Wirkungsgrad von 67 bis 75 Prozent und einer durchschnittlichen Betriebstemperatur von 65 bis 80 °C

Ablaufkühlung – geringere Abwärmelast für das Gewässer

Die Abwärmelast für das Gewässer lässt sich verringern, indem das aufgewärmte Kühlwasser vor Rückleitung in den ursprünglichen Wasserkörper einem Kühlturm zugeführt wird. Darin wird ein

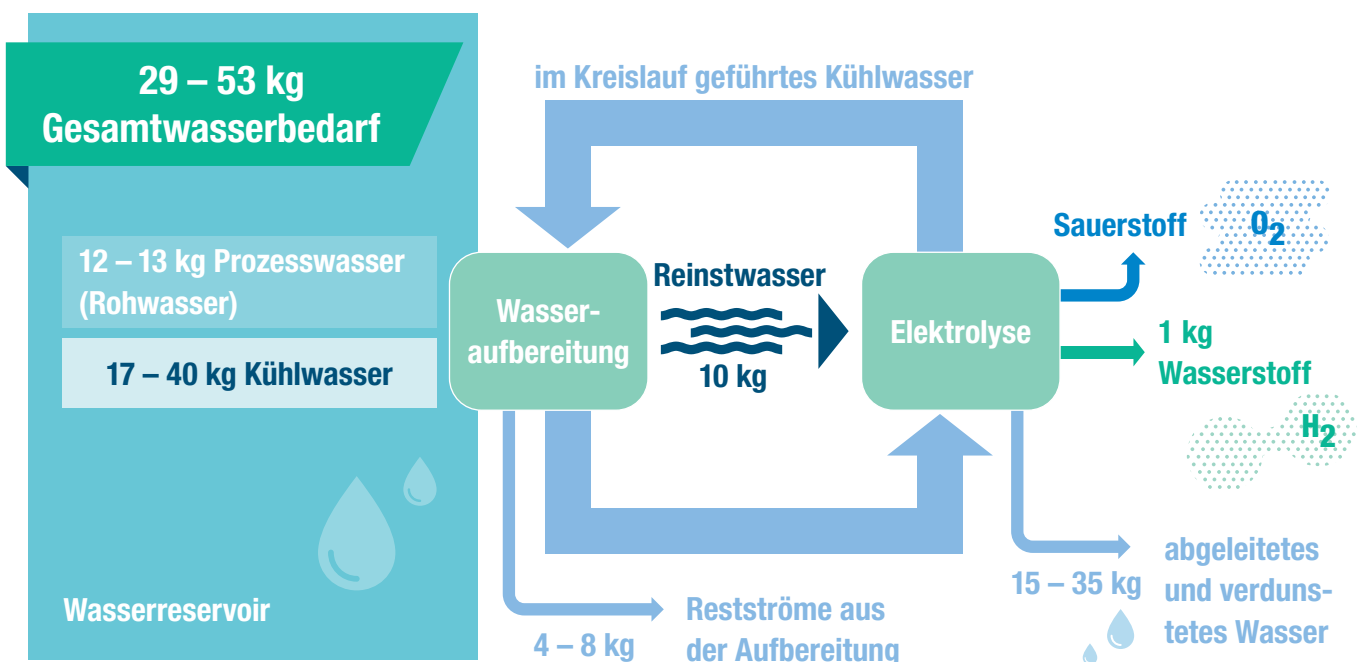
überwiegender Teil der Abwärme durch Verdunstungskühlung an die Umgebungsluft abgegeben. Wird das Kühlwasser nach einmaliger Nutzung zurückgeführt, wird von Ablaufkühlung gesprochen.

Kreislaufkühlung – Wasser mehrfach genutzt, weniger Bedarf

Bei der Kreislaufkühlung wird das Kühlwasser mehrfach genutzt, wodurch sich der Wasserbedarf deutlich verringert. Beim Einsatz von Verdunstungskühlern wird jedoch ein Teil des Wassers an die Umgebung abgegeben. Um schädliche Einflüsse der daraus resultierenden Aufkonzentrierung von Wasserinhaltsstoffen zu vermeiden, wird ein kleiner Teil des Wassers regelmäßig aus dem

System gezogen („blow down“) und durch Frischwasser („make-up“-Wasser) ersetzt. Nachteilig ist, dass aufgrund der hohen Verweilzeit häufig Chemikalien eingesetzt werden, um Ablagerungen und Biofilmbildung einzuschränken. Durch Einsatz eines geschlossenen Kühlsystems kann die Menge der Verdunstung und damit auch der Wasserbedarf weiter verringert werden.

Schematische Darstellung des Wasserbedarfs je Kilogramm Wasserstoff mit einer offenen Kreislaufkühlung



Quelle: DVGW basierend auf [2 - 10]

Der Wasserbedarf variiert je nach Zusammensetzung und notwendiger Aufbereitung des Kühlwassers

Je nach Zusammensetzung des Kühlwassers können Aufbereitungsverfahren notwendig sein, die den Wasserbedarf entsprechend erhöhen. Bei der Durchlaufkühlung sind die Anforderungen an die Wasserzusammensetzung allerdings gering und die Aufbereitung beschränkt sich im Wesentlichen auf die Entfernung großer Gegenstände, die das Equipment mechanisch schädigen könnten.

Bei Einsatz einer offenen Kreislaufkühlung kommt es aufgrund der charakteristischen Verdunstung von Wasser zur Aufkonzentrierung gelöster Stoffe, die das Kühlsystem und Anlagen-

komponenten durch Korrosion und Eintrag verschmutzender Substanzen (Fouling) stören können.

Daher ist je nach Ausgangszusammensetzung des Wassers eine spezifische Aufbereitung notwendig. Hierfür kommen verschiedene Verfahren wie zum Beispiel Ultrafiltration, Umkehrosmose, Ionenaustauscher oder die Zugabe von verschiedenen Chemikalien (Korrosionsinhibitoren, Antiscalanten, Biozide) in Frage [11, 12]. Dieses Problem verringert sich bei einer geschlossenen Kreislaufkühlung.

Wie viel Kühlwasser wird benötigt?

Bei der Durchlaufkühlung werden 920 – 2.450 Liter Wasser pro erzeugtem Kilogramm Wasserstoff benötigt, das Kühlwasser nach Nutzung aber zurück ins Gewässer geleitet. Durch den Einsatz einer Kreislaufkühlung, einschließlich Verdunstungskühlung, kann sich der Kühlwasserbedarf um das bis zu 50-fache auf 17 bis 40 Liter pro Kilogramm Wasserstoff reduzieren.

Neben der Kühlung über einen wassergeführten Kühlkreislauf gibt es auch Optionen, die Abwärme durch Trockenkühlung mit Luft als Kühlmedium abzuführen. Dadurch kann der Wasserbedarf minimiert werden.

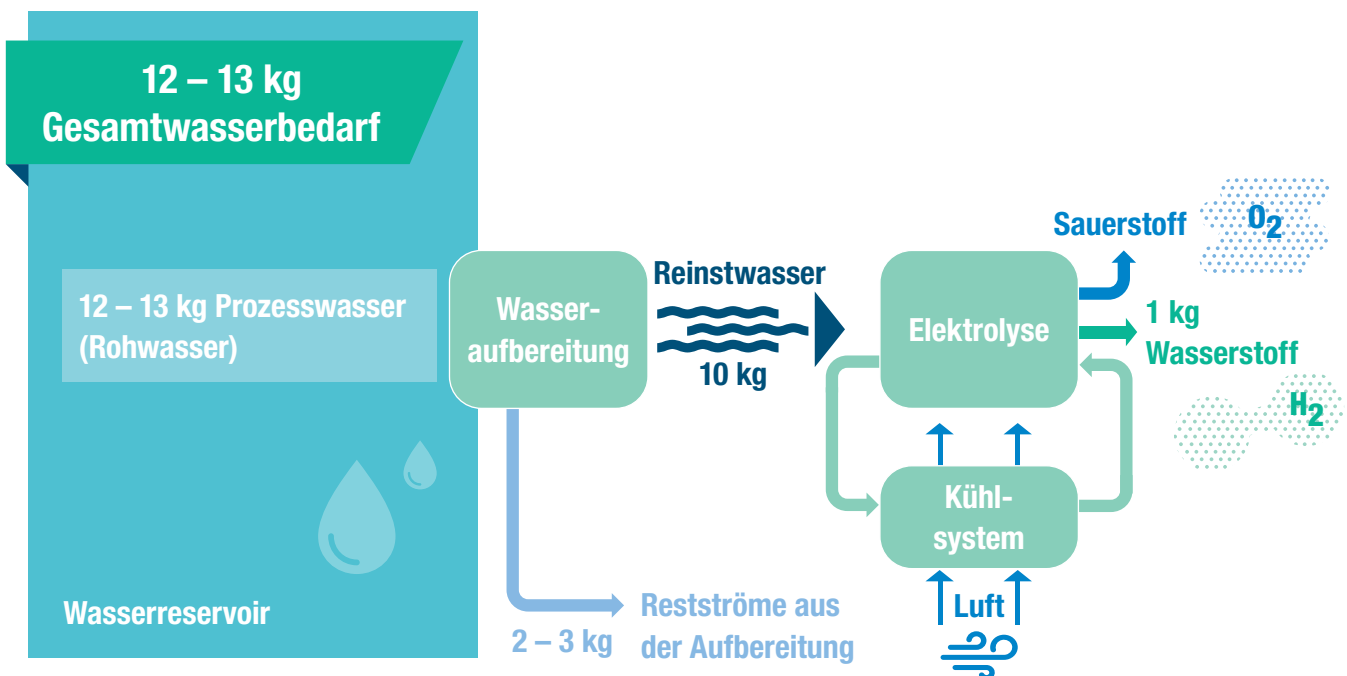


Luftkühlung – kein Wasserverlust in einem geschlossenen System

Luftkühlsysteme, die auch als Trockenkühlssysteme bekannt sind, ähneln dem typischen System mit geschlossenem Kreislauf. Der Verdunstungskühlturm wird jedoch durch einen Trockenkühlturm ersetzt, bei dem die Umgebungsluft zur Kühlung verwendet wird. Die Luft strömt an einer Reihe von Rohren vorbei, die das Kühlwasser enthalten, und nimmt dort die Wärme auf. Es gibt keinen

Wasserverlust durch Verdunstung, da das Arbeitsmedium und die Kühlluft nicht in Kontakt kommen und das Kühlwasser in einem geschlossenen System gehalten wird. In der Praxis verbrauchen Trockenkühlssysteme etwa 95 Prozent weniger Wasser als Nasskühlssysteme.

Schematische Darstellung des Wasserbedarfs je Kilogramm Wasserstoff mit einer Luftkühlung



Quelle: DVGW basierend auf [2-10]

Alternative: Abwärmenutzung

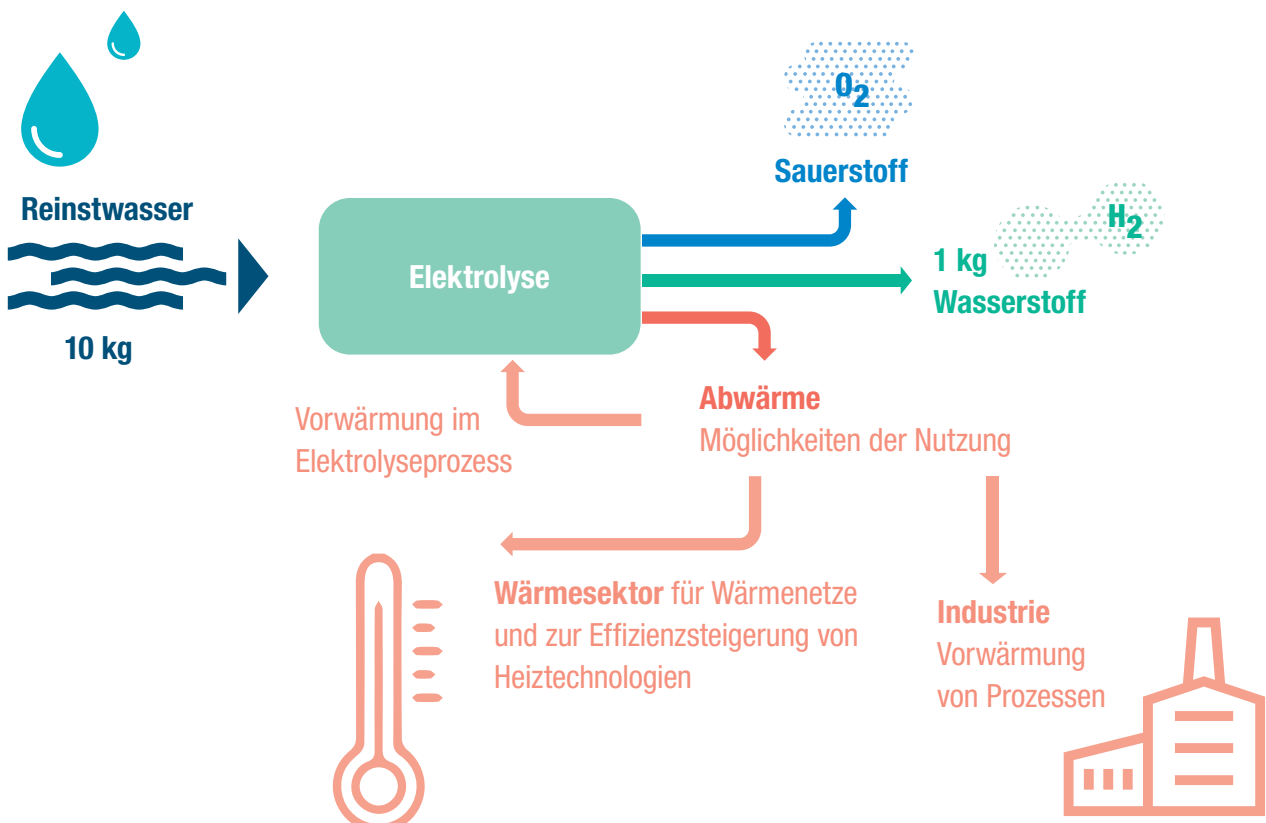
Der Kühlwasserbedarf kann weiter minimiert oder verhindert werden, indem die entstehende Prozesswärme abgeführt und energetisch genutzt wird. Durch eine solche Nutzung gemäß des Kraft-Wärme-Kopplungs-Prinzips lässt sich der Wasserverbrauch gegenüber einer Wasserkühlung erheblich verringern

und gleichzeitig der Gesamtwirkungsgrad des Elektrolyseurs auf über 90 Prozent anheben. Ist eine Abwärmenutzung am Elektrolysestandort möglich, so stehen für diese Energie verschiedene Nutzungsoptionen zur Verfügung.

Möglichkeiten der Abwärmenutzung

- Vorwärmung im Elektrolyseprozess
- thermische Verfahren der Wasseraufbereitung
- in Nahwärmenetzen (in Neubaugebieten oder Wärmenetzen im Bestand) sowie in Niedertemperatur-Netzen oder Fernwärmenetzen im Sommerbetrieb
- Rücklaufanhebung zur Effizienzsteigerung von Heizungstechnik (z. B. von 55 °C auf 65 °C)
- Erhöhung der Quelltemperatur und Effizienzsteigerung von Wärmepumpen
- Vorwärmung industrieller Prozesse

Darstellung des Wasserbedarfs je Kilogramm Wasserstoff bei Nutzung der Abwärme



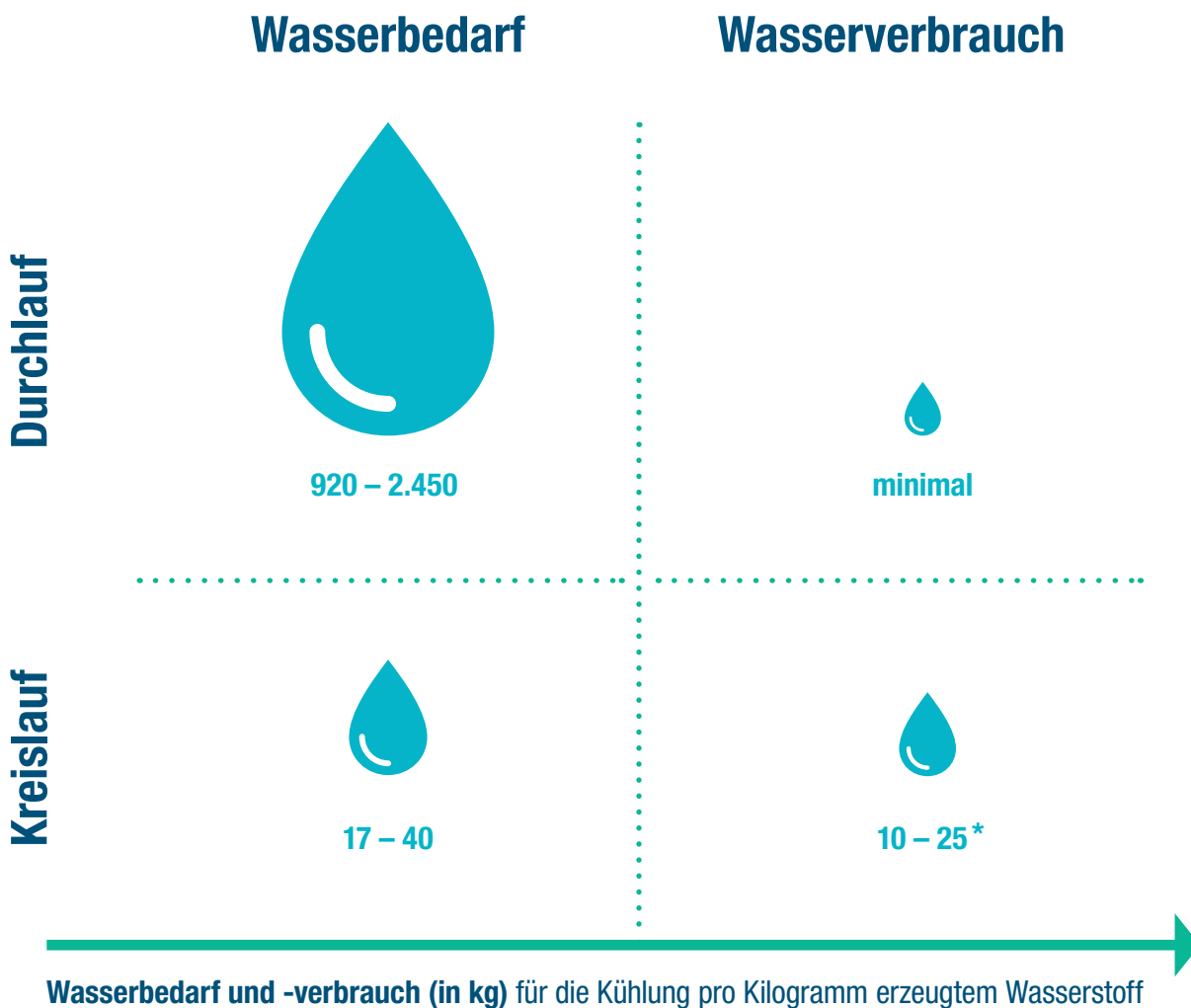
Quelle: DVGW basierend auf [2 - 10]

Wasserbedarf versus Wasserverbrauch

Bei Bewertung dieser Zahlen ist die Unterscheidung zwischen Wasserbedarf und Wasserverbrauch wichtig. Während die Durchlaufkühlung mit Abstand den höchsten Wasserbedarf aufweist, wird hierbei quasi kein Wasser

verbraucht. Bei der Kühlung im offenen Kreislauf verdunstet ein verfahrens- und standortspezifischer Teil des Wassers und kann dem ursprünglichen Wasserkörper nicht wieder zugeführt werden.

Wie viel Kühlwasser wird für die Erzeugung von einem Kilogramm Wasserstoff via Elektrolyse benötigt?



*Verluste durch Verdunstung

Viele Faktoren entscheiden über den Wasserbedarf

Wasser ist ein elementarer Rohstoff für die Wasserstoff-erzeugung via Elektrolyse. Für die Herstellung von einem Kilogramm Wasserstoff werden zehn Kilogramm Reinstwasser verbraucht. Je nach Zusammensetzung des Rohwassers kommen spezifische Mengen für die Aufbereitung hinzu, und je nach Verfahren wird Wasser für die Kühlung oder die Ableitung der entstehenden Abwärme benötigt.

In der Industrie sind bereits eine Reihe von Verfahren zur Wärmeabfuhr mit Wasser etabliert, die ebenso bei Elektrolyseuren eingesetzt werden können. Der Bedarf an Kühlwasser unterscheidet sich von System zu System. Grundsätzlich lassen sich drei geografische Standortbedingungen unterscheiden:

→ Sind am Elektrolysestandort ausreichend Wasserressourcen vorhanden, können Systeme mit hohem Wasserbedarf die wirtschaftlich sinnvollste Lösung sein. Bei diesem Verfahren wird das Wasser nach der Erwärmung im Prozess wieder in das Wasserreservoir zurückgeführt und geht somit nicht verloren – das reduziert den Wasserfußabdruck¹. Außerdem kann auf aufwendige

Reinigungsprozesse und den Einsatz von Chemikalien für die Aufbereitung des Wassers verzichtet werden.

- Stehen vor Ort weniger natürliche Wasserquellen zur Verfügung, kann der Bedarf an Kühlwasser stark reduziert werden, indem es im Kreislauf geführt wird. Allerdings sind bei diesen Systemen die Anforderungen an die Zusammensetzung des verwendeten Wassers höher als bei der Durchlaufkühlung und ein Teil des Kühlwassers wird durch Verdunstung an die Luft abgegeben.
- Für Standorte, die sich durch eine sehr geringe Wasserverfügbarkeit auszeichnen, gibt es Alternativen zur Nutzung von Kühlwasser. Es gibt zahlreiche industrielle Beispiele, die zum Beispiel mit Luftkühlung arbeiten. Auch sollte geprüft werden, ob die anfallende Abwärme in der näheren Umgebung genutzt werden kann, zum Beispiel in Industrieprozessen oder für die Gebäudewärme in Gewerbe, Handel und Haushalten. Das hätte den positiven Nebeneffekt, dass sich der energetische Gesamtwirkungsgrad der Elektrolyse erhöht.

¹Laut Umweltbundesamt ist der Wasserfußabdruck ein Indikator für die Wassernutzung.



Der Wasserbedarf für die Erzeugung von grünem Wasserstoff hängt von vielen Faktoren ab und lässt sich nicht pauschal bestimmen. Denn sowohl verfahrenstechnische Voraussetzungen, wie Art und die Betriebsweise des Elektrolyseurs oder die Beschaffenheit des Kühlsystems, als auch die Zusammensetzung des verwendeten Wassers sowie klimatische und hydrologische Verhältnisse am Standort selbst entscheiden über die benötigten Wassermengen.



Für die verschiedenen Standorte und Rahmenbedingungen gibt es bereits etablierte verfahrenstechnische Lösungen. Wichtig ist es, die Gegebenheiten vor Ort ausreichend zu berücksichtigen und adäquate Prozesse und Verfahren zu wählen, die den Wasserfußabdruck minimieren und gleichzeitig die wirtschaftliche Machbarkeit des Projekts gewährleisten.

Literaturverzeichnis

- [1] DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V.: Genügend Wasser für die Elektrolyse, 2023. Online: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2o-fuer-elektrolyse-dvgw-factsheet.pdf> (abgerufen im März 2024).
- [2] Australian Government – Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, Australien Hydrogen Council und Arup Australia Pty Ltd., Water for Hydrogen – Technical Paper, Brisbane, 2022. Online: <https://h2council.com.au/wp-content/uploads/2023/02/221114-Arup-Technical-paper-Water-for-Hydrogen-report-FINAL.pdf> (abgerufen im Januar 2024).
- [3] W. J. Tiktak, Heat Management of PEM Electrolysis – A study on the potential of excess heat from medium- to large-scale PEM electrolysis and the performance analysis of a dedicated cooling system, 2019.
- [4] Cummins, HyLYZER Water Electrolyzers (Datenblatt), 2021. Online: <https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hylyzer-1000-specsheet.pdf> (abgerufen im Januar 2024).
- [5] Institute for Sustainable Process Technology, Integration of hydrohub gigawatt electrolysis facilities in five industrial clusters in the Netherlands, 2020. Online: <https://ispt.eu/publications/final-report-integration-of-hydrohub-gigawatt-electrolysis-facilities-in-five-industrial-clusters-in-the-netherlands> (abgerufen im Februar 2024).
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA) and BlueRisk, „Water for hydrogen production, 2023. Online: <https://www.irena.org/Publications/2023/Dec/Water-for-hydrogen-production> (abgerufen im Januar 2024).
- [7] D. Fius, Electrolysis Water Requirements, 2020. Online: <https://www.energonx.com/publications/EnergonX%201%20Water%20-%20Electrolysis%20of%20hydrogen.pdf> (abgerufen im Februar 2024).
- [8] K. Lee, The Water Impact of Hydrogen, 2023. Online: <https://blog.sensus.com/the-water-impact-of-hydrogen> (abgerufen am 18. März 2024).
- [9] Eurowater - A Grundfos Company, Water treatment for hydrogen production. Online: <https://www.eurowater.com/en/hydrogen-production> (abgerufen am 18. März 2024).
- [10] GET H2, Factsheet Wasserhaushalt Elektrolyse, 2024. Online: https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/geth2_factsheet_wasserverbrauch_elektrolyse.pdf (abgerufen am 2. Mai 2024).
- [11] S.-Y. Pan, S. W. Snyder, A. I. Packman, Y. J. Lin und P.-C. Chiang, Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus“ Water-Energy Nexus, Bd. 1, Nr. 1, pp. 26-41, 2018.
- [12] R. R. Chandwankar, Cooling Water Treatment, Handbook of Water and Used Water Purification, Springer, pp. 1-42, 2019.



Impressum

Autorinnen und Autoren

Dr. Florencia Saravia (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT)
Dr. Stefan Gehrmann, Dr. Stefanie Schwarz und Marie-Ann Koch (DVGW)

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
Technisch-wissenschaftlicher Verein
Josef-Wirmer-Straße 1–3 · 53123 Bonn
info@dvw.de · www.dvw.de

Gestaltung

mehrwert intermediale kommunikation GmbH, Köln · www.mehrwert.de

Bildnachweis

Titel: stock.adobe/shocky

© DVGW Bonn · Stand Juni 2024