



Thema:

Wasser – Wasserverfügbarkeit, Bereitstellungspfade und Infrastruktur

Stuttgart, Juli 2025

Kontakt

Projekt: InnoFuels

Innovationsschwerpunkt: Supply Chain

Institution:



Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)

Meitnerstraße 1, 70563 Stuttgart

Autoren:

Tobias Buchmann (tobias.buchmann@zsw-bw.de)

Marcel Klingler (marcel.klingler@zsw-bw.de)

Patrick Wolf (patrick.wolf@zsw-bw.de)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Koordiniert durch:



Projektträger:



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Technische Anforderungen an Wasser für die Wasserstoff- und PtL-Produktion	3
3	Wasserverfügbarkeit als Standortfaktor	5
4	Wasserversorgung	10
4.1	Wassergewinnung und potentielle Wasserquellen	10
4.1.1	Meerwasser	10
4.1.2	Abwasser	11
4.1.3	Oberflächenwasser	11
4.1.4	Regenwasser	12
4.1.5	Grundwasser	12
4.1.6	Leitungswasser	12
4.1.7	Wasser aus der Luft	13
4.2	Wasserverteilung und -transport	14
4.3	Wasserspeicherung	17
4.4	Wasseraufbereitung	18
5	Ökonomische Relevanz der Wasserbereitstellung für PtL-Kraftstoffe	20
5.1	Kosten Wasseraufbereitung an den Gesamtkosten	20
5.2	Regionale Unterschiede (Deutschland vs. sonnen-/windreiche Regionen)	21
5.3	Technologischer Vergleich: Effizienz, Nachhaltigkeit und Kosten	22
6	Umweltwirkungen	23
7	Fazit	25
	Tabellenverzeichnis	26
	Literaturverzeichnis	27

1 Einleitung

Im Zuge der Transformation des Energiesystems und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen rückt die Nutzung strombasierter Kraftstoffe zunehmend in den Fokus. Insbesondere im Luftverkehr, dessen Dekarbonisierung mit batterieelektrischen und rein wasserstoffbasierten Antriebssystemen auf absehbare Zeit technisch limitiert bleibt, gelten Power-to-Liquid-(PtL)-Kraftstoffe als zentrale Lösungsmöglichkeit. Als synthetisch hergestellte grüne Kohlenwasserstoff ermöglichen PtL-Kraftstoffe eine langfristige Substitution fossiler Flugkraftstoffe bei gleichzeitiger Nutzung der bestehenden Infrastruktur. Entsprechend haben PtL-Kraftstoffe in den europäischen Strategien oder der SAF-Quote bereits einen festen Platz.

Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist eng mit dem Aufbau von PtL-Produktionskapazitäten verbunden, insbesondere zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Grüner Wasserstoff bildet dabei die Ausgangsgröße für die Erzeugung dieser grünen Moleküle. Neben Strom aus erneuerbaren Quellen ist Wasser eine grundlegende Ressource, deren Verfügbarkeit und Qualität direkt Auswirkungen auf die Realisierbarkeit von Elektrolyse- und PtL-Anlagen haben. Die gilt nicht nur für die Elektrolyse selbst, sondern auch für nachgelagerte Prozessschritte wie die Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese.

Wasser soll dabei nicht als Engpassfaktor, aber als wichtiger Planungsfaktor verstanden werden. Die Wahl geeigneter Wasserquellen, deren Aufbereitung und Verteilung, sowie deren Einbindung in bestehende Infrastrukturen beeinflussen die Standortwahl, Skalierbarkeit und Nachhaltigkeit der PtL-Produktion. Vor dem Hintergrund wachsender regionaler Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit, die unter anderem auf den Klimawandel, intensive Landwirtschaft und zunehmende Flächenversiegelung zurückzuführen sind, ist eine integrierte Betrachtung und frühzeitige Einbindung der Wasserbereitstellung in die Standortplanung unerlässlich.

Im Rahmen der Plattform InnoFuels wird die gesamte Wertschöpfungskette synthetischer Kraftstoffe systematisch untersucht – von der Erzeugung bis zur Anwendung. Mit dem Innovationsschwerpunkt „Supply Chain“ rückt nun auch die bislang oft vernachlässigte Inputgröße Wasser in den Fokus. Diese Kurzstudie greift gezielt das Thema Wasserverfügbarkeit und Wasserbedarf im Kontext von Elektrolyse- und PtL-Anlagen auf. Ziel ist es, ein belastbares Verständnis für den Wasserbedarf, die technischen Anforderungen, mögliche Risiken für Natur und Umwelt und die infrastrukturellen Voraussetzungen zu schaffen.

2 Technische Anforderungen an Wasser für die Wasserstoff- und PtL-Produktion

Die Herstellung von PtL-Kraftstoffen, sei es über die Fischer-Tropsch-Synthese oder die Methanolroute, erfordert den Einsatz von Wasser in verschiedenen Prozessstufen. Ein signifikanter Anteil des Wasserbedarfs entfällt dabei auf die Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse. Für die Produktion von Wasserstoff wird neben elektrischem Strom zwingend aufgereinigtes Wasser benötigt. Die Qualität von

Reinstwasser spielt eine zentrale Rolle für die Effizienz und Langlebigkeit von Elektrolyseanlagen und Power-to-X-(PtX)-Prozessen. Eine unzureichende Wasserqualität kann zu Salzablagerungen auf den Membranen und Elektroden von Elektrolyseuren führen, was deren Leistungsfähigkeit und Lebensdauer negativ beeinflusst. Daher stellt die prozessorientierte Aufbereitung von Wasser nicht nur ein wichtiges technisches Kriterium dar, sondern ist ein entscheidender Faktor für die nachhaltige Herstellung von Wasserstoff und damit auch nachgelagert von synthetischen Kraftstoffen (Envirofalk, 2024).

Da Verunreinigungen im Wasser verschiedene Probleme verursachen können, ist die Reinheit des Wassers wichtig. Es gibt verschiedene Ansätze zur Beschreibung der Reinheit von Wasser, die jedoch nicht immer deckungsgleich sind. Im Allgemeinen spricht man von folgenden Arten von gereinigtem Wasser: Reinstwasser, ultrareines Wasser, deionisiertes Wasser und demineralisiertes Wasser. Reinstwasser hat den höchsten Reinheitsgrad und ist praktisch frei von Ionen, Partikeln und organischen Stoffen. Die folgende Abbildung zeigt die Arten von gereinigtem Wasser auf.

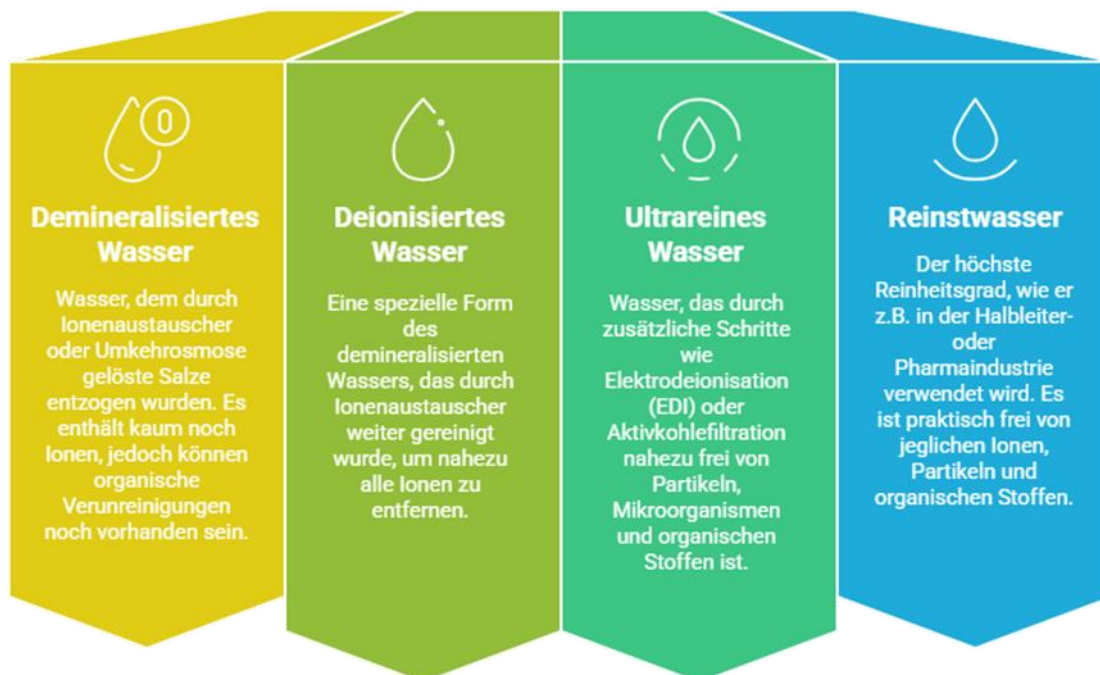


Abbildung 1: Arten von gereinigtem Wasser (EL-Vergleich, 2025)

Dementsprechend zeichnet sich Reinstwasser durch eine nahezu vollständige Freiheit von Verunreinigungen wie organischen Substanzen, Bakterien, Partikeln sowie gelösten Gasen aus und weist eine sehr geringe Leitfähigkeit von $<0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ auf (Brinner, 2013). Diese Eigenschaften machen Reinstwasser besonders geeignet für empfindliche Prozesse wie die Protonenaustauschmembran-Elektrolyse (PEMEL). Aufgrund der hohen Anforderungen wird für PEM-Elektrolyse in der Regel ultrareines Wasser oder Reinstwasser benötigt. Die Alkalische Elektrolyse (AEL) weist geringere Anforderungen an die Wasserreinheit auf als die PEMEL, da der flüssige Kalilauge-Elektrolyt (KOH) Verunreinigungen teilweise abpuffern kann. Für AEL sollte die Leitfähigkeit des eingesetzten Wassers

idealerweise unter 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ liegen, wobei Werte unter 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ eine höhere Betriebseffizienz und längere Lebensdauer der Elektrolysezellen begünstigen. Im allgemeinen ist jedoch für die AEL demineralisiertes oder deionisiertes Wasser ausreichend (EL-Vergleich, 2025).

Unterschiedliche Parameter, wie Leitfähigkeit, Kieselsäuregehalt, Gesamteisenkonzentration, Gehalt an Natrium und Kalium sowie die Partikelkonzentration, müssen innerhalb definierter Grenzwerte liegen, um einen störungsfreien Betrieb der Anlagen zu gewährleisten. Eine typische Spezifikation für Reinstwasser umfasst die folgenden Grenzwerte:

- Leitfähigkeit: < 0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Kieselsäure: < 100 $\mu\text{g}/\text{l}$
- Gesamteisen: < 100 $\mu\text{g}/\text{l}$
- Natrium und Kalium: < 20 $\mu\text{g}/\text{l}$
- Partikelkonzentration: Partikelfrei

Die Einhaltung dieser Parameter ist essenziell, um die Bildung von Ablagerungen, Korrosion oder anderen unerwünschten Effekten in sensiblen Anwendungen zu vermeiden. Daher erfordert die Reinstwasseraufbereitung nicht nur fortschrittliche Technologien, sondern auch eine kontinuierliche Überwachung und Anpassung an die prozessspezifischen Bedingungen (Jabs, 2021; Envirofalk, 2024).

3 Wasserverfügbarkeit als Standortfaktor

Die Verfügbarkeit von Wasser stellt einen zentralen Standortfaktor für die Errichtung von Elektrolyseanlagen und die nachgelagerte Synthese von PtL-Kraftstoffen dar. Der mit Abstand größte Teil des Wasserbedarfs entsteht in der Wasserstofferzeugung. Die Verfügbarkeit von Wasser ist somit ein zentrales Standortkriterium für Elektrolyseure. In Deutschland galt Wasser bisher nicht als knappe Ressource. Allerdings zeigt der fortschreitende Klimawandel, dass die Verfügbarkeit von Wasser in Zukunft stärkeren Schwankungen unterlegen sein wird, insbesondere durch häufigere und längere Trockenperioden, rückläufige Grundwasserneubildung und veränderte Niederschlagsmuster bis hin zu vermehrten Starkregenereignissen mit den damit verbundenen Überschwemmungsrisiken (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW 2022). Auch wird der zukünftige Wasserbedarf voraussichtlich steigen, während gleichzeitig die Wasserverfügbarkeit bedingt durch den Klimawandel abnimmt (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW 2024). So ist zukünftig von einem steigenden Bedarf in der Landwirtschaft (zunehmender Bedarf an Bewässerung und Forstschutzberegnung) oder auch in Kommunen und Privathaushalten (zunehmender Wasserbedarf für Bewässerung von Grünflächen und die Nutzung privater Schwimmbecken) zu rechnen. Dies kann zu Konflikten zwischen verschiedenen Wassernutzungen führen und es wird darauf hingewiesen, dass ein vorausschauendes und integriertes Wassermanagement notwendig ist, sodass die Wasserversorgung auch zukünftig sicher ist (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW, 2022).

Für den Wasserbedarf von Elektrolyseanlagen ist es entscheidend, zwischen **Wasserverbrauch** und **Wassergebrauch** zu unterscheiden. Während beim Wasserverbrauch Wasser dem lokalen

Wasserkreislauf dauerhaft entzogen wird, erfolgt beim Wassergebrauch eine kontrollierte Rückführung in den lokalen Kreislauf. Die benötigten Wassermengen variieren dabei maßgeblich in Abhängigkeit von Faktoren wie der Art der Kühlung, der Wasserqualität und dem spezifischen Elektrolyseverfahren (GET H2, 2024). Tabelle 1 gibt ein Beispiel basierend auf einer Elektrolyseanlage mit nassem Umlaufkühlsystem bei 100 MW, 20 MW und 10 MW elektrischer Anschlussleistung.

Tabelle 1: Wasserbedarf für Elektrolyseanlage in Verbindung mit einem nassen Umlaufkühlsystem
Darstellung basierend auf GET H2 (2024)

Leistung Elektrolyse	Prozesswasser		Kühlwasser	
	Reinstwasser ¹	Betriebswasser Wasser- aufbereitung	Verdunstung	Abwasser Kühlwasser- kreislauf
100 MW _{el}	19 m³/h	5 m³/h	51 m³/h	25 m³/h
20 MW _{el}	3,8 m³/h	1 m³/h	10,2 m³/h	5 m³/h
10 MW _{el}	1,9 m³/h	0,5 m³/h	5,1 m³/h	2,5 m³/h

Der Wasserbedarf einer 20 MW Elektrolyseanlage, die mit einem Nass-Umlaufkühlsystem betrieben wird, beträgt unter der Annahme von 4.000 Volllaststunden etwa 80.000 m³. Bei einer 100 MW Elektrolyseanlage mit vergleichbarem Kühlsystem und unter denselben Betriebsbedingungen steigt der Wasserbedarf auf rund 400.000 m³. In der Fortschreibung der nationalen Wasserstoffstrategie ist bis 2030 eine Elektrolysekapazität von 10 GW in Deutschland als Ziel gesetzt. Bei einer installierten Elektrolyseleistung von 10 GW würde ein Wasserbedarf von etwa 10.000 m³/h entstehen, was einer Gesamtnachfrage von rund 40 Mio. m³ Wasser bei 4.000 Volllaststunden entspricht. Bei einem ambitionierten Ausbau der Wasserstoffproduktion in Deutschland könnte langfristig jedoch auch eine Elektrolysekapazität von 60 GW erreicht werden. Eine spezifische Prognose für die Elektrolysekapazität, die ausschließlich für PtL-Kraftstoffe vorgesehen ist, liegt derzeit nicht vor. Die tatsächliche Entwicklung wird von verschiedenen Faktoren abhängen, darunter technologische Fortschritte, wirtschaftliche Rahmenbedingungen und politische Entscheidungen zur Förderung von PtL-Technologien.

Der Wasserbedarf für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe hängt stark vom jeweiligen Herstellungsweg ab. Wie viel Wasser dabei verbraucht wird, lässt sich anhand des Energiegehalts des Endkraftstoffs in Kilogramm Wasser pro Kilowattstunde (kg/kWh) angeben. Für reinen Wasserstoff liegt der Wasserbedarf der Elektrolyse bei etwa 0,268 kg Wasser pro kWh Endenergie. Wird der Wasserstoff weiterverarbeitet, etwa zu Kerosin, steigt dieser Wert. Bei der Methanolroute sind es rund 0,333 kg/kWh, beim Fischer-Tropsch-Verfahren etwa 0,376 kg/kWh (Soler et al., 2022).

¹ Reinstwasser muss eine geringe elektrische Leitfähigkeit haben, alle Schmutzbestandteile müssen herausgefiltert und schädliche Ionen entfernt sein (Brinner, 2013).

Tabelle 2: H₂-Bedarf und Wasserverbrauch der Elektrolyse für verschiedene PtL-Kraftstoffe (Soler et al., 2022)

PtL-Produktpfad	H ₂ -Bedarf für Synthese & Weiterverarbeitung (MJ H ₂ /MJ Fuel)	Wasserverbrauch Elektrolyse (kg H ₂ O/kWh Fuel)
Wasserstoff (H ₂)	-	0,268
Methanol-to-Kerosin (MTK)	1,241	0,333
Fischer-Tropsch-Kerosin (FTK)	1,404	0,376

Diese Unterschiede ergeben sich daraus, dass für die Herstellung synthetischen Kerosins zusätzlich Wasserstoff benötigt wird, der ebenfalls elektrolytisch bereitgestellt werden muss. Der Wasserstoffbedarf pro Energiemenge des Endprodukts liegt bei diesen Prozessen bei etwa 1,24 MJ H₂/MJ Fuel (Methanolroute) und 1,40 MJ H₂/MJ Fuel (Fischer-Tropsch).

Im Jahr 2022 lag der Trinkwasserbedarf bei rund 4,67 Milliarden m³ wovon 81,5 % (3,80 Milliarden m³) an private Haushalte und Kleingewerbe geliefert wurde und 18,5 % (862 Millionen m³) an Großabnehmer aus Gewerbe und Industrie. Das übrige Wasser ging über Wasserverluste und unkontrollierte Entnahmen (469 Millionen m³) verloren oder wurde zur Instandhaltung der Wasserinfrastruktur (166 Millionen m³) benötigt (Destatis, 2024). Insgesamt entnahmen die Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland im Jahr 2022 über 5,32 Milliarden m³ Wasser aus der Natur. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden 62,5 % aus dem Grundwasser gefördert (3,33 Milliarden m³ Wasser). Es folgen See- und Talsperrenwasser als Trinkwasserquelle mit 657 Million m³ Wasser (12,3 %) und Quellwasser mit 429 Millionen m³ Wasser (8,1 %). Die Nutzung von Flusswasser spielt für die Trinkwasserversorgung eine unbedeutende Rolle; etwa 66 Millionen m³ Wasser (1,2 %) wurden direkt über Deutschlands Flüsse bezogen und aufbereitet (Destatis, 2024). Auch die nicht öffentliche Wasserversorgung hat eine große Nachfrage nach Wasser. Der Sektor Energieversorgung alleine hat eine Wassernachfrage von 8,8 Mrd. m³. Davon sind 97 % Kühlwasser, das wieder in Flüsse und ins Grundwasser gelangt. Auch der Bergbau und das Gewerbe haben für Kühlzwecke und stoffliche Nutzung einen Wasserbedarf von 5,4 Mrd. m³ (Saravia et al., 2023).

Im Vergleich dazu würde der Wasserbedarf von Elektrolyseanlagen in Deutschland bei einer Gesamtkapazität von bspw. 10 GW bei maximal 1 % des aktuellen Trinkwasserbedarfs bzw. der Wassergewinnung (der öffentlichen Wasserversorgung) liegen. Das bedeutet jedoch nicht, dass regional keine Engpasssituationen zukünftig entstehen können, da infrastrukturelle Aspekte vor Ort berücksichtigt werden müssen. Bereits heute gibt es Regionen in Deutschland, die mit den Kapazitäten der Wasserleitungen an ihre Grenzen stoßen.

Die Bereitstellung des Wassers für Elektrolyseure kann über unterschiedliche Wege erfolgen. Je nach Standort und Größe der Elektrolyse können Oberflächen- oder Regenwasser genutzt werden. In den meisten Fällen wird jedoch voraussichtlich ein relevanter Anteil über Trinkwasser bereitgestellt werden müssen, da nicht überall eine separate Wasserinfrastruktur aufgebaut oder genutzt werden kann. Kleine

bzw. dezentrale Elektrolyseanlagen wären aus Kostengründen für den Markthochlauf voraussichtlich auf Trinkwasser angewiesen. Aber auch mittlere und größere Anlagen könnten anteilig Trinkwasser beziehen, um eine diversifizierte Wasserversorgung sicherzustellen. Sehr große Anlagen werden voraussichtlich in Chemie- und Industrieparks verortet sein und das dortige Wasser beziehen. Nach Angaben vom VCI Nordrhein-Westfalen werden etwa 80 % des in der Chemischen Industrie benötigten Wasserbedarfs aus Flüssen entnommen (VCI NRW, 2021). Weitere alternative Quellen für zukünftige großflächige Elektrolyseanlagen könnten Meerwasser sein, das durch Meerwasserentsalzung in Elektrolyseparks in Küstennähe oder in Offshore-Elektrolyseanlagen genutzt wird.

Generell ist die nachhaltige Nutzung von Wasserressourcen eine Herausforderung, auch für den Ausbau der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse. Während der Wasserbedarf von Elektrolyseanlagen im nationalen Kontext vergleichsweise gering ist, können regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit und Qualität der Wasserressourcen zu Engpässen führen.

Grundwasserbilanzrisikogebiete sind Regionen, in denen die natürliche Grundwasserneubildung die Entnahmen und Verluste nicht mehr ausgleichen kann, etwa infolge klimatischer Veränderungen oder intensiver Wassernutzung. In diesen Gebieten ist die Verfügbarkeit von Grundwasser eingeschränkt, was zu Nutzungskonflikten und einer möglichen Verschlechterung der Wasserqualität führen kann. Für Elektrolyseprojekte ist dies von besonderer Bedeutung, da der Betrieb der Anlagen auf eine zuverlässige und nachhaltige Wasserversorgung angewiesen ist. Die Abbildung mit den Grundwasserbilanzierungsgebieten zeigt die Ergebnisse der Grundlagenstudie „WADKlima“ im Auftrag des Umweltbundesamtes.

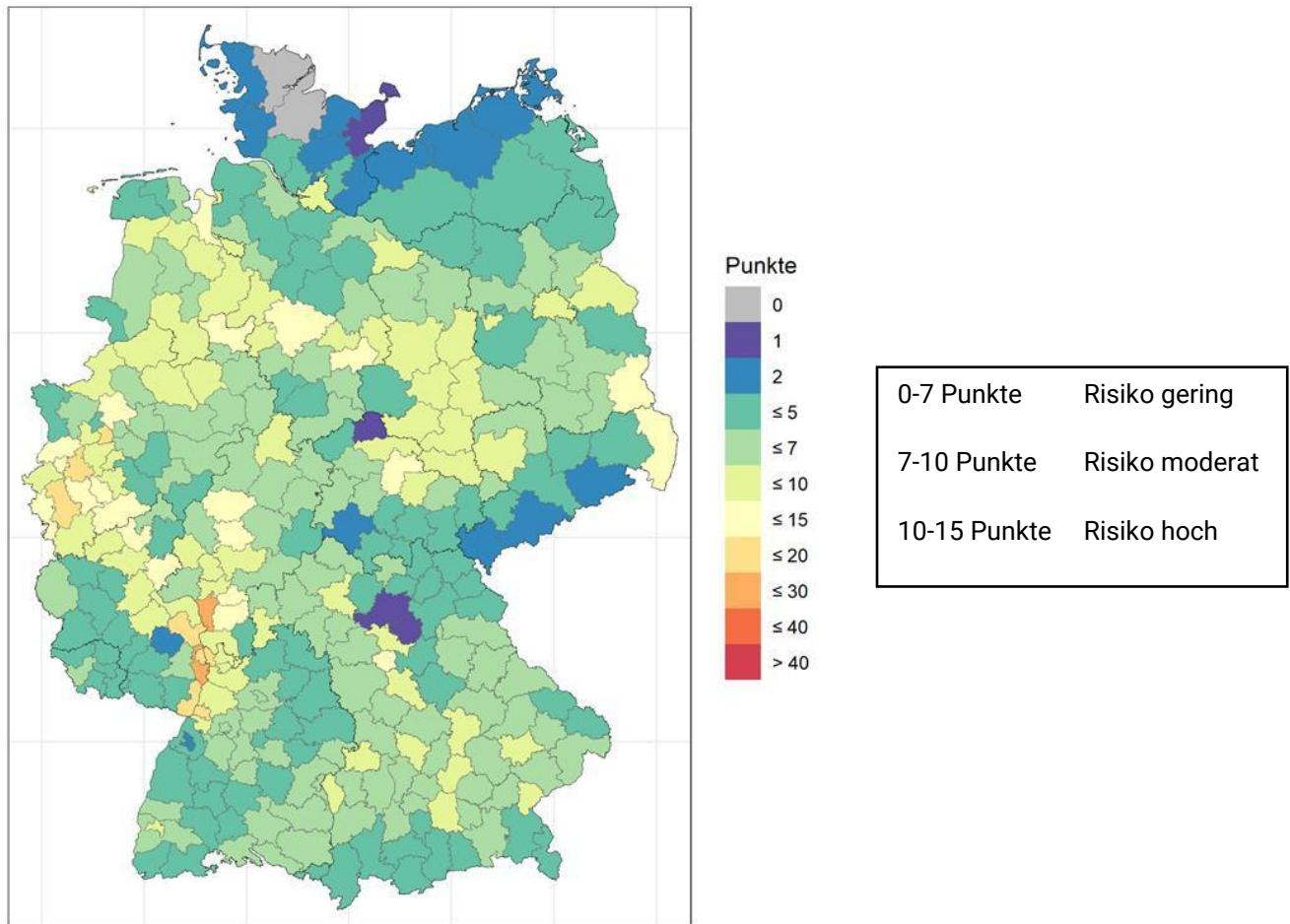


Abbildung 2: Grundwasserbilanzrisikogebiete – aufsummierte Punkte der im Projekt WADKlim untersuchten einzelnen Grundwasserthemen (UBA, 2024a)

In wasserarmen Regionen oder Gebieten mit bereits hoher Grundwassernutzung könnten zusätzliche Entnahmen durch Elektrolyseanlagen die bestehenden Ressourcen weiter belasten. Dies betrifft insbesondere Ballungsräume, landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete oder Regionen mit eingeschränkter Wasserinfrastruktur. Eine unzureichende Planung könnte hier nicht nur ökologische, sondern auch wirtschaftliche und soziale Risiken mit sich bringen. Für zukünftige Elektrolyseprojekte ist es daher essenziell, Grundwasserbilanzrisikogebiete bei der Standortwahl und Planung zu berücksichtigen. In solchen Gebieten sollten alternative Wasserquellen wie entsalztes Meerwasser, Oberflächenwasser oder recyceltes Abwasser priorisiert werden, um die Belastung des Grundwassers zu minimieren. Gleichzeitig müssen potenzielle Einflüsse der Anlagen auf die Wasserqualität durch geeignete Maßnahmen wie Monitoring und Schutzkonzepte kontrolliert werden. Durch die Berücksichtigung von Grundwasserbilanzrisikogebieten können Elektrolyseprojekte nicht nur eine sichere Wasserversorgung gewährleisten, sondern auch aktiv dazu beitragen, regionale Wasserressourcen zu schützen und eine nachhaltige Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen. (UBA, 2024a)

4 Wasserversorgung

Die Wasserversorgung ist ein zentraler Aspekt für die nachhaltige Produktion von PtL-Kraftstoffen, da Wasser nicht nur als Rohstoff für die Elektrolyse, sondern auch für Kühlung und verschiedene Prozessschritte benötigt wird. Die Wahl der Wasserquellen beeinflusst Kosten, Ökologie und Skalierbarkeit der Produktion. Da Trinkwasser in vielen Regionen ein knappes Gut ist, sollten alternative Wasserquellen genutzt werden. Die Rohwasserversorgung, also die Bereitstellung von unbehandeltem Wasser, muss dabei effizient und nachhaltig organisiert sein. Rohwasser muss vor der Nutzung für industrielle Prozesse wie der Elektrolyse einer Wasseraufbereitung unterzogen werden, um Verunreinigungen zu entfernen und die erforderliche Reinheit sicherzustellen. Die wichtigsten Optionen für die Rohwasserversorgung sind: Meerwasser, Abwasser, Oberflächenwasser, Regenwasser, Grundwasser und Leitungswasser.

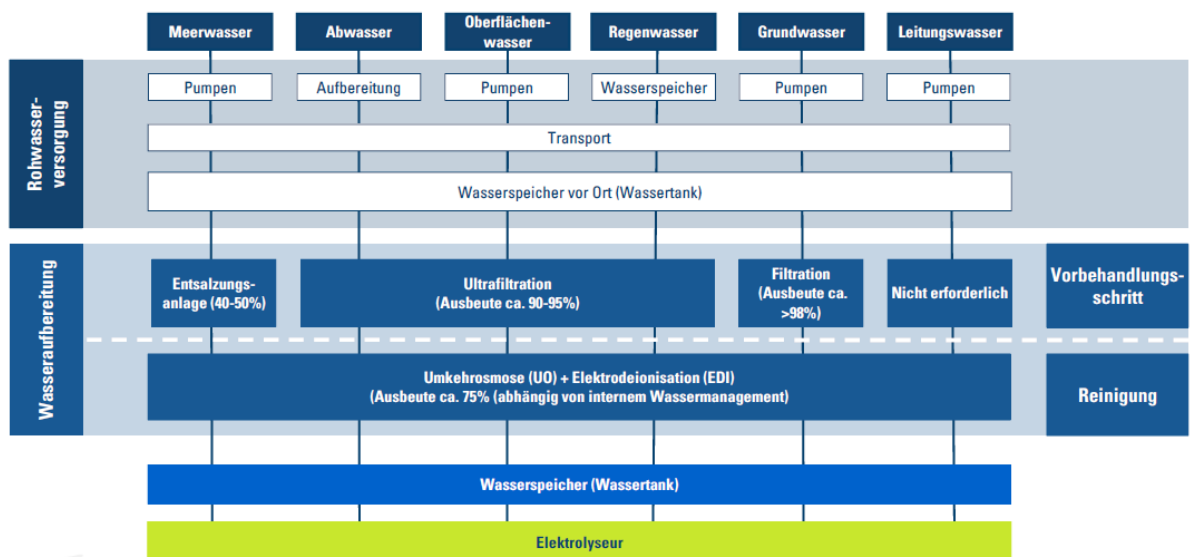


Abbildung 3. Schematische Darstellung der Wasserversorgung eines Elektrolyseurs (Zerta et al., 2024)

4.1 Wassergewinnung und potentielle Wasserquellen

Abhängig vom Standort und den technologischen Anforderungen kommen verschiedene Wasserquellen infrage, die sich hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität, Aufbereitungsbedarf und ökologischer Auswirkungen deutlich unterscheiden können. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über potenzielle Wasserquellen und ihre Relevanz für die industrielle Nutzung im Kontext von PtL-Prozessen. Abbildung 4 gibt ergänzend hierzu eine Übersicht über die räumliche Verteilung der öffentlichen Wassergewinnung in Deutschland.

4.1.1 Meerwasser

Meerwasser stellt eine potenzielle Wasserquelle dar, die insbesondere in küstennahen Regionen technisch nutzbar ist. Aufgrund des hohen Salzgehaltes ist jedoch eine Entsalzung mit zumeist

energieintensiven Verfahren erforderlich. Die Entsalzungstechnologien umfassen vor allem die Umkehrosmose (membranbasiert) und thermische Verfahren (Destillation/Verdampfung). Moderne Anlagen setzen meist auf Umkehrosmose, da sie nur etwa ein Sechstel der Energie der älteren Verdampfungsverfahren benötigt (Stuppert, 2008). Aktuell existiert in Deutschland keine großtechnische Meerwasserentsalzungsanlage für die allgemeine Wasserversorgung. Die Technik ist international zwar verbreitet (weltweit über 22.000 Entsalzungsanlagen in ~170 Ländern; etwa 800 davon in Spanien), aber hierzulande war sie bisher nicht notwendig und auch nicht wirtschaftlich (Elsner, 2023). Helgoland bildet eine Ausnahme, da die Insel keine ausreichenden Süßwasservorkommen hat. Dort deckt eine Umkehrosmose-Anlage den Trinkwasserbedarf der Bewohner und Touristen (Elsner, 2023). Abseits davon beschränkt sich der Einsatz von Meerwasser meist auf Kühlzwecke in der Industrie. Die Entnahme von Meerwasser für industrielle Zwecke bleibt jedoch relativ gering (ca. 0,15 Mrd. m³/Jahr) verglichen mit anderen Quellen (Destatis, 2022). Während Meerwasser in Deutschland aufgrund der Verfügbarkeit anderer Wasserressourcen bislang keine primäre Rolle spielt, könnte es in Zukunft in wasserarmen Küstenregionen als alternative Ressourcen an Bedeutung gewinnen (Zerta et al., 2024). So prüft Mecklenburg-Vorpommern derzeit eine große Meerwasserentsalzungsanlage in Rostock, um die durch Klimawandel und Trockenperioden gefährdete Trinkwasserversorgung zu sichern und neue Industrieansiedlungen zu ermöglichen. Das Projekt wäre bei Realisierung Deutschlands erste großskalige Anlage dieser Art (Hansestadt Rostock, 2025).

4.1.2 Abwasser

Gereinigtes Abwasser aus kommunalen oder industriellen Kläranlagen stellt eine potenzielle Wasserquelle für nicht-trinkwasserrelevante Anwendungen dar. Der erforderliche Reinigungsaufwand variiert je nach Verunreinigungsgrad und umfasst oft mechanische, chemische und biologische Aufbereitungsverfahren (Zerta et al., 2024). Die verstärkte Nutzung von gereinigtem Abwasser könnte die Entnahme aus natürlichen Wasserressourcen reduzieren. In der Industrie ist es bereits üblich, Wasser intern in geschlossenen Kreisläufen wiederzuverwenden (UBA, 2018). Diese innerbetrieblichen Recyclingprozesse sind oft Teil der normalen Abwasserbehandlung und werden von außen kaum wahrgenommen.

4.1.3 Oberflächenwasser

Oberflächenwasser, das aus Flüssen, Seen und Talsperren stammt, ist eine der zentralen Wasserquellen in Deutschland. Es dient sowohl der Trinkwasserversorgung als auch der industriellen und landwirtschaftlichen Nutzung. Oberflächenwasser hat in Deutschland einen Anteil von etwa 37 % an der gesamten Trinkwasserversorgung, wobei See- und Talsperrenwasser mit etwas über 12 % den größten und Flusswasser mit knapp 1 % den kleinsten Anteil aufweist (UBA, 2024c). Im Hinblick auf die industrielle Nutzung, insb. im Hinblick auf die Kühlung von Produktions- und Stromerzeugungsanlagen, ist die direkte Wassergewinnung aus Oberflächengewässern mit knapp 70 % die mit Abstand verbreitetste Art der Wassergewinnung (Destatis, 2022). Die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser unterliegt saisonalen Schwankungen und ist durch klimatische Veränderungen, wie anhaltende

Trockenperiode oder Hochwasserereignisse, beeinflusst (Zerta *et al.*, 2024). Eine nachhaltige Nutzung erfordert ein aktives Wassermanagement, um Nutzungskonflikte zu vermeiden und ökologische Standards einzuhalten.

4.1.4 Regenwasser

Niederschlagswasser kann als ergänzende Wasserquelle genutzt werden, insbesondere für landwirtschaftliche Bewässerung, industrielle Prozesse oder die Gebäudewirtschaft. Die Nutzung von Regenwasser ist in Deutschland vor allem im dezentralen, kleinskaligen Bereich verbreitet. Laut einer Branchenumfrage wurden allein 2009 rund 60.000-65.000 neue Regenwasser-Zisternen in deutschen Haushalten installiert; der geschätzte Gesamtbestand lag damals schon bei etwa 1,8 Millionen Anlagen zur Regenwassernutzung und dürfte seitdem weiter gestiegen sein (Oebbecke, 2010). Neben Privathaushalten entdecken auch Industrie und Gewerbe zunehmend Regenwasser als Ressource: So nehmen die Installationen von Großanlagen (z. B. Zisternen > 50 m³ auf Fabrikdächern oder öffentlichen Gebäuden) zu, und immer mehr Betriebe nutzen Regenwasser z.B. zur Kühlung oder für Reinigungsprozesse (Oebbecke, 2010). In der öffentlichen Wasserversorgung spielt direktes Regenwasser hingegen keine Rolle – es wird nicht ins Leitungsnetz eingespeist. Dennoch trägt Regen (indirekt) wesentlich zur Grundwasserneubildung und Speisung der Oberflächengewässer bei (UBA, 2024d). In Deutschland variiert die Niederschlagsverteilung regional stark, wobei westliche und südliche Regionen tendenziell höhere Mengen verzeichnen als der Osten (LBST, 2024). Aufgrund dieser Schwankung ist Regenwasser allein nicht als konstante Wasserquelle geeignet, kann jedoch durch Speicherung und gezielte Nutzung zur Entlastung anderer Ressourcen beitragen.

4.1.5 Grundwasser

Grundwasser entsteht durch die Versickerung von Niederschlagswasser und wird in Tiefenbrunnen gefördert. Es ist mit einem Anteil von etwa zwei Drittel die wichtigste Quelle für die Trinkwasserversorgung in Deutschland. In der Industrie beträgt der Anteil hingegen etwa 13 % (Destatis, 2022). Für Industrie und Gewerbe ist die Nutzung von Grundwasser vor allem auch dahingehend vorteilhaft, weil es kühler und konstanter in der Qualität ist als Oberflächenwasser. Aufgrund seiner meist guten Qualität erfordert es in der Regel zudem nur eine minimale Aufbereitung. Allerdings unterliegen Grundwasserentnahmen strengen Genehmigungen und Gebühren (Wasserentnahmeentgelt in 13 Bundesländern), was den Einsatz wiederum begrenzen kann. In einigen Regionen Deutschlands besteht bereits ein hoher Entnahmegrad, insbesondere in wasserärmeren Gebieten (Zerta *et al.*, 2024). Eine nachhaltige Nutzung erfordert ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Entnahme und Neubildung, um eine langfristige Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

4.1.6 Leitungswasser

Leistungswasser wird aus Grund- oder Oberflächenwasser gewonnen, aufbereitet und über das öffentliche Versorgungsnetz verteilt. Es erfüllt hohen Qualitätsstandards und wird vorrangig für häuslichen Gebrauch genutzt. Insgesamt wurden 2022 rund 4,67 Mrd. m³ Trinkwasser an

Endverbraucher abgegeben (Destatis, 2024). Haushalte und Kleingewerbe nahmen davon ~3,8 Mrd. m³ (ca. 82 %) ab, während Industrie und Großgewerbe 0,86 Mrd. m³ (18 %) bezogen (Destatis, 2024). Die Versorgungsdichte ist hierbei sehr hoch: knapp 99,4 % der Bevölkerung sind ans öffentliche Wassernetz angeschlossen (BDEW, 2025). Die Nutzung von Leitungswasser für industrielle Zwecke ist technisch möglich, sollte jedoch im Kontext der langfristigen Wasserversorgung und regionaler Verfügbarkeit abgewogen werden. Etwa 3 % des im betrieblichen Bereich genutzten Wassers wird in Deutschland dem öffentlichen Leitungsnetz entnommen (Destatis, 2022). In wasserärmeren Regionen kann jedoch eine Priorisierung der Trinkwasserversorgung gegenüber der industriellen Nutzung erforderlich sein (LBST, 2024).

4.1.7 Wasser aus der Luft

Die Gewinnung von Wasser aus der Luft mittels Kondensationstechnologien stellt eine alternative Möglichkeit zur Wassergewinnung dar. Der Wirkungsgrad dieser Verfahren hängt stark von klimatischen Bedingungen, insbesondere der Luftfeuchtigkeit ab (LBST, 2024). In Deutschland sind diese Technologien aufgrund des vergleichsweise hohen Energieaufwands und der Verfügbarkeit anderer Wasserressourcen derzeit von geringer praktischer Bedeutung. Allerdings gibt es Technologien, die in Kombination mit Direct Air Capture (DAC) zur CO₂-Abscheidung auch Wasser aus der Luft gewinnen. Feststoffbasierte Anlagen mit indirekter Erhitzung können Wasser gewinnen, typischerweise 0,8 bis 2 m³ Wasser pro Tonne CO₂, abhängig von Standortklima und Kondensationstechnik (Lebling *et al.*, 2022). Der Wasserbedarf von DAC-Anlagen variiert jedoch stark je nach Technologie. Flüssigbasierte Systeme zeigen teils hohe Wasserverbräuche von 4 bis 8 m³ pro Tonne CO₂, etwa durch die Verdunstung in NaOH- oder KOH-basierten Prozessen (Fasihi, Efimova and Breyer, 2019). Hinsichtlich des Energieeinsatzes ist festzustellen, dass feststoffbasierte DAC-Anlagen mehr Strom, aber weniger thermische Energie benötigen und dadurch in der Regel insgesamt energieeffizienter sind als flüssigbasierte Systeme mit ihrem hohen Wärmebedarf.

Ein Beispiel einer feststoffbasierten Technologie ist der CORAL-Prozess des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), bei dem durch Kühlung der Umgebungsluft sowohl CO₂ als auch Wasser extrahiert werden. Solche Verfahren könnten in ariden Regionen oder für spezialisierte industrielle Anwendungen von Interesse sein.

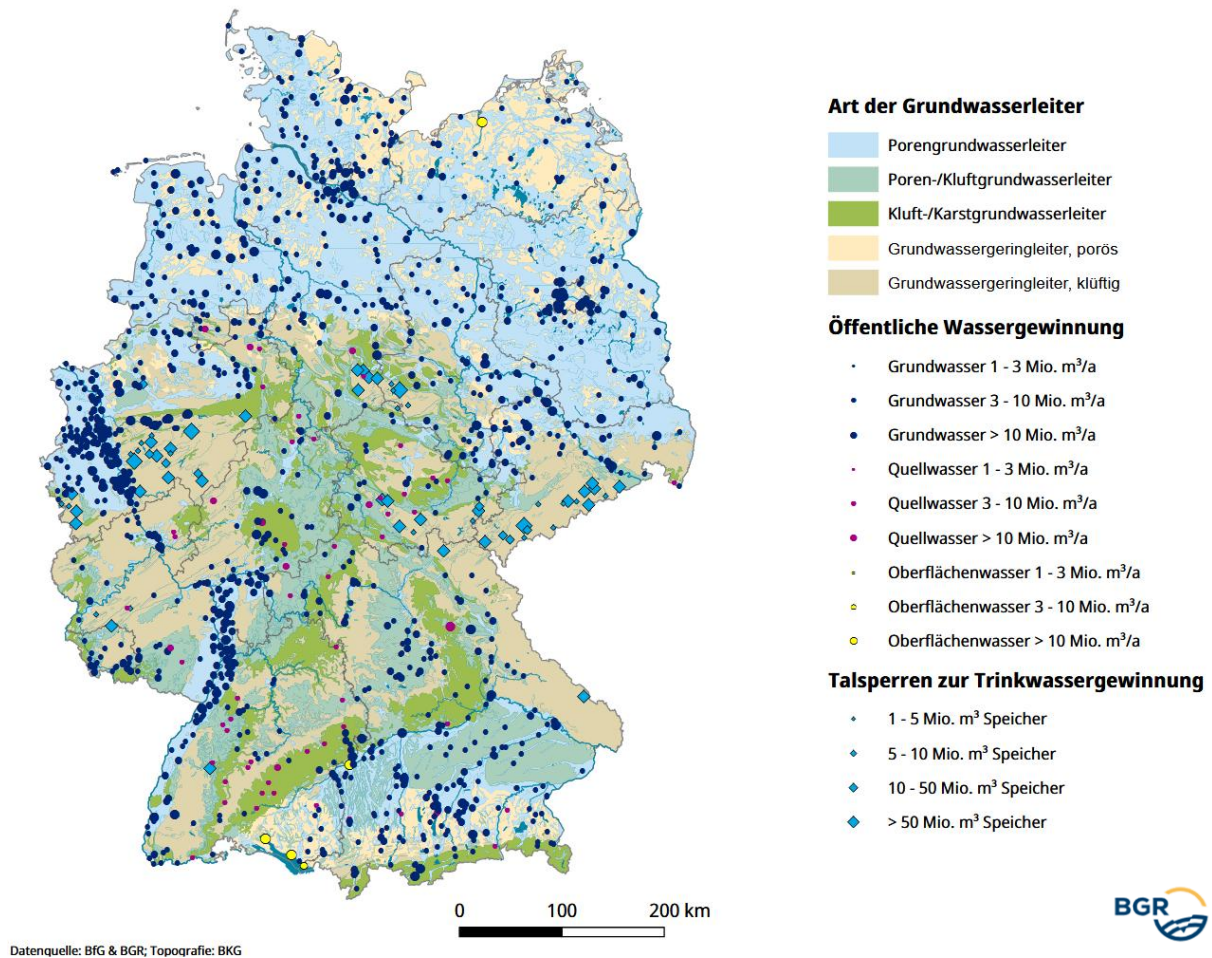


Abbildung 4: Art der Grundwasserleiter und der Wasserversorgung von Deutschland

4.2 Wasserverteilung und -transport

Die zuverlässige Versorgung mit Wasser ist eine zentrale Voraussetzung für den Betrieb von Elektrolyseanlagen und die Produktion von reFuels. Der Transport des benötigten Wassers erfolgt im industriellen Maßstab in der Regel leitungs- bzw. pipelinegebunden. Insbesondere im Kontext großskaliger Anlagen bietet diese Form der Versorgung deutliche Vorteile gegenüber einer Anlieferung per Zug oder Lkw-Trailer: Sie ermöglicht eine kontinuierliche, verlässliche Versorgung mit Wasser, was für einen stabilen Anlagenbetrieb unerlässlich ist.

Tabelle 3: Vor- und Nachteile Leitungs- bzw. Pipelinegebundener Transport nach Stephenson (1989)

Vorteile	Nachteile
1. Häufig die wirtschaftlichste Transportform (geringere Kapital-, Betriebs- oder Gesamtkosten) 2. Kaum anfällig für Preis- und Lohnschwankungen (hoher Anteil an fixen Kosten) 3. Geringer Personalbedarf, automatische/remote Steuerung möglich 4. Unterirdische Verlegung beeinträchtigt die Landschaft kaum 5. Vergrabene Leitungen sind relativ sabotage-sicher 6. Unabhängig von Verkehr und Wetter (keine Staus, keine Witterungsprobleme) 7. Kein Rücktransport leerer Behälter notwendig 8. Kapazität kann vergleichsweise einfach durch Boosterpumpen erhöht werden 9. Stört den Oberflächenverkehr nicht und beeinträchtigt andere Dienste kaum 10. Geringere Unfallrate pro Tonnenkilometer im Vergleich zu anderen Transportformen 11. Kann auch unwegsames oder bergiges Gelände über-/unterqueren	1. Hohe Anfangsinvestitionen (hohe Kapitalbindung), wodurch bei unsicherer Nachfrage Spekulation nötig sein kann 2. Befüllungskosten können bei langen Leitungen sehr hoch sein 3. Nur ein Medium pro Pipeline gleichzeitig (Multi-Produkt-Pipelines sind Ausnahmen mit Chargenbetrieb)

Der konkrete Transportweg und die Art der Wasserbereitstellung hängen stark von den lokalen Rahmenbedingungen sowie der Größe der betrachteten Anlage ab. Kleinere Elektrolyseure können prinzipiell, abhängig von der verfügbaren Kapazität und Auslastung, direkt an das bestehende Trinkwassernetz angeschlossen werden. Deutschland verfügt hierbei über eine gute Abdeckung durch das öffentliche Wassernetz. Das Trinkwasserleitungsnetz umfasst etwa 530.000 Kilometer, davon rund 145.000 Kilometer Hauptversorgungsleitungen (Marangoni, 2011; DVGW, 2020). Hinzu kommen etwa 486.000 Kilometer Abwasserleitungen (Marangoni, 2011). Laut einer Studie des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) hat die Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse keinen spürbaren Einfluss auf die Trinkwasserversorgung in Deutschland (DVGW, 2023). Dennoch wird die Entnahme von Wasser aus dem öffentlichen Trinkwassernetz in Teilen kritisch diskutiert, insbesondere im Hinblick auf wasserarme Regionen oder Zeiten zunehmender Trockenperioden (Saravia, 2024).

Grade im Hinblick auf die im potentiell benötigten, großen Wasserstoffmengen im reFuels-Nutzungskontext ist eine Wasserentnahme aus dem Trinkwassernetz ohnehin eher fraglich. Dies begründet sich auch daraus, dass ein großer Vorteil für die Standortplanung solcher in der Nutzung bestehender industrieller Infrastrukturen liegt. Industriegebiete, die aus genehmigungsrechtlicher Sicht ohnehin als besonders geeignete Standorte für größere Elektrolyseure und PtL-Anlagen gelten, verfügen in der Regel bereits über eigene Systeme zur Wassergewinnung (aus i.d.R. Grund- oder Oberflächengewässer), -aufbereitung und lokalen Verteilung (BDI, 2024). Diese Infrastrukturen können

genutzt und gegebenenfalls erweitert werden, ohne in eine Konkurrenz zur bestehenden Trinkwasserversorgung zu treten.

Für den leitungsgebundenen Transport von Wasser können verschiedene Materialien eingesetzt werden. Tabelle 3 gibt nachfolgend einen Überblick über die Zusammensetzung des bestehenden Wasserleitungsnetzes in Deutschland nach Materialien (vgl. Mendler et al., 2024). Historisch wurden insbesondere Eisen-, Stahl- und Betonrohre häufig für Wassertransportsysteme eingesetzt. Ein beträchtlicher Teil des deutschen Wassernetzes besteht hierbei nach wie vor aus alten Gusseisenleitungen (Marangoni, 2019). Allerdings wurden in den vergangenen Jahren aufgrund von Korrosion zahlreiche metallische Rohrleitungen durch andere Materialien ersetzt, unter anderem durch Beton-Druckrohre (CPP) und Kunststoffe.

Insbesondere Kunststoffrohre gewannen seit den 1960er-Jahren immer mehr an Bedeutung in der Wasserverteilung. Heutzutage können selbst Leitungen mit großem Durchmesser aus Kunststoff gefertigt werden; verbreitete Varianten sind hier vor allem Polyethylen hoher Dichte (HDPE) und unvernetztes Polyvinylchlorid (U-PVC). Aber auch im Bereich von Beton-Druckrohren existieren unterschiedliche Typen mit Durchmessern von etwa 400 mm bis 6000 mm, was sie für eine Vielzahl von Einsatzzwecken, insb. im Kontext von fern- und Zubringerleitungen, attraktiv macht (Mendler et al., 2024).²

Tabelle 4: Aufschlüsselung Material bestehender Wasserleitungen in Deutschland nach Mendler et al. (2024)

Eisen/Gusseisen	Stahl	Plastik	Beton	Anderes
53 %	5 %	30 %	10 %	2 %

Die Dimensionierung der Wasserleitungen für Elektrolyseanlagen richtet sich nach internationalen Normen wie DIN 8062 (PVC-U-Rohre), DIN 2440 (mild steel) und ISO 4427 (HDPE-Rohre). Abbildung 5 zeigt hierzu den theoretisch erforderlichen, minimalen Innendurchmesser der Versorgungsleitungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Elektrolysekapazität. In der Praxis sind die tatsächlich eingesetzten Nennweiten jedoch stets etwas größer zu wählen, um den Vorgaben der genannten Normen gerecht zu werden und ausreichende Sicherheitsreserven zu gewährleisten (Mendler et al., 2024).

² Für die reine Wasserversorgung einer Elektrolyseanlage sind Beton-Druckrohre allerdings allein von der Dimensionierung her eher ungeeignet. Siehe hierfür auch Abbildung 5.

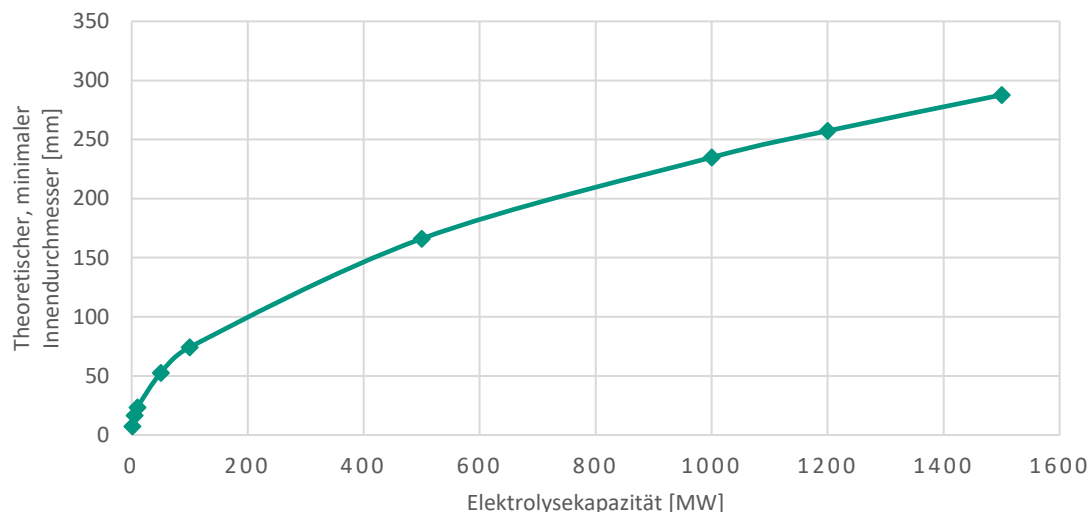


Abbildung 5: Innerer Leitungsdurchmesser nach Elektrolysekapazität (nach Mendler et al., 2024)

4.3 Wasserspeicherung

Für eine zuverlässige Wasserversorgung in Elektrolyse-Anlagen sind neben Pumpen und Transportleitungen auch geeignete Speichertanks vor und nach der Wasseraufbereitung erforderlich. Sie stellen sicher, dass trotz Abgabeschwankungen und schwankender Wasserqualität stets ausreichend Wasser zur Verfügung steht und ermöglichen dadurch einen wirtschaftlichen, kontinuierlichen Anlagenbetrieb. Da die Wasserspeicher nicht nur als reine Lagerbehälter fungieren, sondern auch dazu dienen, Druck- und Mengenunterschiede auszugleichen, sind eine präzise Füllstand- und Grenzstandmessung unverzichtbar.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Rohwasser- und Reinstwassertanks. Rohwassertanks sind die erste Station für unbehandeltes Wasser, das beispielsweise aus öffentlichen Wasserleitungen oder Industrieprozessen stammt. Da dieses Rohwasser häufig Verunreinigungen wie Mineralien, Schwebstoffe, Salze, organische Stoffe oder gelöste Gase enthält, ist eine nachfolgende Aufbereitung für den Einsatz in der Elektrolyse notwendig. Die Rohwassertanks gleichen zudem Schwankungen in der Wasserzufuhr aus, was eine konstante und planbare Wasseraufbereitung ermöglicht. Bei Nutzung von Regenwasser als Quelle sind oftmals groß dimensionierte Speicher (z. B. Seen, Auffangbecken) erforderlich, damit auch in Trockenphasen eine kontinuierliche Wasserversorgung sichergestellt ist (Simoes et al., 2021). Außerdem kann die Installation von Wasserspeichern am Ende einer Pipeline Verbrauchsspitzen abfedern und dadurch den benötigten Rohrdurchmesser reduzieren (Mendler et al., 2024). Üblicherweise bestehen Rohwassertanks aus korrosionsbeständigen Materialien wie beschichtetem Stahl oder Kunststoff und können mit Rührwerken sowie Sensorik für bspw. Füllstand und pH-Wert ausgestattet werden (VEGA Grieshaber KG, 2025).

Für viele Elektrolyseverfahren, insbesondere die PEM-Elektrolyse, wird im Anschluss hochreines Wasser benötigt, da selbst geringe Ionen- oder Partikelkonzentrationen zu Korrosion und Ablagerungen in den Elektrolysezellen führen können. Reinstwassertanks werden daher nach Ionenaustauschern,

Umkehrosmose- oder EDI-Anlagen (Elektrodeionisation) eingesetzt und stellen sicher, dass permanent Wasser einer definierten Qualität verfügbar ist. Zu diesem Zweck werden meist geschlossene Systeme aus Edelstahl oder insbesondere glasfaserverstärktem Kunststoff mit glatten, leicht zu reinigenden Oberflächen (z. B. PVDF) genutzt, um mikrobiologische Verunreinigungen zu minimieren. Um einen Kontakt mit Umgebungsluft und damit einhergehende Verunreinigungen zu vermeiden, kann die Wasseroberfläche mit Inertgas (meist Stickstoff) überlagert oder durch eine Folie beziehungsweise ein Schwimmdach abgedeckt werden (Zerta *et al.*, 2024). Zusätzlich ist die Integration von Messsensorik (z. B. Leitfähigkeitsmessung, Temperatur, Füllstand) essentiell für die kontinuierliche Überwachung der Reinheit und Gewährleistung eines kontinuierlichen Betriebs.

4.4 Wasseraufbereitung

Je nach Art der Wassergewinnung aber auch benötigten Reinheit sind unterschiedliche Techniken und Verfahren zur Wasseraufbereitung erforderlich. Die vorangestellte Abbildung 3 gib hierbei einen Überblick über die benötigten Aufbereitungsverfahren in Abhängigkeit der Wasserquelle und unter Betrachtung der benötigten Reinheit zur Nutzung eines PEM-Elektrolyseurs. Die einzelnen Verfahren werden wiederum in nachfolgender Tabelle 5 vergleichend dargestellt.

Tabelle 5: Überblick über wesentliche Aufbereitungsverfahren (Darstellung nach Simoes *et al.* (2021))

Verfahren	Beschreibung	Energie- bedarf	Wasser- verluste	Abfallprodukte
Feinsiebung	Wird eingesetzt, um Feststoffe aus dem einströmenden (Ab-)Wasser zurückzuhalten, bevor dieses in die Kläranlage gelangt. Hauptziel ist die Entfernung grober Feststoffe. Typische Sieböffnungen liegen bei 1,5–6 mm.	0,5–1,5 Wh/m ³	Vernach- lässigbar	Nass- schlamm
Koagulation/ Flockung & Filtration	Gängige Methode zur Entfernung von Schwebstoffen und Trübstoffen aus Wasser. Ein Flockungsmittel (häufig Eisen- oder Aluminiumsalze in Kombination mit Polymeren) wird zugegeben und mit dem zu reinigenden Wasser vermischt. Das Flockungsmittel lagert sich an den Verunreinigungen an und bildet größere Flocken, die anschließend	< 0,05 kWh /m ³	Vernach- lässigbar	Nass- schlamm

	über Filter (z. B. Sand, Anthrazitkohle) entfernt werden.			
EDI (Elektrodeionisation)	Bei der Elektrodeionisation (EDI) wird ein elektrisches Feld in Kombination mit Ionenaustauschmembranen und -harzen eingesetzt, um gelöste Ionen im Wasser zu entfernen. Das Verfahren findet häufig als "Polierschritt" nach Umkehrosmose Anwendung, um hochreines Wasser zu erzeugen	ca. 0,1–0,5 kWh/m³	meist 10 % des Zulaufwassers	Ionenkonzentrat (niedrigsaliner Abwasserstrom)
Ultrafiltration	Membranverfahren, das gegenüber herkömmlicher Filtration oft wirtschaftlicher ist, weil es kompakter gebaut werden kann, geringere Wartungsanforderungen hat, weniger Abfall produziert und insgesamt niedrigere Betriebskosten aufweist.	0,025–0,1 kWh/m³	ca. 7 % des Zulaufwassers	Salzhaltiges (schlammartiges) Konzentrat
Umkehrosmose	Bei der Umkehrosmose wird eine teilweise durchlässige Membran genutzt, um Ionen, unerwünschte Moleküle und größere Partikel aus dem Wasser zu entfernen. Ein äußerer Druck überwindet dabei den osmotischen Druck, der durch Unterschiede im chemischen Potenzial des Lösungsmittels verursacht wird. Größere Anlagen können mindestens 10 000 m³/Tag aufbereiten.	3–6 kWh/m³	hängt von der Wasserquelle ab: • 15–25 % Grundwasser • 20–30 % Abwasser • 35–40 % Meerwasser	Solekonzentrat (hochsaline Lösung), z. B. 14 % aus Grundwasseraufbereitung; 21 % aus Abwasseraufbereitung

5 Ökonomische Relevanz der Wasserbereitstellung für PtL-Kraftstoffe

5.1 Kosten Wasseraufbereitung an den Gesamtkosten

Der Kostenanteil der Wasseraufbereitung ist in der Regel sehr gering im Vergleich zu den Gesamtkosten der PtL-Kraftstoffe. Die vergleichsweise hohen Kosten der strombasierten PtL-Herstellung ist vor allem auf die benötigten hohen Strommengen und die Anlagentechnik (Elektrolyseure, Synthesereaktoren, CO₂-Bereitstellung) zurückzuführen. Die Wasseraufbereitung macht demgegenüber typischerweise nur einen kleinen einstelligen Prozentanteil der Betriebskosten aus. Studien und Branchenanalysen beziffern den Wasseranteil an den H₂-Gestehungskosten meist auf 1–4 %:

Laut einer technischen Analyse sind nur rund 1–2 % der laufenden Betriebskosten einer grünen H₂-Anlage auf die Reinstwasserversorgung zurückzuführen. Die Kapital- und Betriebskosten für eine Wasseraufbereitungsanlage sind also relativ gering. Selbst in Wüstenregionen mit ausschließlicher Verfügbarkeit von Meerwasser steht der Mehraufwand für Entsalzung für unter 4 % der H₂-Gestehungskosten (im konservativsten Szenario). Mit anderen Worten: Die LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) steigen durch Meerwasserentsalzung nur minimal.

Diese Prozentangaben lassen sich auch durch Beispielrechnungen untermauern: Pro kg H₂ kostet entsalztes Wasser je nach Szenario nur ca. 0,006–0,03 \$ (0,6–3 ¢). Selbst bei günstigen zukünftigen H₂-Preisen von 2 \$/kg entspräche der Wasseranteil damit nur etwa 0,3–1,5 %. Bei heutige höheren H₂-Kosten (>5 \$/kg) liegt der Anteil sogar unter 1 %.

Die Aufbereitung von Wasser ist kostenmäßig vernachlässigbar gering im Verhältnis zu den übrigen PtL-Prozesskosten – selbst wenn Meerwasserentsalzung nötig ist, handelt es sich um eine geringe Zusatzbelastung.

Tabelle 6: Kosten für Wasseraufbereitung

Wasserquelle	Typische Aufbereitung	Kosten Reinwasser	Anteil an H ₂ -/PtL-Kosten (Beispiel)
Meerwasser	Umkehrosmose + Entionisierung (Energie ca. 3–4 kWh/m ³)	Ca. 0,5–2 €/m ³ (große Anlage) bis ca. 3 €/m ³ (klein)	Ca. 1–2 % der H ₂ -Kosten (bei ca. 2–3 €/kg H ₂)
Abwasser (gereinigt)	Filtration + RO + Polishing (Energie ca. 1–2 kWh/m ³)	Ca. 0,5–1,5 €/m ³ (abh. von Vorbehandlung)	Ca. 1 % der H ₂ -Kosten (ähnlich Meerwasser) ggf. etwas geringer durch Synergien (O ₂ -Nutzung)
Süßwasser	Filtration + Deionisierung (Energie <0,5 kWh/m ³)	<0,5 €/m ³ (Wasserpreis + Aufbereitung)	<1 % der H ₂ -Kosten (bei ca. 5 €/kg H ₂ in DE) vernachlässigbar bei hohen Stromkostenanteilen

Wie Tabelle 6 zeigt, bleibt der Wasseraufbereitungsanteil durchweg niedrig. Beispielsweise bedeuten 1 €/m³ Wasserkosten bei einem Bedarf von ~10 l/kg H₂ nur 0,01 € pro kg H₂, was bei jedem realistischen H₂-Preis unter 1 % liegt. Selbst in Deutschland (wo Wasser sehr günstig ist, aber Strom teuer) oder in ariden Exportländern (wo Wasseraufbereitung nötig ist, aber Strom günstig), ändert sich an diesem Befund wenig. Hauptkostentreiber der PtL-Kraftstoffe sind der erneuerbare Strom, die Elektrolyseure und die CO₂-Bereitstellung – die Wasseraufbereitung fällt demgegenüber kaum ins Gewicht.

5.2 Regionale Unterschiede (Deutschland vs. sonnen-/windreiche Regionen)

Deutschland: In Deutschland ist Süßwasser in der Regel verfügbar und preiswert. PtL-Anlagen könnten an bestehende Wasserversorgungen (Leitungswasser oder Industriegewässer) angebunden werden. Die Kosten für Wasser (<1 €/m³) und einfache Reinstaufbereitung sind gering, so dass der Beitrag zu den Kraftstoffkosten minimal ist. Selbst wenn Abwasser-Recycling eingesetzt würde, um Frischwasser zu sparen, wäre der ökonomische Vorteil marginal – hier stünden eher ökologische Motive im Vordergrund.

Sonnen- und windreiche Regionen: Länder mit exzellenten Erneuerbaren-Ressourcen – z. B. Wüstenregionen im Nahen Osten/Nordafrika, Australien, Chile – können sehr günstigen Strom für PtL liefern und dadurch niedrige H₂-Gestehungskosten (~2–3 €/kg oder perspektivisch darunter) erreichen. Diese Standorte sind jedoch oft wasserarm, weshalb praktisch immer Meerwasser-Entsalzung oder Abwasserrecycling eingeplant wird. Die zusätzlichen Kosten hierfür beeinflussen die Gesamtwirtschaftlichkeit aber kaum (siehe oben: <4 % Aufschlag selbst im Worst-Case). So berichtet die Internationale Erneuerbaren-Agentur (IRENA), dass Meerwasserentsalzung in Wüstenprojekten weniger als 4 % der H₂-Gestehungskosten ausmacht. Die regionale Differenz kommt also primär durch die Stromkosten und nicht durch Wasser zustande.

Beispiel: Eine Studie beziffert für ein Wüsten-H₂-Projekt die Wasserkosten auf ~0,87 USD pro MWh H₂ – verglichen mit Gesamtgestehungskosten von z. B. 50–100 USD/MWh H₂ ist das vernachlässigbar. Somit bleibt der Wettbewerbsvorteil sonniger Standorte erhalten, auch wenn diese in Entsalzungsanlagen investieren müssen. Entscheidend ist jedoch die zuverlässige Bereitstellung der benötigten Wassermenge: Bei sehr großen Projekten (Gigawatt-Maßstab) müssen entsprechende Entsalzungsanlagen mitgebaut werden, die z. B. mehrere zehntausend m³ Reinstwasser pro Tag liefern. Dies erfordert Infrastruktur und vorausschauende Planung, bietet aber auch Chancen für die Region (zusätzliche Trinkwasser-Kapazitäten). So können H₂-Projekte in Wüstenstaaten dazu beitragen, die Wasserversorgung der lokalen Bevölkerung zu verbessern, indem Überschuss-Kapazitäten der Entsalzung bereitgestellt werden.

Eine Auswertung geplanter Großprojekte zeigt, dass fast die Hälfte der Vorhaben auf entsalztes Meerwasser setzen, etwa 20 % auf Recyclingwasser, und nur ~10 % auf direktes Frischwasser. Der Trend geht also klar zur Nutzung unkonventioneller Wasserquellen (Meer und Abwasser) in H₂-Exportländern.

5.3 Technologischer Vergleich: Effizienz, Nachhaltigkeit und Kosten

Abschließend werden die Wasseraufbereitungs-Optionen gegenübergestellt:

Wirkungsgrad & Energiebedarf: Die Süßwasseraufbereitung ist am energieeffizientesten (geringster Salzgehalt, einfachere Reinigung; teils $< 0,5 \text{ kWh/m}^3$). Abwasserrecycling erfordert etwas mehr Energie für Membranfiltration und Entfernung organischer Reststoffe ($\sim 1\text{--}2 \text{ kWh/m}^3$). Meerwasserentsalzung hat den höchsten Bedarf ($\sim 3\text{--}5 \text{ kWh/m}^3$) aufgrund des hohen Salzgehalts und benötigten Osmosedrucks. In Bezug auf den Gesamt-PtL-Prozess sind dies jedoch kleine energetische Posten: Zum Vergleich: Die Elektrolyse selbst verbraucht $\sim 50\text{--}60 \text{ kWh}$ Strom pro kg H_2 , also $\sim 5\text{--}6 \text{ kWh/Liter}$ Wasser (9 L). Demgegenüber sind z. B. $0,03 \text{ kWh}$ für die Aufbereitung von 9 L Meerwasser vernachlässigbar.

Kosten und Wirtschaftlichkeit: Alle betrachteten Wassertechnologien verursachen nur geringe spezifische Kosten, die – wie gezeigt – typischerweise $< 2\text{--}3 \%$ der PtL-Gesamtkosten liegen. Meerwasserentsalzung kostet absolut am meisten pro Volumen ($\sim 0,5\text{--}3 \text{ €/m}^3$), gefolgt von Abwasseraufbereitung (ähnliche Größenordnung, oft etwas günstiger da niedrigerer Energieeinsatz) und schließlich Süßwasseraufbereitung (am billigsten, teils $< 0,5 \text{ €/m}^3$, oft entsprechen nur lokale Wassergebühren). Die Kostenstruktur variiert: Bei RO-Entsalzung entfallen beträchtliche Anteile auf Energie und Anlagenabschreibung; bei Süßwasser hauptsächlich Gebühren für Bezug und minimale Behandlung. Wichtig ist: Keine der Optionen treibt die PtL-Kosten nennenswert in die Höhe. Daher wählen Projektentwickler die Wasserquelle primär nach Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit, weniger aus Kostengründen. In vielen Fällen wird die zuverlässige Versorgung (Ausfallsicherheit) wichtiger erachtet als die letzten Cent Kosten – ein Ausfall der Wasserzufuhr würde die gesamte PtL-Anlage stilllegen.

Nachhaltigkeitsaspekte: Frischwasserentnahmen sollten so gestaltet sein, dass sie lokale Ökosysteme nicht belasten – das ist in wasserreichen Regionen unkritisch, in trockenen Gebieten jedoch ein Ausschlusskriterium (dort greift man lieber auf Meer- oder Abwasser zurück). Meerwasserentsalzung ermöglicht die PtL-Produktion in ariden Küstengegenden, muss aber die Salzzurückführung ökologisch managen (durch Verdünnung der Sole im Meer). Abwasserrecycling punktet ökologisch, da es Wasser wiederverwendet und dadurch den Druck auf Süßwasserressourcen mindert. Zudem verwertet es den bei der Elektrolyse anfallenden Sauerstoff und Abwärme sinnvoll weiter – ein Plus für die Gesamteffizienz. Insgesamt gilt grüner Wasserstoff und PtL-Kraftstoff als relativ wasserunkritisch: Die benötigten Wassermengen sind im globalen Maßstab klein. Selbst bei massivem Ausbau bis 2050 wird die zusätzliche Wassernachfrage für grünen Wasserstoff nur einen winzigen Bruchteil ($< 1 \%$) des weltweiten Wasserverbrauchs ausmachen. Pro Einheit Energie liegt der Wasserverbrauch von PtL-Kraftstoffen in einer ähnlichen Größenordnung wie der heutiger fossiler Kraftstoffe – insofern schneidet PtL in Bezug auf "Water Footprint" deutlich besser ab als z. B. Biokraftstoffe, die pro Energieeinheit um ein Vielfaches mehr (für Bewässerung) benötigen. Wichtig bleibt jedoch die Standortwahl: In wasserarmen Gebieten sollten PtL-Anlagen nur zusammen mit Lösungen (Entsalzung/Recycling) realisiert werden, um Nachhaltigkeitsstandards zu erfüllen.

6 Umweltwirkungen

Die verschiedenen Wasserquellen, die im reFuels-Kontext in Frage kommen, sind jeweils mit individuellen Vor- und Nachteilen die Umweltwirkungen betreffend verbunden. Nachfolgend werden knapp und nicht abschließend wesentliche in der Literatur angeführte Umweltwirkungen dargestellt. Allgemein gilt, dass im Idealfall Wasserquellen genutzt werden sollten, die nicht in Konkurrenz zur Trinkwasserversorgung oder Ökosystemen stehen.

Die Nutzung von **Meerwasser** erfordert eine Entsalzung, meist via Umkehrosmose. Die direkten ökologischen Auswirkungen fokussieren hierbei insbesondere auf die verbundenen Eingriffe ins marine Umfeld. Potentiell problematische Umweltwirkungen sind mit der im Prozess entstehenden Sole bzw. dem Sole-Abwasser verbunden. Pro Liter gewonnenem Reinwasser fallen etwa 1,5 Liter konzentrierte Salzlake (Sole) als Abfall an (Root, 2019). Diese müsste bei Anlagenstandorten in der EU in speziellen Verbrennungsanlagen entsorgt werden (Urbansky, 2021). Einer direkten Rückleitung des Abwassers ins Meer, wie sie außerhalb der EU aktuell vorwiegend praktiziert wird, führt jedoch zu einer deutlich erhöhten Salinität, Temperatur, Anreicherung mit Schwermetallen (Kupfer, Nickel) und Chemikalienbelastung des Umgebungswassers und damit einer möglichen Schädigung von Seegras, Korallen und benthischen Lebensräumen im Umfeld der Anlage (Ihsanullah *et al.*, 2021). Die Wirkungen lassen sich durch Verdünnungsmaßnahmen und Diffusoren zwar vermindern, allerdings in der Regel nicht vollständig vermeiden.

Kommunales oder industrielles Abwasser, das entsprechend aufbereitet wurde, stellt eine prinzipiell attraktive Wasserquelle dar, da es die Nutzung von Frischwasserressourcen reduziert und einen Wasserkreislauf schließt. Die Umweltwirkungen bei Nutzung von geklärtem Abwasser sind hierbei überwiegend positiv. So werden bestehende Frischwasservorkommen entlastet und eine Nutzungskonkurrenz mit Trinkwasser und Landwirtschaft aktiv verhindert. Gleichzeitig werden im Rahmen des regulären Klärprozesses nicht entfernte Spurenstoffe durch die zusätzliche Aufbereitung des Abwassers abgefangen und somit der Schmutzstoffeintrag vermindert. Eine solche Nachreinigung zur Entfernung von u. a. organischen Spurenstoffen und Mikroorganismen ist für eine Nutzung des Abwassers im Elektrolyseprozess notwendig, allerdings auch mit den mit der jeweiligen Aufbereitungsart einhergehenden Umweltwirkungen verbunden.

Oberflächengewässer, wie Flüsse Seen und Talsperren, sind heute Hauptquelle der industriellen Wasserversorgung und prinzipiell auch für die Elektrolyse nutzbar. Allerdings sind bei der Entnahme von Oberflächenwasser verschiedene Umweltwirkungen zu beachten, die jedoch aufgrund der verbreiteten Nutzung von Oberflächenwasser weitestgehend bekannt und beherrschbar sind. So ist generell zu beachten, dass jeder Wasserentzug aus Flüssen oder Seen das Gewässerökosystem an sich beeinflusst, indem bspw. bei großen Entnahmen Wasserstand und Fließgeschwindigkeiten reduziert und damit z. B. die Lebensräume von Fischen, Muscheln und aquatischen Pflanzen beeinträchtigt wird. Für jede Entnahme eine behördliche Bewilligung benötigt, die solche Grenzen berücksichtigt.

Grundwasser ist in Mitteleuropa eine wichtige Wassersäule, die jedoch sensibel auf Übernutzung reagiert. Im Falle einer geplanten Entnahme von Grundwasser im Rahmen der PtL-Produktion sind daher die vorliegenden Standortbedingungen genau zu prüfen. So kann eine übermäßige Grundwasserförderung den Grundwasserspiegel absenken und damit zu einem Austrocknen von Feuchtgebieten, Bodensenkungen und einer Verminderung von Ernteerträgen führen (Mull and Holländer, 2011). In Küstennähe besteht bei starkem Abpumpen außerdem die Gefahr, dass Salzwasser in Süßwasser-Aquifere eindringt (Salzwasserintrusions-Effekt), was das Grundwasser versalzen würde (Wiederhold and Elbracht, 2013). In Deutschland wird die bewilligte Fördermenge von Grundwasser so festgelegt, dass sie die jährliche Neubildung nicht überschreitet (UBA, 2024b). Angesichts mehrjähriger Dürreperioden (2018–2020) ist die Neubildung in manchen Regionen bereits heute rückläufig, wobei der Klimawandel solche Trockenphasen zukünftig noch verlängern und verstärken kann (Marx and Boeing, 2023). Gerade in trockenen und wasserknappen Regionen ist ein zusätzlicher, großer Wasserverbrauch mitunter problematisch, weshalb hier alternative Wasserquellen genutzt werden sollten.

Theoretisch lässt sich auch **Regenwasser** auffangen und für die Elektrolyse nutzen. Umweltseitig kann die Nutzung von Regenwasser hierbei als überwiegend unproblematisch angesehen werden. Es ersetzt aufbereitetes Leitungswasser und reduziert die Entnahme aus Gewässern oder Grundwasser. Regenwasser weist zudem einen geringen Salz- und Härtegehalt auf, was die nachfolgende Aufbereitung erleichtert. Da Regen jedoch unregelmäßig fällt ist zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit der Bau größerer Rückhaltebecken bzw. Speichertanks erforderlich, was mit einem erhöhten Flächenverbrauch und Eingriffen ins Landschaftsbild verbunden sein kann (Zerta *et al.*, 2024). Bei sehr großflächiger Regenwassernutzung könnte regional die Grundwasserneubildung etwas sinken, da weniger Wasser versickert. In üblichen Dimensionen ist dieser Effekt allerdings eher gering. Generell wird die Nutzung von Regenwasser in aktuell geplanten Projekten zumeist eher ergänzend gesehen (Kauschke, 2024; Spohn, 2024).

Aufbereitetes Trinkwasser stammt meist aus Grund- oder Oberflächenwasser, wurde jedoch bereits durch Wasserwerke gereinigt und verteilt. Aus Sicht der Ressourcen ist Leitungswasser also kein eigenständiges „neues“ Vorkommen, sondern greift auf die genannten Quellen zurück – mit dem Unterschied, dass es bereits energie- und chemikalienintensiv aufbereitet wurde. Prinzipiell würde selbst eine Elektrolyse-Kapazität von 10 GW weniger als 0,5 % der jährlichen öffentlichen Wasserabgabe ausmachen (KEAN, 2024). Problematisch wäre eine solche Entnahme allerdings vor allem in Sommermonaten, wo Trinkwassernetze ohnehin Spitzen durch Bewässerung erfahren, generell in Zeiten von extremer Trockenheit sowie in Regionen, in denen die Versorgungskapazität bereits in hohem Maße ausgeschöpft wird. Prinzipiell kann den Problemen mit bspw. einer zeitlichen Flexibilisierung der Entnahme oder dem Bau von Pufferspeichern entgegengewirkt werden. Allerdings ist es ökologischer Sicht generell nicht ideal, hochqualitatives Trinkwasser, das unter Einsatz von Energie und Chemikalien bereitgestellt wurde, für industrielle Prozesse einzusetzen. Der DVGW empfiehlt daher, aufbereitetes Trinkwasser möglichst nicht als Elektrolysewasser zu nutzen, sondern vorher ansetzende Quellen (ggf. mit eigener Aufbereitung) heranzuziehen (Saravia *et al.*, 2023).

7 Fazit

Die vorliegende Studie verdeutlicht, dass Wasser als Ressource in der Diskussion um Power-to-Liquid-(PtL)-Kraftstoffe bisher oft vernachlässigt wurde – zu Unrecht. Denn auch wenn der Wasserbedarf im Verhältnis zu anderen Prozessressourcen wie Strom oder CO₂ vergleichsweise gering erscheint, ist die zuverlässige, nachhaltige und standortspezifisch angepasste Wasserversorgung eine zwingende Voraussetzung für den Hochlauf der Wasserstoff- und PtL-Produktion.

Der größte Teil des Wasserbedarfs entfällt auf die Elektrolyse, bei der Wasser als Ausgangsstoffe für die Erzeugung von Wasserstoff benötigt wird. Abhängig vom eingesetzten Elektrolyseverfahren ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Wasserqualität. Während für alkalische Elektrolyse deionisiertes Wasser in der Regel ausreichend ist, erfordert die PEM-Elektrolyse Reinstwasser mit sehr niedriger Leitfähigkeit. Auch für nachgelagerte Syntheseprozesse besteht ein zusätzlicher Wasserbedarf, der sich aus Prozessschritten wie Kühlung, Reinigung und Umwandlung ergibt. Gleichzeitig zeigen die Kostenanalysen, dass die Wasserbereitstellung (einschließlich Entsalzung und Aufbereitung) ökonomisch kaum ins Gewicht fällt und nur einen sehr kleinen Anteil an den Gesamtkosten synthetischer Kraftstoffe ausmacht.

Wasser kann für Elektrolyseanlagen aus verschiedenen Quellen bezogen werden. In industriellen Anwendungen wird häufig Oberflächenwasser bzw. Flusswasser verwendet, insbesondere in Chemie- oder Industrieparks mit bestehender Infrastruktur. Dabei kann es bei nicht standgeregelten Flüssen wie dem Rhein infolge von Niedrigwasserereignissen zu Einschränkungen kommen. Durch Nutzung diversifizierter Wasserquellen, wie gereinigtem Abwasser oder auch Regenwasser, lassen sich solche Schwankungen technisch für industrielle Verbraucher ausgleichen.

Die Untersuchung macht deutlich, dass der Wasserbedarf für Wasserstoff und PtL-Kraftstoffe im nationalen Maßstab als moderat einzuordnen ist. Gleichzeitig bestehen regionale Unterschiede hinsichtlich der Verfügbarkeit, der bestehenden Infrastruktur sowie der Nutzungskonkurrenzen (Nemec and Schilffarth, forthcoming). In wasserarmen Regionen oder in Gebieten mit bereits hoher Entnahmelast kann es erforderlich sein, zusätzliche Prüfungen zur lokalen Wasserversorgung durchzuführen.

Ökologisch stellen insbesondere großtechnische Meerwasserentsalzungsanlagen Herausforderungen, etwa durch Brine-Einleitungen oder Energieverbrauch. Diese Umweltwirkungen müssen – insbesondere in ariden Küstenregionen – systematisch berücksichtigt und durch begleitende Maßnahmen (z. B. Brine-Nutzung, Effizienzsteigerung, Einsatz erneuerbarer Energien) minimiert werden. Auch bei anderen Quellen wie Oberflächen- oder Grundwasser gilt: Die Nutzung muss standortspezifisch angepasst, genehmigungsfähig und langfristig tragfähig sein.

Im Rahmen des Projekts InnoFuels wurde damit ein Beitrag zur systematischen Betrachtung der Ressource Wasser als Bestandteil der Prozesskette von PtL-Kraftstoffen geleistet. Die Ergebnisse

zeigen, dass eine frühzeitige Berücksichtigung von Wasserbedarf, Aufbereitungsanforderungen und Versorgungspfaden eine Voraussetzung für die Umsetzung von Projekten darstellt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wasserbedarf für Elektrolyseanlage in Verbindung mit einem nassen Umlaufkühlsystem	6
Tabelle 2: H ₂ -Bedarf und Wasserverbrauch der Elektrolyse für verschiedene PtL-Kraftstoffe (Soler et al., 2022)	7
Tabelle 3: Vor- und Nachteile Leitungs- bzw. Pipelinegebundener Transport nach Stephenson (1989) ..	15
Tabelle 4: Aufschlüsselung Material bestehender Wasserleitungen in Deutschland nach Mendler et al. (2024)	16
Tabelle 5: Überblick über wesentliche Aufbereitungsverfahren (Darstellung nach Simoes et al. (2021) ..	18
Tabelle 6: Kosten für Wasseraufbereitung	20

Literaturverzeichnis

BDEW (2025) *Wasserwirtschaft in Deutschland – Karten*. Available at: <https://www.bdew.de/wasser-abwasser/karten-der-wasserwirtschaft/deutschland/#:~:text=Anschlussgrad%20Wasser> (Accessed: 16 June 2025).

BDI (2024) *Wasser als industrieller Standortfaktor*. Available at: <https://bdi.eu/artikel/news/wasser-als-industrieller-standortfaktor> (Accessed: 16 June 2025).

Brinner, A. (2013) *Elektrolyse – Basics V. Vom Elektrolyseblock zur Wasserstoff-Erzeugungsanlage*. ZSW. Available at: https://www.zsw-bw.de/uploads/media/Elektrolyse_Basics_V.pdf.

Destatis (2022) 'Zahl der Woche - 85 % der Wassernutzung in der Wirtschaft dienten 2019 der Kühlung von Anlagen'. Available at: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Zahl-der-Woche/2022/PD22_34_p002.html#:~:text=Das%20im%20betrieblichen%20Bereich%20zur,und%20andere%20Wasserarten%20machten%20einen (Accessed: 16 June 2025).

Destatis (2024) 'Öffentliche Wasserversorgung 2022: Über 5,32 Milliarden Kubikmeter Wasser gefördert'. Available at: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/08/PD24_304_32311.html.

DVGW (2020) 'Wasser-Impuls - Nachhaltiger Funktions- und Werterhalt der Wasserversorgungsinfrastruktur – Eine generationsübergreifende Aufgabe für Kommunen und Wasserversorger gleichermaßen'. Available at: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/dvgw-wasser-impuls-erhalt-infrastruktur-factsheet.pdf>.

DVGW (2023) 'Genügend Wasser für die Elektrolyse. Wieviel Wasser wird für die Erzeugung von grünem Wasserstoff benötigt und gibt es ausreichende Ressourcen?' Available at: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2o-fuer-elektrolyse-dvgw-factsheet.pdf>.

Elsner, C. (2023) 'Ozeane - die neue Quelle für Trinkwasser', 19 August. Available at: <https://www.zdfheute.de/wissen/meer-wasser-entsalzung-trinkwasser-100.html>.

EL-Vergleich (2025) *Wasserreinheit für die Elektrolyse: Anforderungen und Aufbereitung*. Available at: <https://www.elektrolyseur-vergleich.de/wasserreinheit/> (Accessed: 20 March 2025).

Envirofalk (2024) *Reinstwasser für Power-to-X-Anlagen*. Available at: <https://www.envirofalk.com/referenzen/reinstwasser-fuer-power-to-x-anlagen/> (Accessed: 5 June 2025).

Fasihi, M., Efimova, O. and Breyer, C. (2019) 'Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants', *Journal of Cleaner Production*, 224. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>.

GET H2 (2024) *Factsheet Wasserhaushalt Elektrolyse*. Available at: https://www.get-h2.de/wp-content/uploads/geth2_factsheet_wasserverbrauch_elektrolyse.pdf.

Hansestadt Rostock (2025) 'Meerwasserentsalzung für die Region Rostock - Erfahrungsaustausch zur Machbarkeit an der Ostsee', 11 April. Available at: https://rathaus.rostock.de/de/rathaus/aktuelles_medien/meerwasserentsalzung_fuer_die_region_rostock_erfahrungsaustausch_zur_machbarkeit_an_der_ostsee/364370 (Accessed: 16 June 2025).

Ihsanullah, I. et al. (2021) 'Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies', *Science of the Total Environment*, 780, p. 146585.

Jabs, F. (2021) 'Sauberer Rohstoff für ein sauberes Klima - Wasseraufbereitung für Power-to-X-Anwendungen', 22 April. Available at: <https://www.chemietechnik.de/sicherheit-umwelt/wasseraufbereitung-fuer-power-to-x-anwendungen-378.html>.

Kauschke, F. (2024) *Infener plant 50 Megawatt Wasserstofffabrik, Erneuerbare Energien*. Available at: <https://www.erneuerbareenergien.de/wasserstoff/infener-plant-50-megawatt-wasserstofffabrik>.

KEAN (2024) *Wasser für die Elektrolyse. Nutzungskonflikte bei der Ressource Wasser?, Klimaschutz und Energieagentur Niedersachsen*. Available at: <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/aktuelles/Wasser-fuer-die-Elektrolyse-4071#:~:text=%C3%B6ffentliche%20und%20nicht,aus%20dem%20Grundwasser%20gewonnen%20wurde>.

Lebling, K. et al. (2022) '6 Things to Know About Direct Air Capture'. Available at: <https://www.wri.org/insights/direct-air-capture-resource-considerations-and-costs-carbon-removal> (Accessed: 7 August 2023).

Marangoni, A. (2011) 'PVC products competitiveness. A total cost of ownership approach'. Available at: https://web.archive.org/web/20170615184105/http://www.pvc.org/upload/documents/TCO_ppt_ProfMarangoni.pdf.

Marangoni, A. (2019) 'PVC-U Pipe Competitiveness: A Total Cost of Ownership Approach'. Available at: https://pvc4pipes.com/wp-content/uploads/2019/05/PVC-U_Pipe_Competitiveness_A_Total_Cost_of_Ownership_Approach_ALTHESYS.pdf.

Marx, A. and Boeing, F. (2023) *Zur Entwicklung von Wasserhaushalt und Dürren in Deutschland*. Available at: <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/hitze-duerre-anpassung-2023/522826/zur-entwicklung-von-wasserhaushalt-und-duerren-in-deutschland/>.

Mendler, F. et al. (2024) *Water Supply for Electrolysis Plants*. Fraunhofer ISI. Available at: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/e7e7db7c-d640-46a9-afca-bc4f25c06631/content> (Accessed: 16 June 2025).

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft BW (2022) 'Strategie zum Umgang mit Wassermangel in Baden-Württemberg'. Available at: https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Wassermangel-Strategie-barrierefrei.pdf.

Mull, R. and Holländer, H. (2011) *Grundwasserhydraulik und-hydrologie: eine Einführung*. Springer-Verlag. Available at: [https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=5xLuBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA14&dq=Mull,+R.,+%26+Holl%C3%A4nder,+H.+\(2011\).+Grundwasserhydraulik+und-hydrologie:+eine+Einf%C3%BChrung.+Springer-Verlag.&ots=9th6Ygul4E&sig=H8zvIpLCG-HCqM6-pRzs6toC-w0](https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=5xLuBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA14&dq=Mull,+R.,+%26+Holl%C3%A4nder,+H.+(2011).+Grundwasserhydraulik+und-hydrologie:+eine+Einf%C3%BChrung.+Springer-Verlag.&ots=9th6Ygul4E&sig=H8zvIpLCG-HCqM6-pRzs6toC-w0) (Accessed: 2 July 2025).

Nemec, B. and Schilffarth, D. (forthcoming) 'Nutzungskonkurrenzen beim Wasserverbrauch durch PTL-Verfahren'. Studie im Rahmen des Forschungsprojektes INNOFUELS, ISP 7.

Oebbeke, A. (2010) *Mall legt Studie zur Regenwassernutzung vor*. Available at: <https://www.baulinks.de/webplugin/2010/1798.php4#:~:text=zur%C3%BCck,Gewerbe%20Regenwasser%20f%C3%BCr%20K%C3%BChlung%20im> (Accessed: 16 June 2025).

Root, T. (2019) *Entsalzungsanlagen produzieren mehr giftige Sole als erwartet*, *National Geographic*. Available at: <https://nationalgeographic.de/umwelt/2019/01/entsalzungsanlagen-produzieren-mehr-giftige-sole-als-erwartet>.

Saravia, F. 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 Wasserfachs eV: Bonn, Germany* [Preprint].

Saravia, F. (2024) 'Wasser für die Wasserstoffproduktion. Wir müssen reden!' Available at: https://www.klima-umwelt.kit.edu/downloads/Kommentar_2024_02.pdf.

Simoes, S.G. et al. (2021) 'Water availability and water usage solutions for electrolysis in hydrogen production', *Journal of Cleaner Production*, 315, p. 128124.

Soler, A. et al. (2022) 'E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050'. Available at: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_22-17.pdf.

Spohn, D. (2024) *Wasserstoff - Grüner Wasserstoff für Südbaden*, *Energie & Management*. Available at: <https://www.energie-und-management.de/nachrichten/technik/detail/gruener-wasserstoff-fuer-suedbaden-235066>.

Stephenson, D.J. (1989) *Pipeline design for water engineers*. Elsevier. Available at: <http://amac.md/Biblioteca/data/30/14/10/27.2.pdf> (Accessed: 16 June 2025).

Stuppert, S. (2008) 'Wasserentsalzung. Ausarbeitung für den Deutschen Bundestag.' Available at: <https://www.bundestag.de/resource/blob/419288/192bdd55e5088ee4bfa4f6d880ed89a6/WD-5-102-08-pdf.pdf>.

UBA (2018) 'Fragen und Antworten zur Wasserwiederverwendung'. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasserbewirtschaften/wasserwiederverwendung/fragen-antworten-zur-wasserwiederverwendung#1.%20Was%20ist%20Wasserwiederverwendung?> (Accessed: 16 June 2015).

UBA (2024a) 'Auswirkung des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit – Anpassung an Trockenheit und Dürre in Deutschland'. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2875/dokumente/zusammenfassung_und_ergebnisse.pdf.

UBA (2024b) 'Mengenmäßiger Zustand des Grundwassers'. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/zustand-des-grundwassers/mengenmaessiger-zustand-des-grundwassers> (Accessed: 16 June 2025).

UBA (2024c) 'Öffentliche Wasserversorgung'. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserwirtschaft/oeffentliche-wasserversorgung#grundwasser-ist-wichtigste-trinkwasserressource> (Accessed: 16 June 2025).

UBA (2024d) 'Tipps für eine nachhaltige Regenwassernutzung'. Available at: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/gartenfreizeit/regenwassernutzung#wie-sie-mit-regenwasser-ihren-garten-umweltbewusst-nutzen>.

Urbansky, F. (2021) *Elektrolyse kann zur Versalzung der Meere führen*. Available at: <https://www.springerprofessional.de/wasserstoff/energie--nachhaltigkeit/elektrolyse-kann-zur-versalzung-der-meere-fuehren/19810028>.

VCI NRW (2021) *Sparsamer Umgang mit Wasser*. Available at: <https://www.nachhaltigechemie.nrw/wasser>.

VEGA Grieshaber KG (2025) *Wasserspeicher - Füllstand- und Grenzstandmessung im Wasserspeicher*. Available at: <https://www.vega.com/de/de/branchen/energie/wasserstoff/anwendungen/wasserspeicher>.

Wiederhold, H. and Elbracht, J. (2013) 'Salzwasserintrusion – Gefahr für unser Trinkwasser?', *Geowissenschaftliche Mitteilungen*, 52, pp. 6–13.

Zerta, M. et al. (2024) 'H2O-Studie Brandenburg. Wasserverbrauch im Kontext der Wasserstoffproduktion im Land Brandenburg'. Available at: https://lbst.de/wp-content/uploads/2024/05/Bericht_H2O-Studie_Brandenburg_2024-05-10.pdf