

Wasser-Wasserstoff-Nexus

Wassernutzung in dezentralen Energiesystemen mit Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien

Welche Rolle spielt grüner Wasserstoff in der dezentralen Energieversorgung?

Grüner Wasserstoff kann eine nachhaltige Alternative gegenüber fossilen Energieträgern, wie zum Beispiel Kohle, Erdöl oder Erdgas, bieten. Neben seinem Potential als transport- und handelsfähiger Energieträger, zum Beispiel für Anwendungen in der Mobilität, kann er in Kombination mit Batterien auch als Langzeitenergiespeicher in dezentralen Energiesystemen zum Einsatz kommen. So kann er unter anderem an Standorten ohne nachhaltige und verlässliche Energieversorgung als umweltfreundliche Alternative zu Dieselgeneratoren eingesetzt werden.¹

Wie wird grüner Wasserstoff hergestellt?

Um Wasserstoff herzustellen werden Wassermoleküle (H_2O) mit Hilfe von Strom in der Wasserelektrolyse in ihre Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) aufgespalten. Die Herstellung eines Kilogramms Wasserstoff erfordert rein stöchiometrisch 9 Kilogramm Wasser. Dabei gilt: Je höher der Wasserstoffbedarf und damit die Elektrolysekapazitäten in der Praxis sind, desto mehr Strom und Wasser müssen bereitgestellt werden. Der hergestellte Wasserstoff kann nur dann als „grün“ bezeichnet, wenn der eingesetzte Strom aus erneuerbaren Energiequellen, wie zum Beispiel aus Wind oder aus Sonne, stammt. Eine nachhaltige Produktion und Nutzung von grünem Wasserstoff berücksichtigt neben dem verwendeten Strom auch das Wasser, das dabei zum Einsatz kommt. Dies setzt eine umsichtige Bereitstellung und Management der Ressource Wasser voraus. Je nach eingesetzter Elektrolysetechnologie, vor Ort vorhandener Rohwasserquelle, Auslegung der Wasseraufbereitung und des angewandten Kühlkonzepts entstehen zusätzliche Wasserbedarfe, die zur Herstellung des Wasserstoffs bereitgestellt werden müssen (LBST, DHI WASY & Water Science Policy 2024).

Warum spielt die Nutzung von Wasser dabei eine besondere Rolle?

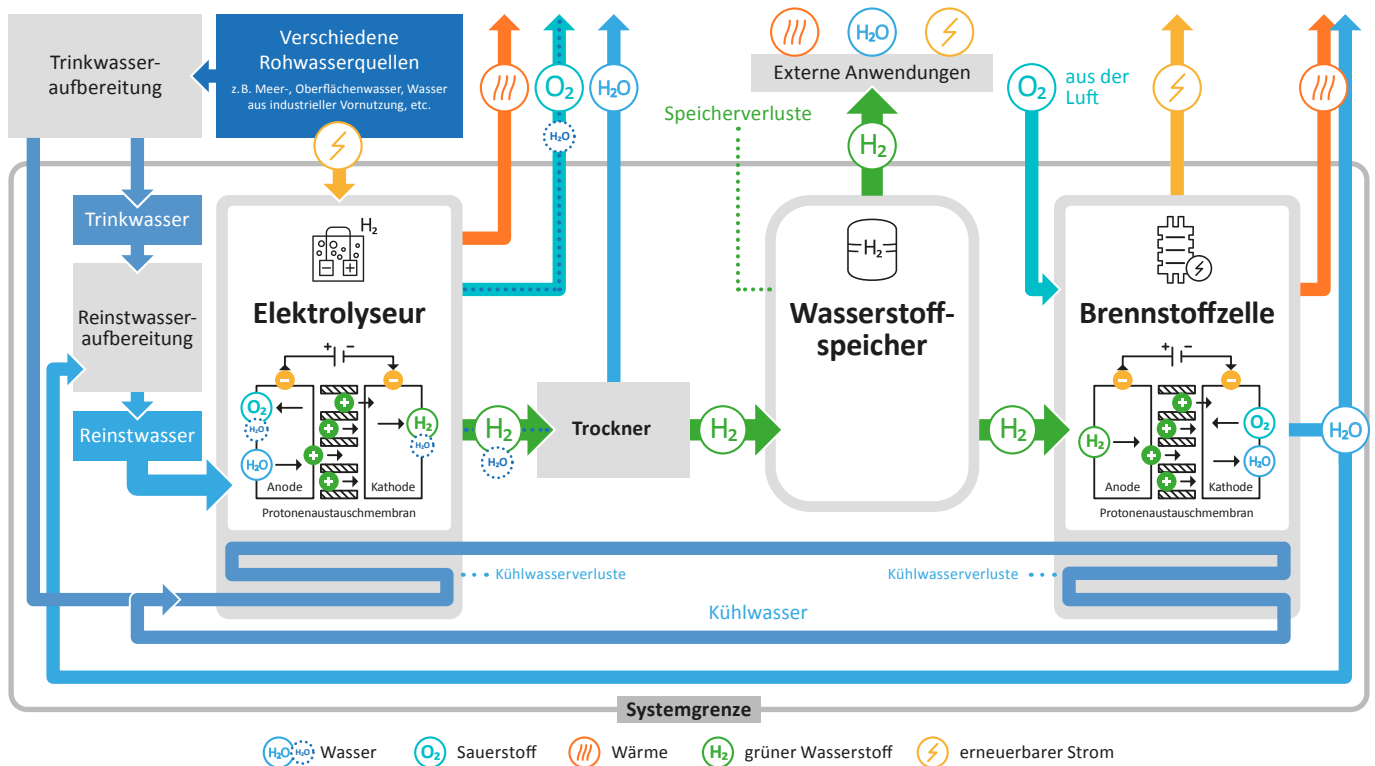
Diese notwendige Verknüpfung von Wasserstoff und Wasser, auch „Nexus“ genannt, ist insbesondere an Standorten kritisch, die von Wasserstress, Wasserknappheit, mangelnden Wasserinfrastrukturen oder unzureichender Energieversorgung geprägt sind. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung, wie sie in den [Sustainable Development Goals \(SDGs\) 6 und 7](#) der Vereinten Nationen beschrieben wird, ist es essenziell, eine systemische Perspektive auf den Energie- und Wasserfußabdruck und einen kontextorientierten Blick auf die jeweilige Anwendung einzunehmen.



Wasserstress

Wasserstress ist als das Verhältnis des gesamten Wasserbedarfs (zum Beispiel für die Nutzung in Haushalten, in der Industrie, für Bewässerung und in der Viehzucht) zu den verfügbaren erneuerbaren Vorräten (Oberflächen und Grundwasser) in einem bestimmten Gebiet definiert. Dabei berücksichtigt werden auch Auswirkungen der natürlichen Nutzungshierarchien der Wasserverbräuche. Je höher dieser Verhältniswert, desto höher die Nutzungskonkurrenz und damit der Wasserstresswert ([World Resources Institute 2023](#)). Aktuell lebt ein Viertel der Weltbevölkerung unter extrem hohem Wasserstress ([UNESCO 2024](#)).

Infografik: Energie- und Wassersystem



Welche Systemgrenze wird im beschriebenen System definiert?

Die Definition der Systemgrenze (in der Grafik durch den grauen, äußeren Kasten dargestellt) erlaubt es, den Wasserfußabdruck eines Systems zu ermitteln, wichtige Einflussfaktoren zu identifizieren und vergleichbar zu machen. Im Fall der hier beschriebenen dezentralen Energiesysteme mit Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien schließt die Systemgrenze alle zentralen Prozesse zur Energieversorgung ein: Wasserstoffbereitstellung (Elektrolyse), Wasserstoffspeicherung und Rückverstromung über die Brennstoffzelle. Auch die Reinstwasseraufbereitung wird innerhalb der Systemgrenze gesehen, da die zurzeit umgesetzten Projekte an die lokale Trinkwasserversorgung angeschlossen sind. Je nach lokaler Si-

tuation sollten jedoch auch die zusätzlichen oder abweichenden Schritte innerhalb der Systemgrenzen betrachtet werden, die notwendig sind, um verschiedene Rohwasserquellen zu Reinstwasser für Elektrolyse aufzubereiten. Dieses Factsheet widmet sich ausschließlich der Betrachtung von Systemen mit der oben beschriebenen Systemgrenze. Es befasst sich dabei mit ihren technischen Grundlagen sowie ersten Erkenntnissen zu ihrer Wassernutzung und ihrem Wasserverbrauch. Es beschäftigt sich nicht mit alternativen (zum Beispiel biogenen) Wasserstofferzeugungspfaden oder allgemeinen Fragen zur Bewertung der Wasserverfügbarkeit für Wasserstoffproduktion für den Export oder lokalen Einsatz in Fahrzeugen.

Wie sehen die Zusammenhänge von Energie, Wasserstoff und Wasser in dezentralen Energiesystemen im Detail aus?

Als Eingangsstoffe für die Elektrolyse fließen erneuerbarer Strom (gelb) und Wasser (blau) in den Elektrolyseur. Je nach Ausgangsqualität der zur Verfügung stehenden Rohwasserquelle finden verschiedene Aufbereitungsschritte statt, um für die Elektrolyse de-ionisiertes Reinstwasser² zu erhalten. Wie auf Seite 1 bereits beschrieben, produziert der Elektroly-

seur über eine chemische Reaktion als Hauptprodukt grünen Wasserstoff (grün), welcher vor der Speicherung zunächst Separierungs- und Trocknungsprozesse durchläuft. Dabei wird er von Wassermolekülen separiert und das entstandene überschüssige Wasser wird abgeschieden. Auch der als Nebenprodukt entstan-

► dene Sauerstoff (türkis) wird vermischt mit anderen Gasen und Wasser meist der Umgebung zugeleitet, könnte aber auch für weitere Anwendungen (zum Beispiel für Gewässer-sanierung) verwendet werden. An diesen beiden Stellen treten deshalb Wasserverluste auf, die theoretisch durch gezielte Maßnahmen reduziert werden könnten. Als weiteres Nebenprodukt wird außerdem Wärme (orange) in die Umgebung abgegeben. Diese könnte bei Bedarf auch extern genutzt werden. Anknüpfend an die Wasserstoffproduktion gelangt der Wasserstoff in einen Speicher. Dafür stehen je nach Platzverfügbarkeit und notwendiger Speicherkapazität verschiedene Technologieoptionen zur Verfügung.

Bei Strombedarf und zeitgleich fehlender Produktion durch erneuerbare Energiequellen kann der gespeicherte Wasserstoff (mit geringen Speicherverlusten) dann wieder aus dem Speicher entnommen werden und in einer Brennstoffzelle zur Energieumwandlung eingesetzt werden. Diesen Prozess nennt man Rückverstromung. In der Brennstoffzelle reagiert der Wasserstoff (H_2) mit Sauerstoff (O_2) aus der Umgebungsluft wieder zu Wasser (H_2O), wobei Strom abgegeben wird. Wie im Elektrolyseur, wird auch in der Brennstoffzelle während der Umwandlungsprozesse Wärme produziert, die ebenfalls abgeführt und genutzt werden kann. Das dabei entstandene Wasser kann mit geringen Verlusten wiederum als Ausgangsstoff für die Wasserelektrolyse genutzt werden.

Neben der Nutzung von Wasser für Wasserstoffproduktion und -einsatz, wird Wasser auch für die Kühlung der Elektrolyse- und Brennstoffzellenkomponenten benötigt. Die Kühlbedarfe wachsen zwar mit zunehmender Lebensdauer des Elektrolyseurs, es fallen dabei in Summe jedoch geringe Wasserverluste an (LBST, DHI WASY & Water Science Policy 2024). Zusätzlich sind sie abhängig von den klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) des Standorts. Durch die Nutzung von Abwärme des Systems kann der Kühlwasserbedarf und damit der Wasserverbrauch reduziert und gleichzeitig die Systemeffizienz erhöht werden (DVGW 2024).

Der größte Anteil des Kühlwassers bleibt für die Dauer der Nutzung der Komponenten in einem geschlossenen Kreislauf. Bei Stilllegung, (zeitweiser) Außerbetriebnahme der Anlage oder aufgrund von Wartung kann das Kühlwasser wieder dem lokalen Ökosystem zugeführt werden (GET H2 2023) und muss bei Wiederaufnahme des Betriebs ersetzt werden.

Wassernutzung und -verbrauch: Welche Eckpunkte bestimmen den Wasserfußabdruck?

Ähnlich wie bei einer Lebenszyklusanalyse, kann der Wasserfußabdruck mit Hilfe der oben dargestellten Grafik bestimmt werden. Hierbei wird die Gesamtmenge aller über die Systemgrenze ein- und ausströmenden Wassermengen in Relation zu einer bestimmten funktionalen Einheit (zum Beispiel 1 kWh Strom) berechnet: das einfließende Trinkwasser, die Ausflüsse über die Wasserstofftrocknung, der Sauerstoffstrom, die Verluste über die Abluft der Brennstoffzelle, sowie die Kühlwasserverluste.



Wasserfußabdruck

Die Richtlinie DIN EN ISO 14046:2014 definiert den Wasserfußabdruck als „Kennzahl(en) zur quantitativen Bestimmung der potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser“. Der Standard verfolgt einen Ökobilanz-basierten Ansatz und umfasst die Wasserfußabdruck-Sachbilanz sowie die Wirkungsabschätzung des Wasserfußabdrucks. Letztere soll als „Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit Wasser, verursacht durch ein Produkt, einen Prozess oder eine Organisation, [dienen]“ (ISO 2014). Verschiedene, meist ISO 14046-konforme Methoden³ helfen bei der praktischen Ableitung von multidimensionalen Indikationen für ein bewusstes und nachhaltigeres Management der Ressource Wasser. Das hier vorliegende Factsheet zeigt zwar Schlüsselemente der Berechnung auf, hat aber nicht den Anspruch, den Wasserfußabdruck eines dezentralen Energiesystems zu erstellen.

Durch diesen Prozess werden Möglichkeiten identifiziert, den Wasserverbrauch so gering wie möglich zu halten, indem sämtliche Ausflüsse (soweit technisch praktikabel) minimiert werden. Das Wasser aus den Sauerstoff- und Wasserstoffströmen sowie der Abluft der Brennstoffzelle sollte möglichst gründlich separiert, aufgefangen, und zur Reinstwasseraufbereitung zurückgeführt werden.

In der Grafik wird auch illustriert, wie sich der Wasserfußabdruck verändert, wenn der Wasserstoff nicht in einer Brennstoffzelle rückverstromt wird. Stattdessen kann der Wasserstoff das System verlassen und in verschiedenen externen Anwendungen, zum Beispiel in der Mobilität, eingesetzt werden, bei denen die Rückführung des freiwerdenden Wassers in das Ursprungssystem nicht praktikabel ist. Außerdem existieren Anwendungsfälle, in denen dezentral gelegene Brennstoffzellensysteme ohne lokale Elektrolyse mit Wasserstoff aus einem zentralen Elektrolyseur beliefert werden. Es ist dabei zwar möglich, das jeweils freiwerdende Wasser aufzufangen, es wird jedoch streng genommen aus dem Ursprungs-Elektrolysesystem entfernt. Ein ähnliches Bild ergibt sich, wenn die Brennstoffzelle zwar am gleichen Ort des Elektrolyseurs zur Rückverstromung eingesetzt wird, das freiwerdende Wasser jedoch anderen Anwendungen zugeführt wird.

Ein zeitlicher Effekt in der Betrachtung des Wasserfußabdrucks ergibt sich, wenn der Wasserstoffspeicher über mehrere Monate gefüllt ist, und erst zu einer anderen Jahreszeit zur Rückverstromung eingesetzt wird.

Welche Erfahrungswerte zur Wassernutzung bieten Beispielsysteme?

Die systemische Betrachtung der Wassernutzung in dezentralen Wasserstoff- und Brennstoffzellensystemen setzt eine spezifische Analyse des Systems auf Grundlage von konkreten Daten voraus. Bisher sind Erfahrungen mit dieser Art von Systemen allerdings eingeschränkt und Daten oft nicht öffentlich verfügbar.

Die **Exportinitiative Umweltschutz (EXI)** fördert daher Pilotprojekte in diesem Bereich, und sammelt erste Erfahrungen aus ihrem Betrieb. Ein Beispiel-Projekt der EXI umfasst ein dezentrales Energiesystem mit 10 kW AEM (Anion-Exchange-Membrane) Elektrolyseurleistung, 10 kg Wasserstoffspeicher und einer 8 kW PEM (Proton-Exchange-Membrane) Brennstoffzelle und ist bereits seit einem Jahr in Betrieb. Daraus können erste Rückschlüsse auf die entsprechenden Wasserbedarfe gezogen werden.

Beim Betrieb des Beispielsystems zeichnet sich ab, dass eine Zufuhr von 5 l an zusätzlichem Kühlwasser pro Quartal benötigt wird. Für die Elektrolyse an sich werden bei Volllastbetrieb der 10 kW-Einheit 1,68 l pro Stunde an Wasser ver-

braucht. Das entspricht in diesem Fall einem täglichen Bedarf an 10 l Frischwasser, die dem System für die Wasseraufbereitung und anschließende Elektrolyse bereitgestellt werden. Folgende weitere praktische, für den Wasserverbrauch relevante Erfahrungen wurden zudem bisher gesammelt:

- Betriebszeiten und Betriebspausen des Stromabnehmers führen gegebenenfalls zu temporärem Stillstand des Gesamtsystems und machen einen Austausch des Elektrolyts erforderlich
- Planmäßiger Austausch des Elektrolyts gemäß Wartungsplan
- Druckminderungen im Kühlsystem können zu einem erhöhten Wasserbedarf des Kühlsystems führen (Fraunhofer IWU 2024)

Fazit und Ausblick:

Der Wasser-Wasserstoff-Nexus verknüpft das Energie- mit dem Wassersystem und muss daher ganzheitlich betrachtet werden, um den nachhaltigen Einsatz beider Ressourcen sicherzustellen. Ein zentrales Werkzeug dafür ist die Ermittlung des Wasserfußabdruckes des gesamten Energieversorgungssystems. Systeme, in denen Wasserstoff als Langzeitenergiespeicher dient, und in denen Elektrolyse und Rückverstromung durch Brennstoffzellentechnologien lokal verknüpft werden, können Wasserressourcen schonend einsetzen.

Die Wassernutzung innerhalb solcher Systeme kann verbessert werden, indem detaillierte Daten zu ihrem Verbrauch erhoben und analysiert werden. Die so gewonnenen Ergebnisse ermöglichen eine ganzheitliche Perspektive auf das tatsächliche Ausmaß der Wassernutzung, die alle Komponenten berücksichtigt. Zum einen können so Optimierungspotentiale innerhalb der Systeme herausgearbeitet werden. Zum anderen kann so der Gesamteffekt des Systems auf die Situation vor Ort, insbesondere in Bezug auf Wasserstress, bewertet werden.

¹ Siehe auch NOW-Factsheetreihe „Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung“ ([Mobilfunk](#), [Netzersatzanlagen](#), [Inselnetze](#))

² Je nach eingesetzter Elektrolýsetechnologie können die Anforderungen an die Reinheit der Ressource Wasser unterschiedlich hoch ausfallen.

³ Die [Water Footprint Toolbox](#) ist eine interaktive Sammlung von Konzepten, Standards, Datenbanken und Wirkungsabschätzungsmethoden in Bezug zu Wasserfußabdruck.