



# H<sub>2</sub>O-Studie Brandenburg

Wasserverbrauch im Kontext der Wasserstoffproduktion  
im Land Brandenburg

03

24

Studie für das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie  
des Landes Brandenburg (MWAE)

*Eine Studie im Auftrag des  
Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE)*

*Datum: 27. März 2024 (Version 2: 10. Mai 2024)*

**PROJEKTTEAM:**

**Ludwig-Bölkow-  
Systemtechnik GmbH**

Daimlerstr. 15  
85521 Ottobrunn  
Deutschland

**DHI WASY GmbH**

Am Studio 26  
12489 Berlin  
Deutschland

**Water Science Policy gUG**

Hochgernstr. 19  
84524 Neuötting  
Deutschland



Martin Zerta  
(martin.zerta@lbst.de)

Christopher Kutz

Patrick Schmidt

Yanni Astono

Jonathan Kirschner

Katja Eulitz  
(keu@dhigroup.com)

Christian Fischer  
(chris@watersciencepolicy.com)

Kseniia Gonjaeva

Athénaïs Georges

**Disclaimer**

*Der Mitarbeiterstab der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, der DHI WASY GmbH und Water Science Policy gUG hat diesen Bericht erstellt.*

*Die Sichtweisen und Schlüsse, die in diesem Bericht ausgedrückt werden, sind jene der Mitarbeitenden der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, der DHI WASY GmbH und Water Science Policy gUG. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings gibt weder die Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH noch irgendeiner ihrer Mitarbeitenden, Vertragspartner oder Unterauftragnehmer irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses.*

## INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis .....	3
Executive Summary .....	5
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>17</b>
1.1. Wasser und Energie – globale und regionale Herausforderungen.....	17
1.2. Studienrahmen, Methodik und Vorgehen.....	23
1.3. Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen.....	25
<b>2. Wasserbedarf der Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse in Brandenburg .....</b>	<b>27</b>
2.1. Zusammenfassung .....	27
2.2. Wasserstoffproduktion in Brandenburg .....	29
2.3. Wasserbedarf der Elektrolyse .....	35
2.3.1. Wasserelektrolyse .....	37
2.3.2. Wasserqualitäten und -anforderungen der Elektrolyse .....	42
2.3.3. Wasseraufbereitung .....	46
2.3.4. Kühlwasser- bzw. Wärmemanagement.....	55
2.3.5. Ableitung des spezifischer Wasserbedarf der Elektrolyse .....	58
2.4. Ausblick: Abgeschätzter zukünftiger Wasserbedarf der Wasserstoffproduktion in Brandenburg .....	63
<b>3. Wasserhaushalt Brandenburg .....</b>	<b>65</b>
3.1. Zusammenfassung – Wasserhaushalt Brandenburg .....	65
3.2. Verfügbare Datengrundlage .....	67
3.3. Regionaler Wasserhaushalt Brandenburg, verfügbare Wasserquellen.....	75
3.3.1. Niederschlagswasser.....	75
3.3.2. Grundwasserdargebot.....	76
3.3.3. Oberflächenwasserdargebot .....	83
3.3.4. Gereinigtes Abwasser .....	89
3.4. Statistische Daten zum Wasserhaushalt Brandenburgs .....	90
<b>4. Diskussion der Auswirkungen der H<sub>2</sub>-Produktion auf den Wasserhaushalt anhand regionaler Fallbeispiele.....</b>	<b>98</b>
4.1. Zusammenfassung .....	98
4.2. Einordnung und Bewertung des potenziellen Wasserbedarfs im Kontext eines ambitionierten Wasserstoffhochlaufs in Brandenburg.....	100
4.3. Regionale Fallbeispiele .....	103
4.3.1. Übersicht und Annahmen der Fallbeispiele .....	104
4.3.2. Fallbeispiel 1: Dezentrale Anwendung .....	110
4.3.3. Fallbeispiel 2: Urbane Region .....	117
4.3.4. Fallbeispiel 3: Industrie.....	126

5. Fazit.....	137
Abkürzungsverzeichnis.....	144
Quellenverzeichnis .....	145
Abbildungsverzeichnis.....	159
Tabellenverzeichnis.....	162
Anhang .....	163



## EXECUTIVE SUMMARY

- ❖ Die Erreichung der Klimaschutzziele erfordert eine entschlossene Energiewende mit Wasserstoff als wesentlichem Schlüsselement.
- ❖ Brandenburg verfügt insgesamt über ein überdurchschnittliches Potenzial für Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und die Produktion von Wasserstoff.
- ❖ Die Wasserverfügbarkeit sowie (existierende und künftige) Wassernutzung sind globale wie auch regionale Themen: So ist Brandenburg bereits heute durch (regionalen) Wasserstress betroffen, v. a. im Sommer, sowohl hinsichtlich des verfügbaren Grundwasserdargebots als auch durch extremwetterbedingte Änderungen der Niederschlagsmengen.
- ❖ Die Transformation des „Lausitzer Kohlereviers“ und anderer Industriestandorte sowie die mögliche Neuansiedlung von Zukunftstechnologien eröffnen wirtschaftliche Chancen für die Region. Gleichzeitig bietet sich die Gelegenheit einer Optimierung der bestehenden Wassergewinnung und -nutzung, die heute v. a. durch Sumpfungswasser dominiert werden.
- ❖ Der potenzielle Wasserbedarf zur Deckung der heimischen H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale (20,7 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub>/a) würde ca. 1–6 % der heutigen Wassergewinnung Brandenburgs entsprechen.
- ❖ Eine künftige großskalige H<sub>2</sub>-Produktion in Brandenburg würde damit den „Wasserstress“ nicht zwangsläufig bzw. signifikant erhöhen – sondern kann sogar helfen, eine „Wasserwende“ einzuleiten.
- ❖ Dennoch werden die regionalen Auswirkungen neuer GroÙelektrolyseure wie auch die Wasserentnahmen anderer Gewerbe- und Industrieunternehmen spezifisch zu prüfen sein.
- ❖ Diese individuelle Prüfung vor Ort stellt damit eine wichtige Voraussetzung für eine weitere Beurteilung und Eignung von Standorten für die H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Elektrolyse dar, auch wenn diese Studie grundsätzlich belegt, dass Wasserstoff in einem integrierten Konzept im Vergleich zu heutigen Wasserverbräuchen einen geringeren „Fußabdruck“ aufweist.
- ❖ Pilotprojekte können helfen, den ressourcensparenden Umgang aufzuzeigen und Akzeptanz zu schaffen. Auch für die weitere Entwicklung von Projekten zur H<sub>2</sub>-Erzeugung mittels Elektrolyse ist die Umweltverträglichkeit der Wasserentnahme von Beginn an sicherzustellen.
- ❖ Die Diskussion der Fallbeispiele zeigt, dass v. a. auch die Nutzung von Abwasser eine große Chance darstellt. Jedoch sind hier weitere „Aufreinigungsaufwände“ mit zusätzlichen Kosten verbunden. Hier sollte der Ansatz für eine Zusammenarbeit zwischen öffentlicher und privater Hand geprüft werden, um konkrete Projekte und Lösungen zu initiieren.
- ❖ Wesentliche Grundlage für die ganzheitliche Bewertung neuer Wasserentnahmen ist auch eine Verbesserung der Datenverfügbarkeit zum bestehenden Wasserhaushalt.
- ❖ Die (nutzungsübergreifende) Sensibilisierung für einen sparsamen und bewussten Umgang mit Wasser stellt die Voraussetzung der weiteren Strukturplanung und -entwicklung dar.

Die Energiewende ist eine zentrale Aufgabe und Voraussetzung zur Erreichung der Klimaschutzziele. Die regionale Nutzung von Wind- und PV-Potenzialen zur heimischen Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs (H<sub>2</sub>) eröffnet außerdem durch heimische Wertschöpfung und Industrieansiedlungen eine Chance für einen erfolgreichen Strukturwandel in Brandenburg. Jedoch stellen die Nutzung und Verfügbarkeit der Ressource Wasser als wesentlicher Einsatzstoff der Elektrolyse gleichzeitig eine Herausforderung dar, die zunehmend durch Trockenwetterereignisse als Folge des Klimawandels verstärkt wird. Ein sparsamer und effizienter Umgang mit Wasser und die Sensibilisierung für das Thema gewinnen daher zunehmend an Bedeutung.

In Brandenburg treffen die Pläne für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft auf eine angespannte Situation des regionalen Wasserhaushalts. Dabei gilt es, die potenziellen Herausforderungen und Chancen im Themenfeld Wasser & Wasserstoff rechtzeitig zu identifizieren und die Hebel für eine ressourcenschonende Wasserstoffproduktion zu nutzen. Der Zubau von erneuerbaren Energien und Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von Wasserstoff kann auf diesem Weg folglich nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung und Transformation der unterschiedlichen Sektoren leisten. Vielmehr kann die Diskussion rund um eine effiziente Wassernutzung und Mehrfachnutzung in diesem Kontext auch Ansatzpunkte für eine „Wasserwende“ in Brandenburg liefern.

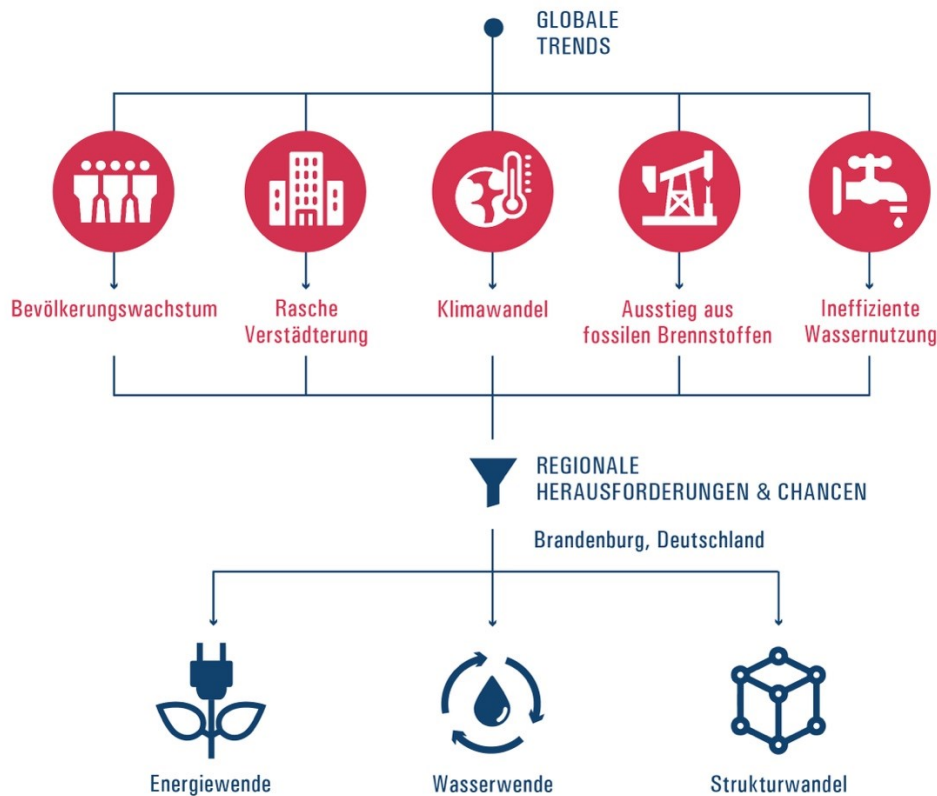


Abbildung 1: Globale Trends und regionale Herausforderungen & Chancen.

Diese Studie adressiert die zentrale Fragestellung der möglichen Auswirkungen einer zukünftigen Wasserstoffproduktion in Brandenburg auf den regionalen Wasserhaushalt des Landes sowie seiner Landkreise und Städte. Damit soll auch ein Beitrag zur bisher bestehenden „Forschungs- und Wissens-

lücke“ zu diesem Thema geleistet werden, indem einerseits eine fundierte Einschätzung zur H<sub>2</sub>-Herstellung mittels Elektrolyse und der damit verbundenen Wasserbedarfe in die Diskussion eingebracht wird. Andererseits fasst die Studie bestehende Erkenntnisse und Daten zum bestehenden Wasserhaushalt in Brandenburg sowie zur weiteren Entwicklung (etwa infolge des Braunkohleausstiegs) zusammen und liefert damit eine wichtige Grundlage für die zukünftige Industriepolitik. Mit dieser Arbeit kann aufgezeigt werden, dass eine künftige Wasserstoffproduktion in Brandenburg selbst nur verhältnismäßig geringe Wassermengen verbrauchen würde – insbesondere im Vergleich zu bestehenden wasserintensiven Branchen wie etwa die Energiegewinnung mit den existierenden Braunkohlekraftwerken, die einen hohen Kühlwasserbedarf (ca. 60 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr) aufweisen.

Eine Hochrechnung auf Basis des theoretischen Wasserstofferzeugungspotenzials in Brandenburg (ca. 20 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub> pro Jahr), wie sie beispielsweise im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu einem H<sub>2</sub>-Startnetz im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE) angenommen wurde, ergibt eine Bandbreite des Wasserbedarfs (in Trinkwasserqualität) von jährlich etwa 8 Mio. m<sup>3</sup> Wasser für optimierte Elektrolyseanlagen (Konzept A) bis ca. 37 Mio. m<sup>3</sup> Wasser für Anlagen mit offenen Kühlsystemen und Verdunstungskühlung (Konzept C). Wie in Abbildung 2 dargestellt, liegt damit der abgeschätzte Wasserbedarf für die Elektrolyse deutlich unter den Mengen der heutigen Wassergewinnung in Höhe von ca. 615 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr für Brandenburg bzw. 1.021 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr für Brandenburg inkl. Berlin. Bezogen auf das Bundesland Brandenburg hätte die Wasserstoffproduktion damit, je nach eingesetztem Konzept, einen Anteil von ca. 1 % bis 6 % relativ zur Wassergewinnung des Jahres 2019<sup>1</sup>. Zum Vergleich lag die eingesetzte Wassermenge (Wassernutzung) in Haushalten und Unternehmen (inkl. ungenutzt wieder eingeleiteter oder an Dritte abgegebener Wassermengen) bei 577 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg und ca. 989 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg inkl. Berlin.

---

<sup>1</sup> Basierend auf den Daten des Amt für Statistik Berlin-Brandenburg für das Jahr 2019 [Amt für Statistik-BB 2022]. Hierin enthalten sind unter anderem bestehende Sumpfungswassermengen im Braunkohletagebau, die zum Teil ungenutzt in Oberflächengewässer eingeleitet werden. Im Einzugsgebiet der Spree beliefen sich im Jahr 2020 die Einleitungsmengen an Sumpfungswasser durch die LEAG im Durchschnitt auf etwa 5 m<sup>3</sup>/s (entspricht etwa 158 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr). Diese Mengen sollen nach Angaben des Unternehmens zeitlich gestaffelt bis 2035 auf 4 m<sup>3</sup>/s (126 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr) und dann bis 2050 (Beendigung der Sanierungsarbeiten) auf schließlich 0 m<sup>3</sup>/s sinken. „

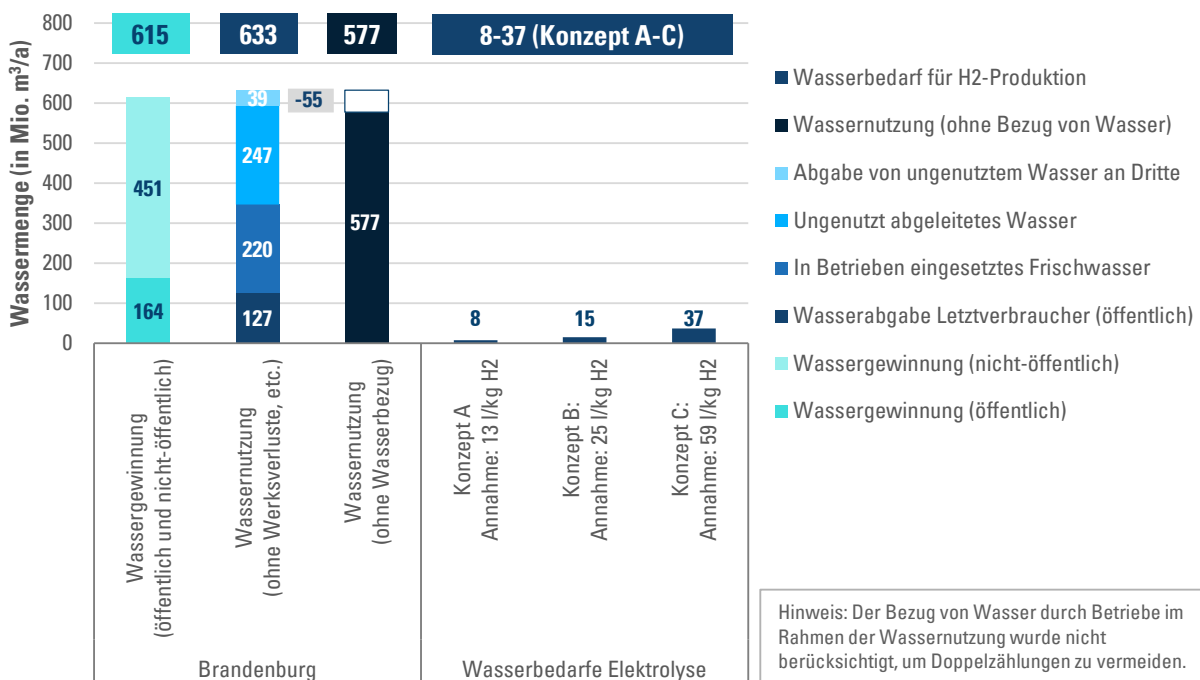


Abbildung 2: Einordnung der ermittelten (potenziellen) Wasserbedarfe der H<sub>2</sub>-Erzeugung in Brandenburg im Vergleich zur heutigen Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin.

Datenquelle: Eigene Hochrechnung auf Basis von [Amt für Statistik-BB 2022] sowie [Fhg IEG et al. 2023]

### Vorgehen und methodischer Ansatz in dieser Arbeit

Grundlage für die Abschätzung der Wasserstoffherzeugung in Brandenburg stellt die „*Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg*“ der Fraunhofer-Institute IEG und ISI in Zusammenarbeit mit dem Reiner Lemoine Institut (RLI) und INFRACON im Auftrag des MWAE dar [Fhg IEG et al. 2023]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folglich keine eigenen H<sub>2</sub>-Potenzialabschätzungen vorgenommen bzw. H<sub>2</sub>-Szenarien bis 2045 entwickelt. Auch umfasst der Studienrahmen keine Betrachtung der Erneuerbare-Energien-Potenziale oder der für die Elektrolyse bereitstehenden Strommengen. Ziel der Studie ist eine Abschätzung, Einordnung und Diskussion einer potenziellen Wasserstoffproduktion in Brandenburg anhand von Elektrolyseanlagen, wie sie u. a. in der Machbarkeitsstudie des MWAE abgeschätzt wurde, und deren Auswirkung auf den regionalen Wasserhaushalt. Für den spezifischen Wasserbedarf der Elektrolyseanlagen wurden für unterschiedliche Elektrolysetechnologien (z. B. PEM-Elektrolyse oder alkalische Elektrolyse) verfügbare Angaben und Daten von Herstellern und aus der Literatur ausgewertet und mithilfe einzelner Experteninterviews validiert. Auf dieser Basis wurden auch die wesentlichen Einflussfaktoren identifiziert und diskutiert, die den Wasserbedarf der Elektrolyse (inkl. Wasseraufbereitung) beeinflussen.

Eine erste Einschätzung des Wasserbedarfs durch die Elektrolyse erfolgte auf Ebene des Bundeslandes sowie der Landkreise und Städte. Diese ermöglicht eine grobe Einordnung der Größenverhältnisse auf Basis von gemittelten Datensätzen, erlaubt jedoch keine spezifischen Rückschlüsse auf einzelne Anlagen und regionale Standorte bezüglich der lokalen Wasserverhältnisse bzw. deren Eignung.

Bezüglich der Datengrundlagen zum Wasserhaushalt ist festzustellen, dass es für das Land Brandenburg keine einheitliche und vollständige Datengrundlage zu den Wassernutzungen und zum Wasserdargebot

gibt. Daher erfolgt ausführlich die Darstellung und Bewertung der verfügbaren Daten, Modellierungen, Gutachten und Studien. Zum Wasserdargebot werden die prinzipiell verfügbaren Wasserquellen (d. h. Niederschlagswasser, Grundwasser, Oberflächenwasser und gereinigtes Abwasser) beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeiten fanden weitere Interviews und Gespräche mit Akteuren und Experten statt.

Anhand ausgewählter Fallbeispiele werden mögliche Anwendungsfälle der Elektrolyse für dezentrale (bis 10 MW), urbane (bis 100 MW) und industrielle Projekte (GW-Klasse) in Brandenburg diskutiert. Hintergrund ist die Identifizierung relevanter offener Fragestellungen und Ansatzpunkte für zukünftige Arbeiten. Eine spezifische Standortbetrachtung einzelner Projekte und Anlagen ist jedoch nicht Teil dieser Studie und erfordert eine separate, umfangreichere Untersuchung.

### Wasserbedarfe der Elektrolyse

Für ein grundlegendes Verständnis der Wasserbedarfe der Elektrolyse ist zunächst ein Blick auf die im Zuge des Prozesses anfallenden Wasserströme hilfreich (siehe Abbildung 3).

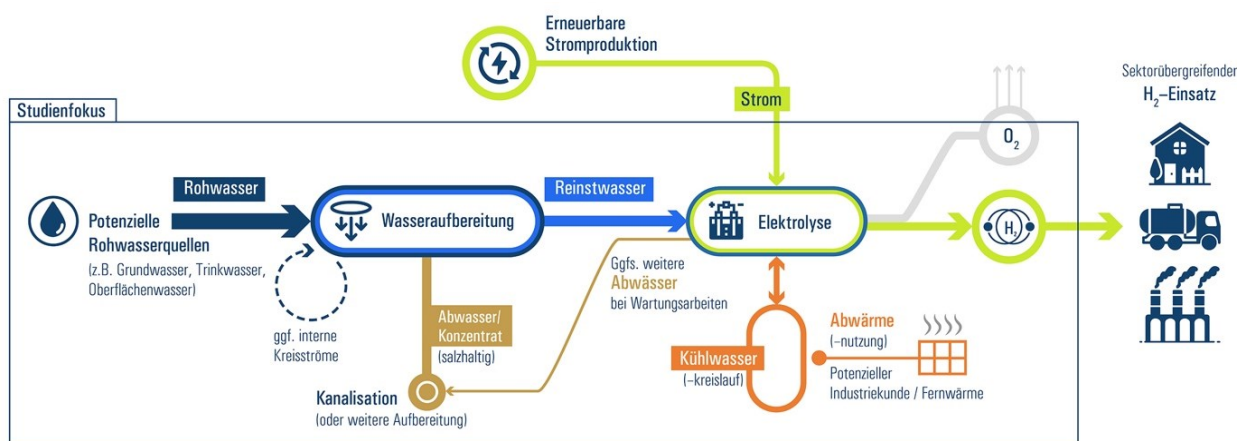


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wasserströme im Kontext der Elektrolyse.

In der Literatur findet sich eine große Bandbreite des tatsächlichen Wasserbedarfs der Elektrolyse. Diese umfasst Werte zwischen 12 und bis zu 120 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, abhängig jeweils von den angenommenen projektspezifischen Rahmenbedingungen. Um diese Zahlen einzuordnen, ist ein detaillierter Blick auf die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Wasserbedarf der Elektrolyse unabdingbar. Dabei können insbesondere folgende vier Faktoren identifiziert werden, die im Rahmen der Studie diskutiert werden:

- Wahl der Elektrolysetechnologie (insb. Niedertemperatur- vs. Hochtemperaturelektrolyse),
- genutzte Rohwasserquelle und -qualität sowie die Anforderungen an die Reinstwasserqualität,
- die damit verbundene Auslegung der Wasseraufbereitung inkl. interner Wasserkreisläufe zur Erhöhung der Ausbeute und
- angewandtes Kühlkonzept und Kühlbedarfe für den Elektrolyseur und weiterer Nebenaggregate.

Basierend auf den Angaben diverser Elektrolysehersteller sowie Gesprächen mit ausgewählten Experten wurden Bandbreiten für die auftretenden Wasserströme sowie die Anforderungen an die Wasserqualität ermittelt. Auch werden die Einflüsse der einzelnen Faktoren sowie die jeweiligen technischen Hintergründe beschrieben.

Für die Wasserstoffherzeugung benötigen Elektrolyseanlagen hoch aufgereinigtes Wasser, sogenanntes Reinstwasser, um mithilfe von Strom die Wassermoleküle (H<sub>2</sub>O) in ihre Bestandteile Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zu teilen. Hierfür sind ca. 10 Liter Reinstwasser für die Erzeugung von 1 kg<sub>H<sub>2</sub></sub> erforderlich. Die Bereitstellung von Reinstwasser erfolgt durch einen mehrstufigen Aufreinigungsprozess der zur Verfügung stehenden Rohwasserquellen. Zusätzliche Wasserbedarfe können sich durch die Kühlbedarfe des Elektrolyseurs ergeben, u. a. durch Zusatzwasserströme zur Kompensation von Verdunstungsverlusten oder Abschlämmwasser (in offenen Kühlsystemen) oder im Zuge der kontinuierlichen Reinigung interner Wasserkreisläufe zum Schutz vor Aufkonzentration von Verunreinigungen.

In dieser Studie werden drei beispielhafte Konzepte für Elektrolyseanlagen abgeleitet und im Detail diskutiert, die durch ihre Auslegung eine Bandbreite des Rohwasserbedarfs aufzeigen sollen. Betrachtet werden zwei Konzepte mit Trockenkühlung mit bzw. ohne optimierte Wasserströme im Zuge der Wasseraufbereitung sowie ein Anlagenkonzept mit Verdunstungskühlung. Hierbei ergaben sich Trinkwasserbedarfe von 13 bzw. 25 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> für Prozesse mit Trockenkühlung (Anlagenkonzept A bzw. B). Außerdem wurde ein Trinkwasserbedarf von 59 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> für Anlagen mit offenem Kühlkreislauf mittels Verdunstungskühlung (Elektrolysekonzept C) in der Literatur identifiziert.

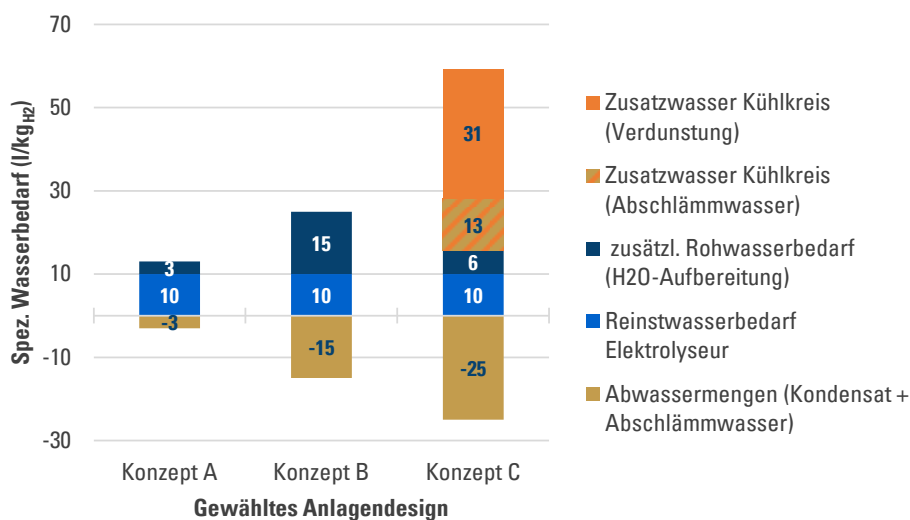


Abbildung 4: Spezifischer Wasserbedarf in Abhängigkeit zu unterschiedlichen Anlagendesigns.

Konzept A: Inkl. interner Wasserrückführung im Rahmen der Wasseraufbereitung

Konzept B: Keine interne Wasserrückführung, mit geschlossenem Kühlkreislauf

Konzept C: Konzept mit hohem Wasseraufbereitungsbedarf und Verdunstungskühlung

Auf Basis dieser Werte wurde abschließend auch der Rohwasserbedarf für eine potenzielle Wasserstoffproduktion von etwa 20 TWh in Brandenburg abgeleitet. Folglich läge der Trinkwasserbedarf bei etwa 8 bis 37 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. Durch zusätzliche Vorbehandlungsschritte im Zuge der Wasseraufbereitung bei Grund- oder Oberflächenwasser sind weitere Mehrbedarfe von etwa 15 % zu berücksichtigen.

Für die weitere Entwicklung und Erprobung von Elektrolyseanlagen wird empfohlen, vor allem die Kühlung und Abwärmenutzung zu optimieren, um mit einem geschlossenen Kühlkreislauf bzw. Luftkühlung die Wasserbedarfe auf ein Minimum zu reduzieren. Zusätzlich sollten durch erste Pilotprojekte auch



Abwasserströme aus kommunalen oder industriellen Kläranlagen als neue Rohwasserquellen erschlossen werden. Die zusätzlichen Kosten für die wassereffiziente Nutzung und insbesondere der Aufbereitung und Nutzung von verschiedenen Rohwasserquellen sollten verstärkt diskutiert und mit den gesamtgesellschaftlichen Vorteilen abgewogen werden. Zur Identifizierung geeigneter regionaler Umsetzungskonzepte wie auch zur Hebung von Synergiepotenzialen wird der kontinuierliche Austausch aller beteiligten Akteure (darunter Elektrolysehersteller, Zulieferer von Wasseraufbereitungs- und Kühlanlagen, Projektierer, Wasserstoffnutzer sowie (kommunale) Wasserbetriebe) mit Politik und (regionalen) Wasserbehörden sowie der Zivilgesellschaft empfohlen.

### **Wasserstress – ein globales und regionales Thema**

Wasserverfügbarkeit und -nutzung ist sowohl ein globales wie auch regionales Thema, das durch den Klimawandel und Trockenwetterereignisse genauso verstärkt wird wie durch fortschreitende Urbanisierung, landwirtschaftliche Aktivität und nicht nachhaltige Nutzungen. Saisonale Schwankungen zeigen vor allem im Sommer zunehmend „Wasserstress“ (u. a. Niedrigwasser bei Oberflächengewässern und Mangel an Niederschlägen). Aufgrund der hohen Temperaturen und hohen Verdunstungsraten in den Sommermonaten ist auch ein Anstieg der künftigen Wasserbedarfe wahrscheinlich, insbesondere getrieben durch die Landwirtschaft, Kühlung und Trinkwasserversorgung.

Regional sind zunehmend zurückgehende Grundwasserverfügbarkeiten und teilweise auch Niederschläge zu verzeichnen und durch den Klimawandel forciert weiter zu erwarten. Hiervon sind auch Brandenburg und Berlin betroffen. Eine besondere Charakteristik in der Region ist dabei auch die enge Verbundenheit und Abhängigkeit der Trinkwasser- und Abwasserentsorgung der Hauptstadt mit dem Wasserhaushalt Brandenburgs, v. a. die Wassermengen der Spree und der Grundwasserverfügbarkeiten in Wassereinzugsgebieten Berlins. Außerdem gilt es, den langjährigen Einfluss des Braunkohletagebaus in der brandenburgischen Lausitz sowie die absehbaren Veränderungen des Wasserhaushalts durch den anstehenden Ausstieg aus der Braunkohleförderung und -verstromung in Einklang mit den Folgeaktivitäten zu berücksichtigen.

Hinsichtlich des Grundwasserdargebots ist vorrangig die Trinkwasserversorgung sicherzustellen und dauerhaft zu gewährleisten. Bei der Erhöhung von Grundwasserentnahmen in bestehenden Fassungsanlagen oder Neuplanung von Grundwasserfassungen sind hydrogeologische Gutachten zur Bewertung des konkret am Standort verfügbaren Grundwasserdargebots und der Auswirkungen der Grundwasserentnahme auf die angrenzenden grundwasserabhängigen Landökosysteme durchzuführen. Informationen zu den tatsächlichen und genehmigten Entnahmen sind bislang nicht vollständig verfügbar.

Anhand des sogenannten Auslastungsgrades in Prozent des genutzten Grundwassers bezogen auf das Grundwasserdargebot kann eine erste Einschätzung auf Basis der verfügbaren Daten erfolgen. Die folgende Abbildung 5 zeigt die Auslastungsgrade (in %) für das mittlere verfügbare Grundwasserdargebot für Trockenwetterperioden in den einzelnen Bilanzgebieten Brandenburgs. Von den insgesamt 75 Bilanzgebieten für das Grundwasserdargebot sind zehn bereits mit einem Auslastungsgrad von 50 % bis 75 % bilanziert und weitere sechs Gebiete haben einen Auslastungsgrad von 75 % bis 100 % erreicht. Das Bilanzgebiet Erpe und Fredersdorfer Mühlenfließ ist in Trockenjahren mit einem Auslastungsgrad > 100 % bereits überbilanziert. Insbesondere in der Region Berlin sind die Grundwasserverhältnisse stark angespannt und die Grundwasservorräte sind vor allem für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung zu sichern. Die Menge des Grundwassers, die von den Berliner Wasserwerken nachhaltig genutzt werden



kann, ist weitestgehend ausgeschöpft. Sinkende Grundwasser- und Oberflächenwasserressourcen bei gleichzeitig steigendem Trinkwasserverbrauch stellen eine große Herausforderung für die Sicherung der Wasserqualität dar: Einerseits kommt weniger „frisches Wasser“ aus den Einzugsgebieten nach. Andererseits steigen die Abwassermengen, die von den Klärwerken in das Gewässersystem zurückgeleitet werden.

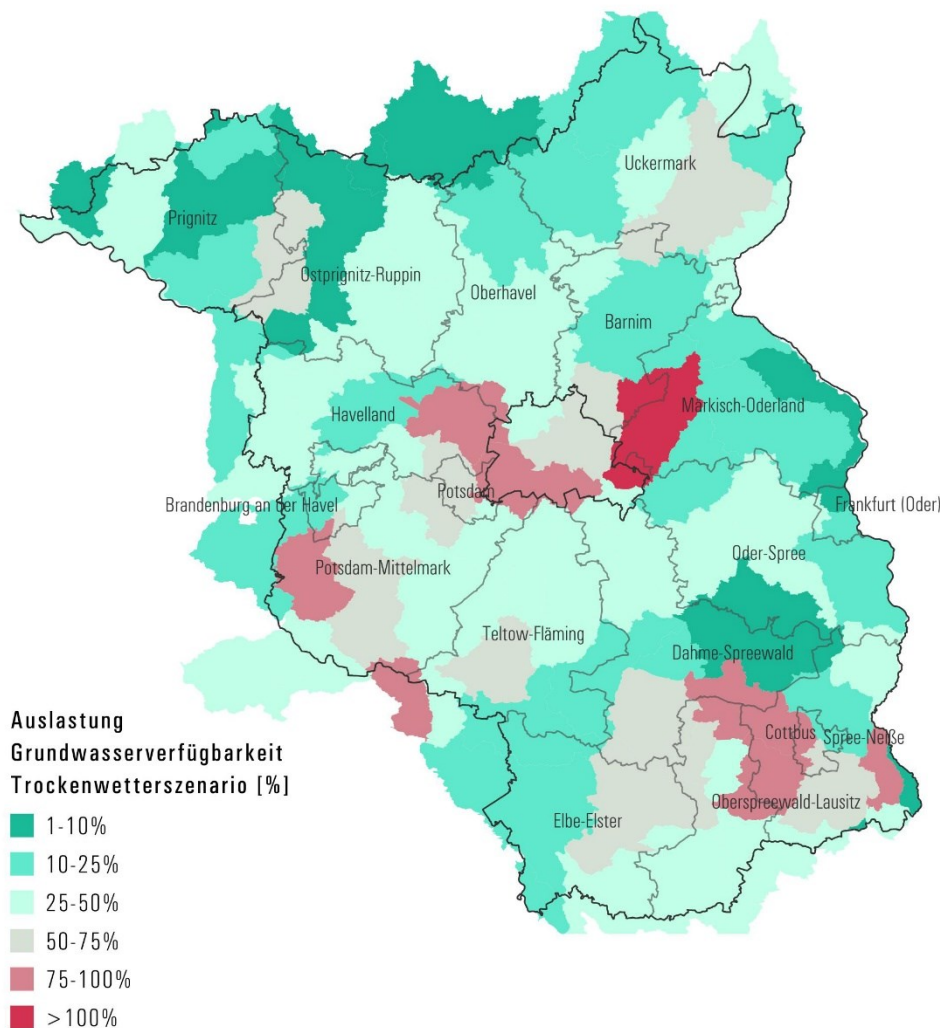
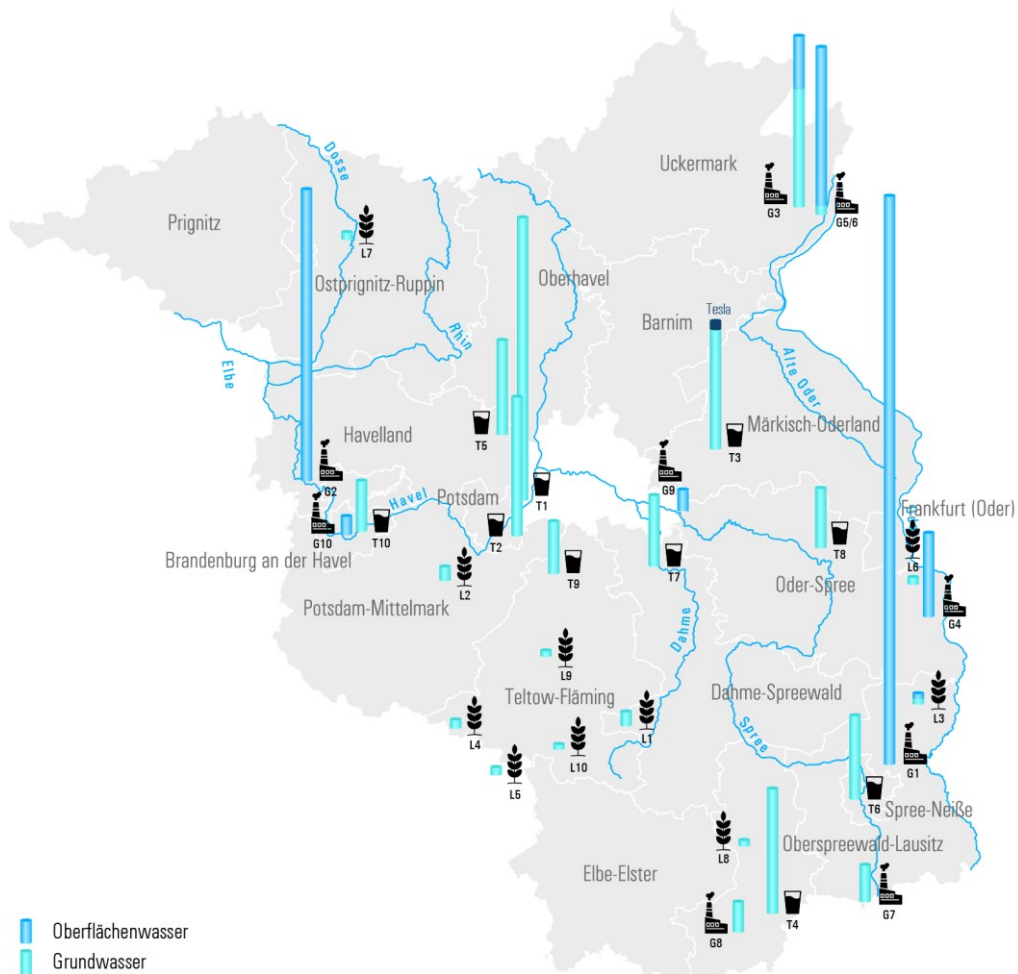


Abbildung 5: Auslastungsgrad [%] für das Trockenwetterzenario.  
Eigene Darstellung nach [LfU 2023 b]

Eine Auswertung der jeweils 10 Unternehmen mit den größten Wasserentnahmen in den drei Bereichen Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft und Gartenbau sowie der Wasserversorger zeigt eine Wasserentnahme von insgesamt ca. 200 Mio. m<sup>3</sup>/a. Eine regionale Verteilung dieser ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Neben dem Kraftwerk Jänschwalde der LEAG, mit ca. 45 Mio. m<sup>3</sup>/a, der EEW Premnitz (ca. 23 Mio. m<sup>3</sup>/a), der PCK Raffinerie (ca. 13,5 Mio. m<sup>3</sup>/a) sowie den LEIPA-Standorten in Schwedt (zusammen 10,6 Mio. m<sup>3</sup>) haben vor allem die Betriebe zur Wasserversorgung (Grundwasser für die Trinkwasserversorgung) rund um Berlin sowie in Brandenburg an der Havel die größten Einzelentnahmen.



**ÜBERSICHT GROSSER WASSERENTNEHMER IN BRANDENBURG**



**Gewerbe und Industrie**

G1. LEAG Lausitz Energie Kraftwerke AG fuer Kraftwerk Jaenschwalde; G2. EEW Premnitz GmbH; G3. PCK Raffinerie GmbH Schwedt; G4. Arcelor Mittal Eisenhuettenstadt GmbH; G5/6. LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Sued / LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Nord; G7. Zweckverband Industriepark Schwarze Pumpe; G8. BASF Schwarzheide GmbH; G9. Prefere Resins Germany GmbH; G10. B.E.S. Brandenburger Elektrostahlwerke GmbH



**Landwirtschaft und Gartenbau**

L1. Landgut Schoeneiche Linkenheil & Seidel OHG; L2. Spargelhof Klaitow Produktions GmbH & Co.KG; L3. Luebbinchener Milch und Mast GbR mbH; L4. AFB Agrar GmbH Flaemingland Bloensdorf; L5. Gluecksburg Agrar eG Dixfoerda; L6. Bauerngenossenschaft Ziltendorfer Niederung GbR; L7. Brandenburger Gemuesekontor GmbH & Co. KG; L8. Landboden Bronkow Agrar GmbH; L9. LaProG Agrargesellschaft Gottow mbH; L10. NGH Agrar Nonnendorf GmbH



**Trinkwasser**

T1. Berliner Wasserbetriebe fuer Wasserwerk Stolpe; T2. Energie und Wasser GmbH Potsdam; T3. Wasserverband Strausberg-Erkner; T4. Wasserverband Lausitz Senftenberg; T5. Osthavellaendische Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung GmbH; T6. LWG Lausitzer Wasser GmbH & Co.KG; T7. DNWAB mbH fuer MAWV Maerkischer Trink- und Abwasserzweckverband; T8. Frankfurter Wasser- und Abwassergesellschaft mbH WW Briesen; T9. DNWAB mbH fuer WARL Wasser- und Abwasserentsorgungs-Zweckverband Region Ludwigsfelde; T10. BRAWAG GmbH Wasser- und Abwassergesellschaft Brandenburg a.d.H.

Abbildung 6: Übersicht großer Wasserentnehmer in Brandenburg. Eigene Auswertung nach [Landtag 2023]

Ein sparsamer und bewusster Umgang mit Wasser und die Sensibilisierung für das Thema sind wichtige Voraussetzung und Aufgaben für die weitere Nutzung und die weitere Strukturplanung und -entwicklung.

## Herausforderungen & Chancen für Brandenburg

Die Pläne für die Umstrukturierung der Energieversorgung und den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft treffen dabei auf einen angespannten Wasserhaushalt – bieten aber auch enorme Potenziale und Chancen zur Optimierung der Wasserentnahmen und -nutzung in Brandenburg, insbesondere durch industrielle Nutzer wie z. B. der chemischen, Stahl- oder Glasindustrie. Dennoch sind lokale Wasserverfügbarkeiten sowie bestehende Wasserentnahmen und -nutzungen kritisch zu prüfen und auch neuzudenken. Dies umfasst die bestehenden wie auch die Ansiedlung von neuen „Wassernutzern“. Eine regionale Standortanalyse sollte insbesondere auch saisonale und extremwetterbedingte Schwankungen in der Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser einbeziehen.

Ausgehend von den Erzeugungspotenzialen für Wasserstoff im Jahr 2045 stellt Abbildung 7 die ermittelte Bandbreite der Wasserbedarfe für die Elektrolyse für die einzelnen brandenburgischen Landkreise und Städte dar. Grundsätzlich liegen diese deutlich unter den heutigen Mengen der öffentlichen und nicht-öffentlichen Wassergewinnung.

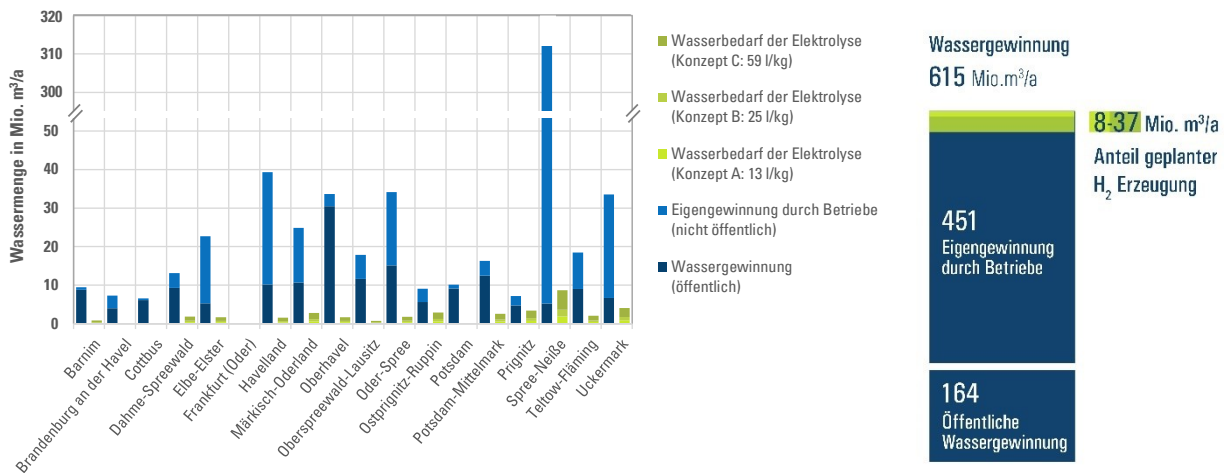


Abbildung 7: Vergleich der potenziell erforderlichen Wassermengen für die Elektrolyse mit der heutigen Wassergewinnung pro Landkreis, sowie Einordnung des Anteils geplanter H<sub>2</sub>-Erzeugung auf Landesebene.

Ein erster Ansatz für eine Regionalisierung der Diskussion erfolgt in der vorliegenden Studie durch die Konzeption dreier generischer Fallbeispiele, die Fragestellungen rund um unterschiedliche Projektkonfigurationen anreißen sollen.

- Dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung:** Die Diskussion der Fallbeispiele hat insbesondere große Chancen für dezentrale Elektrolyseanlagen (bis 10 MW<sub>el</sub>) und erneuerbare Energien sowie der direkten H<sub>2</sub>-Nutzung für die Kommunen und Regionen mit hohen Wind- und PV-Potenzialen aufgezeigt. Die regionale Umstellung auf grüne Wasserstoffnutzung in Bussen und Lkw, wie auch für weitere Anwendungen, ermöglicht es auch, die Wertschöpfung in der Region zu stärken und die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Die Energiewende kann vor allem auf regionaler Ebene und dezentral vorangetrieben werden. Es wird empfohlen, dass in Brandenburg gezielt Projekte, Anlagen, Akteure und Gemeinden bei dem Aufbau der dezentralen Anlagen ermutigt und unterstützt werden. Dies bietet vor allem auch die Chance für dezentral in Brandenburg verteilte Anlagen und damit auch relativ geringe lokale Wasserentnahmen und Kühlbedarfe.

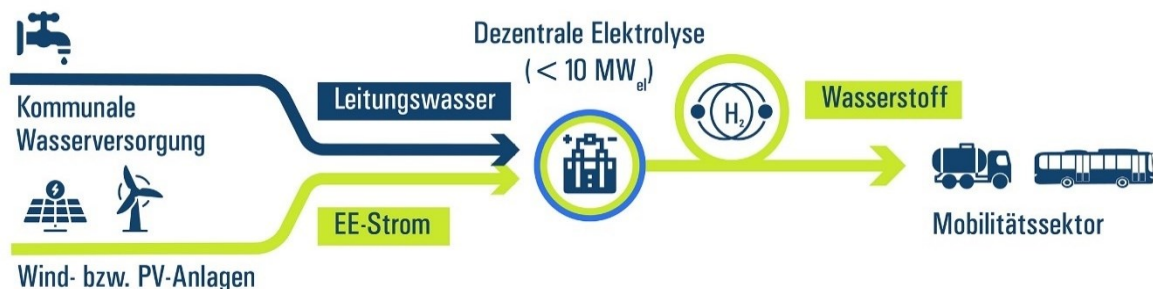


Abbildung 8: Konzept für die dezentrale H<sub>2</sub>-Elektrolyse (bis 10 MW<sub>el</sub>) mit Wind- und PV-Anlagen sowie der Nutzung von Leitungswasser.

- Urbane H<sub>2</sub>-Erzeugung:** Die Nutzung von Abwasser im urbanen Raum, v. a. rund um Berlin, stellt für Elektrolyseanlagen in der 100-MW<sub>el</sub>-Klasse eine interessante Perspektive dar, bei der auch die Abwärme und Sauerstoff in Kläranlagen genutzt werden sollten. Hierzu sollten in Zusammenarbeit der potenziellen Großabnehmer für Wasserstoff (z. B. Flottenbetreiber) mit den (kommunalen) Wasserver- und -entsorgungsunternehmen spezifische Pilotprojekte und Anlagenkonzepte entwickelt und eingeführt werden.

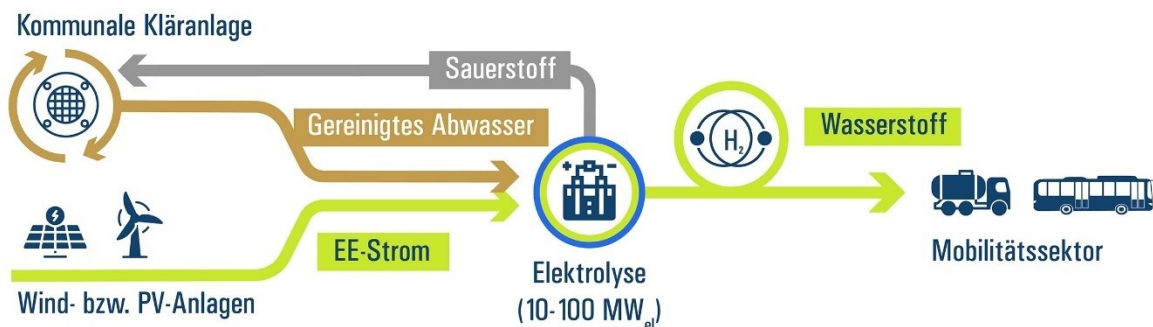


Abbildung 9: Konzept für urbane H<sub>2</sub>-Elektrolyseure mit Wind- und PV-Anlagen und der Nutzung von gereinigtem Abwasser.

- Industrielle H<sub>2</sub>-Erzeugung:** Für Industriestandorte in Brandenburg, wie z. B. am Standort der PCK Raffinerie Schwedt oder auch anderen Industrieclustern, die bereits heute oder auch perspektivisch über hohe eigene Wasserstoffbedarfe verfügen, sollten zeitnah die Machbarkeit für die heimische Erzeugung von Wasserstoff durch die Errichtung von Elektrolysekapazitäten (in der 1-GW<sub>el</sub>-Klasse) sowie der Einfluss auf den lokalen Wasserhaushalt untersucht werden.



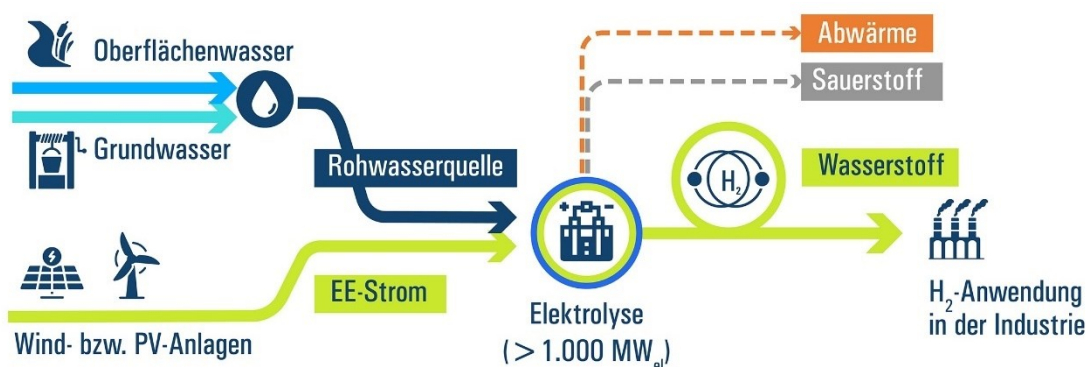


Abbildung 10: Konzept für industrielle H<sub>2</sub>-Elektrolyseure mit Wind- und PV-Anlagen sowie der Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser für industrielle H<sub>2</sub>-Anwendungen sowie der Abwärmenutzung.

Die Diskussion der Fallbeispiele hat gezeigt, dass v. a. auch die Erschließung neuer Rohwasserquellen wie etwa kommunale Abwasser eine große Chance für künftige Wasserstoffprojekte darstellt. Die erforderlichen zusätzlichen „Aufreinigungsaufwände“ und die damit einhergehenden zusätzlichen Kosten gilt es durch konkrete erste (Pilot-)Projekte zu prüfen und optimieren. Hier bietet sich auch der Ansatz für eine Zusammenarbeit zwischen öffentlicher und privater Hand an. Auch werden eine Überprüfung und (Neu-)Regelung des Wasserentnahmerechts bzw. der Kosten für Abwassereinleitung empfohlen, um gezielt Anreize zur Wiedernutzung und Aufbereitung der Abwasserströme zu schaffen. Striktere Vorgaben zur effizienten Wassernutzung sind (wo nötig), insbesondere in Bezug auf die Kühlungstechnik der Elektrolyseure, weiter einzuführen, um die Wassernutzung entsprechend den Verfügbarkeiten anzupassen. Es gilt hier weitere Einsparpotenziale für die effiziente Wassernutzung aus verschiedenen Rohwasserquellen in allen Sektoren konsequent zu erschließen und zu optimieren. Dazu können Pilotprojekte helfen, den ressourcensparenden Umgang aufzuzeigen und gesellschaftliche Akzeptanz für einen Hochlauf der heimischen Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse zu schaffen. Auch für die weitere Entwicklung von Projekten zur Wasserstoffherzeugung durch die Wasserelektrolyse ist die Umweltverträglichkeit der Wasserentnahme von Beginn an sicherzustellen.

Diese Studie hat aufgezeigt, dass die heimische Wasserstoffproduktion den „Wasserstress“ in Brandenburg nicht zwangsläufig erhöht, sondern sogar helfen kann, eine „Wasserwende“ einzuleiten. Dies gilt vor allem mit Blick auf die Transformation des „Lausitzer Kohlereviere“ sowie bestehender und zukünftiger Industriestandorte. Dennoch wird auch die Wasserentnahme bei Planung und Bau einer Elektrolyseanlage, insbesondere im Größenbereich über 100 MW<sub>el</sub>, ähnlich wie bei Gewerbe- und Industrieunternehmen in den einzelnen Regionen spezifisch zu prüfen sein. Die individuelle Prüfung vor Ort stellt damit eine wichtige Voraussetzung für eine weitere Beurteilung und Eignung von Standorten für die H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Elektrolyse dar, auch wenn diese Studie grundsätzlich belegt, dass Wasserstoff in einem integrierten Konzept im Vergleich zu heutigen Wasserverbräuchen einen geringeren „Fußabdruck“ aufweist.

## 1. EINLEITUNG

- ❖ Die Welt steht vor bedeutenden Veränderungen der Wasser- und Energiewirtschaft.
- ❖ Zunehmender Wasserstress – ein globales und regionales Thema – erfordert Handeln, auch Brandenburg ist betroffen.
- ❖ Megatrends verschärfen die Situation zunehmend (v. a. Klimawandel und Trockenwetterereignisse, fortschreitende Urbanisierung, landwirtschaftliche Aktivität, nicht nachhaltige Nutzungen von Wasser).
- ❖ Die ambitionierten Pläne zur Dekarbonisierung und dem Aufbau einer H<sub>2</sub>-Infrastruktur treffen auf einen (lokal) angespannten Wasserhaushalt, eröffnen jedoch auch den Rahmen für die Erhöhung und Schaffung der lokalen Wertschöpfung sowie die Ansiedlung von Zukunftstechnologien.
- ❖ Brandenburg verfügt über ein überdurchschnittliches Potenzial für erneuerbare Energien und Wasserstoff und kann einen entscheidenden Beitrag zur erfolgreichen Energiewende in Deutschland und Europa beitragen.

### 1.1. Wasser und Energie – globale und regionale Herausforderungen

Die Welt steht vor bedeutenden Veränderungen der Wasser- und Energiewirtschaft. Megatrends wie Bevölkerungswachstum, rasche Verstädterung, Klimawandel, Ausstieg aus fossilen Brennstoffen und ineffiziente Wassernutzung treiben diese Veränderungen an. Das Wachstum der Weltbevölkerung auf fast 9,7 Milliarden Menschen bis 2050 wird die Nachfrage nach Wasser und Energie in allen Sektoren weiter stark ansteigen lassen. Dazu gehören primär die Landwirtschaft, auf die vielerorts bereits heutzutage 70–80 % der Süßwasserentnahmen entfallen, aber auch die Industrie und Haushalte [UNESCO 2023].

Gleichzeitig erfordern die ambitionierten Klimaschutzziele auf internationaler und nationaler Ebene die Abkehr von der Nutzung fossiler Energieträger und damit eine grundlegende Transformation der heutigen Energieversorgung. Um dies zu erreichen, werden erneuerbare Stromproduktion aus Wind und PV sowie damit produzierter Wasserstoff wesentliche Säulen des künftigen Energiesystems sein.

Die globale Energiewende geht jedoch mit kaum betrachteten Auswirkungen auf Wasserressourcen einher. Dazu gehören z. B. der Anbau und die Verarbeitung von Pflanzen für Biokraftstoffe, für die oft erhebliche Wassermengen benötigt werden.

Wasserstoffproduktion, die in der Regel in der Nähe von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen angesiedelt ist, ist genauso abhängig von der Verfügbarkeit von ausreichend Wasser in guter Qualität. Deshalb sollten entlang der Wertschöpfungskette alle Wasserbedarfe berücksichtigt werden. Trotz der offensichtlichen Abhängigkeit und Auswirkungen von erneuerbaren Energien auf den lokalen Wasserhaushalt sind deren Ausmaß und Art derzeit vielerorts noch kaum erforscht.

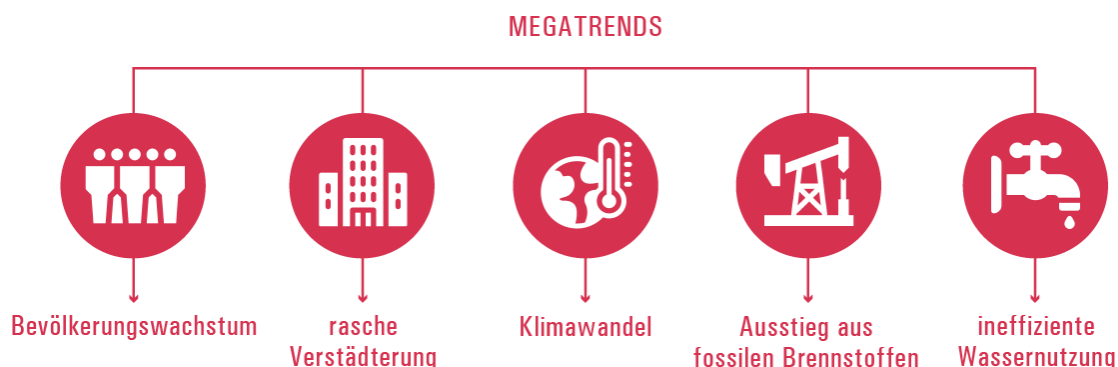


Abbildung 1-1: Megatrends – Herausforderungen für die weitere Entwicklung der Wasser- und Energiewirtschaft.

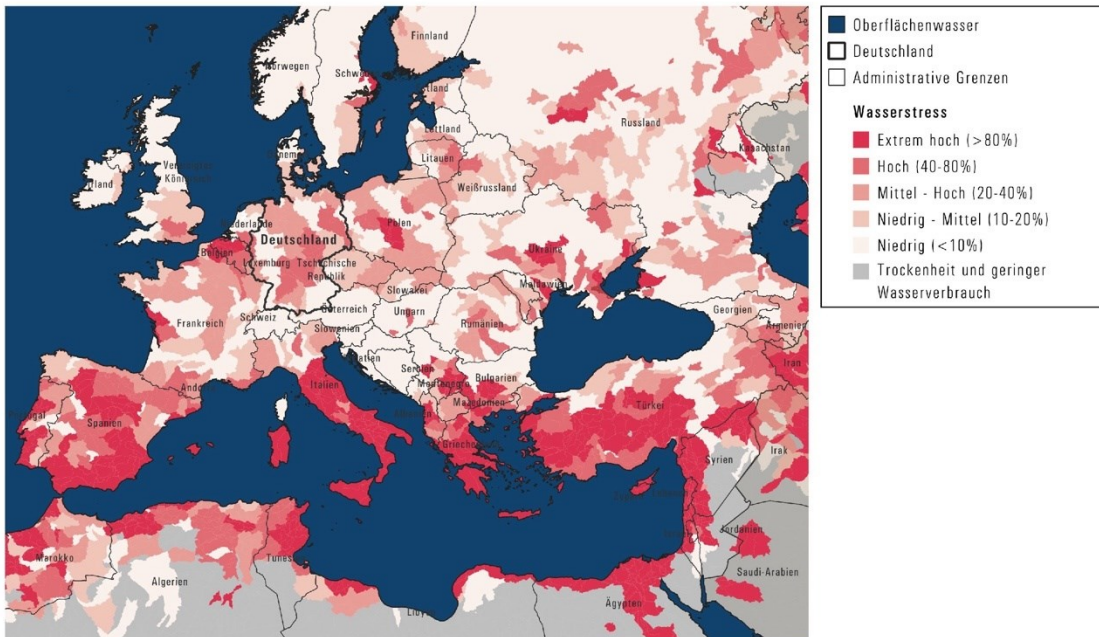
Das ist besorgniserregend, da die Welt mit einer sich verschärfenden Wasserkrise konfrontiert ist. Wir leben zwar auf dem sogenannten Blauen Planeten, aber weniger als 1 % des Wassers auf der Erde ist für den direkten menschlichen Gebrauch geeignet bzw. zugänglich [UNESCO 2023]. Bereits heute sind zwischen zwei und drei Milliarden Menschen mindestens einen Monat pro Jahr von Wasserknappheit betroffen [UNESCO 2023]. Bis 2050 wird diese Zahl voraussichtlich auf fünf bis sechs Milliarden ansteigen [WRI 2023a]. Diese Projektionen und die Ungleichheit in der Wasserverfügbarkeit unterstreichen die Dringlichkeit umfassenderer Studien, um Wasser-, Energie- und Ernährungssicherheit durch nachhaltige und gut informierte Wasser-, Energie- und Landwirtschaft zu gewährleisten.

### **Wasserstress**

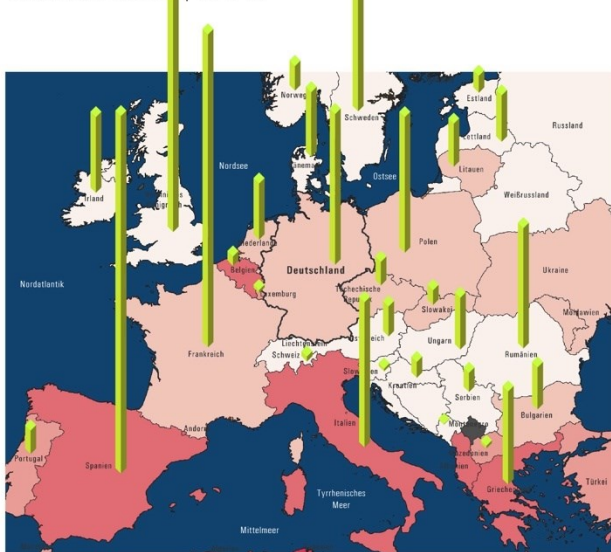
In Regionen mit Wasserknappheit kommt es oft als Erstes zu sogenanntem „Wasserstress“, d. h., die Nachfrage nach Wasser übersteigt die verfügbare Menge in einem bestimmten Zeitraum. Von Wasserstress wird dann gesprochen, wenn pro Einwohner und Jahr weniger als 1.000 m<sup>3</sup> Wasser zur Verfügung steht. Dies ist bereits heutzutage in vielen Regionen der Fall und trägt zunehmend zur Eskalation von Konflikten bei. Regionen mit hohem Wasserstress sind oft Brennpunkte (geo)politischer Spannungen, da Länder und Gemeinschaften um begrenzte Ressourcen konkurrieren. Wasserstress kann bestehende soziale und politische Spannungen verschärfen und zu Konflikten auf lokaler, nationaler und sogar internationaler Ebene führen [FAO 2018].



**WASSERSTRESS | HEUTE**

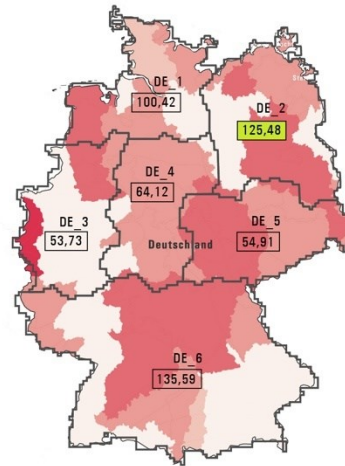


**WASSERSTRESS | HEUTE**



Technisches Gesamtpotenzial für erneuerbaren Strom aus Wasserkraft, Photovoltaik und Windkraft

**WASSERSTRESS 2030 UNTER BUSINESS AS USUAL & ENERGIEPOTENTIAL WIND & PHOTOVOLTAIK**



Gesamtpotenzial, TWh Photovoltaikenergiepotential (Freifläche) und Windenergiepotential

Regionenschnitt für die Potentiale Erneuerbarer Energien nach dem Energiesystemmodell EnerTILE. Wetterdatensatz: COSMO-REA6.

Abbildung 1-2: Weltkarte des Wasserstresses auf europäischer und deutscher Ebene auf Wassereinzugsgebiete bzw. nationaler Ebene aggregiert [WRI 2023a], Potential für erneuerbaren Strom auf Staatenebene [Kakoulaki et al. 2021], sowie Potential für erneuerbare Energie pro Energieregion in Deutschland nach T-45 Szenarien [Fraunhofer ISI 2021].

Das kann tiefgreifende wirtschaftliche und soziale Auswirkungen haben. In wirtschaftlicher Hinsicht kann Wasserknappheit die industrielle und landwirtschaftliche Produktivität behindern [WRI 2023b]. So schätzt die Weltbank, dass Wasserknappheit, die durch den Klimawandel noch verschärft wird, einige Regionen

bis 2050 bis zu 6 % ihres BIP kosten könnte [World Bank 2016]. Auf sozialer Ebene verschärft Wasserknappheit häufig die Ungleichheiten. Geringverdienende stehen in vielen Ländern vor großen Herausforderungen, wenn es um den Zugang zu sauberem Wasser und einer lebenswerten Umwelt geht. Wasserknappheit hat auch erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt und die biologische Vielfalt. In Ländern mit niedrigem und mittlerem Einkommen wirkt sich Wasserknappheit außerdem oft direkt auf die öffentliche Gesundheit aus, da sie zu einer unzureichenden Wasserversorgung und Abwasserentsorgung und einem erhöhten Auftreten von durch Wasser übertragenen Krankheiten beiträgt. Nach wie vor haben 27 % der Weltbevölkerung (2,2 Milliarden Menschen) keinen Zugang zu sicherem Trinkwasser, d. h. Wasser, das zu Hause verfügbar und sicher ist [JMP 2023]. In manchen Regionen, z. B. in Teilen Ostafrikas, steigt die Zahl derer ohne Wasser und Sanitärversorgung seit mehreren Jahren wieder an [WORLD BANK 2023].

### **Klimawandel und Wasser**

Der Klimawandel wird die globale Wasserknappheit und den Wasserstress verschärfen. Ein veränderter Wasserkreislauf hat bereits heutzutage direkte Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Oberflächen- und Grundwasser. Weiter steigende Temperaturen, erhöhte Verdunstungsraten, veränderte Niederschlagsmuster und ein Rückgang der Schneedecke und der Gletscher, die für viele Regionen wichtige Süßwasserquellen sind, werden Volkswirtschaften weltweit vor große Herausforderungen stellen. Der Klimawandel wird in vielen Gebieten auch zu häufigeren und schwereren Dürreperioden führen, während andere mit mehr Überschwemmungen konfrontiert sein werden. Dürren sowie Hochwasser wirken sich negativ auf die Wasserqualität und die Verfügbarkeit von Wasser aus. Der IPCC-Sonderbericht zur globalen Erwärmung um 1,5 °C warnt, dass sich diese Auswirkungen verstärken werden, wenn die globale Erwärmung 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau liegt [IPCC 2018]. Die Situation erfordert eine globale Reaktion, die sich sowohl auf die Abschwächung als auch auf die Anpassung an diese veränderten Muster konzentriert, um die Wasser-, Energie- und Ernährungssicherheit zu gewährleisten.

### **Globale Bemühungen zu nachhaltiger Wasserbewirtschaftung**

Eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung ist von entscheidender Bedeutung für die Bewältigung der globalen Wasserkrise. Viele Ansätze konzentrieren sich darauf die Effizienz von Bewässerungssystemen zu verbessern („*more crop per drop*“), Wasser in der Industrie und zu Hause einzusparen und Kreislaufwirtschaft als Status quo zu etablieren. Erfolgsgeschichten aus verschiedenen Teilen der Welt, wie Singapurs integriertes Wassermanagementsystem und Israels fortschrittliche Wasserrecycling- und Entsalzungstechnologien, sind vielversprechend, bilden sie doch die Grundlage einer florierenden Landwirtschaft und Industrie in vergleichsweise wasserarmen bzw. extrem dicht besiedelten Standorten. Die Anwendung solcher Ansätze andernorts bleibt allerdings schwierig. Neben anderen sozioökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen fehlen oftmals Grundlagenstudien, um die Auswirkungen landwirtschaftlicher und industrieller Praktiken auf den lokalen Wasserhaushalt zu verstehen, was nicht nur die Umsetzung wirksamer Anpassungsstrategien zur Abschwächung der Wasserknappheit, sondern auch eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung einer gesamten Region behindern kann. Zusätzlich zahlen sich Investitionen in Kreislaufsysteme oder die Subventionierung nachhaltiger Landwirtschaft, wie sie z. B. in München oder New York seit mehr als 30 Jahren betrieben wird, oftmals erst nach Jahrzehnten aus.

## Herausforderungen und Chancen für Brandenburg

Die Wasserkrise ist eine vielschichtige Herausforderung. Das Verständnis des globalen Kontextes von Wasserknappheit, -stress und -bewirtschaftung bildet die Grundlage für eine tiefergehende Betrachtung dieser Themen auf lokaler Ebene. Wenngleich global relevant, so sind die Auswirkungen von zu wenig sauberem Süßwasser, im Gegensatz zu Treibhausgasemissionen, zumeist direkt vor Ort zu spüren. Anders als Energie, muss Wasser lokal betrachtet und bewirtschaftet werden. Brandenburg, einer der notorisch wasserarmen Regionen in Deutschland, kommt dabei eine Vorreiterrolle bei der Gestaltung von Strategien zur Bewirtschaftung einer zunehmend knapperen Ressource zu.

In Brandenburg ist die Wasserthematik im Rahmen einer regionalen Wasserstoffwirtschaft zusätzlich eng mit der nationalen Energiewende und dem regionalen Strukturwandel verflochten. Mit der im Jahr 2021 beschlossenen Wasserstoffstrategie (H2BB) hat auch die Regierung des Landes Brandenburg wesentliche Rahmenbedingungen für den Markthochlauf der Wasserstofftechnologie vorgelegt.

Konsequenterweise wurde im Rahmen der H2BB mit der Maßnahme 46 die Wasserthematik als wichtiges Handlungsfeld im Zusammenhang mit der Wasserstoffproduktion explizit formuliert. Die Maßnahme sieht vor, dass die „Wasserverfügbarkeit sowie die regionenspezifischen Klimarisiken mit in die Planung von heimischen Erzeugungskapazitäten ein[zu]beziehen [sind]“ [MWAE 2021]. Nach der Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 im Auftrag des Umweltbundesamtes ist Brandenburg als einziges Bundesland in Deutschland vollständig entweder dem Klimaraumtyp „trockenste“ oder „wärmste Region“ zugeordnet [UBA 2021]. Entsprechende Risiken durch Trockenheit, Niedrigwasser und Hitze, aber auch weitere Temperaturanstiege und Starkregenereignisse müssen daher frühzeitig in die Bewertung und Planung neuer Technologien einbezogen werden.

Mit der Entwicklung neuer Industrien und zusätzlichem Bevölkerungswachstum, insb. im Ballungsraum Berlin, wird der Wasserbedarf in Brandenburg voraussichtlich steigen. Wie in der folgenden Grafik dargestellt, weisen bereits heute die einzelnen Regionen in Brandenburg deutliche Unterschiede bezüglich der Einwohnerdichte in Einwohner je Fläche in m<sup>2</sup> sowie der Nachfrage nach Wasser auf. Während Städte in urbanen Gebieten aufgrund der hohen Einwohnerdichte eine hohe Wassernachfrage aufweisen und somit einer höheren Kritikalität der Wasserversorgung gegenüberstehen, befinden sich Gemeinden und Siedlungen in den sogenannten Flächenregionen mit geringer Besiedlung in einer grundsätzlich besseren Ausgangssituation hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit. Jedoch ist jeweils die tatsächliche Nutzung und Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser in jeder Region individuell zu prüfen.

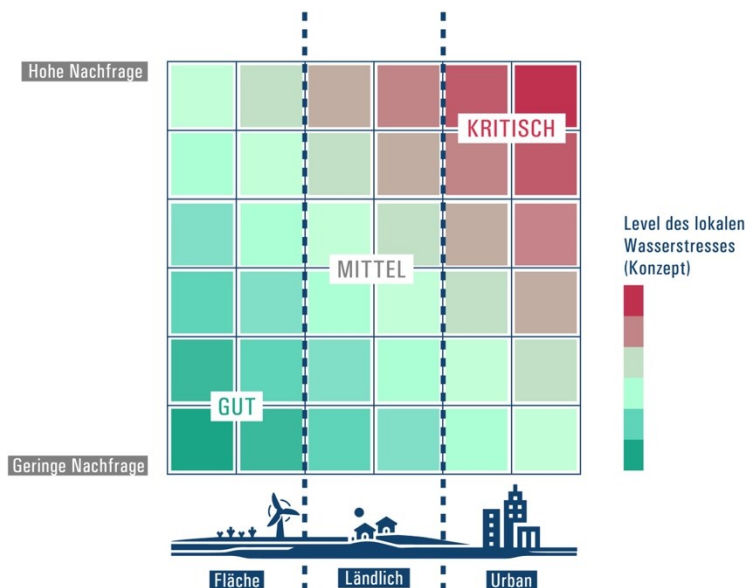


Abbildung 1-3: Veranschaulichung der grundsätzlichen Kritikalität der Wasserversorgung in Abhängigkeit von der Wassernachfrage und der Besiedlungsdichte (Fläche, ländlich, urban).

Vor diesem Hintergrund bietet die vorliegende Studie eine umfassende Analyse der Auswirkungen des absehbaren Hochlaufs der Wasserstoffherstellung auf den brandenburgischen Wasserhaushalt. Dabei sind neben dem Einsatz von Reinstwasser als Rohstoff der Wasserstoffproduktion auch die Wasserbedarfe hinsichtlich Rohwasser und Kühlwasser sowie Abwasserströme sämtlicher Aufbereitungsschritte und Produktionsschritte berücksichtigt. Herausforderungen beim Aufbau großer Wasserstoffproduktionskapazitäten (insb. mittels Elektrolyse) werden aufgezeigt und transparent für die Fachwelt und Öffentlichkeit bereitgestellt.

## 1.2. Studienrahmen, Methodik und Vorgehen

Diese Studie adressiert die zentrale Fragestellung möglicher Auswirkungen einer zukünftigen Wasserstoffproduktion auf den regionalen Wasserhaushalt in Brandenburg. Dazu erfolgen eine Betrachtung der relevanten Aspekte der Wasserstoffproduktion (in Kapitel 2) sowie eine grundlegende Einschätzung des Wasserhaushalts in Brandenburg (in Kapitel 3). Basierend auf den verfügbaren Datengrundlagen, Annahmen und Ergebnissen erfolgt eine Diskussion anhand von ausgewählten Fallbeispielen für die mögliche Wasserstofferzeugung und -nutzung in Brandenburg (in Kapitel 4) sowie eine zusammenfassende Einordnung (in Kapitel 5).

Für die Wasserstofferzeugung wurde die Technologie der Elektrolyse zugrunde gelegt, die grünen Wasserstoff (H<sub>2</sub>) aus Wasser (H<sub>2</sub>O) mit erneuerbarem Strom, z. B. aus Wind und PV-Anlagen, erzeugt.

Grundlage für die Abschätzung der Wasserstofferzeugung in Brandenburg stellt die „*Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg*“ der Fraunhofer-Institute IEG und ISI in Zusammenarbeit mit dem Reiner Lemoine Institut (RLI) und INFRACON im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE) dar [Fhg IEG et al. 2023].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine eigenen H<sub>2</sub>-Potenzialabschätzungen vorgenommen bzw. H<sub>2</sub>-Szenarien bis 2045 entwickelt. Auch umfasst der Studienrahmen keine Betrachtung der erneuerbaren Energiepotenziale oder der Bereitstellung von erneuerbarem Strom für die Elektrolyse. Ziel der Studie ist eine Abschätzung, Einordnung und Diskussion einer potenziellen Wasserstoffproduktion in Brandenburg anhand von Elektrolyseanlagen, wie sie u.a. in der Machbarkeitsstudie des MWAE abgeschätzt wurde, und deren Auswirkung auf den regionalen Wasserhaushalt. Für den spezifischen Wasserbedarf der Elektrolyseanlagen wurden für die einzelnen Technologien (PEMEL, AEL, HTEL, AEMEL) verfügbare Angaben und Daten von Herstellern und aus der Literatur ausgewertet und mithilfe einzelner Experteninterviews validiert.

Für die Beschreibung des Wasserhaushalts in Brandenburg wurden verfügbare Informationen und Daten ausgewertet und bewertet. Es wurden keine eigenen hydrologischen Untersuchungen und Auswertungen vorgenommen.

Eine erste Einschätzung des Wasserbedarfs durch die Elektrolyse erfolgte auf Ebene des Bundeslandes sowie der Landkreise und Städte. Diese ermöglicht eine grobe Einordnung der Größenverhältnisse auf Basis von gemittelten Datensätzen, erlaubt jedoch keine spezifischen Rückschlüsse auf einzelne Anlagen und regionale Standorte bezüglich der lokalen Wasserverhältnisse bzw. deren Eignung.

In der folgenden Abbildung wird das grundsätzliche Vorgehen und der Studienrahmen vereinfacht dargestellt.



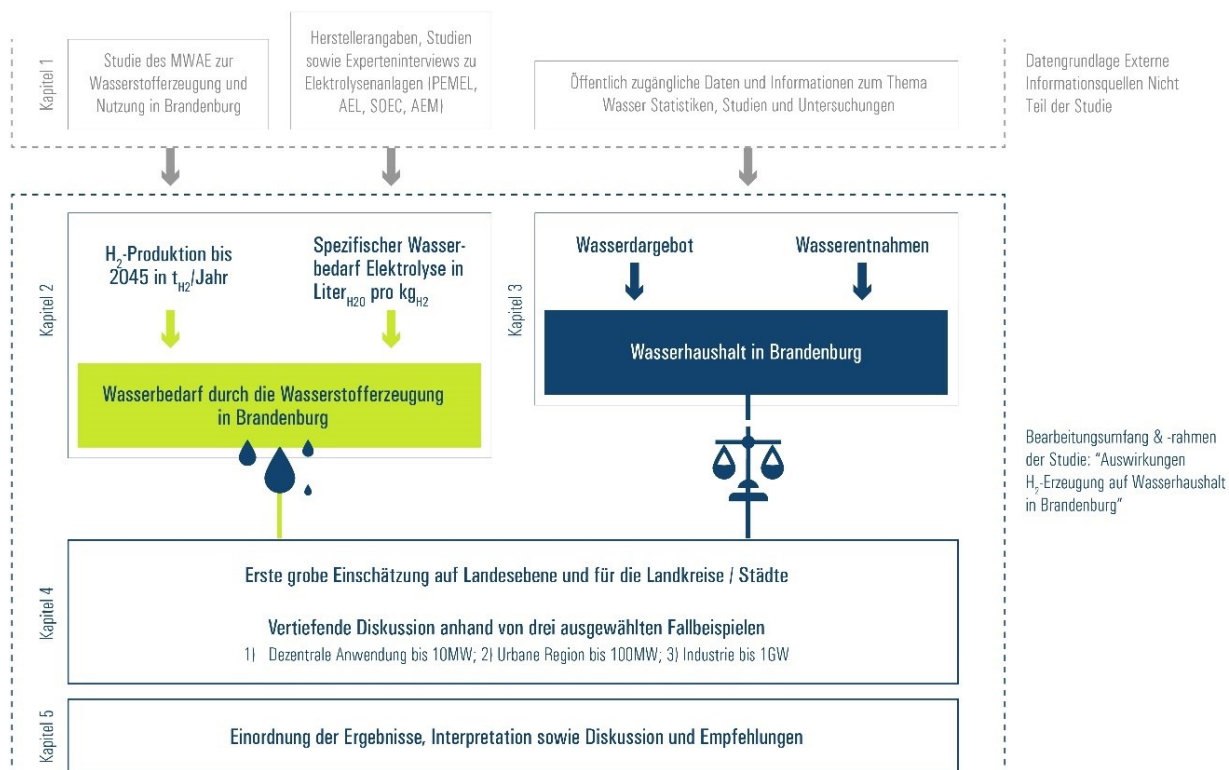


Abbildung 1-4: Studienrahmen und Vorgehen.

**Im Rahmen der Arbeiten fanden Interviews und Gespräche mit folgenden Akteuren statt (in alphabetischer Reihenfolge):** ABO Kraft & Wärme AG, Asian Development Bank (ADB), Berliner Wasserbetriebe (BWB), Graforce GmbH, Herco Wassertechnik GmbH, LEAG, PCK Raffinerie GmbH, Sunfire, TÜV Süd und International Bank for Reconstruction and Development – (World Bank).

**Überdies wurden ausgewählte Ergebnisse mit wissenschaftlichen Vertretern diskutiert,** darunter Prof. Dr. Irina Engelhard (TU Berlin), Prof. Dr. Traugott Scheytt (TU Bergakademie Freiberg), Prof. Dr. Mario Schirmer (EAWAG) und Dr. Kevin Grecksch (University of Oxford).

### 1.3. Begriffsdefinitionen und -abgrenzungen

- **Abschlämmwasser (Blowdown water):** Wasser, das absichtlich aus Reinigungsstufen interner Prozesskreisläufe oder Kühlsystemen abgeleitet wird, um Mineralienablagerungen zu vermeiden.
- **Auslastung (utilization):** Der Grad, in dem Kapazitäten, Ressourcen oder Anlagen genutzt werden, oft im Kontext von maximal möglicher oder effizienter Nutzung.
- **Fußabdruck (footprint):** Ein Maß für den Gesamtverbrauch oder die Auswirkungen einer Person, Organisation oder eines Produkts auf natürliche Ressourcen, oft spezifiziert als „Wasserfußabdruck“, „Kohlenstofffußabdruck“ etc., um spezifische Umweltauswirkungen zu quantifizieren.
- **Grundwasser (groundwater):** Wasser, das sich unterhalb der Erdoberfläche in der Sättigungszone des Bodens und Gesteins in sog. Grundwasserleitern ansammelt.
- **Grundwasserleiter (aquifer):** Die Bodenschichten bzw. Gesteinskörper, in denen sich Grundwasser befindet, werden als Grundwasserleiter bezeichnet (aus dem Lateinischen auch: Aquifer, „wassertragend“ bzw. „Wasserträger“). Dies schließt, je nach Definition, neben der gesättigten Zone auch den Kapillarsaum über dem Grundwasserleiter mit ein.
- **Oberflächenwasser (surface water):** Alle Arten von Wasser, die sich auf der Erdoberfläche befinden, wie Flüsse, Seen, Feuchtgebiete und Meere.
- **Reinstwasser (ultra pure water):** Im Rahmen dieser Studie wird hierunter hochgradig aufgereinigtes Wasser verstanden, das als Einsatzstoff (Prozesswasser) der Elektrolyse zugeführt werden kann. Ein wichtiger Parameter ist dabei die Leitfähigkeit des Wassers. Je nach Anwendungsfall finden sich in der Literatur auch andere Begriffe wie deionisiertes Wasser, demineralisiertes Wasser oder vollentsalztes Wasser, die nur zum Teil festen Qualitätsstufen zugeordnet sind und im Folgenden auch unter den Begriff Reinstwasser fallen sollen.
- **Rohwasser (raw water):** Unbehandeltes Wasser aus Flüssen, Seen, Grundwasser, Kläranlagen, oder sonstigen Industrieprozessen.
- **Trinkwasser (drinking water):** Natürlich vorkommendes oder aufbereitetes Wasser, das sicher für den menschlichen Verzehr ist und über das Leitungsnetz in Haushalte und Einrichtungen geliefert wird. Auch als Leitungswasser bezeichnet.
- **Vorbehandeltes Wasser (purified water):** Durch Vorbehandlung aufbereitetes Rohwasser, das über eine ausreichende Qualität verfügt, um als Input für die Wasserreinigung der Elektrolyse zur Erzeugung von Reinstwasser oder für die Dampferzeugung eingesetzt zu werden.
- **Wasseraufkommen (water volume / discharge):** Das Wasseraufkommen umfasst die eigene Gewinnung und den Fremdbezug von Wasser einer Region / eines Verbrauchers (umfasst genutztes und ungenutzt wiederingeleitetes oder verlorenes Wasser).
- **Wasserbedarf (water demand):** Menge benötigten Wassers, das einem bestimmten Prozess, einer Anlage oder einem Abnehmer zur Verfügung gestellt werden muss. Der Bedarf ist nicht dem Verbrauch gleichzusetzen, da teilweise Wasser auch wiederverwendet oder zurückgeführt werden kann.



- **Wasserdargebot (water resources):** Die Menge an Wasser, die in einer Region oder einem System natürlich verfügbar ist, einschließlich Oberflächen- und Grundwasserressourcen.
- **Wasserentnahme (water abstraction) (= Wassergewinnung):** Der Prozess des Entnehmens oder Herausziehens von Wasser aus einer natürlichen Quelle oder einem Reservoir für verschiedene Zwecke, wie Landwirtschaft, Industrie oder Haushalte.
- **Wasserknappheit (water scarcity):** Wasserknappheit bezeichnet eine Situation, in der die verfügbare Wasserversorgung nicht ausreicht, um den Bedarf der Bevölkerung, der Landwirtschaft und der Industrien einer Region zu decken, was häufig zu Dürre, Stress für natürliche Ökosysteme und Konflikten über die Wassernutzung führt. Wenn das jährliche erneuerbare Wasserdargebot unter 1.000 m<sup>3</sup> pro Person fällt, ist die Bevölkerung von Wasserknappheit bedroht, unter 500 m<sup>3</sup> von „absoluter Knappheit“.
- **Wassernutzung (water use):** Sammelbegriff für in der Statistik abgebildete Werte der öffentlichen Wasserabgabe an Letztverbraucher sowie der in den Betrieben eingesetzten Frischwassermenge (nicht-öffentlich) und der durch Betriebe ungenutzt wiedereingeleiteten oder an Dritte abgegebenen Wassermenge (nicht-öffentlich). Um Doppelzählung zu vermeiden wird, je nach Anwendungsfall, der Netzbezug der Unternehmen aus der öffentlichen Wasserversorgung oder von Dritten herausgerechnet.
- **Wasserstress (water stress):** Wasserstress misst das Verhältnis des gesamten Wasserbedarfs zu den verfügbaren erneuerbaren Oberflächen- und Grundwasservorräten. Der Wasserbedarf umfasst die Nutzung in Haushalten, in der Industrie, bei der Bewässerung und in der Viehzucht.
- **Wasserverbrauch (water consumption):** Der Wasserverbrauch beschreibt jenen Anteil, der aufgrund von Verdunstung oder Umwandlung nicht wieder der ursprünglichen Quelle zugeführt wird [WIR 2013].
- **Wasserverfügbarkeit (water availability):** Teilmenge des Wasserdargebots, die für den Gebrauch zugänglich und nutzbar ist, unter Berücksichtigung von qualitativen und quantitativen Aspekten.
- **(Wasser-)Einzugsgebiet (WEG):** Ein Wassereinzugsgebiet beschreibt hier das oberirdische Einzugsgebiet (Niederschlagsgebiet) eines Flusses oder Flussabschnittes. Das Gebiet wird durch topografische Verhältnisse bestimmt, die Grenzen durch den Verlauf von Wasserscheiden (z. B. Gebirgskämme), aber auch durch nichtnatürliche Gegebenheiten wie Straßen und Dämme. Die Wassereinzugsgebiete sind in den Tabellen durch dreistellige Zahlen gekennzeichnet, wobei die erste Stelle das Stromgebiet bezeichnet.
- **Zusatzwasser (Makeup water):** Das Wasser, das einem internen Prozesskreislauf oder Kühlsystem (wieder-)zugeführt wird, um das durch den Prozess, Ableitung oder Verdunstung verlorene Wasser aufzufüllen.

## 2. WASSERBEDARF DER WASSERSTOFFHERSTELLUNG MITTELS ELEKTROLYSE IN BRANDENBURG

- ❖ Der tatsächliche Wasserbedarf einer Elektrolyseanlage ist abhängig von einer Vielzahl an Einflussfaktoren, darunter etwa die Wahl der Elektrolysetechnologie, inklusive der Anforderungen an die Wasserreinheit, der zur Verfügung stehenden Rohwasserquelle und -qualität, der Systemauslegung und Konzepte zur Wasseraufbereitung sowie der Kühlbedarfe und -konzepte.
- ❖ Angenommene beispielhafte spezifische (Roh-)Wasserbedarfe reichen von 13 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (für optimierte Anlagenkonzepte) über 25 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (für typische Anlagen) bis zu 59 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (für Elektrolyseure mit hohen Wasserbedarfen für die Nasskühlung/Verdunstungskühlung).
- ❖ Der Reinstwasserbedarf beträgt etwa 10 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, der Rest wird als Konzentrat oder Verdunstungsverluste wieder an die Umgebung abgegeben.
- ❖ Künftige Projekte sollten gezielt den Wasserbedarf der Elektrolyse optimieren, um v. a. auch (kommunales) Abwasser als Quelle zu erschließen.

### 2.1. Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der Ziele des Landes Brandenburg für die künftige großflächige Produktion und Nutzung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien ist ein grundlegendes Verständnis der Größenordnung sowie der Einflussfaktoren auf den damit einhergehenden Wasserbedarf ein wesentliches Element. Der in der Wasserstoffstrategie beschriebene sektorübergreifende Einsatz von Wasserstoff bildet einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung der Energiestrategie und des Klimaschutzplans bis zum Jahr 2045. Basierend auf den Analysen im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für ein Wasserstoffstartnetz in Brandenburg in [Fhg IEG et al. 2023] belaufen sich die heimischen Produktionspotenziale auf bis zu 20,7 TWh bzw. > 600.000 Tonnen im Jahr 2045. Für die Bereitstellung dieser Mengen sind, je nach Annahmen zu Betriebsdauer und Wirkungsgrad, ca. 7,5– 10 GW<sub>el</sub> installierte Elektrolyseleistung erforderlich. Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, durch eine Übersicht zu den technischen Grundlagen der Elektrolyse hinsichtlich ihres Wasserbedarfs und -verbrauchs eine Abschätzung der daraus resultierenden Wassermengen abzuleiten.

In der Literatur findet sich eine große Bandbreite des tatsächlichen Wasserbedarfs der Elektrolyse. Diese umfasst Werte zwischen 12 und 120 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, abhängig jeweils von den angenommenen projektspezifischen Rahmenbedingungen. Um diese Zahlen einzuordnen, ist ein detaillierter Blick auf die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Wasserbedarf der Elektrolyse unabdingbar. Dabei können insbesondere folgende vier Faktoren identifiziert werden:

- Wahl der Elektrolysetechnologie (insb. Niedertemperatur- vs. Hochtemperaturelektrolyse),
- genutzte Rohwasserquelle und -qualität sowie die Anforderungen an die Reinstwasserqualität,

- die damit verbundene Auslegung der Wasseraufbereitung, inkl. interner Wasserkreisläufe zur Erhöhung der Ausbeute und
- angewandtes Kühlkonzept und Kühlbedarfe für den Elektrolyseur und weiterer Nebenaggregate.

Basierend auf den Angaben diverser Elektrolysehersteller sowie Gespräche mit ausgewählten Experten wurden Bandbreiten für die auftretenden Wasserströme sowie die Anforderungen an die Wasserqualität ermittelt. Der Reinstwasserbedarf liegt mit 9– 11 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (= 0,8– 1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>) im Allgemeinen nur leicht über dem aus der Reaktionsgleichung ermittelten stöchiometrischen Wassereinsatz der Reaktion von 8,97 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> und umfasst neben diesem in der Regel auch das Zusatzwasser für den internen Prozesskreislauf.

Je nach Elektrolysetechnologie ist jedoch eine unterschiedlich starke Aufreinigung des Rohwasser durch verschiedene Vorbehandlungs- und Reinigungsschritte erforderlich. Die hohen Qualitätsanforderungen der Elektrolyse basieren auf potenziellen Degradationseffekten und damit negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer der Stacks durch diverse (gelöste und feste) Stoffe im Wasser, sodass sich mitunter negative Auswirkungen auf die Investitions- und Betriebskosten der Anlage zeigen können. Im Allgemeinen kann bei den heute verfügbaren Produkten folgende Reihenfolge bei der Qualität abgeleitet werden: PEMEL > HTEL > AEL > AEMEL. Als wichtiges Maß für die Reinheit des Wassers dienen die Leitfähigkeit sowie weitere Grenzwerte für wesentliche Substanzen (etwa gesamtorganischer Kohlenstoffgehalt (TOC) oder -Ionen gelöster Salze und Metalle). Aufgrund heute fehlender standardisierter Qualitätsanforderungen im Elektrolysebereich wird teilweise auf existierende Standards aus anderen Bereichen verwiesen, wie etwa den ASTM Standard I und II aus dem Laborbereich.

Die Wasseraufbereitung durch Technologien wie Ionenaustauscher, Umkehrosmose, Elektrodeionisation und Mischbettvollentsalzer ist folglich ein wesentliches Element der Wasserbereitstellung für die Elektrolyse sowie potenzieller Kühlwasserkreisläufe. Die Nutzung unterschiedlicher Rohwasserquellen (darunter Trinkwasser, Grundwasser, Oberflächenwasser und Niederschlagswasser sowie Meerwasser oder potenziell auch aufgereinigtes Abwasser) stellt durch potenzielle Verunreinigungen und Salzgehalte jeweils individuell zusätzliche Anforderungen an die Aufbereitung. Während die technische Umsetzung seit vielen Jahren (insb. auch im Kraftwerksbereich) erprobt ist, so werden die Menge des aufzureinigenden Wassers und damit die Anlagenauslegung durch eine Skalierung der Elektrolyse in den Gigawatt-Bereich deutlich zunehmen. Aufgrund der anfallenden Konzentratströme sowie zusätzlicher Platz- und Energiebedarfe sind effiziente Konzepte der Wasseraufbereitung umzusetzen, auch vor dem Hintergrund der einzusetzenden Wassermengen. Durch die Aufreinigung ergibt sich eine erforderliche Rohwassermenge in den Herstellerangaben (bezogen auf Trinkwasserqualität) von etwa 13– 33 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>.

Weitere Wasserbedarfe ergeben sich aus dem angewandten Kühlkonzept der Elektrolyse. Durch die Umwandlungsverluste von elektrischer Energie in Wasserstoff ergeben sich Kühlbedarfe für den internen Prozesskreislauf sowie weiterer Anlagenkomponenten von etwa 15– 20 %. Diese steigen im Laufe der Lebensdauer des Elektrolyseurs durch Effizienzverluste auf etwa 25– 30 % an. Insbesondere bei den Niedertemperatur-Elektrolysetechnologien (AEL, PEMEL und AEMEL) sind hier aktive Kühlkonzepte erforderlich – potenziell mit Nutzung der entstehenden Abwärme für andere Abnehmer. Als Kühltechnologien stehen für die Elektrolyse insbesondere Trocken- bzw. Luftkühlung (zum Teil ergänzt durch adiabatische Kühlung) sowie Verdunstungskühlung mit hybriden oder offenen Kühlkreisläufen zur Auswahl – jeweils verbunden mit individuellen Vor- und Nachteilen. Während geschlossene Kühlkreisläufe den Wasserbedarf nicht wesentlich beeinflussen, kann Verdunstungskühlung aufgrund erforderlicher

Zusatzwassermengen für den Kühlkreislauf zum Ausgleich des verdunsteten Wassers sowie potenzieller Mengen an Abschlämmwasser eine deutliche Erhöhung des Wasserbedarfs auf über 50 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> hervorrufen.

Im Rahmen dreier ausgewählter Anlagenkonzepte mit unterschiedlicher Kombination der genannten Einflussfaktoren kann eine Bandbreite des Rohwasserbedarfs abgeleitet werden. Betrachtet wurde ein Konzept mit Trockenkühlung sowie mit bzw. ohne hinsichtlich des Wasserbedarfs optimierte Wasseraufbereitung. Hierbei ergaben sich Trinkwasserbedarfe von 13 bzw. 25 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Außerdem wurde ein Anlagenkonzept mit Verdunstungskühlung und einem Trinkwasserbedarf von 59 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> aus der Literatur identifiziert. Auf Basis dieser Werte wurde abschließend auch der Rohwasserbedarf für eine potenzielle Wasserstoffproduktion von etwa 20,7 TWh in Brandenburg abgeleitet. Folglich läge der Trinkwasserbedarf bei etwa 8 bis 37 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr. Durch zusätzliche Vorbehandlungsschritte im Zuge der Wasseraufbereitung bei Grund- oder Oberflächenwasser sind weitere Mehrbedarfe von etwa 15 % zu berücksichtigen.

Die gezeigten Ergebnisse erlauben neben einem grundlegenden Verständnis auch die Identifizierung der wesentlichen Hebel, um die spezifischen Wasserbedarfe von Elektrolyseprojekten insbesondere in trockenen Regionen zu reduzieren. Neben einer optimierten Wasseraufbereitung zählt sicherlich die Auslegung der Kühlsysteme ohne offene Kühlkreisläufe zu den entscheidenden Faktoren.

## 2.2. Wasserstoffproduktion in Brandenburg

Im Februar 2023 wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE) eine Studie zum Auf- und Ausbau eines Wasserstoff-Transportnetzes in Brandenburg vorgestellt. Mit dieser „*Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg*“ wurden erste Grundlagen für die Auslegung eines H<sub>2</sub>-Grundversorgungsnetzes für das Land Brandenburg geschaffen [Fhg IEG et al. 2023], basierend auch auf den überregionalen Plänen für ein Wasserstoff-Kernnetz auf deutscher Ebene bzw. dem European Hydrogen Backbone auf europäischer Ebene [BMWK 2024, EHB 2023]. Die genannte Studie dient in der weiteren Betrachtung als Datenbasis für die Abschätzung der möglichen H<sub>2</sub>-Bedarfe und -Erzeugungspotenziale in Brandenburg. Hieraus sollen anschließend unter Zuhilfenahme spezifischer Wasserbedarfe der Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse in den nachfolgenden Kapiteln die daraus resultierenden Wasserbedarfe abgeleitet werden. Für eine Einschätzung und Diskussion der kurzfristigen Entwicklungen werden überdies weitere Ankündigungen für regionale Wasserstoffprojekte sowie verfügbare regionale Machbarkeitsstudien hinzugezogen.

### **Wasserstoffstartnetz-Studie Brandenburg**

Wesentliches Ziel der Studie [Fhg IEG et al. 2023] war dabei die Betrachtung bzw. Entwicklung eines technisch realisierbaren Wasserstoffstartnetzes für Brandenburg. Dazu erfolgte auf Basis einer Modellierung und Hochrechnung auch eine Potenzialabschätzung zur Wasserstoffnutzung und -erzeugung in Brandenburg und Berlin. In Abbildung 2-1 sind die in der Studie ermittelten Potenziale für eine Wasserstoffbereitstellung und -nutzung in diesem Zusammenhang dargestellt:

- Bis 2045 wurden heimische Erzeugungspotenziale von bis zu > 20 TWh an H<sub>2</sub>-Erzeugung aus erneuerbaren Energien identifiziert.

- Im Jahr 2030 könnten bilanziell ca. 20 % der ermittelten H<sub>2</sub>-Bedarfspotenziale und bis 2040 bzw. 2045 ca. 30 % durch heimische Produktion gedeckt werden.
- Die Industrie stellt mit etwa 40 % neben Exportmengen die größten Einsatzpotenziale für Wasserstoff in Brandenburg dar. Beides unterstreicht die große wirtschaftliche Bedeutung von Wasserstoff für den Wirtschaftsstandort Brandenburg.
- Brandenburg würde große Mengen an Wasserstoff importieren und exportieren, d. h. einen Teil des Eigenverbrauchs über das H<sub>2</sub>-Transportnetz beziehen, aber auch große Mengen an H<sub>2</sub> durch- bzw. weiterleiten.

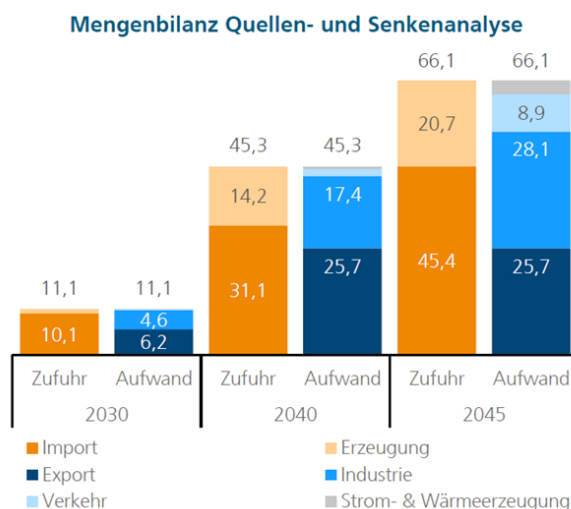


Abbildung 2-1: H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie: Potenziale für Wasserstoffbereitstellung und -verwendung (in TWh).  
Quelle: [Fhg IEG et al. 2023]

Wesentliche Bedarfspotenziale wurden für die Industrie ermittelt, gefolgt von dem Verkehrssektor. Abbildung 2-2 zeigt die H<sub>2</sub>-Bedarfspotenziale bis 2045. Neben der Kraftstoffproduktion (PCK Raffinerie in Schwedt) haben v. a. Zement- (CEMEX in Rüdersdorf) und Stahlwerke (zwei Elektrostahlwerke in Brandenburg an der Havel und in Eisenhüttenstadt) potenziell große H<sub>2</sub>-Bedarfe.

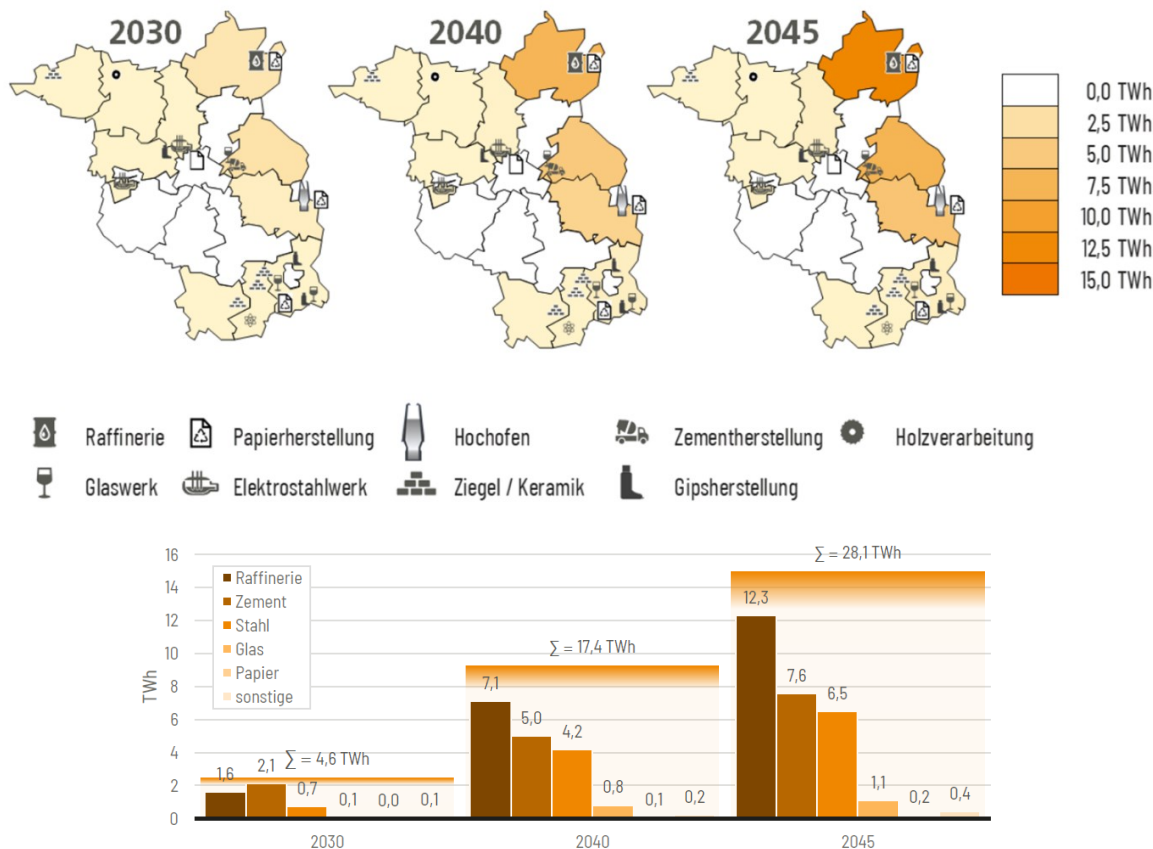


Abbildung 2-2: H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie: Technische Potenziale für mögliche Wasserstoffbedarfe der Industrie.  
Quelle: [Fhg IEG et al. 2023]

Im Verkehrsbereich wurden auf Basis einer Modellhochrechnung v. a. für Lkw und Pkw H<sub>2</sub>-Bedarfs-  
potenziale ermittelt, siehe Abbildung 2-3. Neben dem Straßenverkehr in und rund um Berlin sind auch in  
Brandenburg spezifische Bedarfe am Berliner Flughafen identifiziert worden.



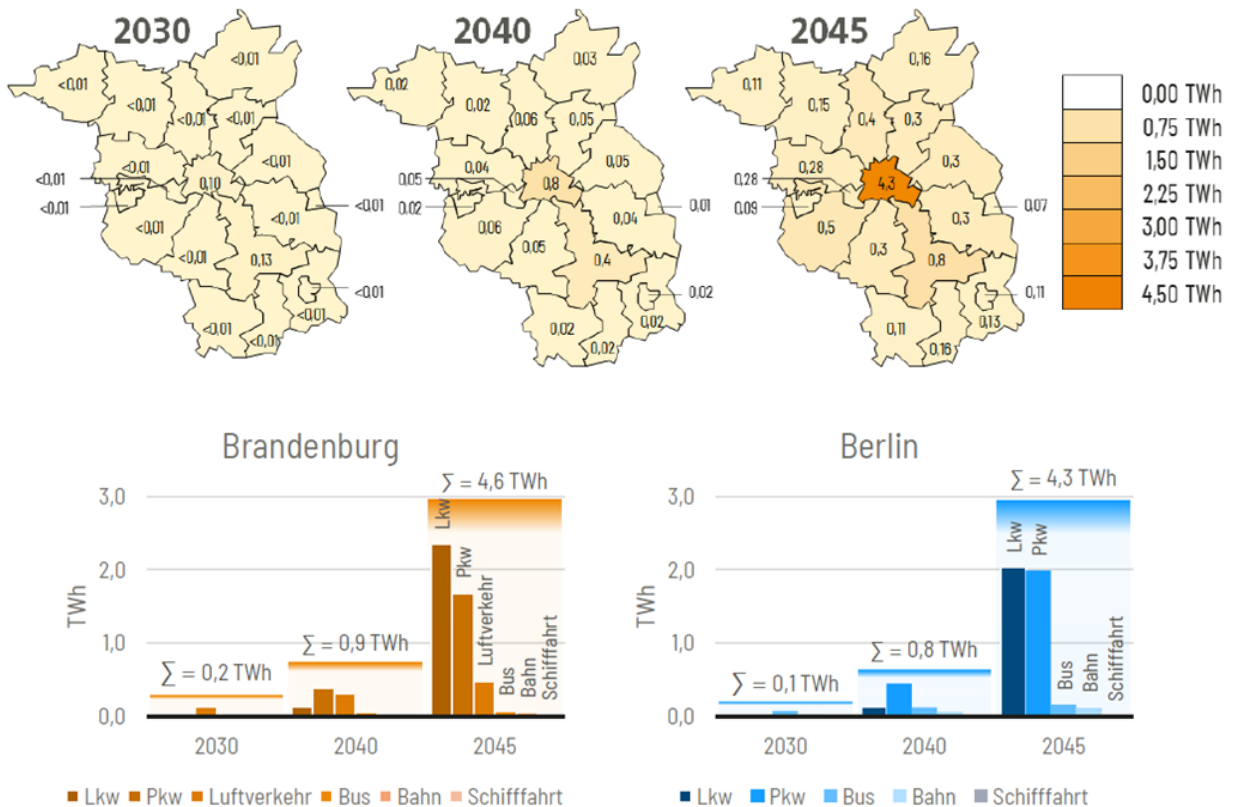


Abbildung 2-3: H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie: Technische Potenziale für Wasserstoff im Verkehr.  
Quelle: [Fhg IEG et al. 2023]

Für Berlin und das urbane Umland sowie für die Industriestandorte in der Lausitz sind überdies auch H<sub>2</sub>-Einsatzpotenziale für die Fernwärmenutzung untersucht worden. Von den insgesamt 1,3 TWh H<sub>2</sub>-Potenzialen entfallen auf Berlin ca. 60 %, siehe Abbildung 2-4.

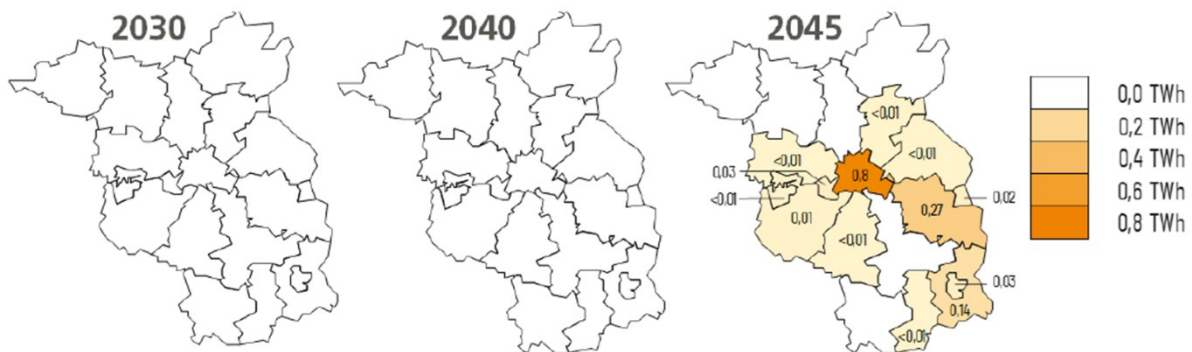


Abbildung 2-4: H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie: Technische Potenziale für Fernwärme.  
Quelle: [Fhg IEG et al. 2023]

Bis 2045 werden in der Studie auch Potenziale zur Rückverstromung aus Wasserstoff identifiziert und auf bis zu 2 TWh pro Jahr bilanziert. Vor allem an den Standorten der heutigen Braunkohlekraftwerke wurden in der Untersuchung H<sub>2</sub>-Einsatzpotenziale beschrieben.



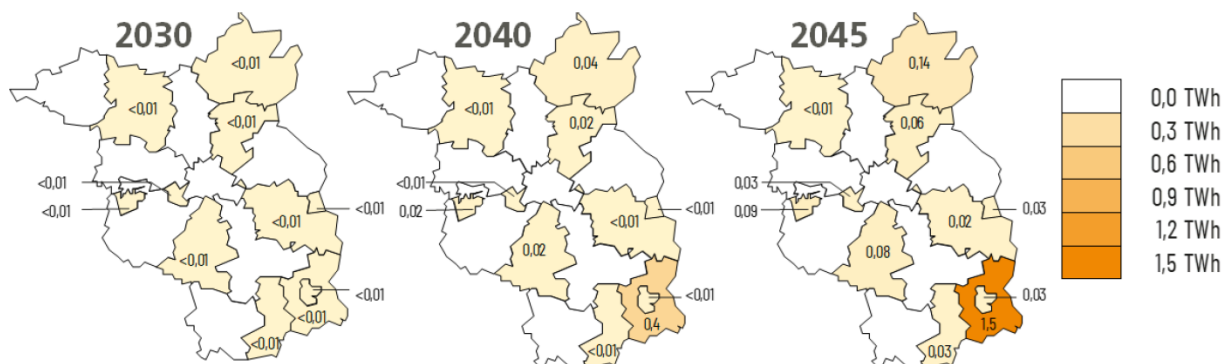


Abbildung 2-5: H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie: Potenziale für die Rückverstromung von Wasserstoff.

Quelle: [Fhg IEG et al. 2023]

Die Abschätzung der H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale in Brandenburg erfolgte in [Fhg IEG et al. 2023] auf Grundlage der theoretisch verfügbaren Flächen für Wind- und PV-Anlagen in der Region.<sup>2</sup> Hiernach verfügt Brandenburg mit einer installierten Leistung von etwa 40 GW<sub>el</sub> hinter Mecklenburg-Vorpommern über die größten potenziellen Stromerzeugungspotenziale in den ostdeutschen Bundesländern. Unter Berücksichtigung der jährlichen Betriebsstunden ergibt sich ein Stromerzeugungspotenzial aus erneuerbaren Energien (EE) von etwa 75 TWh, davon 57 TWh durch Wind (onshore) und 18 TWh durch PV.

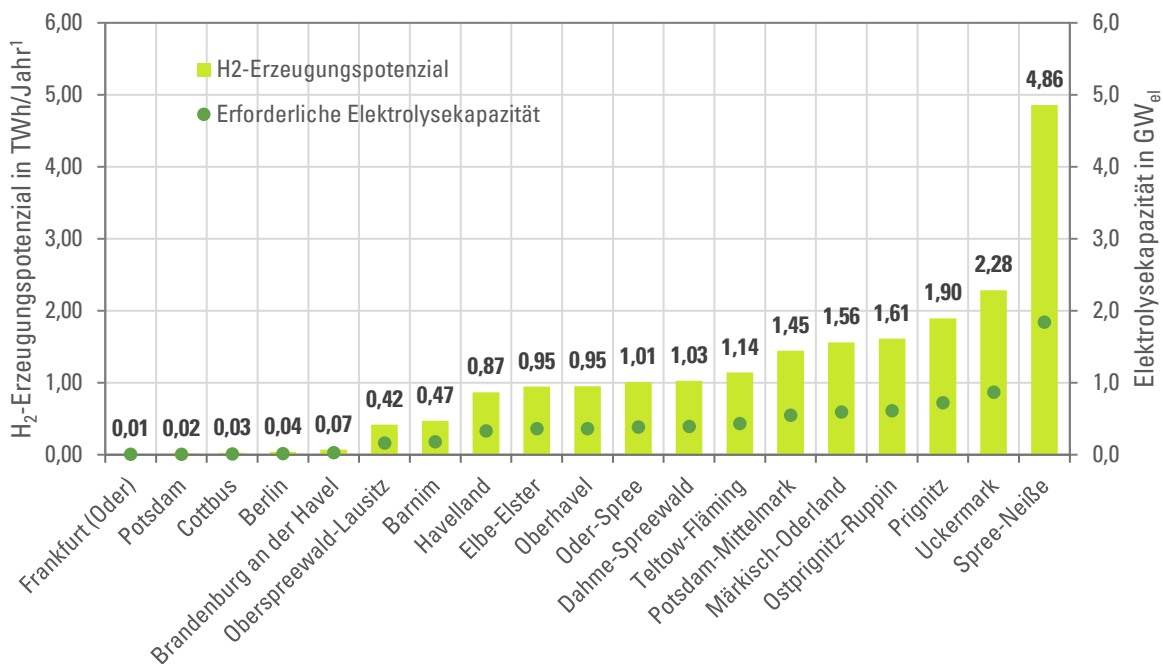
Unter Berücksichtigung des prognostizierten Ausbaus erneuerbarer Energien in den Langfristszenarien des BMWK<sup>3</sup> [Lux et al. 2021] wurde in der Studie der Aufbau von 38 GW erneuerbarer Stromerzeugungskapazitäten bei einer erzeugten Strommenge von 67 TWh im Jahr 2045 abgeleitet. Auch wurde anhand der Szenarien der mögliche Hochlauf der Wasserstoffherzeugung für die Landkreise im Jahr 2045 abgeschätzt. Dieser könnte demnach von 1 TWh im Jahr 2030 über 14,2 TWh (2040) auf bis zu 20,7 TWh im Jahr 2045 ansteigen. Unter Berücksichtigung einer Benutzungsdauer von 4.000 Stunden pro Jahr und einem Wirkungsgrad von 66,6 % entspräche dies einer installierten Elektrolyseleistung von etwa 7,8 GW<sub>el</sub> im Jahr 2045. Die hohe Dynamik in den vergangenen Jahren insbesondere für die kurz- bis mittelfristige Entwicklung bis 2030 lässt aber durchaus mittelfristig eine höhere Zubaurate an Elektrolyseuren erwarten (siehe hierzu auch Fallstudien in Kapitel 4.3).

In Abbildung 2-6 sind diese H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale je Landkreis zusammengefasst. Demnach existieren vor allem in den Landkreisen Spree-Neiße, der Uckermark und Prignitz große Potenziale für die Nutzung

<sup>2</sup> Das technische Erzeugungspotenzial für erneuerbare Stromerzeugung erfolgte in der Studie unter Berücksichtigung stündlicher Wetterdaten und anderer technischer Parameter, wie etwa eines Mindestabstands von Windanlagen zu Siedlungen. Die Erzeugungspotenziale für aktuelle und ehemalige Tagebaugelände wurde mit 14 GW installierter Leistung abgeschätzt, angelehnt an das Vorhaben der LEAG zum Aufbau neuer Erzeugungskapazitäten im Rahmen des Projekts „GigawattFactory“. Dabei sei jedoch darauf verwiesen, dass nur etwa 2/3 dieser angekündigten Kapazitäten tatsächlich für Brandenburg geplant sind, was insbesondere im Landkreis Spree-Neiße zu einer potenziellen Überschätzung des EE-Erzeugungspotenzials führen kann.

<sup>3</sup> Hinweis: Basis der Analysen ist das TN-H2-Szenario im Rahmen der Langfristszenarien 1 [Lux et al. 2021]. Durch Veränderungen im politischen Rahmen wurden 2022 die T45-Szenarien entwickelt, die das Ziel der Treibhausgasneutralität für Deutschland von 2050 auf 2045 vorziehen und somit einen noch ambitionierteren Ausbaupfad für erneuerbare Energien vorsehen. Im Februar 2024 wurde außerdem ein überarbeitetes T45\*-Strom-Szenario vorgestellt. Das entsprechende T45\*-H2-Szenario ist ebenfalls für 2024 angekündigt.

und den weiteren Zubau von PV- und Windanlagen und daraus abgeleitet auch für die Erzeugung von grünem Wasserstoff. Eine weitere Betrachtung der regionalen H<sub>2</sub>-Erzeugungs- und Anwendungsbeispiele erfolgt im Rahmen ausgewählter Fallbeispiele in Kapitel 4. Es ist wichtig zu betonen, dass diese Angaben nur Potenziale darstellen. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere an Industriestandorten mit hohen Wasserstoffbedarfen vor Ort eigene Produktionsanlagen aufgebaut werden. Inwieweit die Pläne für den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung im Landkreis Spree-Neiße tatsächlich zu einem wie in der Studie dargestellten Hochlauf der H<sub>2</sub>-Produktion von knapp 5 TWh bzw. etwa 1,9 GW<sub>el</sub> Kapazität führen, hängt beispielsweise auch von der Verfügbarkeit der existierenden Stromnetzkapazitäten ab.



<sup>1</sup> Theoretisches H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenzial für Brandenburg im Jahr 2045 (gesamt = 20,7 TWh/Jahr bzw. 7,8 GW<sub>el</sub>) auf Basis der Ergebnisse der H<sub>2</sub>-Startnetzstudie Brandenburg [Fhg IEG et al. 2023].

Abbildung 2-6: Ermittelte Wasserstoffherzeugungspotenziale nach Landkreisen und Städten in Brandenburg. Eigene Darstellung nach [Fhg IEG et al. 2023]

Bei der Einordnung dieser Potenziale sollte jedoch Folgendes beachtet werden: Diese Angaben stellen Rahmenbedingungen für einen möglichen Hochlauf der Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse in Brandenburg dar, jedoch können die Potenziale einer eingeschränkten wirtschaftlichen wie auch praktischen Umsetzbarkeit unterliegen und sollten somit für die weitere Betrachtung in dieser Studie nur ein maximales, theoretisches Limit darstellen. Dies gilt insbesondere auch vor dem Hintergrund der in Kapitel 3.3 zu diskutierenden Wasserdargebote unterschiedlicher Rohwasserquellen und potenziell eingeschränkter Verfügbarkeit von Wasser. Auch liegen (bislang) nur eingeschränkt konkrete Ausbauszenarien für Wasserstoffprojekte in den unterschiedlichen Regionen vor.

## Weitere regionale Wasserstoffaktivitäten in Brandenburg

Neben der Machbarkeitsstudie für den Aufbau eines Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg sind zunehmend auf regionaler Ebene Projekte zur H<sub>2</sub>-Erzeugung und Nutzung in Planung, Vorbereitung und bereits in der Umsetzung und zeigen die Dynamik und die Potenziale in den einzelnen Regionen in Brandenburg. So werden die regionalen Ambitionen beispielsweise unterstützt durch eine „Machbarkeitsstudie leitungsgebundenes Wasserstofftransportnetz in der Lausitz“ [INFRACON & IKEM 2023], der „Potenzialstudie für eine regionale Wasserstoffwirtschaft“ für die Region Prignitz-Oberhavel [RLI & Rebel 2022] sowie des HyExpert-Projekts H2VL – Wasserstoffregion Havelland [RLI et al. 2023].

[INFRACON & IKEM 2023] identifiziert für die Lausitz ein Bedarfspotenzial für Wasserstoff in der Lausitz von etwa 5,6 TWh sowie ein Erzeugungspotenzial von etwa 6,2 TWh<sup>4</sup>. Insbesondere kurzfristig (d. h. bis 2030) liegen die Bedarfswerte auf Basis der Abfrageergebnisse bereits deutlich über jenen in der Wasserstoffstartnetz-Studie Brandenburg [Fhg IEG et al. 2023]. Die Autoren geben auch für 2045 regional in der Lausitz einen erhöhten Bedarf verglichen mit [Fhg IEG et al. 2023] an.

[RLI & Rebel 2022] beschreiben für die Region Prignitz-Oberhavel ein Potenzial von 3.000 bis 9.000 t (ca. 90–270 GWh) im Jahr 2030 und einen weiteren Hochlauf auf 11.000 bis 78.000 t (0,33 bis 2,34 TWh) bis zum Jahr 2045. Beide Regionen weisen potenziell signifikante Produktionspotenziale auf, die perspektivisch auch die Rolle Brandenburgs als wichtigen Produktionsstandort für grünen Wasserstoff unterstreichen.

Die in der Machbarkeitsstudie zum Wasserstoffstartnetz Brandenburg skizzierten Pläne werden weiter gestützt durch die Veröffentlichungen der Ferngasnetzbetreiber (FNB) zu einem innerdeutschen Wasserstoffkernnetz [FNB 2023]. Unter dem Stichwort „Marktabfrage für Wasserstoffprojekte“ führen Fernleitungsnetzbetreiber (FNB) Gas im Zeitraum zwischen dem 7. Februar und dem 22. März 2024 eine Abfrage künftiger Wasserstoffbedarfe in Deutschland durch. Die Ergebnisse werden als Entwurf des Szenariorahmens für die Infrastrukturplanung innerhalb des Netzentwicklungsplan NEP Gas & Wasserstoff der Bundesnetzagentur Mitte des Jahres übermittelt.

Wesentliche regionale Infrastrukturvorhaben stellen die Projekte „doing Hydrogen“ [ontras 2023a] bzw. ontras Startnetz [ontras 2023b] und „Flow – making Hydrogen happen“ [Gascade et al. 2023] dar, die innerhalb Brandenburgs wichtige regionale Kernelemente eines zukünftigen deutschen Wasserstofftransportnetzes bilden. Diese Netzelemente verbinden neben den Importkorridoren aus Rostock bzw. Lubmin überdies wichtige Produktions- und Verbrauchsstandorte für Wasserstoff in Brandenburg und ermöglichen auch die Einspeisung und den überregionalen Weitertransport von Wasserstoff in andere Verbrauchszentren in Mittel- bzw. Süddeutschland.

## 2.3. Wasserbedarf der Elektrolyse

In der Literatur findet sich für den Wasserbedarf der Elektrolyse eine hohe Bandbreite an Zahlen. Diese reichen etwa von 18 bis zu 30 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> Wasserstoff [Blanco 2021], 12– 30 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> [DVGW 2023] oder 20– 30 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> [RMI 2023, ANL 2015], um nur einige ausgewählte Beispiele zu nennen. Weitere Angaben mit Bezug auf

---

<sup>4</sup> Angegebene Werte bezogen auf Brennwert H<sub>s</sub> (= 39,41 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>). Zur besseren Vergleichbarkeit erfolgt die Umrechnung der Werte auf Basis des Heizwertes H<sub>i</sub>. Dies ergibt ein Bedarfspotenzial von 4,7 TWh und ein Erzeugungspotenzial von 5,2 TWh.

Systeme mit offenen Kühlkreisläufen liegen bei etwa 25– 35 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> [IRENA & Bluerisk 2023] bzw. z.T. 46– 120 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> z. T. deutlich über dieser Spanne.

Um diese Zahlen einzuordnen ist ein detaillierter Blick auf die unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den Wasserbedarf der Elektrolyse unabdingbar. Dabei können insbesondere vier Faktoren identifiziert werden, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

- Wahl der Elektrolysetechnologie,
- genutzte Rohwasserquelle und -qualität,
- die damit verbundene Auslegung der Wasseraufbereitung, inkl. interner Wasserkreisläufe zur Erhöhung der Ausbeute und
- angewandtes Kühlkonzept für den Elektrolyseur und weiterer Nebenaggregate.

Es ist jedoch zu beachten, dass die verschiedenen Einflussfaktoren stark projektabhängig sind und im Einzelfall individuell optimiert werden können.

Im Kontext der Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse sind diverse Wasserströme zu berücksichtigen. Abbildung 2-7 fasst diese schematisch zusammen.

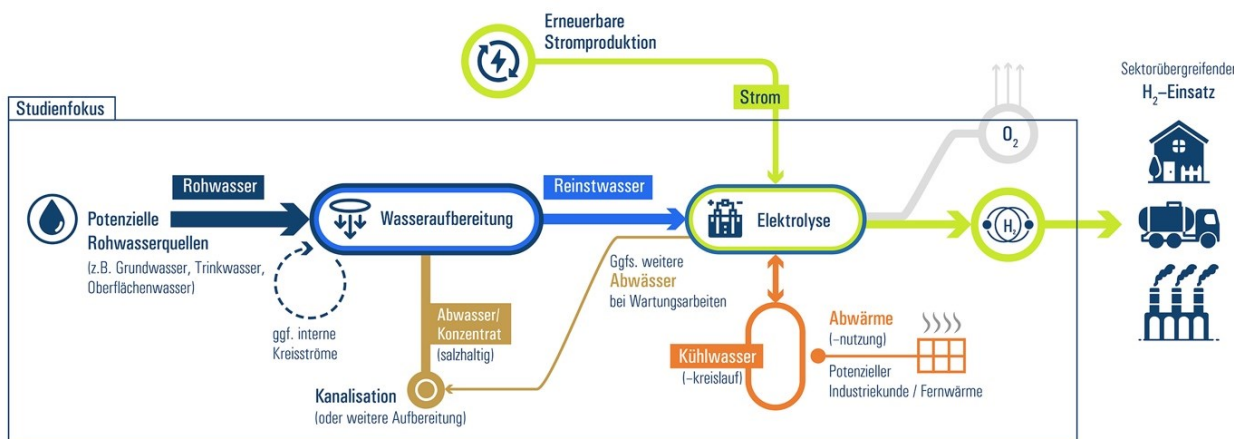


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Wasserströme im Kontext der Elektrolyse.

Grundsätzlich kann der Wasserbedarf eines Elektrolyseurs an Reinstwasser durch das stöchiometrische Massenverhältnis aus der Reaktionsgleichung (etwa 9 l Wasser pro kg Wasserstoff)<sup>5</sup> beschrieben werden. Für die Bereitstellung von Reinstwasser ist zunächst eine Aufreinigung von Rohwasser erforderlich. Mögliche Quellen sind beispielsweise Grundwasser, Oberflächenwasser (Seen, Flüsse, Niederschlag) oder perspektivisch auch (kommunale) Abwässer. Des Weiteren entstehen bei der Aufreinigung aufkonzentrierte Abwasserströme (Konzentratströme), die nicht für einen erneuten Einsatz als Rohwasser geeignet sind und – in der Regel – über die Kanalisation abgeleitet werden. Zusätzliche Wasserbedarfe

<sup>5</sup> Nach der Reaktionsgleichung  $2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$  erfordert die Produktion von 1 Mol Wasserstoff den Einsatz von 1 Mol Wasser. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Molekulargewichte von 18,015 g/mol (H<sub>2</sub>O) und 2,016 g/mol (H<sub>2</sub>) ergibt sich ein stöchiometrisches Massenverhältnis von 8,94 kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Unter Annahme der Dichte von 0,997 kg/l (25 °C) entspricht dies 8,97 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>.

ergeben sich durch die Kühlbedarfe des Elektrolyseurs. Je nach Kühlkonzept sind Zusatzwasserströme zur Kompensation von Verdunstungsverlusten und Abschlammwasser notwendig.

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die technischen Grundlagen der unterschiedlichen Elektrolysetechnologien und fasst Herstellerangaben zu den Anforderungen hinsichtlich Menge und Qualität an das Prozesswasser zusammen (Kapitel 2.3.1). Aufbauend auf den Ergebnissen werden die unterschiedlichen Wasserqualitäten diskutiert, die für die jeweiligen Elektrolysetechnologien erforderlich sind und der Wasserbedarf für Roh- bzw. Reinstwasser für die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse abgeleitet (Kapitel 2.3.2). In Kapitel 2.3.3 erfolgt die Beschreibung der Wasseraufbereitung mit Berücksichtigung unterschiedlicher Rohwasserquellen. Kapitel 2.3.4 stellt allgemein unterschiedliche Optionen zur Kühlung und des Abwärmemanagements vor. Abschließend wird in Kapitel 2.3.5 der spezifische Gesamtwasserbedarf der Elektrolyse anhand aus der Literatur abgeleiteter exemplarischer Anlagenkonzepte beschrieben.

### 2.3.1. Wasserelektrolyse

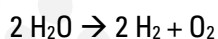
Die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse ist die wesentliche Produktionstechnologie für den Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Wird Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, so können die Gesamtkettenemissionen (inkl. Vorkettenemissionen der Brennstoffförderung oder Stromproduktion sowie der sog. „grauen Emissionen“ aus Bau und Produktion der Anlagen) gegenüber den etablierten Herstellungspfaden deutlich reduziert werden. Nach umfassenden Lebenszyklusanalysen in [Hydrogen Council & LBST 2021] für das Jahr 2030 liegen die THG-Emissionen EE-basierter Pfade um ca. 95–99 % unter jenen der Wasserstoffherstellung aus Erdgas unterschiedlicher Quellen (ca. 9,2–11 kg<sub>CO2</sub>/kg<sub>H2</sub>).

Im Wesentlichen lassen sich heute vier unterschiedliche Technologien zur Elektrolyse von Wasser unterscheiden, deren jeweilige Bezeichnung sich von dem genutzten Elektrolysemedium ableitet:

- Alkalische Elektrolyse (AEL),
- Elektrolyse mit Protonenaustauschmembran (engl. Proton Exchange Membrane, PEM),
- Hochtemperaturelektrolyse (HTEL), auch Festoxidelektrolyse genannt (engl. Solide Oxide Electrolysis Cell, SOEC) und
- Elektrolyse mit Anionenaustauschmembran (engl. Anion Exchange Membran, AEM).

In der Literatur existiert eine Reihe von Beschreibungen und Vergleichen dieser unterschiedlichen Typen hinsichtlich Aufbau, Funktionsweise, Entwicklungsstand und Markt (z. B. [IRENA 2020]). Aus diesem Grund fokussieren sich die folgenden Ausführungen auf einige grundlegende Aspekte sowie insbesondere jene Faktoren, die mit Blick auf den Wasserbedarf und die -qualität besonders relevant erscheinen.

Für alle beschriebenen Technologien gilt das gleiche Grundprinzip: An zwei Elektroden, die von einer ionenleitenden Membran bzw. Elektrolyten getrennt sind, wird eine Gleichspannung angelegt. Dadurch wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten, gemäß der folgenden Reaktionsgleichung:



Je nach Technologie unterscheiden sich die an den Elektroden ablaufenden Halbreaktionen etwas, wie in Abbildung 2-8 dargestellt ist.

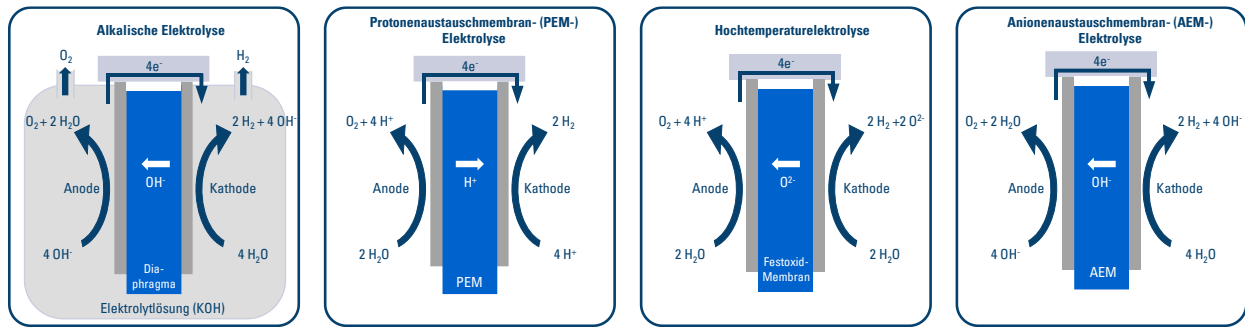


Abbildung 2-8: Teilreaktionen innerhalb der unterschiedlichen Elektrolysezellen.  
LBST nach [IRENA 2020]

Eine Übersicht der unterschiedlichen Eigenschaften der Elektrolyseure ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Übersicht unterschiedlicher Wasserelektrolyse-Technologien

Quelle: eigene Recherchen, Prognos et al. 2023, IRENA 2020

Parameter	AEL	PEMEL	HTEL	AEMEL
<b>Elektrolyt &amp; Membran</b>	wässrige KOH-Lösung + Diaphragma (Zirfon)	Polymermembran (protonenleitend) (meist PFSA-basiert)	Festoxidelektrolyt (O <sub>2</sub> -leitend) (Keramikmembran)	Polymermembran (anionenleitend)
<b>Technologische Reife</b>	Ausgereift (ca. 60–65 % Marktanteil <sup>1</sup> )	Ausgereift (ca. 30–35 % Marktanteil <sup>1</sup> )	Pilotstatus	Entwicklung / erste Projekte
<b>Betriebstemperatur</b>	70–90 °C	50–80 °C	40–60 °C	700–850 °C
<b>Ausgangsdruck H<sub>2</sub></b>	1–30 bar	< 70 bar	1 bar	< 35 bar
<b>Vorteile</b>	Kostenvorteile Langzeitstabilität Geringer Einsatz kritischer Materialien (Metalle)	Hohe Flexibilität Große Leistungsdichte bei hohem Wirkungsgrad Hohe Gasreinheit	Kopplung mit Hochtemperatur-wärme (Industrie) ermöglicht sehr hohen Wirkungsgrad	Siehe Vorteile AEL und PEMEL Kein kritischer Materialbedarf
<b>Nachteile</b>	Kalilauge (korrosiv, ätzend) Trägheit, geringes Teillastverhalten Geringe Leistungsdichte	Einsatz kritischer Materialien (insb. Iridium, Platin als Katalysator, PFSA-Membran)	Wärmebedarf (>700 °C) beschränkt Anwendungsgebiete Materialbedarf, z. B. Yttrium, Scandium	Hoher Energiebedarf Wenige Akteure Kalilauge (korrosiv, ätzend) Trägheit, geringes Teillastverhalten Geringe Leistungsdichte

- **Abkürzungen:** PFSA = perfluorierte Alkylsulfonsäuren, YSZ = Yttriumoxid-stabilisiertes Zirconiumdioxid
- <sup>1</sup> Schätzung nach [IEA 2023].

Auf Basis der Herstellerangaben diverser Elektrolysehersteller wurden wesentliche Anforderungen an die jeweiligen Wasserbedarfe verglichen. Hierzu wurden zunächst mit dem Auftraggeber Elektrolysehersteller ausgewählt. Die Auswertung umfasst dabei ausgewählte Hersteller aller Elektrolysetypen, sofern Daten zum Wasserbedarf vorliegen. Tabelle 2-2 ordnet die Hersteller den unterschiedlichen Elektrolysetypen zu. Die Aufteilung nach Technologie ist dabei wie folgt: AEL (10 Hersteller), PEMEL (10), HTEL (4) und AEMEL (2).



Die Detailergebnisse der Auswertungen sind im Anhang aufgeführt. Neben dem Elektrolysetyp und Produktnamen sind die Angaben zu Wasserbedarfen (Prozesswasser und Kühlwasser) sowie den jeweiligen Qualitätsanforderungen zusammengetragen.

Tabelle 2-2: Übersicht untersuchter Elektrolysehersteller nach Technologie  
Stand: Oktober 2023

#	Alkalische Elektrolyse (AEL)	PEM-Elektrolyse	Hochtemperaturelektrolyse (Festoxidelektrolyse)	AEM-Elektrolyse
1	Asahi Kasei (JP)	Cummins Inc. (US)	Elcogen AS (EE)*	Enapter (DE)
2	Cockerill Jingli Hydrogen (CJH) (CN)	Elogen (FR)	Topsoe (DK)	EVOLOH (US)*
3	Cummins Inc. (US)	H2B2 (ES)	Sunfire (DE)	
4	Green Hydrogen Systems (GHS) (DK)	H-Tec Systems (DE)	Sylfen (FR)*	
5	HydrogenPro AS (NO)	ITM POWER (GB)		
6	McPhy Energy (FR)	Kumatec/Kyros (DE)		
7	Nel Hydrogen (NO)	Nel Hydrogen (NO)		
8	Peric (CN)*	Peric (CN)*		
9	Sunfire (DE)	Plug Power (US)		
10	thyssenkrupp nucera (DE)	Siemens Energy (DE)		

Hinweise: Ländercodes nach ISO 3166-1 α2.

\* Keine Produktdatenblätter verfügbar (Stand: November 2023).

Neben einer Kurzbeschreibung der unterschiedlichen Elektrolysetechnologien werden im Folgenden auch die Ergebnisse hinsichtlich der Auswertung der Herstellerangaben aufgeführt.

### AEL: Alkalische Elektrolyse

Die AEL ist eine seit vielen Jahrzehnten bewährte Technologie zur Wasserstoffproduktion durch Wasserspaltung. Indem Strom in eine wässrige Lösung (meist Kaliumhydroxid, Kalilauge) geleitet wird, entsteht an den Elektroden Wasserstoff (Kathode) bzw. Sauerstoff (Anode). Zur Trennung der Reaktionshalbräume wird ein anionenleitendes Diaphragma eingesetzt, durch welches die an der Kathode gebildeten Hydroxid-Ionen zur Anode diffundieren. Ein wichtiger Vorteil der Technologie ist, dass sie keine teuren Platingruppenmetalle als Katalysator benötigt. Gleichzeitig erfordert die geringe Leistungsdichte jedoch einen höheren Platzbedarf gegenüber beispielsweise der PEM-Technologie. Auch die weniger flexible Betriebsweise schränkt die Einsatzweise bei Verwendung volatiler erneuerbarer Energien ggf. ein. Tabelle 2-2 führt diverse internationale Hersteller mit Produkten im Bereich der AEL auf.

Basierend auf den Produktdatenblättern liegt der (Reinst-)Wasserbedarf bei der AEL je nach Hersteller bei 9,5–11,1 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (entspricht ca. 0,85–1 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>). Lediglich wenige Hersteller (z. B. Cummins, Green Hydrogen Systems) geben außerdem den Bedarf an Leitungswasser an, da in diesem Fall die Wasseraufreinigung in dem angebotenen Produkt integriert ist. Der Wasserbedarf an Leitungswasser wird hierbei mit 13–17 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (Cummins, HyStat-100 (0,5 MW)) bzw. 33,4 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (Green Hydrogen Systems, HyProvide A-Series 90, 390 kW) angegeben. In den übrigen Fällen wird die Wasseraufbereitung von Leitungswasser- auf Reinstwasserqualität oft optional mitangeboten. Die vergleichsweise hohe Bandbreite der Wasserbedarfe kann bei diesen kleinen Anlagengrößen (< 500 kW<sub>el</sub>) zum Teil mit den nicht optimal ausgelegten Aufbereitungsanlagenkomponenten oder unzureichenden internen Wasserkreisläufen

begründet werden. Es ist davon auszugehen, dass die spezifischen Wasserbedarfe im Falle größerer Anlagenskalierung sich reduzieren werden.

Für die erforderliche Reinheit des demineralisierten Wassers (in einigen Fällen auch als deionisiertes (DI-) oder vollentsalztes (VE-)Wasser bezeichnet) wird die Leitfähigkeit als Hauptparameter angegeben. Dieser liegt bei  $< 5 \mu\text{S}$  (Green Hydrogen Systems) bzw.  $< 1 \mu\text{S}$  (John Cockerill). Sunfire gibt diesen Wert für ihr aktuelles Produkt (HyLink Alkaline) mit  $< 0,5 \mu\text{S/cm}$  an und bestätigt damit den generell in der Branche zu beobachtenden Trend hin zu höheren Reinheitsanforderungen an das Reinstwasser<sup>6</sup> [Sunfire 2024].

### **PEMEL: Polymerelektrolytmembranelektrolyse**

Eine weitere heute bereits großskalig eingesetzte Elektrolysetechnik ist die PEM-Elektrolyse, auch Protonenaustauschmembran-Elektrolyse genannt. Hierbei wird eine spezielle protonenleitende Polymermembran als Elektrolyt eingesetzt, die nur für Protonen, nicht aber für Gase durchlässig ist und damit die beiden Reaktionsräume trennt. Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung wird an der Anode Sauerstoff aus Wasser erzeugt. Die dabei entstehenden Protonen wandern durch die Membran zur Kathodenseite und werden dort zu Wasserstoff umgesetzt. Im Allgemeinen bietet diese Technologie im Vergleich zu anderen Elektrolyseverfahren einen hohen Wirkungsgrad, schnelle Reaktionszeiten und damit flexible Einsatzmöglichkeiten. Außerdem erlaubt die heute eingesetzte, vergleichsweise dicke (ca. 100–200  $\mu\text{m}$ ) Membran hohe Druckunterschiede zwischen den Elektroden und damit Ausgangsdrücke des Wasserstoffs von in der Regel etwa 40 bar. Insgesamt erfordert die Technologie bislang noch höhere Investitionskosten, getrieben vor allem durch den Einsatz von Iridiumoxid bzw. Platin als Katalysatoren auf der Anoden- bzw. Kathodenseite sowie die hohen Anforderungen an die Stabilität und Leitfähigkeit der Polymermembran (Nafion™-Membran oder vergleichbare auf Perfluorsulfonsäure (PFSA) basierende Membranen). Dies zeigt sich auch hinsichtlich der Reinheitsanforderungen des eingesetzten Wassers (siehe unten). Eine hohe Stromdichte erlaubt insgesamt eine kompakte Bauweise.

Der Wasserbedarf liegt nach Herstellerangaben zwischen 9 und  $< 11,1 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  (VE-Wasser) (entspricht ca.  $0,8\text{--}1 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{Nm}^3_{\text{H}_2}$ ). Sofern Angaben vorhanden, wird auf eine Reinheit hinsichtlich der Leitfähigkeit von  $< 0,1 \mu\text{S/cm}$  sowie  $\text{TOC} < 30 \text{ ppb}$  verwiesen (Beispiel: [H2B2 2022]). Auch Nel gibt für seine kleine Anlage ohne integrierte Wasseraufbereitung einen erforderlichen Wert nach ASTM Typ II<sup>7</sup> (Leitfähigkeit  $< 1 \mu\text{S/cm}$  bzw. einen Widerstand von  $> 1 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ ) und einen präferierten Wert nach ASTM Typ I ( $< 0,1 \mu\text{S/cm}$  bzw.  $> 10 \text{ M}\Omega/\text{cm}$ ) an.

Für den Fall, dass die Wasserversorgung in Form von normalem Leitungswasser erfolgt, liegt die Bandbreite der Wasserbedarfe zwischen  $12,8 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  (Plug Power),  $13\text{--}17 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  (Cummins),  $22,2 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  (Elogen) und  $25 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  (ITM Power, Nel). Auch hierbei sei auf den Einfluss des Anlagenlayouts sowie der angenommenen Rohwasserqualität und des damit einhergehenden Aufwands der Wasseraufbereitung verwiesen. Wie in Kapitel 2.3.5 näher diskutiert wird, berücksichtigen die Angaben von Plug Power mit etwa  $12,8 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$  einen besonders sparsamen Umgang mit der Ressource Wasser. Nach Angaben des Unternehmens ergibt sich der zusätzliche Bedarf (gegenüber den theoretischen  $9 \text{ l}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{H}_2}$ ) aus dem Schritt der Wasseraufbereitung sowie gewisser „Verluste“ in Form von Wasserdampf, der mit dem Sauerstoff in

<sup>6</sup> Hintergrund der hohen Reinheitsanforderungen sind potenzielle Degradationsprozesse innerhalb der investitionsintensiven Elektrolyse-Stacks.

<sup>7</sup> Für Details zu den Qualitätsanforderungen nach dem ASTM-Standard siehe Kapitel 2.3.2.

die Atmosphäre entlassen wird [Plug Power 2022]. Durch Rückführung diverser Konzentratströme (etwa der zweiten Stufe der Umkehrosmose oder Elektrodeionisation) in vorhergehende Reinigungsprozesse (siehe Kapitel 2.3.2)) beschreibt das Unternehmen, dass so der Gesamtwasserbedarf der Anlage auf ein Minimum reduziert werden kann. Wird außerdem Sauerstoff einer weiteren Nutzung zugeführt (und ist in diesem Rahmen eine vorherige Gastrocknung erforderlich), kann eine weitere Abgabe von Wasserdampf über den Sauerstoffstrom in die Umgebungsluft verhindert werden. Es erscheint wahrscheinlich, dass diese internen Recyclingströme in den höheren Angaben zum Wasserbedarf anderer Hersteller nicht berücksichtigt sind und folglich diverse Konzentratströme direkt als Abwasser abgeleitet werden.

Für die Ausgangsqualität des Leitungswassers (bei integrierter Wasseraufbereitung) wird je nach Hersteller auf unterschiedliche Normen verwiesen: 98/83/EG (Elogen), TrinkwV 2020 und EU-Richtlinie 2020/2184-EU (H-Tec Systems, Kyros).

### **HTEL: Hochtemperaturelektrolyse**

Die HTEL enthält einen sauerstoffionenleitenden Festoxidelektrolyten, der gleichzeitig die Trennung der beiden Halbreaktionen sicherstellt. Das Betriebstemperaturniveau beträgt etwa 700–850 °C, weshalb Wasserdampf als Ausgangsmaterial eingesetzt wird. Dieser wird an die Kathode geleitet und dort durch das Anlegen einer elektrischen Spannung in Wasserstoff- (H<sup>+</sup>) und Sauerstoffionen (O<sup>2-</sup>) gespalten. Während die Protonen direkt zu Wasserstoff reagieren, wandern die gebildeten Sauerstoffionen durch den Feststoffelektrolyten (meist bestehend aus mit Yttriumoxid (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dotiertem Zirkoniumdioxid, YSZ) zur Anodenseite und bilden Sauerstoff unter Abgabe von Elektronen. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus ist insbesondere die Einbindung in regionale Wärmenetze (z. B. bei Industrieanwendungen mit Wärmeauskopplung) ein interessanter Anwendungsfall der HTEL, um die Systemwirkungsgrad zu steigern. Eine erste Pilotanlage der Firma Sunfire wurde beispielsweise im Kontext der Stahlproduktion aufgebaut. Nachteilig sind dagegen die eingeschränkte Kaltstart- und Teillastfähigkeit, insbesondere bei der direkten Kopplung mit erneuerbarer Stromerzeugung.

Für die Dampferzeugung sind die im Kraftwerksbereich üblichen Entmineralisierungsanlagen für Hochdruckdampferzeuger erforderlich. Die Wasserbedarfe in Form von Dampf liegen nach Angaben der Firmen Sunfire und Topsoe Firma Sunfire gibt den Bedarf an Wasser in Form von Dampf bei etwa 9-9,48 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (150–200 °C und 3,5–10 bar(a)) [Sunfire 2024, Topsoe 2021]. Für die Wasserversorgung bedeutet die hohe Betriebstemperatur, dass das eingeleitete Wasser erhitzt und verdampft wird, bevor es dem Elektrolyse-Stack zugeführt wird. Die Anforderung an die Leitfähigkeit des Reinstwassers liegen mit < 0,2 µS/cm (Sunfire HyLink SOEC) zwischen den Werten der AEL und der PEM-Elektrolyse. Kritische Verunreinigungen im Dampf umfassen beispielsweise Silizium, Chlorid oder Schwefelverbindungen.

### **AEMEL: Elektrolyse mit Anionenaustauschmembran**

Die AEM-Elektrolyse ist erst in den letzten Jahren durch Unternehmen wie Enapter in Europa oder EVOLOH in den USA bekannt gemacht worden. Die Hersteller versprechen, die Vorteile der PEMEL (hohe Flexibilität und Leistungsdichte) mit jenen der AEL (geringe Kosten und hohe Stabilität) zu verbinden. Ähnlich wie bei der PEMEL wird auch bei der AEMEL eine ionenleitende Polymermembran als Festelektrolyt zwischen den Elektroden eingesetzt. Diese ist jedoch nur für Hydroxidionen (OH<sup>-</sup>) durchlässig, sodass alternative Membranmaterialien zum Einsatz kommen. Platingruppenmetalle als Katalysatoren sind aufgrund des alkalischen Milieus nicht erforderlich. Der Bau einer großen Produktionsanlage der Firma Enapter für

modulare AEM-Elektrolyseure in Nordrhein-Westfalen (Saerbeck) begann im Jahr 2023. Dabei werden in einem modularen Aufbau bis zu 420 AEM-Module für einen 1-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseur verbaut.

Aufgrund der verwendeten Materialien sind Ionenrückstände im zugeführten Wasser weniger relevant als bei den vorherigen Technologien. Aus diesem Grund liegt die Leitfähigkeitsangabe mit etwa < 20 µS/cm nach aktuellen Literaturangaben oft noch deutlich höher als etwa bei der AEL- oder PEM-Technologie. Erfahrungen aus bestehenden Projektskalierungen anderer Elektrolysetechnologien lassen aber vermuten, dass bei zunehmender Projektgröße die Anforderungen an die Wasserqualität angehoben werden, um verunreinigungsbedingte Einbußen an Lebensdauer und Leistung zu minimieren. Die Firma Enapter bietet ein eigenes Wasserreinigungssystem an, das Leitungswasser oder aufgereinigtes Regenwasser auf die erforderliche Qualität aufbereitet [enapter o. D.]. Die maximale Produktionsrate von bis zu 1 l/min bei einer Leitfähigkeit von 1 µS/cm ist dabei ausreichend, um bis zu 16 Elektrolysemodule mit aufgereinigtem Wasser zu versorgen. Das System besteht aus einer Umkehrosmoseeinheit inkl. Filter.

### 2.3.2. Wasserqualitäten und -anforderungen der Elektrolyse

Die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Unterschiede und identifizierten Qualitätsstandards und -anforderungen an das Roh- bzw. Reinstwasser zur Versorgung der Elektrolyse sollen im Folgenden beschrieben und näher diskutiert werden.

#### Qualitätsstandards

Hintergrund der hohen Qualitätsanforderungen der Wasserelektrolyse sind mögliche Degradationsprozesse an wesentlichen Stack-Komponenten wie Katalysatoren, Diaphragma (AEL) bzw. Polymermembran (PEMEL), die sich negativ auf die Lebensdauer und Leistung des Elektrolyse-Stacks auswirken. Verunreinigungen durch Metallkationen (z. B. Natrium, Magnesium, Kalzium sowie Eisen oder Kupfer), Halogenanionen (Chlorid, Fluorid, Bromid und Iodid), aber auch organische Verbindungen können die Katalysatoroberfläche blockieren oder die Leitfähigkeit der Membranen herabsetzen oder gar zu einer Degradation der Membran beitragen [Becker et al. 2023, Blanco 2021]. Neben der Wasserquelle können beispielsweise auch die verwendeten Materialien (etwa der Rohrleitungen) Quellen für Verunreinigungen sein. Insofern ist eine kontinuierliche Überwachung der Wasserqualität an unterschiedlichen Stellen der Wasserkreisläufe geboten.

Die Auswertung der Herstellerangaben in Kapitel 2.3.1 zeigt, dass es, selbst innerhalb einer Elektrolysetechnologie, keine einheitlichen Standards für die Anforderungen an die Qualität des aufbereiteten Wassers gibt. Auch im Rahmen der relevanten ISO-Norm 22734:2019<sup>8</sup> werden keine Werte für die Wasserqualität bei Elektrolyseuren spezifiziert. Stattdessen wird darauf verwiesen, dass jeder Hersteller die Anforderungen selbst festsetzen soll. Gleiches gilt für die Qualität und Versorgungsanforderungen mit Leitungswasser. Gleichzeitig soll der Elektrolyseur mit ausreichenden Schutzmechanismen ausgestattet sein, sodass keine Rückeinspeisung von Rohwasser oder Kühlmitteln in das Leitungswasserversorgungssystem möglich ist. In einigen Fällen wird jedoch auf existierende Standards oder Anforderungen aus anderen Bereichen verwiesen. Diese umfassen etwa Leitungswasser, das als Rohwasserquelle genutzt wird oder der ASTM-Standard für die Anforderungen für aufbereitetes Wasser

---

<sup>8</sup> ISO 22734:2019 – Hydrogen generators using water electrolysis – Industrial, commercial, and residential applications. Gegenwärtig befindet sich die Norm in der Überarbeitung durch die Arbeitsgruppe 26 in ISO TC197.

(im Folgenden als Reinstwasser bezeichnet). Im Rahmen der HTEL ergibt sich ein Sonderfall, da die vorgeschaltete Dampferzeugung die erforderliche Wasserqualität bestimmt und in gängigen Industrierichtlinien wie etwa der VGB-S-010-T-00<sup>9</sup> geregelt ist.

### *Trinkwasser / Leitungswasser*

Bei Anlagen/Produkten mit integrierter Wasseraufbereitung (in der Regel Container-basierte Lösungen im Bereich < 5 MW) wird je nach Hersteller auf unterschiedliche Vorgaben verwiesen. In älteren Produktdatenblättern findet sich für Leitungswasserqualität oft ein Verweis auf Richtlinie 98/83/EG des Rates vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. Diese wurde Anfang 2023 durch die EU-Richtlinie 2020/2184-EU zur „Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch für alle in der Union“ abgelöst. Zu den Zielen der Richtlinie gehören die effizientere Überwachung der Wasserqualität, aktuelle Qualitätsstandards, bessere Verfügbarkeit sowie mehr Transparenz rund um das Trinkwasser [BMG 2020]. Die Umsetzung in nationales Recht (in Deutschland) erfolgte durch eine Novelle der Trinkwasserverordnung (TrinkwV), die am 24.6.2023 in Kraft trat. Darin werden etwa die Untersuchungshäufigkeit sowie die Grenzwerte hinsichtlich mikrobiologischer, chemischer und radioaktiver Stoffe definiert (Bundesgesetzblatt Nr. 159).

### *Reinstwasser für die Elektrolyse*

Hinsichtlich der Reinstwasserqualität (= Wasser, das nach der Wasseraufbereitung der Elektrolyse zugeführt wird) werden durch die Elektrolysehersteller die Begriffe „deionisiertes“ (DI-) und „demineralisiertes“ bzw. „vollentsalztes (VE-) Wasser“ verwendet, zum Teil ohne eine Beschreibung der dahinterliegenden Qualitätsanforderungen. Nach dem Anlagenhersteller Lenntech ist eine klare Abgrenzung der Begriffe nur schwer und nicht ohne Überlappungen vorzunehmen [Lenntech o. D.]. Insofern ist es hilfreich, auf international anerkannte Standards für die möglichen Wasserqualitäten zu verweisen. Im Zusammenhang mit der Elektrolyse ist insbesondere der Standard D1193-06(2018) der American Society for Testing and Materials (ASTM) zu nennen [Huesa 2022].

Tabelle 2-3: Anforderungen nach ASTM-Standard D1193 2011

Parameter	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
<b>Max. elektrische Leitfähigkeit (µS/cm bei 25 °C)</b>	0,056	1	0,25	5
<b>Min. elektrischer Widerstand (MΩ-cm bei 25 °C)</b>	18,2	1	4	0,2
<b>pH bei 25 °C</b>	–	–	–	5,0–8,0
<b>TOC max. (µg/L)</b>	10	50	200	Unbegrenzt
<b>Natrium max. (µg/L)</b>	1	5	10	50
<b>Max. Kieselsäure (µg/L)</b>	3	3	500	Unbegrenzt
<b>Chlor max. (µg/L)</b>	1	5	10	50

TOC = gesamtorganischer Kohlenstoffgehalt.

<sup>9</sup> VGB-S-010-T-00: Speisewasser-, Kesselwasser- und Dampfqualität für Kraftwerke / Industriekraftwerke (ehemals VGB-R 450 L), <https://www.vgb.org/shop/s-010-00-de-print.html>.

Nach ASTM D1193-06(2018) („Standard Specification for Reagent Water“), einem Standard aus dem Laborbereich, werden vier Qualitätstypen unterschieden, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an die elektrische Leitfähigkeit sowie unterschiedliche Verunreinigungen (Natrium, Chlorid, organische Probenbestandteile (total organic carbon, TOC) sowie Silica/Kieselsäure) stellen (siehe Tabelle 2-3). ASTM Typ II (Leitfähigkeit < 1 µS/cm und TOC < 50 µg/L) ist dabei die für AEL-Elektrolyseure meist erforderliche Qualitätsstufe. PEM-Elektrolyseure erfordern hingegen mit ASTM Typ I zumeist eine noch höhere Wasserreinheit.

Der Hersteller für Wasseraufbereitungsanlagen im Zusammenhang mit der Elektrolyse eurowater weist außerdem darauf hin, dass die alleinige Beschreibung der Wasserqualität durch diese Parameter in Realität unter Umständen nur unzureichend gegeben ist [eurowater o. D.]. Weitere relevante Faktoren können neben diversen Ionengehalten (Carbonat, Sulfat, Chlorid oder Aluminium) auch beispielsweise Angaben zu Sauerstoff, Kohlendioxid oder Siliziumdioxid (insb. bei HTEL) enthalten. Dies unterstreicht etwa das Beispiel des Elektrolyseherstellers Nel: Dieser gibt für seine Anlagen (AEL und PEMEL) an, dass der Einsatz von vollentsalztem Wasser ASTM Typ II für alle Elektrolysetypen mindestens erforderlich sei. Empfohlen werde jedoch Wasser gemäß ASTM Typ I [Nel o. D.]. Tabelle 2-4 zeigt exemplarisch die technischen Spezifikationen der Firma Sunfire für ihre Produkte der AEL und HTEL auf.

Tabelle 2-4: Technischen Spezifikationen und Grenzwerte für Verunreinigungen für Elektrolyseure der Firma Sunfire  
 Quelle: [Sunfire 2024], Stand: 2024

Alkalische Elektrolyse (Demineralisiertes Wasser für Elektrolyse)			Hochtemperaturelektrolyse (Input der vorgelagerten Dampferzeugung)		
Parameter	Einheit	Wert	Parameter	Einheit	Wert
Leitfähigkeit (@ 20°C)	µS/cm	< 0,5	Leitfähigkeit	µS/cm	< 0,2
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	≤ 2	Gesamt Si	µg/kg	< 5
CO <sub>2</sub>	mg/l	< 1	SiO <sub>2</sub>	µg/kg	< 10
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	≤ 0,8	Gesamt P	µg/kg	< 10
SiO <sub>2</sub>	mg/l	≤ 1	Gesamt S	µg/kg	< 10
Cl <sup>-</sup>	mg/l	≤ 0,01	Sauerstoff	ppm	< 100
Al <sup>3+</sup>	mg/l	≤ 0,0007	pH	-	< 9,2
			TOC	mg/l	< 0,1

Erforderliche Reinheit für die KOH-Lebensdauer von 45.000 äquivalenten Betriebsstunden (andere Werte können für eine niedrigere KOH-Lebensdauer gelten).

## Übersicht: Prozesswasserbedarf und -qualität

Tabelle 2-5 fasst die Ergebnisse hinsichtlich des Wasserbedarfs und der Qualitätsanforderungen für die Elektrolysetechnologien zusammen. Dabei zeigen sich bei den Wasserbedarfen nur geringe Abweichungen zwischen den Niedertemperaturtechnologien (AEL, PEMEL und AEMEL). Die Gesamtspanne aller zusammengetragenen Herstellerwerte reicht von 9 bis 11,1 l Reinstwasser pro kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (entspricht etwa 0,8-1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>). Bei einem stöchiometrischen Wassereinsatz von 8,97 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entspricht dies einem Mehreinsatz von bis zu 24 %. Neben dem für das Prozess erforderliche Wasser ist auch das



Zusatzwasser zu berücksichtigen, dass den internen Wasserkreislauf speist und Verluste durch Abschlämmwasser (PEMEL) oder Austausch des KOH-Elektrolyten ausgleicht. Es kann außerdem davon ausgegangen werden, dass ein Teil dieses überschüssigen Wassers mit den Produktgasen Wasserstoff und Sauerstoff aus der Reaktionskammer abtransportiert und z. T. im Zuge der Gastrocknung zurückgewonnen wird. Der Wasserbedarf für Rohwasser wird durch die unterschiedlichen Hersteller in einer Bandbreite von etwa 13-33 l (Leitungs-)Wasser pro kg<sub>H<sub>2</sub></sub> angegeben. Unterschiede zwischen den Reinst- bzw. Prozesswasserbedarfen und den Rohwasserbedarfen lassen sich auf Verluste und Mehrbedarfe für die Wasseraufbereitung sowie potenzieller Einspeisung als Zusatzwasser in das Kühlkreislauf zurückführen, um Verdunstungs- und Konzentratverluste auszugleichen. Weitere Details zur Wasseraufbereitung sowie den Kühlkonzepten werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

Im Falle der Hochtemperaturelektrolyse liegen keine konkreten Herstellerangaben für den Rohwasserbedarf der Anlage vor. Die Prozesswasserbedarfe werden mit etwa 9-9,4 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> angegeben. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das zugeführte Rohwasser zunächst entmineralisiert und einer Dampferzeugung zugeführt wird.

Tabelle 2-5: Übersicht: Ermittelte Wasserbedarfe nach Elektrolysetechnologie  
(Basis: Herstellerangaben, siehe Anhang)

Wasserbedarf nach Technologie in l <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	Prozesswasserbedarf	Rohwasserbedarf (inkl. Bedarf für Wasseraufbereitung)	Qualitätsanforderung (beispielhaft ausgewählte Parameter) <sup>2</sup>
<b>AEL</b>	9,5 bis 11,1 (Reinstwasser)	13–17 (Cummins) 33,4 (Green Hydrogen Systems)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitfähigkeit &lt; 0,5 bis &lt; 5 µS/cm</li> <li>TOC &lt; 50 µg/L,</li> <li>ASTM Typ II</li> </ul>
<b>PEMEL</b>	9 bis < 11,1 (Reinstwasser)	12,8 (Plug Power) 13–17 (Cummins) 22,2 (Elogen) 25 (ITM Power, Nel).	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitfähigkeit von &lt; 0,1 µS/cm</li> <li>TOC &lt; 30 µg/L</li> <li>ASTM Typ I</li> </ul>
<b>HTEL</b>	~9-9,4 (Dampf)	Verwendung von Dampf, z. B. aus anderen Hochtemperaturprozessen, hierfür standardmäßige Entmineralisierung erforderlich (üblich für Dampferzeugung, s. Richtlinie VGB-S-010)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitfähigkeit von &lt; 0,2 µS/cm</li> <li>TOC &lt; 0,1 mg/l (aufgrund hoher Temperaturen eher unempfindlich gegenüber TOC)</li> <li>Empfindlich gegenüber Silizium, Chlorid, oder Schwefelverbindungen im Dampf</li> <li>Bezogen auf Input-Wasser der Dampferzeugung (150–200 °C)</li> </ul>
<b>AEMEL</b>	10,1 (Reinstwasser)	k. A.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Leitfähigkeit &lt; 20 µS/cm</li> </ul>
<b>Abgeleitete technologie-übergreifende Bandbreiten<sup>1</sup></b>	9–11	13–33	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anforderungen je nach Technologie: PEMEL &gt; HTEL &gt; AEL &gt; AEMEL</li> </ul>

<sup>1</sup> Bandbreite ergibt sich durch Angaben unterschiedlicher Hersteller. Rohwasserbedarf insb. abhängig von Rohwasserquelle und internem Wasserrecycling innerhalb der Wasseraufbereitungsanlage. Rohwasseraufbereitung meist nicht im Scope der Elektrolysehersteller.

<sup>2</sup> Technische Spezifikationen und Grenzwerte der jeweiligen Hersteller sind einzuhalten.

Die Anforderungen an die Wasserqualität stellen stets auch eine Kostenabwägung zwischen dem Aufwand der Wasseraufbereitung und der Lebensdauer des Elektrolyse-Stacks dar. Nach [Herco 2023] ist so beispielsweise in den letzten Jahren bei einigen AEL-Herstellern ein Trend zu höherer Wasserqualität zu beobachten, um auf diesem Weg Mineralieneintragung und Aufkonzentrierung innerhalb des Elektrolyseurs / Stacks zu vermeiden, da sich diese negativ auf die Lebensdauer des Stacks auswirken können. Folglich werden gegenwärtig durchweg strenge Vorgaben an mögliche Verunreinigungen im Prozesswasser beschrieben. Es bleibt abzuwarten, ob sich im Bereich der AEM-Elektrolyse ein ähnlicher Trend abzeichnet. Andererseits könnte die zunehmende Betriebserfahrung auch eine Anpassung bzw. Erhöhung der zulässigen Grenzwerte ausgewählter Stoffe basierend ihrer tatsächlichen Auswirkungen auf die Elektrolyse-Komponenten zur Folge haben.

Aus den untersuchten Herstellerangaben lässt sich zudem ein weiterer Trend ableiten: Während insbesondere kleinere Anlagen mit integrierter Wasseraufbereitung angeboten werden, so wird bei Großanlagen über ca. 5 MW in der Regel die Wasseraufbereitung in jedem Fall projektspezifisch konzipiert und erlaubt damit Anpassungen an besondere regionale Gegebenheiten (Rohwasserqualität) oder optimiertes internes Wassermanagement.

### 2.3.3. Wasseraufbereitung

Die Intensität des Reinigungsprozesses im Zuge der Reinst- bzw. Prozesswasseraufbereitung und -bereitstellung hängt im hohen Maße von der zur Verfügung stehenden Rohwasserquelle ab. Während in der Projektklasse heute bestehender Elektrolyseure meist Leitungswasser als Rohwasserquelle angenommen wird<sup>10</sup>, spielen insbesondere bei großskaligen, industriellen H<sub>2</sub>-Erzeugungsprojekten zukünftig wohl auch andere Rohwasserquellen eine wichtige Rolle.

Im Folgenden werden die wesentlichen Grundlagen und Aspekte der Wasseraufbereitung im Zuge der Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse erläutert. Dies umfasst sowohl eine Kurzerläuterung der unterschiedlichen Verfahren bzw. Stufen der Rohwasseraufbereitung als auch eine Diskussion potenzieller Rohwasserquellen und ihrer Eigenschaften. Ziel ist die Beschreibung der Auswirkungen der Wasseraufbereitung auf den Wasserbedarf der Elektrolyse.

#### **Technologieübersicht der Wasseraufbereitung**

Die Wasseraufbereitung ist aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen der Elektrolyse ein wesentlicher Bestandteil von Elektrolyseanlagen, um Auswirkungen von Verunreinigungen auf die Lebensdauer von Elektrolyseuren zu vermindern. Dabei wird die Wasseraufbereitungstechnologie in der Regel durch einen separaten Technologieanbieter auf die Bedürfnisse bzw. Anforderungen des Elektrolyseherstellers angepasst.

Im Allgemeinen lässt sich die Versorgung mit Wasser für die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse mit verschiedenen Schritten und Reinigungstechnologien beschreiben, auf die im Nachfolgenden

---

<sup>10</sup> Dabei sei zu beachten, dass der Begriff Leitungswasser hier das durch Wasserwerke über die Wasserleitung an den Endverbraucher zur Verfügung gestellte Wasser in Trinkwasserqualität beschreibt. Meist wird Grundwasser als ursprüngliche Wasserquelle der Wasserwerke genutzt.

eingegangen werden soll [Eurowater o. D.; Herco o. D.]. Es sei erwähnt, dass je nach Rohwasserquelle und Qualitätsanforderungen nicht alle Stufen der Aufreinigung Anwendung finden. Ein beispielhaftes Fließschema mit den unterschiedlichen Aufbereitungsschritten eines PEM-Elektrolyseurs ist in Abbildung 2-9 dargestellt.

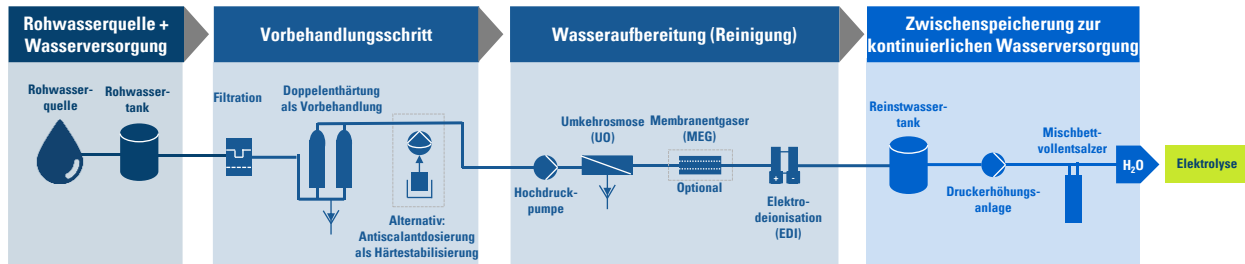


Abbildung 2-9: Mögliche Schritte der Vorbehandlung und Aufbereitung im Rahmen der Wasserbereitstellung für die Elektrolyse (Beispiel: PEMEL).

Quelle: LBST nach [Herco o. D.]

Zur Sicherstellung der Wasserqualität innerhalb des Prozesswasserkreislaufs ist überdies die Anwendung von UV-Anlagen und ggf. einer weiteren Stufe eines Mischbettvollentsalzers oder Elektrodeionisation (EDI) im sog. „Polishing“ sowie eine kontinuierliche Überwachung der Leitfähigkeit sowie anderer Kennwerte wie des TOC-Gehalts notwendig. Insbesondere die Nutzung von Mischbettvollentsalzern erlauben es, die Wasserqualität ohne zusätzliche Wasserverluste sicherzustellen. Dies dient im Falle der PEMEL oder AEMEL dazu, eine Aufkonzentration der verbleibenden Ionen oder Einträge aus den Komponenten des Elektrolyseurs (z.B. Metallionen oder Fluorid) in dem intern umgewälzten Prozesswasserstrom zu verhindern. Ein konkretes Projektbeispiel für eine 1 GW-PEM-Elektrolyse in [ISPT 2022] beschreibt, dass aufgrund der hohen umgewälzten Wassermenge die erforderlichen „Polishing“-Kapazitäten mit etwa 500 m<sup>3</sup>/h sogar doppelt so hoch ausfallen, wie die erforderliche Wasseraufreinigung. Im Vergleich zum gesamten Durchsatz des Prozesswasserkreislaufs<sup>11</sup> wird jedoch nur ein Teilstrom dem kontinuierlichen Polishing zugeführt (ca. 1 bis max. 10 %) [ISPT 2022, EUROWATER 2021]

Bei der AEL wird das gereinigte Wasser dagegen dem Elektrolyt-Strom beigefügt (KOH), sodass keine kontinuierliche Aufreinigung möglich ist. Stattdessen ist wegen der Aufkonzentration ein kompletter Austausch der Elektrolytlösung nach einigen Jahren nötig. Im Falle der HTEL wird Dampf und nicht Wasser der Elektrolysezelle zugeführt. Folglich sind Ablagerungen von Feststoffen im internen Dampfkreislauf unwahrscheinlich.

Natürlich sind in Abhängigkeit der Wasserquelle, der Anforderungen und der Elektrolysetechnologie auch weitere Konzepte zur Wasseraufbereitung möglich und nötig. So beschreibt der Elektrolysehersteller Plug Power etwa einen Reinigungsprozess mit einer zweistufigen Umkehrosmose und Rückführung diverser Konzentratströme in vorhergehende Reinigungsprozesse [Plug Power 2022]. Dabei betont das Unternehmen, den Gesamtwasserbedarf der Anlage möglichst auf ein Minimum reduzieren zu wollen und

<sup>11</sup> Für einen ausreichenden Wärmeabtransport aus der Elektrolysezelle ist der Durchsatz im Prozesswasser etwa um den Faktor 250-500 größer als der des zugeführten Reinstwassers. Hierdurch ergeben sich auch die hohen Kostenanteile für Pumpen am Gesamtsystem des Elektrolyseurs [EUROWATER 2021].

entsprechend diverse Abwasserströme (etwa der Umkehrosmose oder Elektrodeionisation) in vorhergehende Reinigungsprozesse zurückzuführen. Auch die Integration der Elektrolyse in bestehende Industrieanlagen mit zum Teil schon existierenden Deionat-Strömen (etwa für die Kühlwasserversorgung) erfordert individuelle Konzepte der Wasseraufbereitung. Die erforderlichen Modelle zur optimalen Anlagenauslegung sind erprobt und die Aufreinigungstechnologien seit vielen Jahren im Einsatz.

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Methoden beschrieben, die im Zuge der Wasseraufbereitung und -reinigung Anwendung finden [Eurowater o. D.; Herco o. D.].

### A) Vorbehandlung / Vorreinigung

Die **Filtration** dient im Rahmen der Vorbehandlung des Rohwasserstroms der Trennung von Feststoffen (z. B. Schwebeteilchen oder Partikel bis zu einer gewissen Mindestgröße) aus Flüssigkeiten bzw. gelösten Substanzen. Ziel ist es, eine Verblockung oder Schädigung nachfolgender Prozessschritte zu verhindern, etwa der Ionenaustauscherharze oder Membranen. Während des Filtrationsprozesses durchströmt das Rohwasser ein poröses Filtermedium, das die ungelösten Partikel aufgrund ihrer Größe mechanisch wie auch physikalisch (Adsorption) zurückhält. Als Filtermaterialien können beispielsweise Aktivkohle oder Sand eingesetzt werden.

Die **Enthärtungseinheit** reduziert die Härte des Wasserstroms, indem es die Ionen schwer löslicher Salzverbindungen (z. B. Kalziumcarbonat (Kalk), aber auch Magnesiumsalze) durch Ionen austauscht, deren Salze leichter löslich sind. Hierdurch wird beispielsweise in der nachfolgenden Umkehrosmose die Verblockung der Membran durch Carbonatausfällung verhindert. Der Wasserstrom wird dazu über stark saure Austauschharze geleitet. Das Wasser ist nach der Behandlung nahezu frei von Härtebildnern und erreicht Resthärten von weniger als 0,1 °dH (Grad deutscher Härte)<sup>12</sup>. Es ist wichtig, anzumerken, dass während des Enthärtungsprozesses lediglich Ionen ausgetauscht werden, sich der Gesamtsalzgehalt jedoch nur minimal verändert. Sobald die Harzkapazität erschöpft ist, d. h. alle Natriumionen durch Calcium- oder Magnesiumionen ersetzt wurden, erfolgt die Regeneration durch eine entsprechende Salzlösung.

---

<sup>12</sup> Gesamthärte von 1 °dH entspricht 10 mg Calciumoxid (Branntkalk) je Liter Wasser. Die Wasserhärte des Trinkwassers in Deutschland liegt bei durchschnittlich 16,6 °dH [wasserhaerte.net o. D.]. Ab 14 °dH bzw. > 2,5 mmol Calciumcarbonat je Liter spricht man von hartem Wasser.

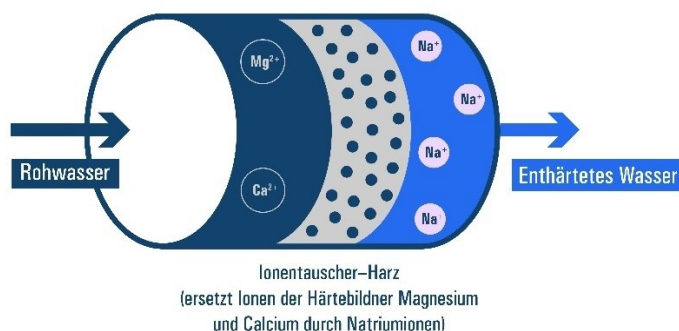


Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Enthärtung mittels Ionenaustauscherharz.

Quelle: nach [Herco o.D.]

## B) Reinigung

Die weitere Aufreinigung des Wassers auf die für die Elektrolyse erforderliche Qualität erfolgt anschließend typischerweise durch das Verfahren der Umkehrosmose, kombiniert (wo erforderlich) mit weiteren Reinigungsschritten wie Membrantengaser, (kontinuierlicher) Elektrodeionisation sowie durch Mischbett-Ionenaustauschzylinder.

### Umkehrosmose:

Wesentliche Technologie zur Aufreinigung von Wasser ist die sog. **Umkehrosmose** (UO): Dabei werden auf Basis rein physikalischer Prinzipien Flüssigkeiten mithilfe einer semipermeablen Membran getrennt. Durch Anlegen eines Drucks auf das salzhaltige Wasser (oberhalb des natürlichen osmotischen Drucks) diffundiert entsalztes Wasser (Permeat) durch die Membran und zurück bleibt ein aufkonzentrierter Wasserstrom (Retentat, auch Konzentrat = „aufgesalztes“ Wasser). Um eine zu starke Konzentration auf einer Seite der Membran zu verhindern, wird das Konzentrat kontinuierlich durch einen Spülstrom abtransportiert. Die Ausbeute der Umkehrosmose ist neben Druck und Membran auch von der Salzkonzentration im Rohwasser sowie von der Temperatur abhängig [Veolia Water Technologies o. D.]. Der vorgeschaltete Prozess der Hochdruckpumpe ist insgesamt im Rahmen der Reinstwasseraufbereitung als besonders energieintensiv einzustufen.

Eingesetzt wird die Umkehrosmose sowohl zur Meerwasserentsalzung (Wasserquelle mit hohem Salzgehalt, siehe Tabelle 2-6) als auch zur Demineralisierung von bereits vorbehandeltem Wasser. Der Energieaufwand und damit die Kosten steigen jedoch mit zunehmender Salzkonzentration im Eingangsstrom linear an.

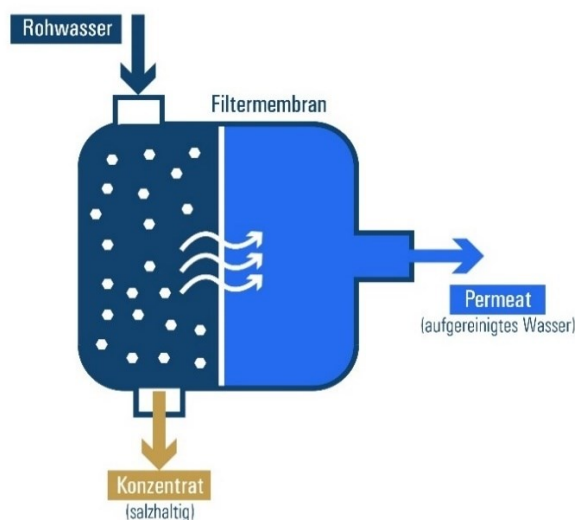


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Umkehrosmose.

Bei der Umkehrosmose können Lösungen zum Wasserrecycling in den Kreislauf eingebunden werden, um „Abwasserströme“<sup>13</sup> zu minimieren. Hierzu wird der Konzentratstrom erneut der Rohwasserversorgung zugeführt, um die Permeat-Ausbeute von etwa 75 % auf 80–85 % zu steigern. Dadurch bleiben bei 100 Litern Rohwasser 15–20 Liter Konzentrat zurück [Veolia Water Technologies o. D.].

#### Membranentgasung:

Um die Menge an gelöstem Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) im Permeat der Umkehrosmose (oder ggf. auch zwischen zwei hintereinander geschalteten RO-Anlagen) zu reduzieren, kann überdies eine **Membranentgasung (MEG)** vorgenommen werden. Dabei wird gelöstes CO<sub>2</sub> durch eine semipermeable Membran aus PP-Hohlfasern geleitet. Während Gase (hier CO<sub>2</sub>) die Membran passieren können, wird das Wasser zurückgehalten. Ziel ist eine Reduktion der Leitfähigkeit des Permeats und der Belastung der nachgeschalteten Elektrodeionisation (EDI). Für optimale Ergebnisse werden Permeat und Strippluft meist im Gegenstrom geführt (siehe Abbildung 2-12). Mittels der Membranentgasung kann der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Wasser auf Werte < 2 mg/l (ppm) (im Strippluftbetrieb) bzw. auf Werte < 1 mg/l (ppm) (in Kombination mit einer Vakuumpumpe) gesenkt werden [Herco o. D.].

<sup>13</sup> Hinweis: Ein wichtiger Vorteil einer Umkehrosmoseanlage im Rahmen der Wasseraufbereitung besteht darin, dass das anfallende Konzentrat in der Regel nicht weiter gereinigt oder nachbehandelt werden muss, sondern über einen Verdampfer aufkonzentriert oder direkt in die Kanalisation eingeleitet werden kann [Gross Wassertechnik o. D.].



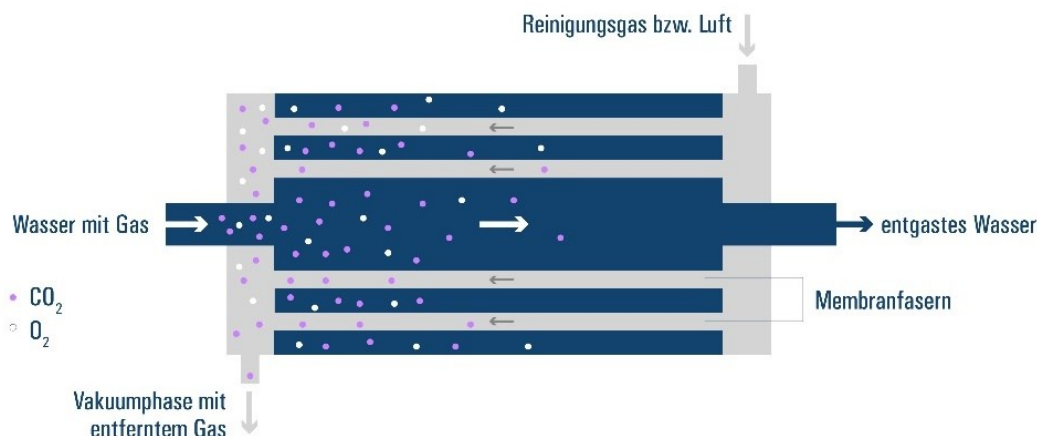


Abbildung 2-12: Funktionsschema Membranentgasung.

Quelle: nach [Hydrogroup 2023]

### Elektrodeionisation (EDI):

Der Aufbereitung mittels RO-Anlage folgt in der Regel (teilweise sogar integriert in einem Modul) die **Elektrodeionisation (EDI)**. Dabei wird der Salzgehalt des Permeats der Umkehrosmoseanlage weiter reduziert, sodass Leitfähigkeiten des sogenannten Diluats von etwa 0,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  und bei Bedarf bis zu ca. 0,056  $\mu\text{S}/\text{cm}$  erreicht werden können. Dies ist folglich nur erforderlich, wenn der Elektrolysehersteller diese strengen Anforderungen an die Wasserqualität stellt (insb. bei PEMEL). Die Anwendung der Technologie geht neben zusätzlichen Investitionskosten auch mit dem Erfordernis einer kontinuierlichen Überwachung des Eingangswasserstroms einher. Ein Vorteil der Technologie ist dabei ihr kontinuierlicher und unterbrechungsfreier Betrieb, ohne den Einsatz von Chemikalien oder Regenerationszyklen, was eine platzsparende Bauweise der Anlage erlaubt. Eine EDI besteht aus mehreren Zellen bzw. Kammern, die zusammen einen Elektrodialyse-Stack bilden. Die einzelnen mit sog. Ionenaustauscherharz gefüllten Zellen bzw. Kammern sind voneinander durch ionenselektive Membranen getrennt. Durch Anlegen einer Spannung wandern die negativ geladenen Ionen (Anionen) zur Anode und die positiv geladenen Kationen zu Kathode. Neben dem entsalzten Diluat entsteht auch ein Konzentrat. Dieses aufkonzentrierte UO-Permeat kann anlagenintern rezirkuliert oder für andere Zwecke eingesetzt werden. Eine separate Neutralisierung bzw. Entsorgung ist nicht erforderlich [Herco o. D.].

### Weiteres:

Als Puffertank nach EDI- oder Mischbettanlagen werden im Allgemeinen **Wassertanks** aus glasfaserverstärktem Kunststoff eingesetzt. Um Luftkontakt und dadurch eine Verunreinigung des Reinstwassers zu vermeiden, kann die Wasseroberfläche mit Stickstoff befüllt werden. Weitere Methoden sind eine Abdeckung der Kontaktfläche mit einer Folie oder einem plattenförmigen Schwimmdach, wobei es üblich ist, den Tank zusätzlich mit Stickstoff abzudichten [FRPZF o. D.].

Weitere Aufbereitungsschritte sind etwa ein **Mischbettvollentsalzer** oder eine **UV-Anlage**. Beim Vollentsalzer handelt es sich um einen Ionenaustauscher, der sowohl positiv als auch negativ geladene Ionen in einem Arbeitsschritt aus dem Wasser entfernt. Hierzu werden getrennte Anionen- und Kationenaustauscher verwendet. Das unreine Wasser fließt dabei in einen Behälter mit Mischbettharz, das

die Ionen an sich bindet und durch Wasserstoff- und Hydroxidionen ersetzt. Neutral geladene Teilchen werden bei dem Verfahren nicht entfernt [Wassertechnik-Shop o. D., Lenntech o. D.]. **UV-Anlagen** dienen der Desinfektion von Wasser, wobei durch Niederdruckstrahler UV-Licht vorwiegend mit einer Wellenlänge von 254 nm und einer Mindeststrahlungs-dosis von 400 J/m<sup>2</sup> emittiert wird. Für eine wirksame Abtötung von Mikroorganismen ist eine gleichmäßig starke Durchstrahlung des Wassers in der Anlage notwendig, weshalb dieses davor klar filtriert sein muss. Zudem müssen zuvor Eisen und Mangan aus dem Wasser entfernt worden sein, um das Bilden von Belägen an den Strahlenschutzrohren zu verhindern [EUWA o. D.].

### **Potenzielle (Roh-)Wasserquellen für die Wasserstoffproduktion**

Je nach Region sind unterschiedliche Rohwasserquellen für die Wasserstoffproduktion verfügbar. Natürliche Wasserressourcen können nach [Baldinelli et al. 2022] etwa anhand ihrer Salzgehalte nach Brackwasser sowie Meer- und Salzwasser unterschieden werden. Während Brackwasser nur einen geringen Salzgehalt unter 10 ppt (< 0,1 %) aufweist, liegt der Salzgehalt der Ostsee beispielsweise zwischen 0,3 und 1,8 %. Darüber hinaus kann er in salzwasserführenden Schichten, etwa salinen Aquiferen, auf über 50 ppt (> 5,0 %) ansteigen. Letztere sind aufgrund ihres hohen Salzgehalts für die Leitungswassergewinnung ungeeignet [LfULG 2010].

Überdies stehen auch anthropogene Abwasserströme als potenzielle Rohwasserquellen zur Verfügung. In diesem Zusammenhang seien auch kurz Technologien zur direkten Wasserstoffproduktion aus Abwasser genannt, die aufgrund ihres geringen Entwicklungsstadiums jedoch noch keinen Einzug in die großskalige Wasserstoffproduktion gefunden haben. [Aydin et al. 2022] beschreiben dabei unterschiedliche Prozesse, die sich auf Basis ihrer allgemeinen Betriebsweisen unterscheiden: darunter etwa die biochemische Fermentation (z. B. auf Basis von Abwässern der Lebensmittelindustrie, Brauereien oder Molkereien) oder thermische Prozesse wie Vergasung oder Pyrolyse zur Produktion. Weitere potenzielle Verfahren sind Elektrodialyse, Photokatalyse oder der direkte Einsatz der Elektrolyse. Als ausgewähltes Beispiel wird in Anhang auf die Schmutzwasser-Plasmalyse als Wasserstoffproduktionstechnologie aus stark stickstoffhaltigem Abwasser eingegangen. Auch sei an dieser Stelle auf Forschungsarbeiten zur direkten Nutzung von salzhaltigem Meerwasser für die Elektrolyse verwiesen (siehe z. B. [Dresp et al. 2019]).

Tabelle 2-6 beschreibt die unterschiedlichen Rohwasserquellen hinsichtlich ihrer Eignung bzw. ihres Aufreinigungsbedarfs hinsichtlich einer Anwendung in der Elektrolyse.

Tabelle 2-6: Übersicht: Eigenschaften unterschiedlicher Rohwasserquellen und Auswirkungen auf Wasseraufreinigung

Quelle: eigene Analysen, [Simoes et al. 2021], [eurowater 2021]

Wasserquelle	Typische Verunreinigungen	Überlegungen hinsichtlich Nutzung als Wasserquelle für Elektrolyse	Aufreinigungsbedarf für Nutzung in Elektrolyse
Öffentliche Wasserversorgung / Leitungs- bzw. Trinkwasser	Gelöste Feststoffe	Hohe Qualität nach TrinkwV 2023. Trinkwasserversorgung allerdings mit prioritärer Nutzung vor Industriebedarf. Standardlösung für heutige Elektrolyseprojekte. Bedarf von Großelektrolyseuren u. U. zu hoch für regionales Wasserversorgungsnetz.	Keine Vorbehandlung erforderlich, Reinigung durch Umkehrosmose, EDI (je nach Qualität)
Grundwasser	Gelöste Feststoffe	Im Allgemeinen sehr hohe Qualität durch natürliche Bodenfiltration; kann bestimmte Ionen enthalten. Grundwasserdargebot regional sehr unterschiedlich.	Ggf. Vorbehandlung (Filtration) + Umkehrosmose, EDI (je nach Qualität)
Oberflächenwasser (Flüsse, Seen)	Gelöste Feststoffe, biologische Verunreinigungen	Hohe Qualität, reichlich Durchfluss mit kontinuierlicher Verfügbarkeit, Flusstände können im Sommer stark sinken.	Vorbehandlung (Feinsiebung, Koagulation/Filtration), Umkehrosmose, EDI
Regenwasser	Gelöste Feststoffe	Im Allgemeinen gute Qualität, enthält Fremdstoffe durch Gasabsorption oder Bodendrainage, erfordert große Tanks bzw. Speicher zur Gewährleistung kontinuierlicher Wasserverfügbarkeit.	Vorbehandlung (Feinfiltration), Umkehrosmose & EDI
Abwasser	Schwebstoffe, abhängig von Aufbereitung und Quelle	Abwasserbehandlung vor Umkehrosmose in der Regel erforderlich.	Aufbereitung in Kläranlage, anschl. Vorbehandlung (Koagulation + Filtration), Umkehrosmose & EDI
Meerwasser	Hoher Salzgehalt	Nutzung wegen hohen Energiebedarfs meist nur, wenn keine anderen Wasserquellen verfügbar. Enthält hohe Mengen gelöster Feststoffe. Regionale Verfügbarkeit unterschiedlich.	Feinsiebung, i. d. R. zweistufige Umkehrosmose (Entsalzungsanlage), EDI

EDI = Elektrodeionisation

Die regionale Verortung dieser Studie erlaubt hinsichtlich des verfügbaren Wasserdargebots eine Fokussierung auf die allgemeine Trinkwasserversorgung. Weitere Rohwasserquellen umfassen etwa Grundwasser, Oberflächenwasser (in Seen und Flüssen und als potenziell weitere Quelle aufgefangenes Regenwasser). Daneben stellt auch die Nutzung (aufgereinigter) Abwasserströme aus Kläranlagen oder Industrieprozessen eine weitere Option dar. Der großflächige Einsatz von Meerwasser durch Salzwasserentsalzungsanlagen wird dagegen im Kontext dieser Studie ausgeschlossen. Eine detaillierte

Beschreibung der jeweiligen Wasserquellen sowie deren Verfügbarkeit im Bundesland Brandenburg findet sich in der Diskussion des brandenburgischen Wasserhaushalts in Kapitel 3.3.

Neben den genannten Quellen können durch die Einbindung der Elektrolyse in nachgelagerte Prozesse zur Bildung gasförmiger oder flüssiger Derivate (Power-to-Gas/PtG oder Power-to-Liquid/PtL) weitere Wasserquellen genutzt werden (siehe auch Fallbeispiel in Kapitel 4.3.4). Hintergrund ist die für diese Prozesse erforderliche Bereitstellung von CO<sub>2</sub>, etwa bei der Methanolherstellung. Bei CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) wird neben CO<sub>2</sub> auch Wasser kondensiert. Laut Angaben des Herstellers Climeworks kann die bereitgestellte Menge bei Niedertemperatur-DAC-Anlagen bei etwa 1.000 Liter pro abgeschiedener Tonne CO<sub>2</sub> liegen [Viebahn et al. 2019]. Auch die Kondensation aus Kühltürmen der Industrie ist prinzipiell denkbar (Kondensatströme), um durch geschlossene Systeme die Abgabe von Wasser an die Atmosphäre zu reduzieren. Theoretisch sind auch Wasserabscheideanlagen aus der Luft denkbar, jedoch wird hier der hohe Energieverbrauch als wesentliches Hindernis für den großskaligen Einsatz angeführt [Correia et al. 2023].

Zusammenfassend lassen sich die erforderlichen Wasseraufbereitungs- und -versorgungsinfrastrukturen für die Elektrolyse in Abhängigkeit von der jeweiligen Wasserquelle vereinfacht wie folgt darstellen.

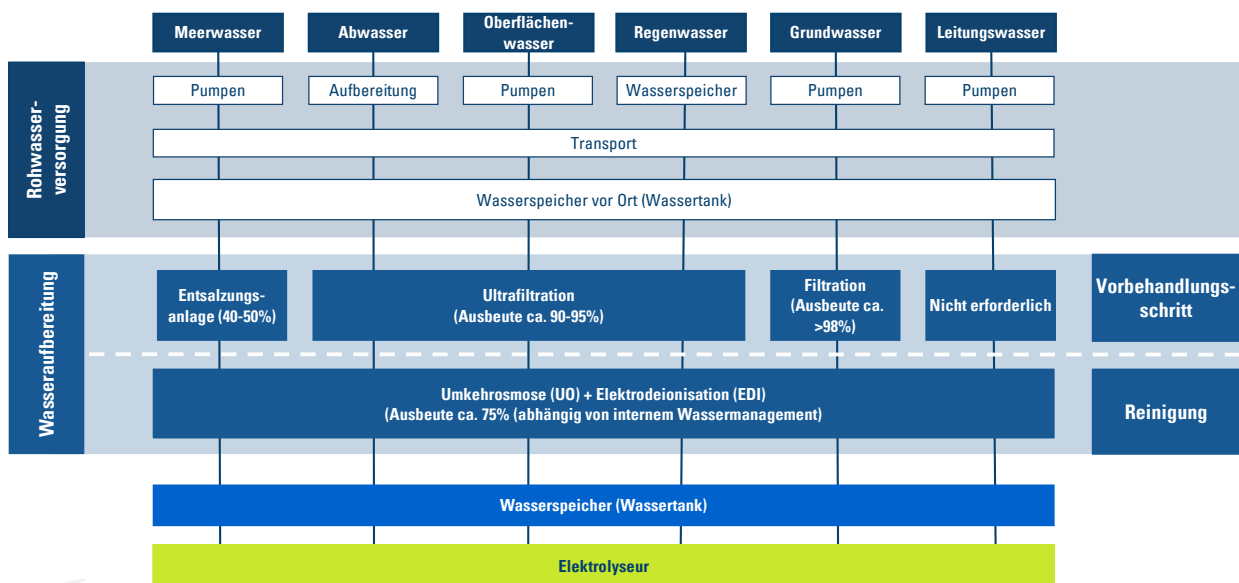


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Wasserversorgung (inkl. -aufbereitung) eines Elektrolyseurs bei der Nutzung von Rohwasser aus unterschiedlichen Quellen.

Hinweis: Beispielhafte Darstellung. Reinigungsschritte und Prozessausbeuten können je nach Projekt und Eigenschaften der Rohwasserquelle variieren. LBST nach [Simoes et al. 2021]

Der Einsatz von Leitungs- bzw. Trinkwasser stellt im Vergleich zu anderen Optionen geringere Erfordernisse an die Vorbehandlung. Bei der Nutzung von Oberflächenwasser oder Abwasser müssen beispielsweise zusätzlich in einem Vorbehandlungsschritt biologische und bakterielle Verunreinigungen entfernt werden. Die Kernprozesse zur Wasseraufbereitung in Form der Umkehrosmose und der Elektrodeionisation sind dagegen bei allen Rohwasserqualitäten erforderlich, bei einer typischen Ausbeute von etwa 75 % [EUROWATER 2021].

Für die Wasserversorgung sind neben Pumpen und Transportleitungen auch die Speichertanks vor und nach der Wasseraufbereitung vorzusehen, um eine kontinuierliche Versorgung sicherzustellen. Bei der Nutzung von Regenwasser ist hierfür ein großer Wasserspeicher in Form eines Sees oder Auffangbeckens notwendig.

### 2.3.4. Kühlwasser- bzw. Wärmemanagement

Für die Ableitung der Wasserbilanz für die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse sind neben den Mengen- und Qualitätsanforderungen an das Prozesswasser auch einige weitere Aspekte hinsichtlich Kühlwasser- und Wärmemanagements zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere, da das eingesetzte Kühlkonzept (durch Verdunstung, Kondensatströme und Abschlämmwasser) einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Wasserbedarf der Anlage haben kann. Dabei ist auch eine generelle Unterscheidung zwischen den Elektrolysetechnologien sinnvoll.

Niedertemperaturprozesse mit Betriebstemperaturen unter 100 °C (AEL, PEMEL, AEMEL) müssen aktiv gekühlt werden, um Umwandlungsverluste bei der Reaktion von Strom zu Wasserstoff in Form von Wärmeabgabe zu kompensieren. Die erforderliche Kühlleistung hängt damit direkt mit dem Wirkungsgrad des Elektrolyseurs zusammen. Nach [EUROWATER 2021] ist eine Flussrate von etwa 50-100 m<sup>3</sup>/h pro MW<sub>el</sub> erforderlich, um den internen Temperaturanstieg des Prozesswassers auf etwa 2-4 °C zu limitieren. Entsprechend groß sind die erforderlichen Pumpsysteme auszulegen. Für die weitere Auslegung des Kühlsystems ist zu berücksichtigen, dass der Wirkungsgrad durch die Stack-Alterung mit Verlauf der Lebensdauer sinkt. Folglich sollte die final erwartete Kühlleistung für die Planung des Kühlsystems zugrunde gelegt werden. [H-Tec 2023] beschreibt die Wärmeleistung für ein 1 MW<sub>el</sub>-PEMEL-System mit 170 kW (BoL) bis 350 kW (EoL). Analysen in [ISPT 2022] gehen die Autoren im Rahmen einer technischen Machbarkeitsstudie für eine (zukünftige) 1-GW-Elektrolyseanlage<sup>14</sup> bei einem angenommenen Systemwirkungsgrad von etwa 65 %<sup>15</sup> bei Volllastbetrieb einen Kühlbedarf von mindestens 140 MW (AEL) bzw. 160 MW (PEMEL). Durch Degradationsprozesse steigt damit die Wärmeabgabe von den ursprünglichen 140–160 MW über die Lebensdauer des Stacks auf 230 MW (AEL) bzw. 265 MW (PEMEL) an. Weitere Kühlbedarfe von etwa 35 MW ergeben sich außerdem für die angenommene Wasseraufbereitungsanlage sowie, in kleineren Maßstab, für die erforderlichen Gleichrichter/ Transformatoren. Je nach Technologie und Einsatzgebiet sind außerdem weitere Prozesse wie Gasreinigung und Kompression zu berücksichtigen.

Die Hochtemperaturelektrolyse (HTEL) benötigt dagegen ohnehin eine externe Wärmezufuhr zur Erzeugung des Wasserdampfs und zur Erreichung der Prozesstemperatur von > 700 °C benötigt. Der hohe Wirkungsgrad der Technologie kann daher insbesondere bei entsprechender Kopplung mit anderen (Industrie-)Prozessen erreicht werden, die als Wärme- und/oder Dampfquelle fungieren. Externe Dampfkreisläufe können, je nach Menge an Verunreinigungen, potenziell direkt genutzt werden oder durch Wärmetauscher als getrennte Kreisläufe betrieben werden.

---

<sup>14</sup> Das entsprechende Anlagendesign für die 1-GW-Elektrolyseanlage wurde im Rahmen des Projekts „Hydrohub GigaWatt-Scale Electrolyzer“ für einen Standort in den Niederlanden entwickelt. Im Rahmen der Studie wurde sowohl die Nutzung der AEL- als auch der PEM-Technologie analysiert. Formuliertes Ziel ist es, die Anlage bis zum Jahr 2030 in Betrieb zu nehmen.

<sup>15</sup> Bezogen auf den Heizwert H<sub>i</sub>. Dies entspricht den Angaben des Systemwirkungsgrads von 75,8 % (AEL) bzw. 77,0 % (PEMEL) bezogen auf den Brennwert H<sub>s</sub> bzw. einem Stack-Wirkungsgrad von etwa 80 %.

[GHD 2023] beschreibt qualitativ die theoretisch denkbaren Optionen zur Kühlung von Wasserstoffproduktionstechnologien sowie die jeweiligen Auswirkungen auf die Wassermenge, die Kosten (CAPEX und OPEX) sowie den Energiebedarf (siehe Tabelle 2-7). Details zu den jeweiligen Kühltechnologien sind in Tabelle 2-8 zusammengefasst.

Tabelle 2-7: Qualitative Übersicht unterschiedlicher Kühlstrategien  
LBST nach GHD 2023

Kühlkonzept	Wasseraufbereitungsbedarf	Entnommene Wassermenge	Rückgeleitete Wassermenge	CAPEX	OPEX	Energiebedarf
<b>Durchlaufkühlung</b>	Oberflächen- oder Meerwasser	++	++	-	0	-
<b>Verdunstungskühlung</b>	Oberflächen- oder manchmal Meerwasser	+	--	0	0	0
<b>Trocken-/Luftkühlung</b>	Demineralisiertes oder Leitungswasser	--	--	+	+	+
<b>Trocken-/Luftkühlung inkl. adiabatischer Kühlung</b>	Demineralisiertes oder Leitungswasser	0	-	+	0	+
<b>Abwärmenutzung/ Fernwärme</b>	Demineralisiertes oder Leitungswasser	--	--	++	+	-
<b>Kühler oder Kältemaschinen</b>	Demineralisiertes oder Leitungswasser	--	--	+	+	+

- Qualitative Bewertung: ++ = sehr hoch, + = hoch, 0 = mittel, - = gering, -- = sehr gering

Tabelle 2-8: Kurzbeschreibung unterschiedlicher potenzieller Kühlungsstrategien für Elektrolyseure

Kühlkonzept	Kurzbeschreibung <sup>16</sup>
<b>Durchlaufkühlsysteme</b>	Wasser wird einem Wasserkörper (z. B. Fluss) entnommen und einmalig zur Kühlung der Anlage genutzt, bevor das erwärmte Kühlwasser zurückgeleitet wird. Insbesondere im Kraftwerksbereich ist die Durchlaufkühlung die vorherrschende Kühlform (deckt fast 95 % des zu Kühlzwecken in der Energieversorgung eingesetzten Wassers) [UBA 2019].
<b>Verdunstungskühlung bzw. Nasskühlung (als offenes System oder Hybrid)</b>	Bei der Verdunstungskühlung wird die Abwärme an Wasser abgegeben, das dadurch zur Verdunstung gebracht wird und in Form von Dampf über Kühltürme an die Umgebung abgegeben wird. Die Wasserentnahme ist bei diesen Systemen deutlich geringer als bei der Durchlaufkühlung (etwa 2–3,5 % [UBA 2019]), da jeweils nur der Verdunstungs-

<sup>16</sup> Für weitere Details zu den unterschiedlichen Kühltechnologien (Verdampfungskühlung, Hybrid, Trockenkühlung, Adiabatische Kühlung) sei an dieser Stelle auf die Hersteller verwiesen, beispielsweise: <https://www.evapco.eu/de/kuehlungstechnologien>.



Kühlkonzept	Kurzbeschreibung <sup>16</sup>
	<p>verlust sowie potenzielle Abschlammwasser (zur Vermeidung von Ablagerungen im Kühlkreislauf) ausgeglichen werden muss. Es findet jedoch keine Rückleitung in den Wasserkörper statt.</p> <p>Durch Einsatz hybrider Systeme mit der Kombination eines geschlossenen und eines offenen Kühlkreislaufs, welche durch Wärmetauscher verbunden sind, können sich Vorteile hinsichtlich Wasserbedarf und Reinigungsanforderungen ergeben.</p>
<b>Trocken-/Luftkühlung (geschlossenes System)</b>	<p>In diesem Fall erfolgt der Abtransport der Abwärme über einen geschlossenen Kühlkreislauf. Um Keimbildung und Korrosion in dem geschlossenen Wasserkreislauf zu vermeiden, ist der Zusatz von Frostschutzmitteln sowie eine Entgasung gängig. Über Wärmetauscher (etwa in Form großer Lüfter) wird die Wärme an die Umgebungsluft abgegeben.</p> <p>Wird überdies die Verdunstungskälte von zusätzlichem (enthärtetem) Sprühwasser an der Oberfläche des Kühlsystems genutzt, spricht man von einer adiabatischen Kühlung. Diese zusätzliche Form der Kühlung kommt dann zum Einsatz, wenn eine Luftkühlung aufgrund zu hoher Außentemperatur nicht mehr ausreichend möglich ist. Hierdurch können auch Lärmemissionen durch die Luftkühlung reduziert werden.</p>
<b>Abwärmenutzung (Fernwärmenetz)</b>	<p>Statt an die Umgebung kann die entstehende Wärme auch an ein Nah- bzw. Fernwärmenetz angeschlossen und damit für andere Verbraucher nutzbar gemacht werden. Erforderlich ist dabei, insbesondere bei Großanlagen, meist eine regionale bzw. kommunal integrierte Versorgungsstrategie, da hohe Investitionen in die entsprechenden Infrastrukturen erforderlich sind. Zu berücksichtigen ist das relativ geringe Temperaturniveau bei der Wärmeauskopplung. Dieses liegt bei Niedertemperatur-Elektrolysesystemen bei etwa 55–60 °C, sodass ggf. zusätzliche Wärmepumpen erforderlich sind, um höhere Temperaturniveaus zu erreichen [ABO Kraft &amp; Wärme 2023]. [H-Tec 2023] für das 1 MW<sub>el</sub>-PEM-System ME450 eine Übergabetemperatur von 57 C an das Kundensystem.</p>
<b>Kältemaschinen</b>	<p>Überdies ist auch die aktive Kühlung in Form von Kühlern bzw. Kältemaschinen denkbar, spielt aufgrund des hohen Energiebedarfs allerdings eher eine nachgelagerte Rolle.</p>

Die Angaben zum Kühlwasserbedarf variieren zwischen den Herstellern. Hierbei ist zu beachten, dass die angegebenen Wassermengen zwar recht hoch sind, das Wasser jedoch nicht notwendigerweise verbraucht wird, sondern zunächst nur die Angaben zur Auslegung des Kühlsystems darstellen. Die Kühlung selber kann dann je nach Konzept sowohl in offenen oder geschlossenen Kreisläufen umgesetzt werden. Nach Angaben von Sunfire beträgt der Kühlwasserbedarf für das AEL-System HYLINK ALKALINE (10 MW<sub>el</sub>) in Abhängigkeit der Lebensdauer zwischen ca. 770 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (BoL, 150.000 l/h) und 1.460 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (EoL, 285.000 l/h) [Sunfire 2024]. Durch zukünftige Wirkungsgradsteigerungen wird der Kühlbedarf in künftigen Produktgenerationen weiter sinken. Der Hersteller Cummins gibt für den HyLYZER 1000-30 (5 MW<sub>el</sub>) einen Kühlwasserbedarf von umgerechnet max. 1.667 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> an (5-40 °C, max. 10 °C Temperaturdifferenz, max.

2.500 l/min). Die Angaben von [Nel 2021b] für das PEM-System C30 (0.15 MW<sub>el</sub>) liegen bei bis zu 4.400 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (max. 200 l/min bei 35 °C Zulauftemperatur)<sup>17</sup> (siehe Tabelle 2-9).

Mit Blick auf die Kühlwasserbedarfswerte kann bilanziert werden, dass diese einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Wasserbedarf und -verbrauch der Elektrolyse haben können. Geschlossene Systeme mit Trocken-/Luftkühlung haben das Potenzial, die erforderlichen Wassermengen signifikant gegenüber offenen Kühlsystemen zu senken. Nachteilig sind neben den höheren Kosten auch der große Platzbedarf für die entsprechenden Luftkühler. Kombinationen mit adiabatischer Luftkühlung, um die Kühlleistung auch an Tagen mit hoher Umgebungstemperatur reibungslos gewährleisten zu können, sind eine mögliche Alternative, die bereits heute Anwendung findet [ABO Kraft & Wärme 2023]. Hier beschränkt sich der zusätzliche Wasserbedarf auf meist wenige heiße Tage im Jahr. Inwieweit zukünftig ein geschlossenes Kühlsystem (etwa in Form von Luftkühlung) auch bei Großelektrolyseanlagen > 100 MW<sub>el</sub> Anwendung findet, wird stark von den regionalen Anforderungen (Wasserverfügbarkeit und genehmigungsrechtliche Vorgaben abhängen).

Im nachfolgenden Kapitel wird auch der Einfluss unterschiedlicher Kühlkonzepte (Luftkühlung mit geschlossenem Kühlkreislauf, Durchlaufkühlung, Verdampfungskühlung / offenes Kühlsystem) auf den spezifischen Wasserbedarf und -verbrauch des Elektrolyseurs beschrieben.

### 2.3.5. Ableitung des spezifischer Wasserbedarf der Elektrolyse

Aus den vorangegangenen Kapiteln können einige Trends der unterschiedlichen Einflussfaktoren auf den spezifischen Wasserbedarf und -verbrauch der Elektrolyse abgeleitet werden.

- |   |   |
|---|---|
| 1) Elektrolysetechnologie                 | Der Reinstwasserbedarf als Eingangsstrom sowie die für den Elektrolyseprozess erforderliche Wassermenge ist im Allgemeinen technologieunabhängig (9-11 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub> ). Abweichungen sind durch Unterschiede in den internen Prozessströme (Bedarf an Prozesszusatzwasser) bedingt. Weitere Unterschiede mit Auswirkungen auf den Rohwasserbedarf ergeben sich durch die unterschiedlichen Qualitäts- und Kühlungsanforderungen (Wirkungsgradunterschiede). |
| 2) Wasserqualitätsanforderungen           | Die erforderliche Wasserqualität wird in der Regel durch die Elektrolysehersteller vorgegeben und ist sowohl von der Technologie (im Allgemeinen PEMEL > SOEL > AEL > AEMEL) sowie durch die verwendeten Komponenten bestimmt.  |
| 3) Wasseraufbereitung und Rohwasserquelle | Zwar ist die notwendige Wasseraufbereitung hauptsächlich durch Rohwasserquelle und Qualitätsanforderungen bestimmt. Doch ermöglichen Auslegung der unterschiedlichen Reinigungsstufen inkl. interner Wasserkreisläufe und Mehrfachnutzung von beispielsweise Konzentratströmen auch Optionen zur Reduktion des Wasserbedarfs.   |

<sup>17</sup> Wasserbedarf in der Regel stark von Kühlwasserzulauftemperatur abhängig. Bei geringeren Temperaturen sind auch deutlich geringere Kühlwassermengen zu erwarten.

#### 4) Kühlsystem

Der zusätzliche Wasserbedarf für die Versorgung des Kühlwasserkreislaufs ist für Niedertemperaturtechnologien (AEL, PEMEL, AEMEL) relevant, da diese aktiv gekühlt werden müssen. Relevante Kühlkonzepte umfassen (in Reihenfolgen abnehmender Wasserbedarfe) Verdampfungskühlung, hybride Konzepte und Trockenkühlung (=Luftkühlung) mit bzw. ohne adiabatischer Kühlung.

Die hohe Bandbreite in den Herstellerangaben in Tabelle 2-5 von 13 bis zu 33 l Rohwasser pro kg Wasserstoff deutet bereits auf unterschiedliche Möglichkeiten der Ausgestaltung der Elektrolyseanlage hin.

Im Folgenden wird anhand drei exemplarischer Anlagenkonzepte der spezifische Wasserbedarf (in Liter pro kg Wasserstoff) für die Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse basierend aus unterschiedlichen Annahmen zu den oben beschriebenen Parametern (Prozessbedarf, Wasseraufbereitung und Kühlbedarf) abgeleitet. Hierdurch soll der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf den Wasserbedarf der Anlage dargestellt werden. Berücksichtigt werden dabei auch potenzielle Optionen zur Mehrfachnutzung bestimmter Wasserströme. Dabei sei erwähnt, dass die Umsetzungen unterschiedlicher Konzepte auch Auswirkungen auf die Kosten (CAPEX und OPEX) sowie den Energie- und Platzbedarf der Elektrolyse haben und folglich projektspezifisch das erforderliche Maß an Wassereffizienz identifiziert werden sollte. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Wasserqualität wird in allen Fällen zur besseren Vergleichbarkeit von einer PEM-Elektrolyse und der Nutzung von Trinkwasser als Rohwasserquelle ausgegangen.

##### *Konzept A: Elektrolyse mit Trockenkühlung und optimierter Wasseraufbereitung*

Der PEM-Elektrolysehersteller Plug Power beschreibt beispielsweise ein relativ wassersparendes Konzept (Konzept A) mit internen Recyclingströmen im Zuge der Wasseraufbereitung [Plug Power 2022]. In diesem Konzept wird das Permeat der 1. UO-Stufe einer weiteren UO-Stufe zugeführt.<sup>18</sup> Außerdem wird eine Trocken- bzw. Luftkühlung eingesetzt, welche an besonders heißen Tagen durch eine zusätzliche adiabatische Wasserkühlung unterstützt wird. Um diese zusätzlichen Wasserbedarfe zu vermeiden, wäre auch eine entsprechende größere Dimensionierung der Trockenkühlung denkbar.

Nach dem Beispiel von Plug Power's *STAMP Green Hydrogen Production Site* in New York beträgt somit der maximale tägliche Rohwasserbedarf 961.500 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub> (davon ca. 5.5 % für die adiabatische Kühlung), bei einer täglichen Produktionsmenge von 75 Tonnen Wasserstoff. Der spezifische Rohwasserbedarf liegt demnach bei 12,8 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Etwa 23-30 % des eingesetzten Rohwassers gelangen werden als Abwasser abgeleitet. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2-14 gezeigt.

<sup>18</sup> Nach Angaben von [Herco 2023] ist allerdings aufgrund der Druckdifferenz zwischen Konzentrat und Permeat auch die Einleitung des Konzentrats in eine 2. UO-Stufe möglich, um dieses weiter aufzureinigen. In diesem Fall würde das Permeat dieser 2. Stufe der 1. Stufe als Rohwasser (nach vorheriger Druckerhöhung) wieder zugeführt werden können.



### Konzept C: Elektrolyse mit Verdunstungskühlung

Abschließend soll noch ein Extrembeispiel (Konzept C) gezeigt werden, das aus unterschiedlichen Quellen nach [Lee 2023], [Potts 2023] und [GHD 2023] abgeleitet ist. Hierbei wird der theoretische Fall einer Verdampfungskühlung angenommen und das Wasser für diese Wasserkühlung überdies mittels Umkehrosmose aufbereitet. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Fall nur eine Option ist, wenn ausreichend Oberflächen- bzw. ggf. Meerwasser zur Verfügung steht. Dabei verdampfen etwa 42 % des eingesetzten Rohwassers im offenen Kühlsystem der Anlage. Abbildung 2-16 zeigt das entsprechende Fließdiagramm. Während im Fall geschlossener Systeme mit Luftkühlung keine zusätzlichen (kontinuierlichen) Kühlwassermengen erforderlich sind, so betragen diese bei Anwendung der Verdunstungskühlung in diesem Beispiel etwa 35 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, um Verdunstungs- und Abschlammwasserverluste des Systems auszugleichen.

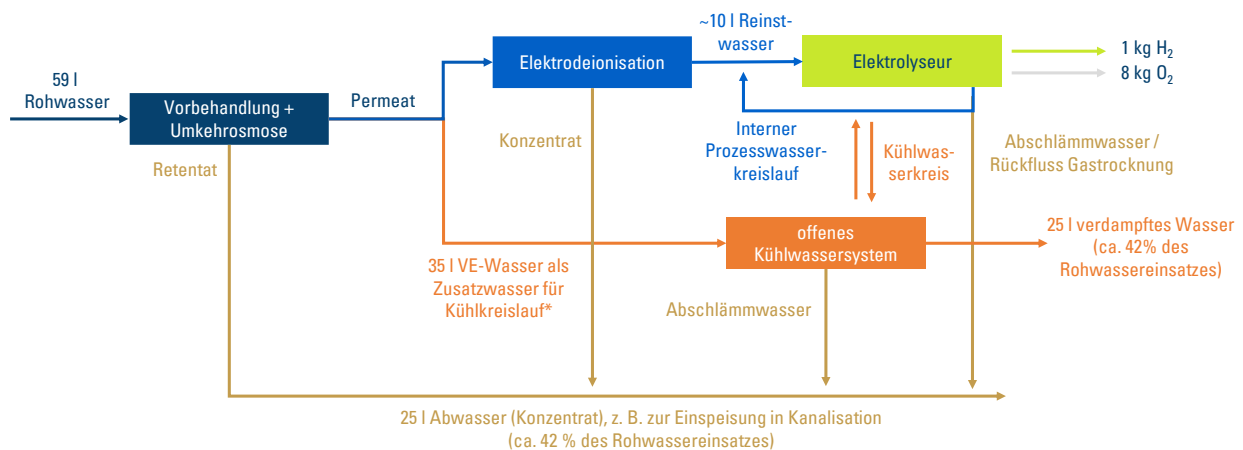


Abbildung 2-16: Konzept C: Wasserströme für Wasseraufbereitung und Elektrolyse für ein System mit Verdampfungskühlung.

LBST nach [Lee 2023, GHD 2023, Potts 2023]

Ein ähnliches System beschreibt [IRENA & Bluerisk 2023] für Wasserstoff, mit einem Gesamtwasserbedarf von 34,7 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Davon entfallen 15,2 l/kg auf das Leitungswasser zusätzliche 19,5 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> auf die Versorgung des (offenen) Kühlkreislaufes. Neben einer Verdampfungs- menge von 14,6 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> fallen außerdem in diesem Beispiel 4,9 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> an aufkonzentriertem Abschlammwasser an<sup>20</sup>, welches je nach Konzentration über die Kanalisation entsorgt oder zukünftig möglicherweise auch einem Wiederaufbereitungsprozess zugeführt werden könnte [Brannock et al. 2022].

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass die gezeigten Konzepte jeweils nur als Beispiele für eine Reihe von möglichen Anlagenausgestaltungen dienen sollen. Je nach Projektauslegung ist eine große Bandbreite an tatsächlichen Wasserbedarfen möglich. So zeigt [GHD 2023] in verschiedenen Fallstudien

<sup>20</sup> Die Autoren in [IRENA & Bluerisk 2023] gehen von einer Eindickungszahl (cycle of concentration) des Kühlwassersystems von 6 an. Der Wert berechnet sich aus dem Verhältnis des Salzgehalts in Wasser, das aus einem Kühlsystem austritt, zu jenem des in das System einfließenden (Frisch-)wassers.

Rohwasserbedarfe von etwa 46 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> bis 120 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> für den Fall einer Verdampfungskühlung und fast 2.000 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> für den Fall einer Durchlaufkühlung.

### Vergleich der Konzepte und Gesamtbilanz

Tabelle 2-9 und Abbildung 2-17 stellen die spezifischen Wasserbedarfe in Abhängigkeit der oben gezeigten Anlagendesigns (Konzept A – C) einander gegenüber.

Die gezeigte Bandbreite für die Konzepte A bis C mit einem Rohwasserbedarf (Trinkwasserqualität) von 13–59 Liter Wasser pro Kilogramm Wasserstoff<sup>21</sup> (kurz: l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>) spiegelt auch die hohe Bandbreite der durch Hersteller (siehe Tabelle 2-5) und in der Literatur angegebenen Werte wider. Gleichzeitig wird deutlich, dass durch eine gezielte Anlagenauslegung der Rohwasserbedarf eines Elektrolyseurs deutlich beeinflusst werden kann. Ein Anlagenkonzept mit einem offenen Kühlkreislauf (Verdunstungskühlung) (Konzept C) sollte trotz der höheren zu erwartenden Kosten und des zusätzlichen Platzbedarfs in Regionen mit eingeschränkter Wasserverfügbarkeit möglichst vermieden werden.

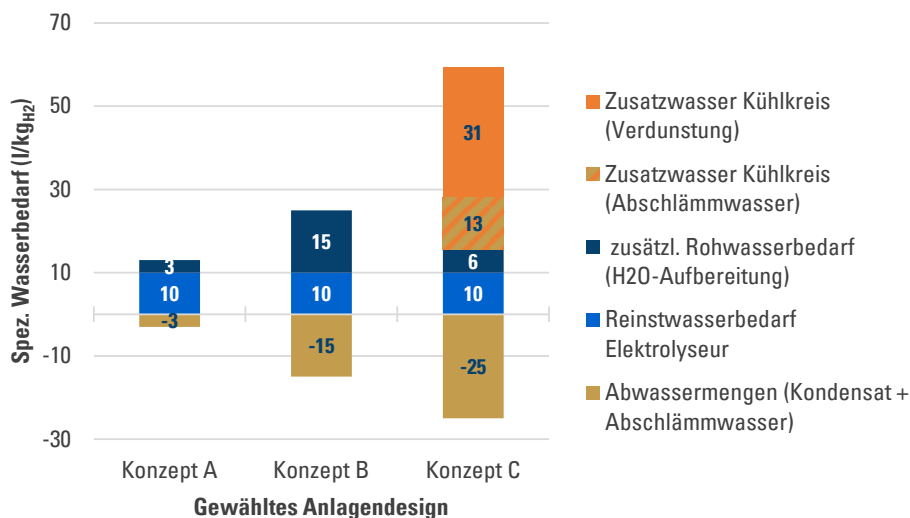


Abbildung 2-17: Spezifischer Wasserbedarf in Abhängigkeit zu unterschiedlichen Anlagendesigns.  
 Konzept A: Trockenkühlung, inkl. interner Wasserrückführung im Rahmen der Wasseraufbereitung  
 Konzept B: Trockenkühlung, keine interne Wasserrückführung  
 Konzept C: Konzept mit Nass-/Verdunstungskühlung

<sup>21</sup> Bei Annahme einer 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseanlage mit einer stündlichen Wasserstoffproduktion von etwa 2 t entspricht dies einem Wasserbedarfe mit 26 bis 118 m<sup>3</sup>/h, bei gleichzeitig anfallenden Abwassermengen von 6-50 m<sup>3</sup>/h.



Tabelle 2-9: Vergleich unterschiedlicher Anlagenkonzepte hinsichtlich ihrer Wasserbilanz

	Einheit	Konzept A	Konzept B	Konzept C
<b>Rohwasserbedarf</b>	l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	13	25	59
<b>Prozesswasser (Elektrolyse)</b>	l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	10	10	10
<b>Wasseraufbereitung</b>	-	2-stufige UO + EDI, inkl. Wasserrückführung	UO + EDI, ohne Wasserrückführung	UO + EDI
<b>Abwasser (aufkonzentriert)</b>	l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	3-4	15	25
<b>Kühlsystem</b>	-	Geschl. Kühlwasserkreislauf mit Trockenkühlung (ohne zusätzlichen Wasserbedarf)	Geschl. Kühlwasserkreislauf mit Luftkühlung	Verdunstungskühlung
<b>Kühlwasserbedarf</b>		Trockenkühlung ergänzt durch adiabatische Kühlung für besonders heiße Tage (Wasserbedarf max. 5,5 % des Rohwassereinsatzes)	Kühlwasserbedarf bis zu 4.400 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub> (bei 35 °C Kühlwasser-temperatur) – potenziell auch als offenes System möglich	35 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub> (zur Kompensation von Verdunstungsverlusten (=25 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub> ) und Abschlämmwasser (=10 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub> )  Verdunstung, ohne Rückführung in Wasserkörper

## 2.4. Ausblick: Abgeschätzter zukünftiger Wasserbedarf der Wasserstoffproduktion in Brandenburg

Im Folgenden erfolgt eine Abschätzung des Wasserbedarfs der Wasserstoffproduktion in Brandenburg auf Basis der spezifischen H<sub>2</sub>-Bedarfe der Elektrolysekonzepte (Konzept A, B und C) und der ermittelten H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale für Brandenburg (siehe Kapitel 2.2).

Auf Grundlage der abgeschätzten H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale im Jahr 2045 in den einzelnen Landkreisen und Städten in Brandenburg (siehe [Fhg IEG et al. 2023]) ergeben sich für die einzelnen Elektrolysekonzepte A (optimiertes Konzept), B (insbesondere bei kleinen Anlagengrößen) und C (offenes Kühlsystem mit Nass-/Verdunstungskühlung) insgesamt Rohwasserbedarfe (d. h. ohne Berücksichtigung der anfallenden Abwassermengen) für Wasser mit Trinkwasserqualität von bis zu 8–37 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr in Brandenburg.

Abbildung 2-18 fasst die jeweiligen Hochrechnungen für die einzelnen Regionen in Brandenburg zusammen und zeigt auch die zugrunde gelegten Elektrolysekapazitäten.<sup>22</sup> Bei vollständiger Umsetzung der in Kapitel 2.2 beschriebenen H<sub>2</sub>-Potenziale würden vor allem in den Landkreisen Spree-Neiße und Uckermark sowie in Prignitz und den weiteren Landkreisen Ostprignitz-Ruppin, Märkisch-Oderland signifikante Wasserbedarfe für die H<sub>2</sub>-Produktion anfallen. Eine vertiefende Betrachtung und Diskussion wie auch

<sup>22</sup> Annahmen: 66,7 % Wirkungsgrad der Elektrolyse (bezogen auf Heizwert H<sub>i</sub>), 4.000 h/a Benutzungsdauer.

Einordnung dieser Ergebnisse (Energie- und Wassermengen) erfolgen anhand von Fallbeispielen in Kapitel 4.3.

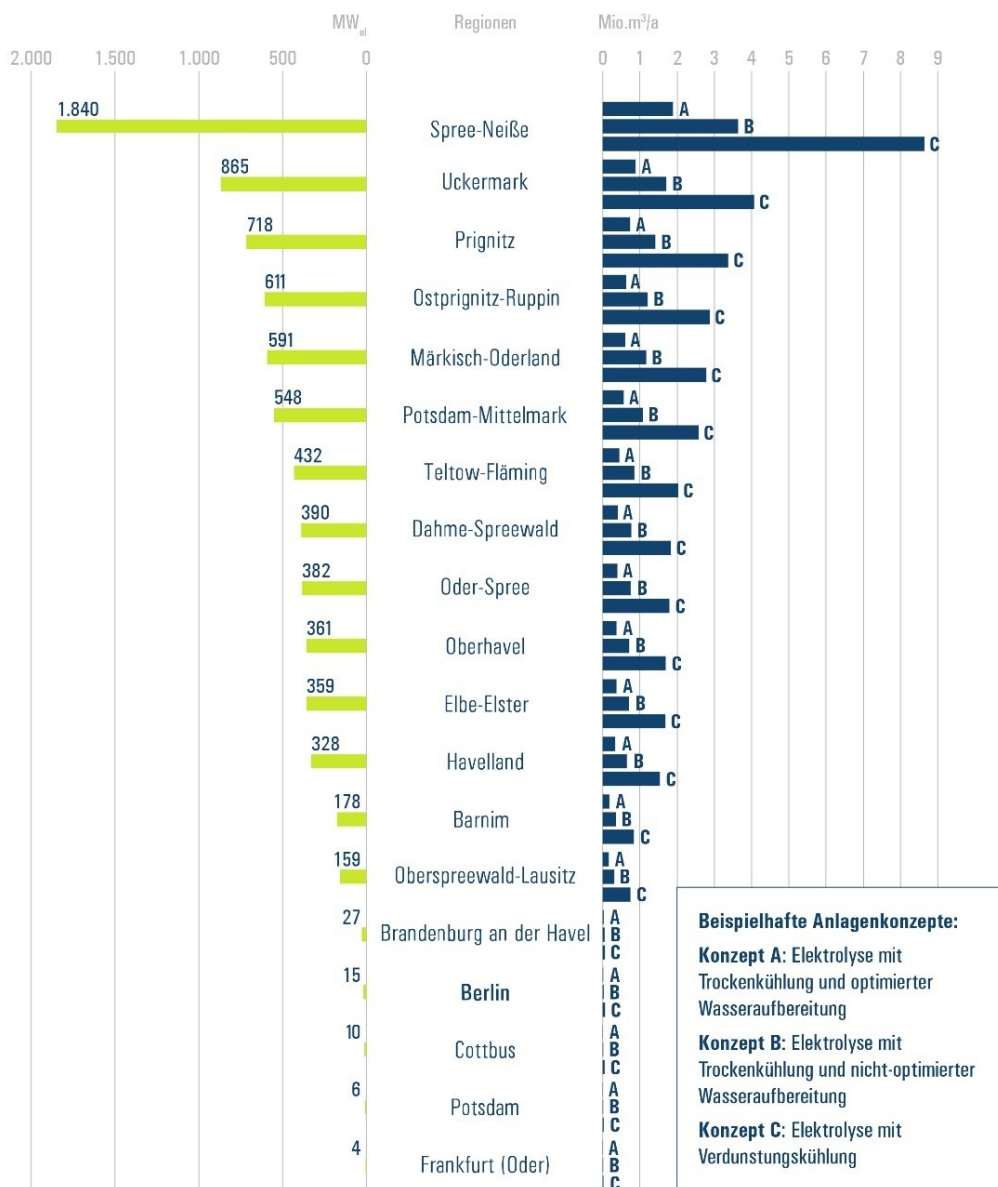


Abbildung 2-18: Abschätzung mittlerer Wasserbedarfe für die H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale und Elektrolysekonzepte in den Regionen.

Eigene Auswertung und Berechnungen auf Basis von Daten aus [Fhg IEG et al. 2023].

### 3. WASSERHAUSHALT BRANDENBURG

- ❖ Wasser ist eine wertvolle und zunehmend begrenzte Ressource.
- ❖ Sparsamer Umgang mit Wasser und die Sensibilisierung für das Thema sind wichtig.
- ❖ Zunehmend wird „Wasserstress“ in Brandenburg erwartet.
- ❖ Das verfügbare Wasserdargebot, insbesondere Oberflächenwasser, ist in einigen Regionen bereits stark ausgelastet und wird durch saisonale Schwankungen (v. a. Sommer) sowie durch den Klimawandel verstärkt.
- ❖ Heutige und zukünftige Wasserentnahmen und -verwendung – insbesondere von Grundwasser – müssen auf den Prüfstand gestellt und auf Basis hydrogeologischer Gutachten vor Ort geprüft werden.
- ❖ Der heutige Wasserhaushalt in der Lausitz wird v. a. von abgeleitetem Wasser (Sümpfungswasser) dominiert – große Veränderungen sind hier absehbar.
- ❖ Neben Grundwasser sollten zukünftig v. a. verschiedene Rohwasserquellen, auch Abwasser genutzt werden.

#### 3.1. Zusammenfassung – Wasserhaushalt Brandenburg

Dieses Kapitel beschreibt den Wasserhaushalt in Brandenburg. Es werden vor allem landesweite Betrachtungen durchgeführt. Dabei werden auch der Wasserbedarf und die Abwassermenge Berlins mit in die Diskussion einbezogen, insbesondere da die Berliner Wasserwerke sowohl Wasser aus Brandenburg beziehen und fördern als auch wesentliche Abwassermengen im Umland aufbereiten und in die Wasserströme wieder einleiten.

In den folgenden Unterkapiteln werden die verfügbaren Datengrundlagen und die wesentlichen Ergebnisse aus der Zusammenstellung und Bewertung der Daten und Erkenntnisse zum Wasserdargebot sowie Details zur aktuellen Wassergewinnung und Wassernutzung sowohl von Grund- und Oberflächenwasser als auch gereinigten Abwassers dargestellt und diskutiert.

Bezüglich der Datengrundlagen ist festzustellen, dass es für das Land Brandenburg keine einheitliche, vollständige und öffentlich zugängliche einzelne Datenquelle zu den Wassernutzungen und zum Wasserdargebot gibt. Daher erfolgte ausführlich die Darstellung und Bewertung der verfügbaren unterschiedlichen Daten, Modellierungen, Gutachten und Studien.

Zum Wasserdargebot wurden die prinzipiell verfügbaren Wasserquellen Niederschlagswasser, Grundwasser, Oberflächenwasser und gereinigtes Abwasser beschrieben. Der Wasserhaushalt in Brandenburg ist insgesamt angespannt und stellt daher insbesondere hinsichtlich neuer industrieller Wassernutzer ein sensibles Thema dar. Bundesweit betrachtet ist das Land Brandenburg relativ niederschlagsarm. Zudem wurden in den letzten Jahren seit 2018 mehrfach deutlich unterdurchschnittliche Jahresniederschlagsmengen und vor allem langanhaltende Trockenphasen beobachtet. Aufgrund des Klimawandels wird die Verdunstung weiter zunehmen. Die mittleren Niederschläge bleiben gleich bzw. steigen sogar leicht.

Jedoch werden insgesamt die Niederschlagsverteilungen extremer (Starkregen, Dürre, weniger Neubildungswirksame Niederschläge).

Hinsichtlich des Grundwasserdargebots wird darauf hingewiesen, dass vorrangig die Trinkwasserversorgung gewährleistet werden muss und aufgrund des angespannten Wasserhaushalts insbesondere in der Region Berlin keine weitere Entnahme empfohlen wird. Die durch das Landesamt für Umwelt erarbeitete Methodik zur Bilanzierung des verfügbaren Grundwasserdargebots in Brandenburg liefert für die Wasserbehörden eine Orientierung zu eher kritischen bzw. unkritischen Bilanzgebieten für weitere Grundwasserentnahmen. Zusätzlich sind ergänzende Indikatoren wie die Entwicklung der lokalen Grundwasserstände heranzuziehen. Bei einer Erhöhung von Grundwasserentnahmen in bestehenden Fassungsanlagen oder Neuplanung von Grundwasserfassungen sind auf jeden Fall hydrogeologische Gutachten zur Bewertung des konkret am Standort verfügbaren Grundwasserdargebots und der Auswirkungen der Grundwasserentnahme auf die angrenzenden grundwasserabhängigen Landökosysteme durchzuführen. Insgesamt wird Grundwasser vorrangig als Wasserquelle für die dezentrale Wasserstoffproduktion eingeschätzt.

Die Entnahme von Oberflächenwasser für die industrielle Nutzung erfolgt in Brandenburg nur in den größeren Gewässern 1. Ordnung. Im Sommer werden aktuell bereits schon langanhaltend die Mindestabflüsse unterschritten. So dass bei der Planung zusätzlicher Nutzungen gegebenenfalls eine konstante Entnahme in den Sommermonaten nicht mehr garantiert werden kann. Diese Saisonalität der Verfügbarkeit des Oberflächendargebots ist bei den Elektrolyseplanungen zu berücksichtigen. In der Spree ist aufgrund des Wegfalls der Sumpfungswassereinleitungen in den kommenden Jahren aufgrund des Braunkohleausstiegs nur bei Schaffung neuer Speicherkapazitäten und Erhöhung des Dargebots durch Überleitungen aus anderen Einzugsgebieten eine Entnahme von Oberflächenwasser für die Wasserstoffproduktion zusätzlich zu den anderen Nutzungsanforderungen praktikabel. Eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs wird im Spreegebiet als nicht realisierbar eingeschätzt.

Für größere Anlagen zur Wasserstoffproduktion wird aufgrund der beschriebenen Wasserdargebotssituation daher empfohlen, ein Wasserversorgungskonzept mit einem Mix aus den verschiedenen Wasserquellen anzustreben, damit die Grundwasserressourcen geschont werden können. Oberflächenwasser steht vor allem im Winterhalbjahr zur Verfügung. Die Speicherung von Regenwasser kann eine Grundlast abdecken. Die Abwassernutzung sollte auf jeden Fall als Option geprüft werden. Nur für kleinere, dezentrale Anlagen wird Grundwasser bzw. Leitungswasser als potenzielle Wasserquelle eingeschätzt. Da für die Elektrolyse in jedem Fall eine Aufbereitung der Wasserquellen erfolgen muss, werden die verschiedenen Wasserqualitäten nicht als einschränkend gesehen.

Die statistischen Daten zum Wasserhaushalt in Berlin und Brandenburg (Berichtsjahr: 2019) geben einen guten Überblick über die aktuelle Wassergewinnung- und -nutzung in Brandenburg. Jedoch muss auf Bilanzierungsunsicherheiten und nicht (vollständig) erfasste Nutzungen, etwa in der Landwirtschaft, hingewiesen werden. Die Wassergewinnung aus Grund- und Oberflächenwasser in Brandenburg beträgt rund 615 Mio. m<sup>3</sup>/a, wovon ca. 164 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die öffentliche und ca. 451 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die nicht-öffentliche Wasserversorgung (=Eigengewinnung durch Betriebe) entfallen. Demgegenüber stehen rund 127 Mio. m<sup>3</sup>/a Wasser gegenüber, die im Jahr 2019 an Letztverbraucher abgegeben wurden. Außerdem beträgt das nicht-öffentliche Wasseraufkommen (=Eigengewinnung durch Unternehmen + Bezug von Wasser) rund 505 Mio. m<sup>3</sup>, welches sich auf drei wesentliche Anwendungen aufteilt: (1) Wasser, das in

Betrieben eingesetzt wird (220 Mio. m<sup>3</sup>/a), (2) ungenutzt wieder abgeleitetes Wasser (247 Mio. m<sup>3</sup>/a) <sup>23</sup> sowie (3) Abgabe von Wasser an Dritte (38,9 Mio. m<sup>3</sup>/a). Aufgrund der engen Verknüpfung mit dem Wasserhaushalt des Landes Berlin wurden die statistischen Angaben in der Diskussion auch entsprechend ausgeweitet. Als wesentliche Anwendungssektoren in Brandenburg ist der Bergbau (230 Mio. m<sup>3</sup>/a) und die Energieversorgung (149 Mio. m<sup>3</sup>) zu nennen.



Abbildung 3-1: Übersicht zu den Auswertungen zum Wasserhaushalt Brandenburg.

### 3.2. Verfügbare Datengrundlage

Zur Analyse wurden Datensätze zur Wasserverfügbarkeit bzw. des Wasserdargebots aus unterschiedlichen Quellen ausgewertet. Die folgende Tabelle fasst die recherchierte und für die Auswertungen berücksichtigten Datengrundlagen zusammen.

<sup>23</sup> Dies enthält etwa Sumpfungswasser in der Braunkohleförderung, welches dem Oberflächenwasser (z. B. der Spree) zugeführt wird.

Tabelle 3-1: Übersicht verfügbarer Studien und Statistiken

Literatur	Herausgeber / Autor	Erläuterung / Anmerkung	Quellenverzeichnis
Auskunftsplattform Wasser Brandenburg	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Öffentlich zugängliches Portal zu Daten rund um das Thema Wasser <a href="https://apw.brandenburg.de/">https://apw.brandenburg.de/</a>	[eAPW]
Elektronisches Wasserbuch	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Zentrale Dokumentation genehmigter Grund- und Oberflächenwasserbenutzungen, Kartenanwendung Elektronisches Wasserbuch	[eWB]
Übersicht zu kommunalen Kläranlagen, Stand 2019	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Auflistung zu den kommunalen Kläranlagen, Erfassungsstand 2019	[LfU 2021]
Übersicht zu Wasserwerksementnahmen, Stand 2019	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Auflistung der Fördermengen der aktuell betriebenen Wasserwerke im Land Brandenburg, Erfassungsstand 2019, unveröffentlicht	[LfU 2023a]
Wasserversorgung und Abwasserversorgung im Land Brandenburg 2019, 2. korrigierte Ausgabe	Amt für Statistik Berlin-Brandenburg	Statistische Daten zu Wasserversorgung und Abwasser nach Landkreisen und Städten in Brandenburg für das Jahr 2019 (aktuelle Datengrundlage)	[Amt für Statistik-BB 2022]
Wasserversorgung und Abwasserversorgung im Land Berlin 2019	Amt für Statistik Berlin-Brandenburg	Statistische Daten zu Wasserversorgung und Abwasser im Land Berlin für das Jahr 2019 (aktuelle Datengrundlage)	[Amt für Statistik-BE 2022]
Landtagsanfrage der Grünen Fraktion	Landtag Brandenburg	Auflistung der größten Wasserentnehmer in Brandenburg	[Landtag 2023]
Wasserversorgungsplanung Brandenburg, Sachlicher Teilabschnitt mengenmäßige Grundwasserbewirtschaftung	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Grundwasserdargebot und Bilanzierung in Brandenburg, Entwicklung der Grundwasserstände, Entwicklung des Wasserbedarfs	[LfU 2022]
Bilanzierung des Grundwasserdargebotes für das Land Brandenburg, Arbeitsstand September 2023	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Aktualisierung der Grundwasserressourcenkarte für Brandenburg, Konzeption für ein Web-GIS-Werkzeug, das den Wasserbehörden als Entscheidungswerkzeug für die Vergabe von Wasserrechten zur Verfügung gestellt werden soll, Arbeitsstand 09/2023, unveröffentlicht	[LfU 2023b]
Trendkarten der Grundwasserstände	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in den Grundwasserleiterkomplexen 1 und 2, unveröffentlicht	[LfU 2023c]
Erweiterung des Hydrologischen Wochenberichtes	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Erweiterung des Hydrologischen Wochenberichtes mit hydrologischer Einordnung des Niedrigwasserereignisses 2018, unveröffentlicht	[LfU 2019]
Einzugsgebietsmodell des Landes Brandenburg auf der Grundlage von ArcEGMO	Büro für Angewandte Hydrologie GmbH	Landesweites Niederschlags-Abfluss-Modell für Brandenburg, Aktualisierungsstand 2020	[BAH 2022]



Literatur	Herausgeber / Autor	Erläuterung / Anmerkung	Quellenverzeichnis
Studie zum Gebietswasserhaushalt und Abflussgeschehen in Brandenburg auf Basis von Klimaprojektionsdaten mittels des Landesmodells ArcEGMO-PSCN für das Landesamt für Umwelt Brandenburg	Büro für Angewandte Hydrologie GmbH	Niederschlags-Abfluss-Modellierungen mit verschiedenen Klimaprojektionen sowie der Analyse der Änderungen ausgewählter Wasserhaushaltsgrößen, z. B. Gewässerabflüsse und Grundwasserneubildung	[BAH 2023]
Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz	Handlungsrahmen, Niedrigwasserkonzepte, Niedrigwasserempfehlungen, Maßnahmen zur Stützung des Landschaftswasserhaushalts	[MLUK 2021]
WBalMo-Ländermodell	DHI WASY GmbH	Wasserwirtschaftliches Großraummodell der Flussgebiete Spree, Schwarze, Elster und Lausitzer Neiße	[DHI WASY 2023]
Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz	Umweltbundesamt	Analyse der Veränderungen der Wassermenge und Wasserbeschaffenheit, Darstellung der Ziel- und Nutzungskonflikte, Aufzeigen von Maßnahmen und Lösungsansätzen	[UBA 2023]
Masterplan Wasser Berlin	Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt	Zukunftsstrategie für die Berliner Wasserwirtschaft, Risikoanalyse, Handlungsfelder	[SenMVKU 2022]
Antwort zur Anfrage zum künftigen Wasserdargebot in der Lausitz vom 11.05.2023	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Einschätzung zukünftiges Wasserdargebot in der Lausitz im Hinblick auf den gesetzlich verankerten Braunkohleausstieg bis 2038 im Hinblick auf eine grüne Wasserstoffproduktion in der Lausitz	[LfU 2024a]
Stellungnahme des LfU zur Anfrage Region Schwedt vom 13.03.2024	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Beschreibung Wasserentnahmen und Wasserqualitäten	[LfU 2024b]
Gegenüberstellung der Wasserrechte zu den Wasserwerkentnahmen	Landesamt für Umwelt Brandenburg	Tabelle mit Entnahmen der öffentlichen Wasserversorger in Brandenburg und den recherchierten Bescheidwerten, unveröffentlicht	[LfU 2024c]

Für die Fragestellungen zur Ermittlung des Wasserdargebots und der Wasserverfügbarkeit im Land Brandenburg werden folgende Daten und Informationen als relevant eingeschätzt:

### **Auskunftsplattform Wasser Brandenburg [eAPW], Elektronisches Wasserbuch [eWB]:**

Die Auskunftsplattform Wasser (eAPW) ist ein öffentliches zugängliches Portal, das verschiedene Kartenthemen wie Hochwasserrisikogebiete, Grundwasserisolinien, Einzugsgebiete der Wasserwerke etc. darstellt. Zudem können in zahlreichen Messstellen und Pegeln die aktuellen Messwerte sowie die langjährigen Zeitreihen der Grundwasserstände und Abflüsse angezeigt und exportiert werden. Über den Link <https://apw.brandenburg.de/> ist die Anwendung erreichbar.

Ebenso erfolgt die Nutzung der [Kartenanwendung Elektronisches Wasserbuch](#) über die Auskunftsplattform Wasser. Das Wasserbuch ist eine zentrale Dokumentation genehmigter Grund- und Oberflächenwasser-

benutzungen. Die Wasserbehörden des Landes Brandenburg sowie das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe sind seit dem 19. Juni 2012 in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsbereich für die Eintragungen in dieses öffentliche Register verantwortlich. Seit der Bereitstellung der Software „Elektronisches Wasserbuch“ (2019) erfolgt Schritt für Schritt die Übertragung aller relevanten Wasserrechtsverhältnisse in die zentrale Datenbank. Ähnlich dem Grundbuch gibt das Wasserbuch einen Überblick über wasserrechtliche Erlaubnisse und Bewilligungen, also wesentliche wasserwirtschaftliche Rechtsverhältnisse, sowie wasserwirtschaftlich begründete Schutzgebiete.

Die Datenerfassung und öffentliche Bereitstellung ist bislang jedoch unvollständig, da noch nicht alle Landkreise die vorhandenen Daten digitalisiert und eingepflegt haben. Auch werden überdies gegenwärtig über das elektronische Wasserbuch keine Informationen zu Trinkwasserentnahmen bereitgestellt. Es befindet sich derzeit in Klärung, ob diese Daten überhaupt mit Blick auf die kritische Infrastruktur vollumfänglich veröffentlicht werden sollten.

Aktuell liegt keine vollständige digitale Übersicht zu bestehenden Gewässerbenutzungen im Land Brandenburg vor. Zudem gibt es keine landesweite Gegenüberstellung der Wasserrechte mit den tatsächlichen Entnahmen. Detaillierte Auskünfte sind beim Wasserwirtschaftsamt des Landes Brandenburg oder der jeweils zuständigen Unteren Wasserbehörde der Landkreise oder der kreisfreien Städte zu beantragen.

Für die weiteren Analysen in dieser Studie wurden daher verschiedenen Datenquellen zusammengetragen und ausgewertet. Der uneinheitliche Datenstand erschwert eine landesweite Bewertung des Wasserbedarfs und die Gegenüberstellung mit dem Wasserdargebot.

#### **Übersichten zu den Wasserwerksentnahmen [LfU 2023a] und kommunalen Kläranlagen [LfU 2021]:**

Standortbezogene Auflistung aller öffentlichen Entnahmen und kommunalen Klärwerkseinleitungen im Jahr 2019. Eine Übersicht zu den Industrie- und Gewerbeentnahmen ist beim Wasserwirtschaftsamt nicht verfügbar.

#### **Statistische Daten 2019 für Brandenburg und Berlin [Amt für Statistik-BB 2022], [Amt für Statistik-BE 2022]:**

Landesweite Übersichten zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung in Brandenburg und Berlin im Jahr 2019. Es wird in öffentliche und nicht-öffentliche Ver- und Entsorgung unterschieden. Die Auswertungen erfolgen landkreisbezogen bzw. nach Industriesektoren.

#### **Auflistung der größten Wasserentnehmer in Brandenburg [Landtag 2023]:**

Als Antwort auf eine Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN an die Landesregierung erfolgte durch den Minister für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz die Beantwortung diverser Fragen zu Wasserentnahmen in Brandenburg. U. a. erfolgte durch das Landesamt für Umwelt (LfU) eine Zusammenstellung der 10 größten Grundwasserentnehmer für Trinkwasser und der jeweils 10 größten Wasserentnehmer aus Grund- und Oberflächenwasser im Bereich Industrie und Gewerbe sowie im Bereich Landwirtschaft und Gartenbau. Das Bezugsjahr ist 2021. Zudem wurden die Entnahmemengen in den Braunkohlentagebauen in Brandenburg seit 2016 bis 2022 dargestellt.

### **Bilanzierung des Grundwasserdargebotes für das Land Brandenburg [LfU, 2023b]:**

Es erfolgte eine landesweite Betrachtung des natürlichen und verfügbaren Grundwasserdargebotes als Grundlage für die Wasserversorgungsplanung in Brandenburg. Es wurde eine Grundwasserressourcenkarte für Brandenburg erstellt sowie eine Konzeption für ein Web-GIS-Werkzeug erarbeitet, das die Wasserbehörden bei der Beurteilung unterstützen soll, wo im regionalen Maßstab nutzbare Grundwasserressourcen, z. B. für die Trinkwasserversorgung, verfügbar sind. Das Gutachten hat einen Arbeitsstand von 09/2023 und ist noch nicht veröffentlicht<sup>24</sup>.

Die vorliegende Methode zur Grundwasserbilanzierung ist eine qualifizierte Weiterentwicklung und Präzisierung der bewährten Vorratsprognosen aus den 1980/90er Jahren. Vordergründiges Ziel ist, grundsätzliche Informationen über die Auslastung des Grundwasserdargebotes zu erhalten. Die Wasserbehörden (untere und obere) sollen damit eine einheitliche Grundlage zur Vergabe von Wasserrechten bekommen. Die Bilanzierung entbindet jedoch nicht der Einzelfallentscheidung im Zusammenhang mit der Prüfung von Einflüssen auf wasserabhängige Ökosysteme, Mindestabflüsse etc. Es handelt sich ausschließlich um eine Mengenzbilanzbetrachtung und ersetzt nicht die Erstellung geohydraulischer Modelle zu Auswirkungsprognosen von Grundwasserentnahmen.

### **Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg [MLUK, 2021]:**

Die naturräumlichen und geologischen Rahmenbedingungen bedingen in den meisten Regionen Brandenburgs eine hohe Sensitivität auf Niederschlagsdefizite und führen sehr schnell zu Wassermangelsituationen. Auf überwiegend sandigen Böden führt anhaltende Trockenheit bei hohen Lufttemperaturen besonders schnell zu extremer Dürre. Das Absinken von Grundwasserständen in den oberen Grundwasserleitern bringt mit kurzer Reaktionszeit Niedrigwasser in den brandenburgischen Fließgewässern und Wasserstandsverluste in den Seen mit sich. Häufigkeit und Dauer von Witterungsperioden ohne nennenswerten Niederschlag haben in den letzten 10 Jahren zugenommen.

2021 wurde das Landesniedrigwasserkonzept vom Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz veröffentlicht [MLUK, 2021]. Das Landesniedrigwasserkonzept zielt auf ein systematisches und strukturiertes wasserwirtschaftliches und wasserrechtliches Handeln für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement in Brandenburg ab, d. h. bei der Vorsorge gegen Niedrigwasser und daraus resultierende Schäden sowie beim Management in Niedrigwassersituationen.

---

<sup>24</sup> Für das 2. Halbjahr 2024 ist außerdem eine wiederholte landesweite Neuberechnung für alle Bilanzgebiete vorgesehen, um die zum Teil zwischenzeitlich aktualisierten Eingangsdaten in der weiteren Analyse zu berücksichtigen.

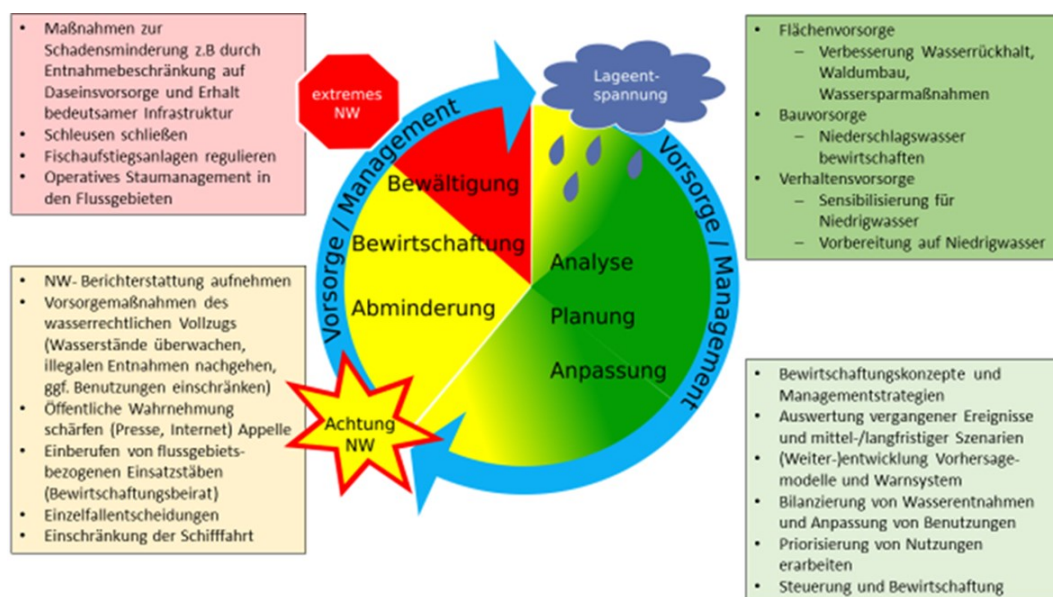


Abbildung 3-2: Kreislaufschema Niedrigwasservorsorge & Niedrigwassermanagement.

Quelle: [MLUK 2021]

Räumlicher Maßstab für die ganzheitliche Betrachtung und Anpassung der Wasserwirtschaft ist die Ebene der Flussgebiete. Um den negativen Auswirkungen des Klimawandels verbunden mit anhaltenden Trockenwetterperioden und zunehmenden Wasserdefiziten entgegenzuwirken, muss den Problemen in Brandenburg vor allem dadurch begegnet werden, dass die Flächenentwässerung reduziert und der Wasserrückhalt in den natürlichen Speichern der Landschaft erhöht wird.

Als Hilfsmittel für die Steigerung der öffentlichen Wahrnehmung und für die situationsangepasste Festlegung von Maßnahmen des Niedrigwassermanagements in brandenburgischen Flussgebieten wird ein auf die flussgebietsbezogene Bewirtschaftung ausgerichtetes pegelspezifisches Niedrigwasserswarnsystem (Niedrigwasserampel) aufgebaut. Aktuell bilden 26 Referenzpegel die Niedrigwassersituation im Land Brandenburg ab. Die Ampelphasen – grün, gelb, rot – sollen Anhaltspunkte für eine beginnende oder eingetretene Niedrigwassersituation sein (siehe Abbildung 3-10).

#### Erweiterung des Hydrologischen Wochenberichtes [LfU 2019]:

Es werden die hydrologische Einordnung des Niedrigwasserereignisses 2018 und die Einschätzung der in den Flussgebieten zu verzeichnenden wasserwirtschaftlichen Situationen dargestellt. Dazu wurden u. a. Dauerlinien und Niedrigwasserkennwerte der Abflüsse an verschiedenen Pegeln ausgewertet. Für Vergleiche mit früheren Niedrigwasserereignissen und Wahrscheinlichkeitsermittlungen fanden die längstmöglichen Zeitreihen Verwendung.

#### Einzugsgebietsmodell des Landes Brandenburg auf der Grundlage von ArcEGMO [BAH 2022], [BAH 2023]:

Im Auftrag des Landesamts für Umwelt Brandenburg (LfU) erfolgt mit dem Niederschlags-Abfluss-Modell ArcEGMO die landesweite Modellierung der Wasserhaushalts- und Abflussverhältnisse für das Land Brandenburg. Aktueller Datenstand ist die Aktualisierung bis 2020 [BAH, 2020]. Die Modellergebnisse zu den Wasserhaushaltsgrößen für Gewässerabschnitte und Einzugsgebiete der Reihe 1991–2020 sind als

GIS-Datensätze verfügbar (Recherche über das Geodatenportal des LfU Brandenburg [https://maps.brandenburg.de/WebOffice/synserver?project=Hydrologie\\_www\\_CORE](https://maps.brandenburg.de/WebOffice/synserver?project=Hydrologie_www_CORE)).

Die berechneten Grundwasserneubildungsmengen bilden nicht die Grundlage für die Bilanzierung des Grundwasserdargebotes für das Land Brandenburg in [LfU 2023b].

Mittels des Landesmodells wurde eine Studie zum Gebietswasserhaushalt und Abflussgeschehen in Brandenburg auf Basis von Klimaprojektionsdaten durchgeführt. Es erfolgten Niederschlags-Abfluss-Modellierungen mit verschiedenen Klimaprojektionen sowie die Analyse der Änderungen ausgewählter Wasserhaushaltsgrößen, wie beispielsweise der Gewässerabflüsse und der Grundwasserneubildung für zwei verschiedene Zukunftszeiträume (2031–2060 und 2071–2100) im Vergleich zur Referenz (1971–2000) [BAH 2023].

#### **WBalMo-Ländermodell [DHI WASY 2023]:**

Das WBalMo-Ländermodell ist ein wasserwirtschaftliches Großraummodell der Flussgebiete Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße. Die Entwicklung und Nutzung erfolgt durch DHI WASY und wird durch den „Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell“ der Arbeitsgruppe Flussgebietsbewirtschaftung fachlich begleitet. Nach mehr als 25 Jahren Entwicklung zählt zu den Stärken des WBalMo-Ländermodells, dass für Langzeitprognosen alle relevanten wasserwirtschaftlichen Komponenten in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße enthalten sind:

- Abflussbildung unter Berücksichtigung der Besonderheiten der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und des Spreewalds, Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser in Speichern, Seen und Fließgewässern,
- Wasserentnahmen und -einleitungen sowie Mindestabflüsse,
- Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher sowie Überleitungen und Kanäle,
- Prognose der Sulfatkonzentration in Fließgewässern und Speichern sowie deren Bewirtschaftung nach Menge und Sulfat.
- Für die aktuelle UBA-Studie „Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz“ bildeten die Ergebnisse zu den aktuellen und zukünftigen Wasserverfügbarkeiten dieses Modells die Grundlage für die Auswertungen [UBA 2023].

#### **Studie zu wasserwirtschaftlichen Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz [UBA 2023]**

Seit Beginn der industriellen Gewinnung, Veredlung und Verstromung von Braunkohle im Lausitzer Revier wurden innerhalb von 120 Jahren (1900–2020) in Summe ca. 8,4 Mrd. Tonnen Rohbraunkohle gefördert. Die Braunkohle diente vorrangig der Wärme- und Stromversorgung. Zur Freilegung der Braunkohle wurden in diesem Zeitraum ca. 58 Mrd. m<sup>3</sup> Grundwasser gefördert. Dieser Eingriff in den Wasserhaushalt hat in den Flussgebieten der Schwarzen Elster und der Spree deutliche Spuren hinterlassen. Dazu zählen ein aktuelles Grundwasserdefizit von ca. 4 Mrd. m<sup>3</sup> sowie der im Vergleich zum natürlichen Leistungsvermögen des Einzugsgebiets deutlich erhöhte Abfluss der Spree. Seit Jahrzehnten haben sich die Spreeanrainer einschließlich der Bundeshauptstadt Berlin und des UNESCO-Biosphärenreservats Spreewald an den erhöhten Abfluss gewöhnt und darauf Versorgungskonzepte gegründet. Gegenwärtig beträgt der mittlere



Anteil des Sumpfingwassers am Durchfluss der Spree bei Cottbus etwa 50 %. Er steigt in trockenen Sommermonaten auf ca. 75 %.

Gemäß dem Kohleausstiegsgesetz wird die Stromerzeugung aus Braunkohle und der zugehörige Bergbau im Lausitzer Revier bis spätestens zum Jahr 2038 auslaufen. Daraus resultiert ein starker Rückgang der vom Bergbau in die Spree eingeleiteten Wassermengen und ein entsprechender Rückgang der Wasserführung der Spree bis hin zum abschnittsweisen Trockenfallen der Spree. Der rückläufigen Wasserführung der Spree steht in den kommenden fünf Jahrzehnten ein zusätzlicher Wasserbedarf von ca. 6 Mrd. m<sup>3</sup> zur Auffüllung der verbleibenden bergbaulichen Hohlformen und des Grundwasserabsenkungstrichters gegenüber. Der künftige Wassermangel wird durch die Verdunstung von den großen Wasserflächen der bereits entstandenen sowie der noch entstehenden Bergbaufolgeseen von ca. 250 km<sup>2</sup> sowie durch die zu erwartenden Wirkungen des Klimawandels zusätzlich verstärkt.

Im Zuge des energiewirtschaftlichen Transformationsprozesses werden die Ansprüche an das Spreewasser hinsichtlich Menge und Beschaffenheit steigen. Insbesondere durch den zu erwartenden Bevölkerungszuwachs in der Metropolregion Berlin-Brandenburg und durch neue Industrien muss mit einem Bedarfszuwachs gerechnet werden. Sowohl in der Phase der wasserhaushaltlichen Sanierung in der Lausitz bis etwa 2070 als auch danach wird eine große Diskrepanz zwischen dem Wasserdargebot der Spree und dem Wasserbedarf von Natur, Mensch und Industrie entstehen. In der Lausitz konkurrieren der Industriesektor mit den Schwerpunkten BASF Schwarzheide, Industriepark Schwarze Pumpe und Oberzentrum Cottbus sowie die geplanten industriellen Umnutzungen der Kraftwerksstandorte Boxberg und Jänschwalde miteinander und mit dem UNESCO-Biosphärenreservat Spreewald um das verfügbare Wasserdargebot. Die Bundeshauptstadt Berlin im Unterlauf der Spree wird bei der Rohwasserbereitstellung für ihr größtes Trinkwasserwerk Friedrichshagen sowie bei der Verdünnung der in das Berliner Gewässersystem eingeleiteten Abwasserströme von jährlich ca. 220 Mio. m<sup>3</sup> vor große Herausforderungen gestellt.

Der maßgebliche Konflikt zwischen dem Rückgang der Wasserverfügbarkeit in der Spree und dem Zuwachs des Wasserbedarfs im Einzugsgebiet kann durch die Umsetzung eines Bündels von Maßnahmen entschärft werden. Dieses Bündel beinhaltet den Wasserrückhalt in Talsperren und in den zu Speichern ausgebauten Bergbaufolgeseen in dargebotsreichen Perioden sowie die Wasserabgabe zur Niedrigwasseraufhöhung in dargebotsarmen Perioden.

Die derzeit nutzbaren Speicherkapazitäten im Spreegebiet von nominal 151 Mio. m<sup>3</sup> werden zum Ausgleich des künftigen Wasserdefizites nicht ausreichen, zumal diese durch geotechnische, ökologische und hydrochemische Restriktion bis auf Weiteres nur reichlich zur Hälfte tatsächlich nutzbar sind. Zur Stabilisierung des nachbergbaulichen Wasserhaushaltes und zur Gewährleistung der vielfältigen Nutzeransprüche im Spreegebiet ist eine Gesamtspeicherkapazität von mindestens 178 Mio. m<sup>3</sup> erforderlich. Diese muss durch die Aufhebung bestehender Speicherrestriktionen sowie durch den Neubau von Speichern, z. B. im Cottbuser Ostsee mit ca. 27 Mio. m<sup>3</sup>, hergestellt werden.

Allein durch das natürliche Wasserdargebot der Spree kann eine Vollenfüllung der Speicherräume zu Frühjahrsbeginn jedoch nicht gewährleistet werden. Dazu müssen jährlich mindestens 60 Mio. m<sup>3</sup> Wasser aus benachbarten Flussgebieten, vorzugsweise aus der Elbe, der Lausitzer Neiße und der Oder, in das Spreegebiet übergeleitet werden. Da die Wasserüberleitungen nur in Zeiten des Wasserüberschusses



möglich sind, bilden sowohl der Speicherzubaue und die Speicherertüchtigung als auch die vorgenannten Wasserüberleitungen ein untrennbares Maßnahmenbündel.

Eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs wird im Spreegebiet als nicht realisierbar eingeschätzt.

### 3.3. Regionaler Wasserhaushalt Brandenburg, verfügbare Wasserquellen

#### 3.3.1. Niederschlagswasser

In Brandenburg gibt es bundesweit betrachtet relativ wenig Niederschlag, im langjährigen Mittel der hydrologischen Jahre 1952– 2018 beträgt die korrigierte Niederschlagshöhe 626 mm. In den letzten Jahren seit 2018 wurden mehrfach deutlich geringere Jahresniederschlagsmengen und vor allem langanhaltende Trockenphasen beobachtet. Im hydrologischen Jahr 2018 lag die über das Land Brandenburg gemittelte korrigierte Gebietsniederschlagshöhe bei 456 mm [LfU 2019].

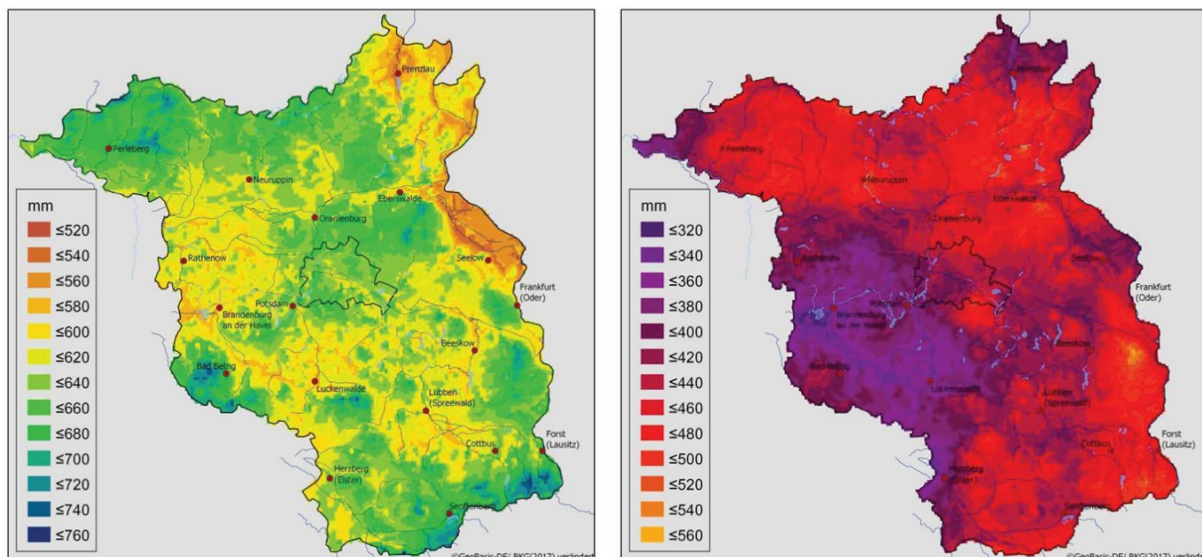


Abbildung 3-3: Jahreswerte der korrigierten Niederschlagshöhe [mm] im Land Brandenburg. Links: Mittlere Jahreswerte 1951– 2018, rechts: Jahreswerte 2018, Auswertung der Daten des DWD in [LfU 2019], unveröffentlicht

Die über das Land Brandenburg gemittelte potenzielle Verdunstungshöhe bei unbegrenzt verfügbarem Wasser gemäß Methode nach Turc/Ivanov betrug im hydrologischen Jahr 2018 739 mm. Das ist der höchste Wert im Vergleichszeitraum 1952/2018. Das Mittel der potenziellen Verdunstungshöhe (hydrologische Jahre 1952/2018) beträgt 603 mm.

Die untersuchten Klimaprojektionen mittels des Landesmodells in [BAH 2023] zeigen für Brandenburg eine geringfügige mittlere Zunahme des Jahresniederschlags um 3 % bis Mitte des Jahrhunderts und ein anschließendes Verharren auf diesem Niveau in der fernen Zukunft. Die potenzielle Verdunstung nimmt im Mittel um 7 % bis Mitte des Jahrhunderts bzw. 13 % in der fernen Zukunft zu.

Für die Nutzung von Niederschlagswasser ist aber neben den mittleren Mengen vor allem die innerjährliche Niederschlagsverteilung relevant. Niederschlag ist eine diskontinuierliche Wasserquelle, es können aufeinanderfolgend mehrere Tage bis Monate mit wenig oder fast gar keinem Niederschlag auftreten. In Kombination mit dem anderen Extrem der Starkregenereignisse sind diese Dürrezeiten in den Jahressummen teilweise nicht erkennbar. Sie sind jedoch für die Nutzung des Niederschlagswassers als Wasserquelle für die Industrie bzw. hier insbesondere für die Wasserstoffproduktion bedeutend, da keine gleichmäßige Wasserversorgung gewährleistet werden kann. Speicherbecken können die Trockenphasen überbrücken. Wegen sowohl der Verdunstung als auch der Verschmutzungsgefahr (insbesondere organisches Material) sollten die Speicher abgedeckt bzw. geschlossen sein.

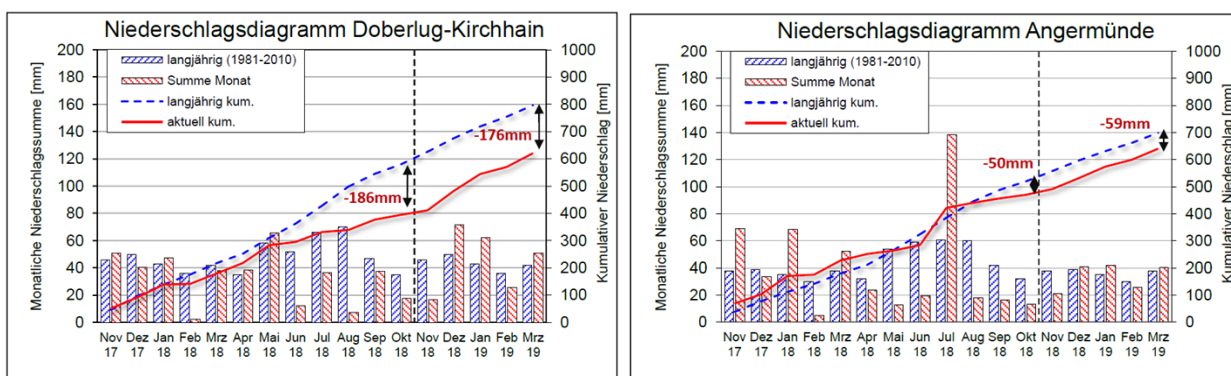


Abbildung 3-4: Niederschlagsdiagramme an zwei exemplarisch gewählten Stationen in Brandenburg mit Gegenüberstellung der langjährigen monatlichen Niederschlagsverteilung 1981–2010 zu den Monatsniederschlägen im Zeitraum 11/2017 – 03/2019.

Quelle: [LfU 2019], unveröffentlicht

Aufgrund der in Brandenburg zu berücksichtigenden, längeren Trockenphasen wird Niederschlagswasser nicht als alleinige Wasserquelle eingesetzt werden können. Es kann aber einen Anteil an einem Gesamtwasserversorgungskonzept bilden. An Gewerbe-/ Industriestandorten mit einer entsprechend größeren Fläche erfolgt zunehmend die Fassung und Reinigung des anfallenden Niederschlagswassers in Retentionsbodenfiltern, die eine Speicherung in gewissem Umfang ermöglichen. Somit kann – bis auf die langen sommerlichen Trockenphasen – das Niederschlagswasser nach Aufbereitung zumindest einen Teil des Wasserbedarfs decken. Am Flughafen Berlin-Brandenburg wird das Niederschlagswasser in großen Bodenfiltern aufgefangen und gereinigt und könnte ggf. auch als Wasserquelle (nach Aufbereitung, im Winter sind zusätzlich Enteisungsmittel zu berücksichtigen) für die Wasserstoffproduktion vor Ort dienen.

### 3.3.2. Grundwasserdargebot

Für landesweite Auswertungen steht die „Bilanzierung des Grundwasserdargebotes für das Land Brandenburg“ in [LfU, 2023b] zur Verfügung. Hierfür wurden anhand der oberirdischen und unterirdischen Einzugsgebiete insgesamt 74 Bilanzgebiete abgegrenzt, innerhalb derer auf Grundlage der Gebietswasserbilanz auch das Grundwasserdargebot, sein aktueller Nutzungsumfang sowie dessen potenziell nutzbarer Anteil ausgewiesen werden.

Die Ermittlung des Gesamtabflusses erfolgt hierfür nach dem BAGLUVA-Verfahren. Entsprechend diesem Verfahren wird auf der Grundlage von rasterbezogenen Primärdaten zu den klimatischen Kenngrößen

(Niederschlag, potenzielle Verdunstung), Bodenart, Nutzung und Flurabstand die reale Verdunstung berechnet. Die Bezugszeitreihe reicht von 1986 bis 2015.

Der Gesamtabfluss wird aus der Differenz des korrigierten Niederschlags und der realen Verdunstung ermittelt. Die Grundwasserneubildung wird für den Bereich unbedeckter Grundwasserleiter dem Gesamtabfluss gleichgesetzt. Die Grundwasserneubildung für den Bereich bedeckter Grundwasserleiter wurde auf Basis von Erfahrungen des Landesamts für Umwelt mit 70 % des Gesamtabflusses angesetzt.

Zudem wurden oberirdische Zu- und Abflüsse, künstliche Überleitungen, Oberflächenwasserentnahmen und -einleitungen und der ökologische Mindestabfluss in der Bilanzierung des Gesamtwasserdargebots berücksichtigt.

Da die Bilanzgebiete nach den oberirdischen Einzugsgebietsgrenzen ausgewiesen sind, werden anhand der Gegenüberstellung mit den unterirdischen Wasserscheiden auf Basis des landesweiten Hydroisohypsenplans von 2015 im Maßstab 1:50.000 die unterirdischen Zu- und Abflüsse in die Bilanzgebiete ermittelt.

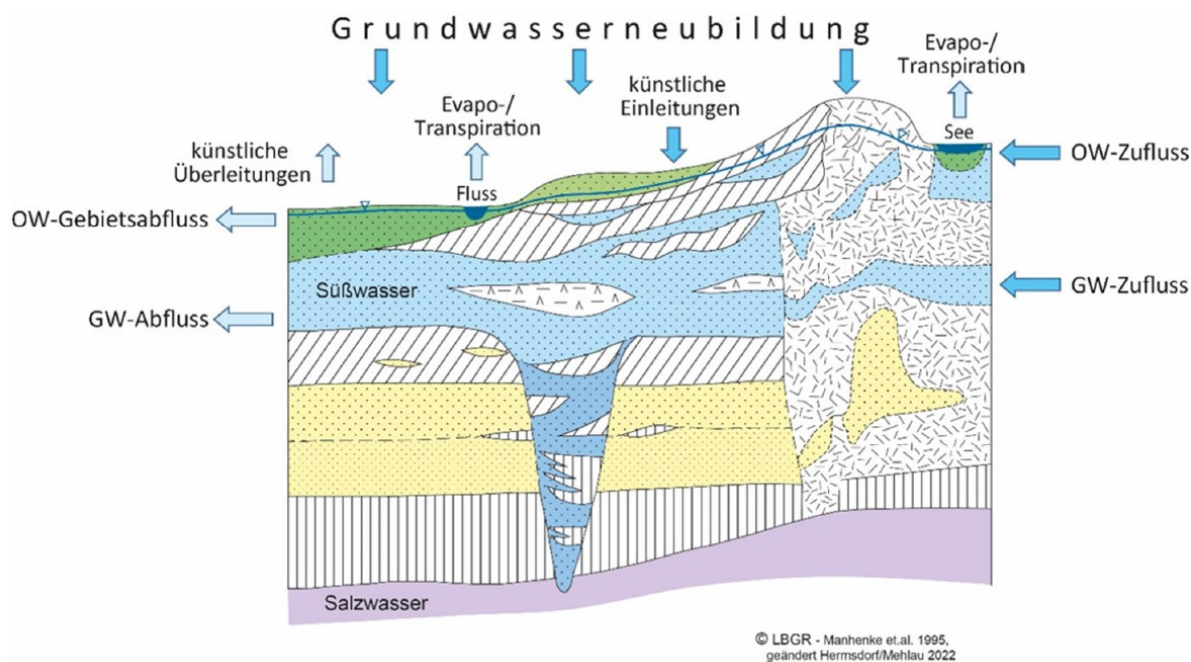


Abbildung 3-5: Bilanzierungsschema zur Ermittlung der Grundwasserdargebots.  
Quelle: [LfU 2022]

Das verfügbare Grundwasserdargebot für die Bilanzgebiete ergibt sich aus dem natürlichen Dargebot unter Berücksichtigung der Grundwasserentnahmen, anteilig reduziert um den Anteil Uferfiltrat/Grundwasseranreicherungen und den nicht nutzbaren Anteil am Grundwasserdargebot.

Für die Grundwasserentnahmen standen unterschiedliche Datensätze zur Verfügung, die zum Teil sehr inhomogen waren. Das elektronische Wasserbuch [eWB] konnte nicht genutzt werden, da die Erfassung zum Bearbeitungsstand 2020 unvollständig war und nur ca. 50 % des Landes Brandenburg abdeckte. Zudem enthielt noch diverse bereits alte, abgelaufene Wasserrechte. Es bestand keine Möglichkeit zur

Unterscheidung aktueller / ausgelaufener Wasserrechte. Es wurden daher diverse Einzeldateien mit Meldungen zu den tatsächlichen Entnahmemengen mit verschiedenen Bezugszeiträumen in den Jahren 2015– 2020 und Wasserrechtsangaben verwendet und zusammengeführt. In den angrenzenden Bundesländern war die recherchierte Datenlage zu den Entnahmen ähnlich inhomogen.

Als für eine Grundwassergewinnung nicht nutzbare Bereiche wurden Bereiche mit Salzwasser > 1.000 mg/l NaCl oberhalb von 0 m NHN, Bereiche ohne Ausbildung von Grundwasserleitern und Naturschutzgebiete mit einem Flurabstand < 2 m festgelegt. Grundwasserversalzungen sind lokal begrenzt vor allem im zentralen Bereich Brandenburgs anzutreffen. Bereiche mit fehlenden Grundwasserleitern konzentrieren sich überwiegend auf die Uckermark.

Abbildung 3-6 zeigt die Verteilung des verfügbaren Grundwasserdargebots [m<sup>3</sup>/d] in den Bilanzgebieten bei mittleren Verhältnissen (1986– 2015).

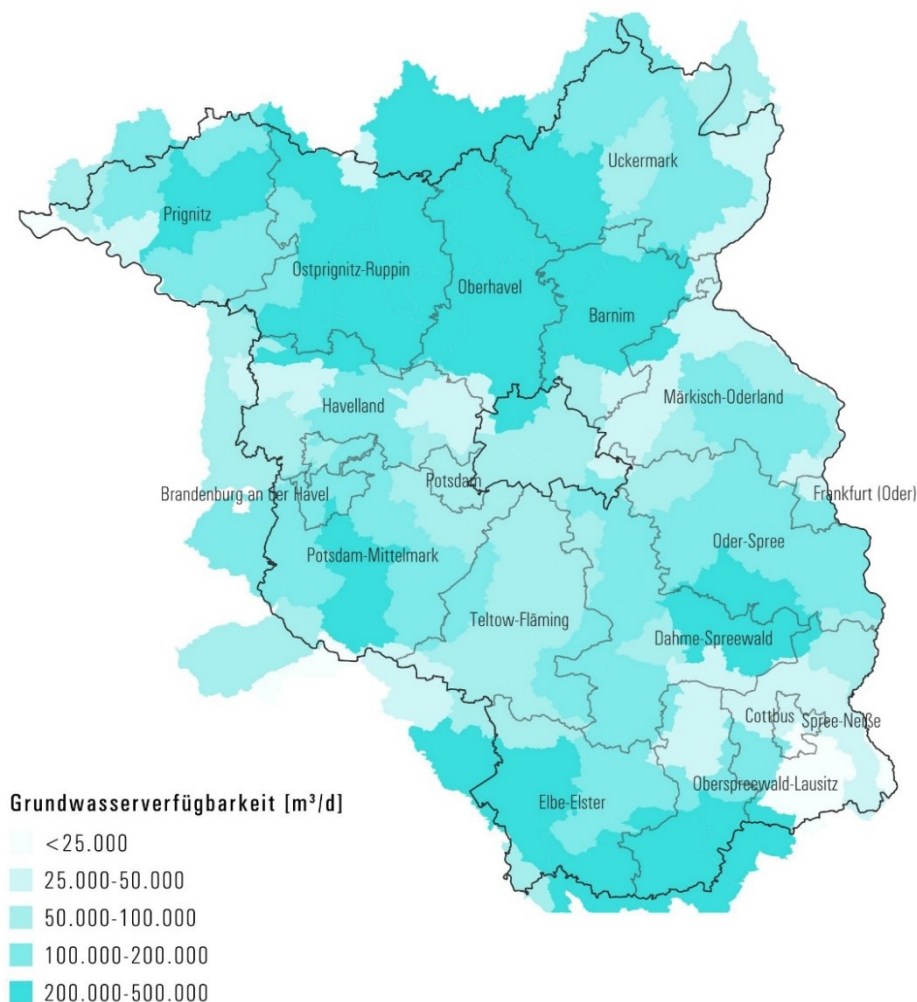


Abbildung 3-6: Verfügbares Grundwasserdargebot [m<sup>3</sup>/d] bei mittleren Verhältnissen.  
Eigene Darstellung nach [LfU 2023 b]



Abbildung 3-7 zeigt den Auslastungsgrad des genutzten Grundwassers bezogen auf das Grundwasserdargebot. In 39 Bilanzgebieten (54 %) liegt der Auslastungsgrad bei < 25 % des Grundwasserdargebots. In 22 Bilanzgebieten (30 %) liegt der Auslastungsgrad zwischen 25 % und 50 %, in 11 Bilanzgebieten (14 %) zwischen 50 % und 75 % und in einem Bilanzgebiet zwischen 75 % und 100 %. Eine Übernutzung des Grundwasserdargebots mit einer Auslastung > 100 % wird für mittlere Verhältnisse nicht abgeleitet.

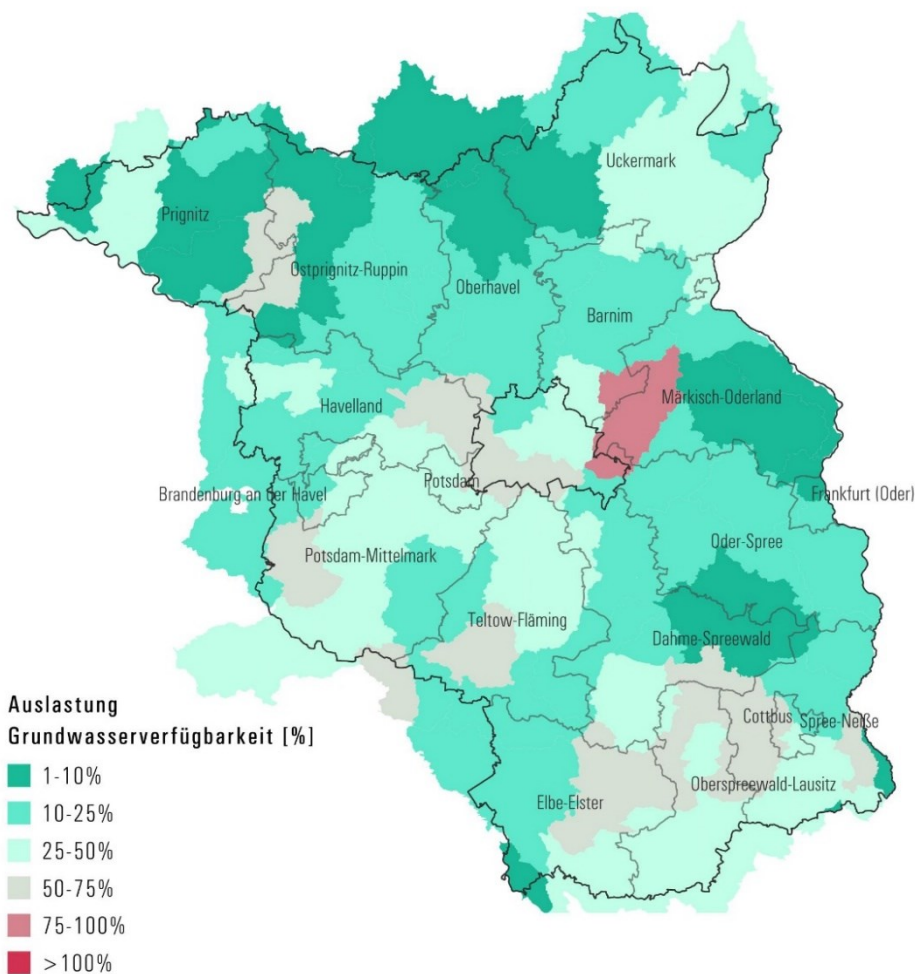


Abbildung 3-7: Auslastungsgrad [%] des Grundwasserdargebots bei mittleren Verhältnissen. Eigene Darstellung nach [LfU 2023b]

Ergänzend wurde das mittlere verfügbare Grundwasserdargebot für Trockenwetterperioden ermittelt. Dazu wurde das 20%-Perzentil der mittleren Jahresabflüsse für die einzelnen Bilanzpegel ausgewertet. Das 20%-Perzentil stellt die Abflussverhältnisse der 6 abflussärmsten Jahre einer 30-jährigen Reihe dar. Die Auswertung für die Bilanzgebiete mit vollständigen Abflussreihen (1990– 2019) zeigte, dass der Trockenjahrfaktor bei durchschnittlich etwa 0,70 bezogen auf die mittleren Verhältnisse liegt. Mit diesem Ansatz reduziert sich das verfügbare Gesamt- bzw. Grundwasserdargebot in Trockenjahren um 30 %

gegenüber dem langjährigen Durchschnitt. Abbildung 3-7 zeigt den sich daraus ergebenden Auslastungsgrad für das Trockenwetter szenario.

Bei Ansatz des Trockenwetter szenarios weisen deutlich mehr Bilanzgebiete eine höhere Ausnutzung des Grundwasserdargebots auf. Die Anzahl der Bilanzgebiete mit einem Auslastungsgrad von 50 % bis 75 % beträgt 10 und mit einem Auslastungsgrad von 75 % bis 100 % handelt es sich um 6 Gebiete. Das Bilanzgebiet Erpe und Fredersdorfer Mühlenfließ ist in Trockenjahren mit einem Auslastungsgrad > 100 % überbilanziert.

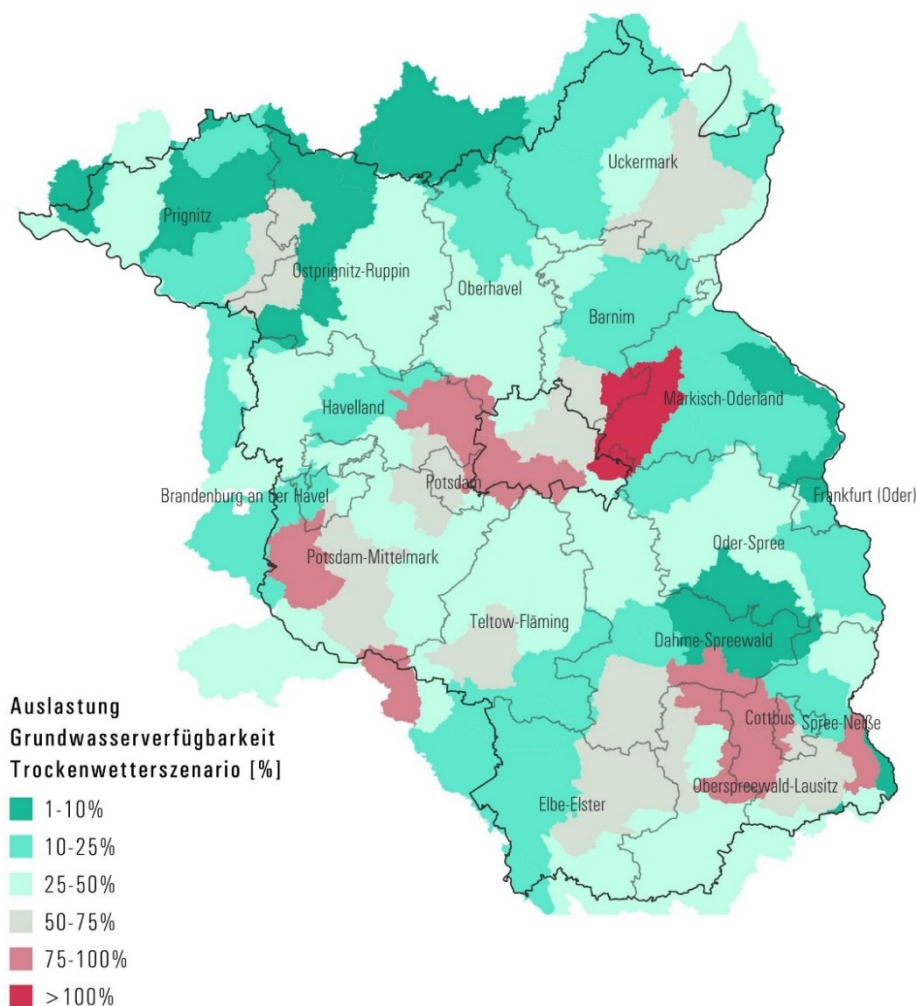


Abbildung 3-8: Auslastungsgrad [%] für das Trockenwetter szenario.  
Eigene Darstellung nach [LfU 2023b]

Auch wenn die dargestellte Methodik auf der stark vereinfachten Annahme zur Bilanzierung des Grundwasserdargebots aus der Gesamtwasserbilanz sowie vereinfachten Ansätzen zur Verdunstung, zur Neubildung in bedeckten Grundwasserleitern, zur Salzwasserbeeinflussung etc. kritisch zu bewerten ist und vermutlich selbst diese Mittelwertbetrachtung das tatsächlich verfügbare Dargebot überschätzt, so lassen sich hiermit trotzdem bereits kritische Regionen aufzeigen, wo weitere Grundwasserentnahmen sehr differenziert zu betrachten sind: So sind insbesondere in der Region Berlin die Grundwasser-



verhältnisse stark angespannt und die Grundwasservorräte vor allem für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung zu sichern. Die Menge des Grundwassers, die von den Berliner Wasserwerken nachhaltig genutzt werden kann, ist weitestgehend ausgeschöpft. Sinkende Grundwasser- und Oberflächenwasserressourcen bei gleichzeitig steigendem Trinkwasserverbrauch stellen eine große Herausforderung für die Sicherung der Wasserqualität dar: Einerseits kommt weniger „frisches Wasser“ aus den Einzugsgebieten nach. Andererseits steigen die Abwassermengen, die von den Klärwerken in das Gewässersystem zurückgeleitet werden. Damit erhöhen sich die Anforderungen an die Reinigung des Abwassers erheblich. Im „Masterplan Wasser Berlin“ sind 32 Maßnahmen zum Wassermengenmanagement und weiteren Handlungsfeldern definiert worden, um langfristig den Berliner Wasserkreislauf und insbesondere die Trinkwasserversorgung zu sichern [SenMVKU 2022].

Ebenso zeigen sich in Teilen der Landkreise Potsdam-Mittelmark und Uckermark stark beanspruchte Grundwasserreserven. In der Lausitz entstand aufgrund der Entwässerung durch den Braunkohletagebau ein großräumiger Grundwasserabsenkungstrichter, der Grundwasserwiederanstieg benötigt mehrere Jahrzehnte.

Dass das ausgewiesene verfügbare Dargebot aktuell schon in einigen Regionen stark ausgelastet ist bzw. nicht mehr zur Verfügung steht, zeigt die in Abbildung 3-9 dargestellte Karte mit interpolierten Trends der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in den Grundwasserleiterkomplexen 1 und 2 (Auswertung von Grundwasserstandsganglinien mit Zeitreihen 1976–2020) [LfU 2022]. Der Grundwasserleiterkomplex 2 ist der Hauptgrundwasserleiter in Brandenburg, der für die Trinkwasserversorgung genutzt wird. Es zeigen sich großräumig Bereiche mit 3-bis 10 cm Absinken der Grundwasserstände pro Jahr, d. h. eine Grundwasserspiegelabnahme von ca. 120 bis 400 cm in den ausgewerteten 40 Jahren. Die ausgewiesenen Bereiche liegen vor allem in den Hochflächen, z. B. Barnim, Niederlausitzer Landrücken, Fläming, Beeskower Platte, Ruppiner Land, die die Grundwasserspeisungsgebiete in Brandenburg darstellen. In den Niederungen ist bereits ebenfalls sichtbar, dass eine Übernutzung des Grundwasserdargebots erfolgt. Die entsprechenden Analysen werden auch durch die noch nicht veröffentlichten Arbeiten in [LfU 2023c] weiter gestützt und verfeinert.

Der langjährige Trend der sinkenden Grundwasserstände hat zumeist komplexe Ursachen, d. h. eine Überlagerung mehrerer Einflussfaktoren: Neben den sich ändernden klimatischen Bedingungen sind auch verringerte Grundwasserneubildungen durch großflächige Kiefernmonokulturen, die starke Entwässerung der Landschaft in Zusammenhang mit der landesweiten Komplexmelioration sowie die Übernutzung der Grundwasserleiter durch Grundwasserentnahmen wesentliche Einflussgrößen. Es ist vor allem auch zu berücksichtigen, dass der Ansatz in der Bilanzierung, dass alles neugebildete Grundwasser bzw. 70 % bei bedeckten Grundwasserleitern dem tieferen 2. Grundwasserleiterkomplex zur Verfügung steht, nicht die realen Verhältnisse abbildet.

In den letzten fünf trockenen Jahren wurde zudem landesweit eine besonders starke Abnahme der Grundwasserspiegel mit Auswirkungen in grundwasserabhängigen Landökosystemen sowie mit sinkenden Seewasserspiegeln oder verringerten Abflüssen bzw. (temporärem) Trockenfallen von Fließgewässern beobachtet. Das hängt vor allem mit den geringeren neubildungswirksamen Niederschlägen durch Verschiebungen im Auftreten der Niederschläge im Jahresverlauf bzw. generell geringeren Niederschlagsmengen sowie mit den hohen Verdunstungsraten aufgrund höherer Temperaturen zusammen. Zudem erfolgte besonders in den Sommermonaten in den Wasserwerken eine

fast doppelt so hohe Entnahme im Vergleich zum Winterhalbjahr. Ebenso wird Wasserverbrauch in der Landwirtschaft und vermutlich auch in der Industrie im Sommer deutlich höher sein und generell in den letzten Jahren aufgrund des Klimawandels zugenommen haben.

Diese Effekte werden in der vorgestellten Bilanzierungsmethode des Landesamts für Umwelt [LfU 2023b] nicht oder nur eingeschränkt abgebildet und sind durch Mittelungen über die Zeit und die Flächen der Bilanzgebiete nicht in dem erforderlichen Maß erkennbar.

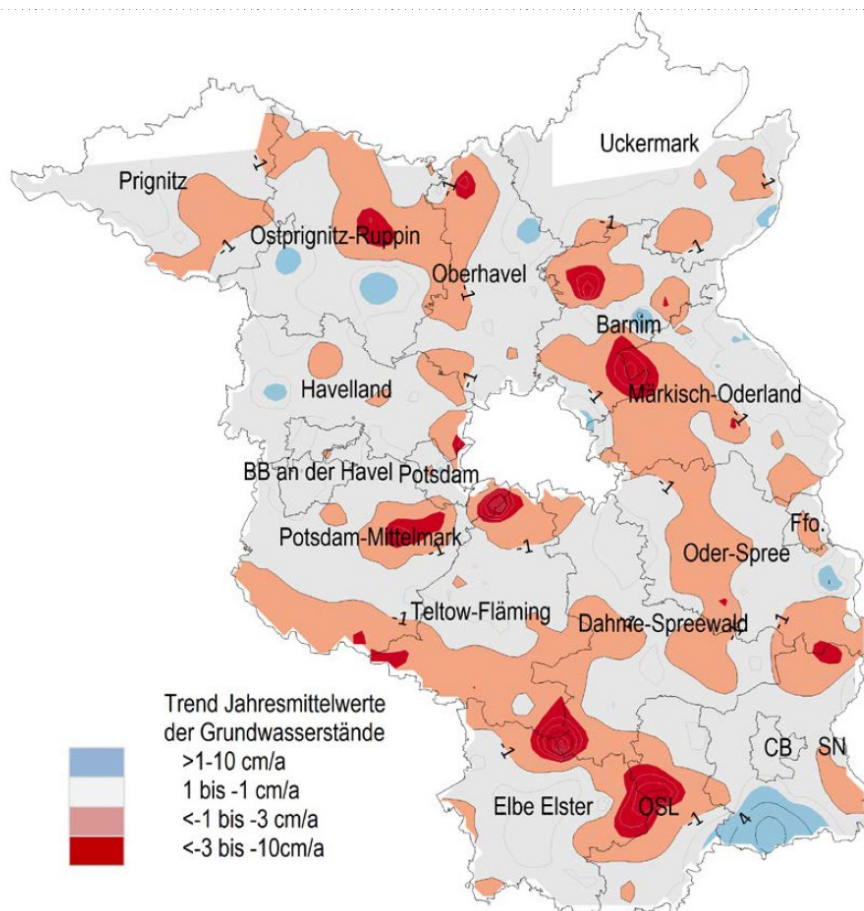


Abbildung 3-9: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in cm/a in den Grundwasserleiterkomplexen 1 und 2 (Reihen 1976–2020).

Quelle: [LfU 2022]

Aus den Klimaprognosen in [BAH 2023] zeigt sich im Jahresmittel ein weiteres Absinken der schon jetzt für Brandenburg defizitären klimatischen Wasserbilanz in der Zukunft. Die Grundwasserneubildung als maßgebend das Dargebot prägende Wasserhaushaltsgröße nimmt im Mittel für Brandenburg und im Mittel der Klimaprojektionen um 15 mm bis Mitte des Jahrhunderts und um ca. 17 mm in der fernen Zukunft ab. Dies entspricht einer Abnahme um 19 bzw. 20 %. Verstärkt werden die negativen Auswirkungen dadurch, dass sich die bisherigen Bilanzüberschüsse im Winterhalbjahr, in dem das meiste Grundwasser neu gebildet wird, verringern und die schon jetzt vorhandenen Defizite zu Beginn der Vegetationsperiode sich künftig vergrößern werden.

Die vorliegende Methode zur landesweiten Grundwasserbilanzierung stellt somit vor allem eine qualifizierte Weiterentwicklung und Präzisierung der bewährten Vorratsprognosen aus den 1980/90er-Jahren dar. Sie soll den Wasserbehörden eine Orientierung zur Wasserrechtsvergabe geben. Es wird empfohlen, dass jedoch nicht mit den ausgewiesenen Absolutmengen je Bilanzgebiet gearbeitet wird, sondern die Betrachtung im Gesamtbild und im Kontext der Auslastung erfolgt.

Es handelt sich ausschließlich um eine Mengenbilanzbetrachtung. Die Bilanzierung entbindet nicht von der Einzelfallentscheidung im Zusammenhang mit der standortkonkreten Prüfung zur Auswirkung von neuen Grundwasserentnahmen. Es sind die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse und das Wasserdargebot zu betrachten und zusammen mit den anderen Wasserbedarfen (Grundwasserentnahmen, Naturschutz, Fischerei, Wasserrahmenrichtlinie, Schifffahrt etc.) zu bewerten. Dazu sind hydrogeologische Gutachten zu erstellen, die je nach Umfang der geplanten Grundwasserentnahme zusätzliche Erkundungen und numerische Modellierungen (Grundwasserströmungsmodellierung oder bei Bedarf auch integrierte Wasserhaushaltsmodellierungen mit Gesamtbetrachtung von Wasserhaushalt und Grundwasser) zur Berücksichtigung der oben genannten Einflussfaktoren beinhalten.

Wenn die Nutzung von Grundwasser als Wasserquelle für die Wasserstoffherzeugung erfolgen soll, dann kann das prinzipiell über eine eigene, neue Wasserfassung (Brunnen) oder über bereits vorhandene Wasserfassungen in Trinkwasserwerken oder an Industriestandorten geschehen. In jedem Fall ist die Auswirkung zusätzlicher Entnahmen zu prüfen.

Wenn Wasserwerke noch Kapazitäten in ihren Wasserrechten haben [LfU 2024], die über den Bedarf der Trinkwasserversorgung hinausgehen, dann kann ggf. bereits aufbereitetes Trinkwasser „aus der Leitung“ für die H<sub>2</sub>-Herstellung genutzt werden. Das kann vor allem für dezentrale Standorte eine Option sein. Gemeinsam mit dem Wasserversorger und der Wasserbehörde sind das Wasserdargebot und die Auswirkungen der zusätzlichen Entnahme unter den aktuellen Rahmenbedingungen zu prüfen. Wenn die vorhandenen Wasserrechte genutzt werden können, ist kein neues Wasserrechtsverfahren notwendig.

Wenn eine neue Wasserfassung (Brunnen) errichtet werden soll oder eine Erhöhung der Entnahmerechte an bereits vorhandenen Grundwasserentnahmestandorten erfolgen soll, sind umfangreiche Gutachten zu erstellen (hydrogeologisches Gutachten, Wasserrechtsantrag, UVP-Vorprüfung und ggf. weitere). Der Genehmigungsaufwand ist bei der Planung von Anlagen zur Wasserstoffherstellung zu berücksichtigen.

Bei der Installation von größeren Elektrolyseuren empfiehlt sich eine Kombination von Wasserquellen, um möglichst die Grundwasserressourcen zu schonen. Zusätzlich zu Grundwasser als saisonal unabhängige Wasserressource ist im Wasserversorgungskonzept die Nutzung von gefasstem Niederschlagswasser, Oberflächenwasser in Überschusszeiten und ggf. Abwasser zu integrieren.

### 3.3.3. Oberflächenwasserdargebot

Die verschiedenen Nutzungsansprüche früherer Generationen und die daraus erwachsenen Anforderungen an das Management zur Verteilung der Wasserressourcen haben das heutige Gewässernetz Brandenburgs geprägt. Natürliche Fließgewässer wurden begradigt und ausgebaut und um eine Vielzahl an künstlichen Wasserläufen ergänzt. Um angepasst an die jeweiligen Nutzungserfordernisse Wasser ableiten oder einspeisen zu können, wurde der natürliche Wasserrückhalt der Landschaft reduziert, sodass verfügbare Wasserressourcen schneller aus der Landschaft den Gewässern zufließen

und abgeführt werden, wenn sie nicht durch Staue oder durch Wehre zurückgehalten werden. Resultat ist ein ausgedehntes künstliches oder erheblich verändertes Gewässernetz mit schätzungsweise 30.000 vorwiegend der Stauhaltung und Abflusssteuerung zur Ent- und Bewässerung dienenden wasserwirtschaftlichen Anlagen. Auch die großen natürlichen Fließgewässer, aber auch die Unterläufe der kleineren natürlichen Gewässer sind meist staureguliert. Die Abflüsse von Spree, Schwarzer Elster, Dosse und Rhin werden zudem durch Speicher zum Hochwasserrückhalt sowie zur Niedrigwasseraufhöhung gesteuert [MLUK, 2021].

In Zusammenhang mit den aktuellen klimatischen Bedingungen ist das Oberflächenwasserdargebot in Brandenburg keine unbeschränkt nutzbare Wasserquelle. Relevante Entnahmen für Industrie und Gewerbe erfolgen nur in den Gewässern 1. Ordnung, die noch ganzjährig Abfluss haben, d. h. in der Spree, der Oder sowie an der Havel (siehe Abbildung 3-21).

Bei der Entnahme von Oberflächenwasser ist zu beachten, dass die festgelegten Mindestabflüsse gewährleistet werden müssen. Vor allem in den Sommermonaten der letzten Jahre lagen die Abflüsse lang anhaltend unter den Schwellenwerten. Somit kann eine kontinuierliche Entnahme zur Wasserversorgung mit Oberflächenwasser nicht gewährleistet werden. In den Wintermonaten gibt es zumeist hohe Abflüsse mit Überschusswasser, das zur Entnahme zur Verfügung steht, in den Sommermonaten kann hingegen die Entnahme von Oberflächenwasser stark eingeschränkt sein. Die Saisonalität dieser Wasserquelle ist bei der Planung von Wasserversorgungskonzepten für Elektrolysestandorte zu beachten.

An die größeren Oberflächengewässer in Brandenburg bestehen bereits aktuell vielfältige Nutzungsansprüche, u. a. für die Schiffbarkeit, die Bereitstellung von Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung sowie Entnahmen für Industrie und Gewerbe, für Teichwirtschaften, für den Naturschutz, für Wasserqualitätssteuerungen etc., so dass bereits heute die Wasserbilanz in länger andauernden Trockenphasen nicht ausgeglichen ist. Es wird also mehr Wasser entnommen, als zugeführt wird, bzw. sind in den Sommermonaten die Niederschläge und die grundwasserbürtigen Basisabflüsse aus dem Einzugsgebiet einfach zu gering.

Im Folgenden werden ausgewählte Abflussganglinien und Dauerlinien [LfU 2019] an vier Pegeln der Niedrigwasserampel des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz dargestellt [MLUK 2021].

Abbildung 3-10 zeigt die Karte der 16 Flussgebiete in Brandenburg und die Pegel der Niedrigwasserampel in Brandenburg mit Markierung der ausgewählten Pegel Rathenow, Rhinow, Leibsch und Hohensaaten-Finow zur Darstellung der Abflussverhältnisse. Der Bildschirmabdruck wurde Ende September 2023 auf der Auskunftsplattform Wasser Land Brandenburg [eAPW] abgerufen – zu diesem Zeitpunkt zeigten alle Abflusspegel der Niedrigwasserampel eine Unterschreitung der Vorwarnstufe (gelb) und vor allem der Warnstufe (rot).



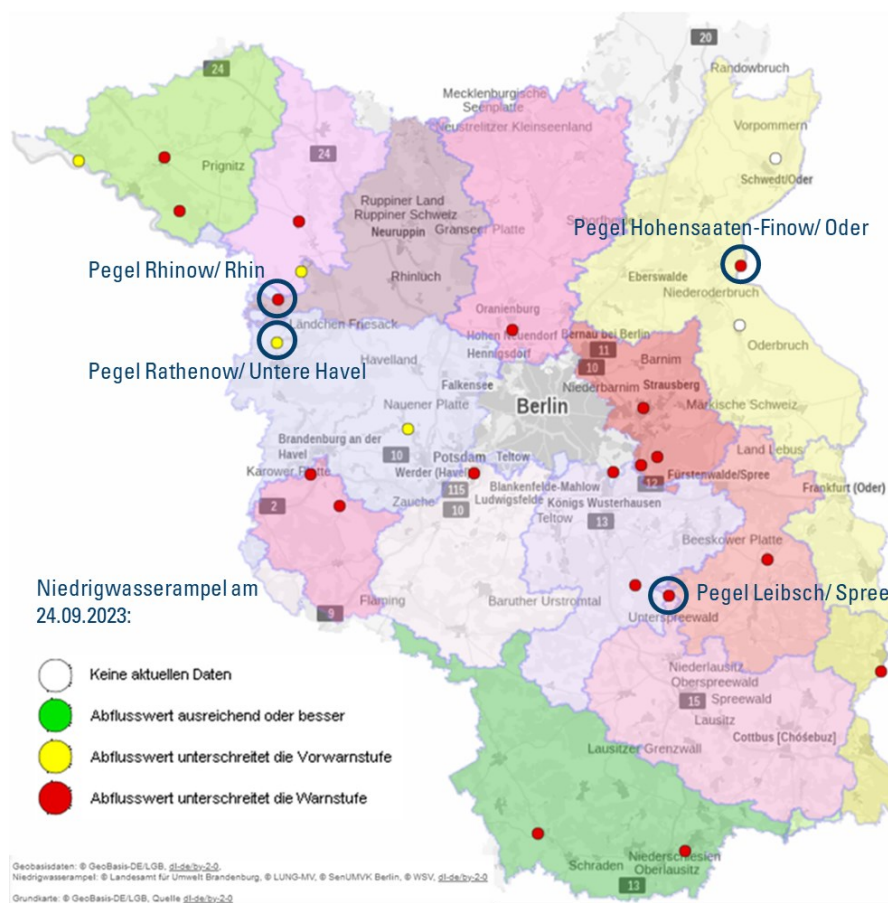


Abbildung 3-10: Karte der Flussgebiete und Pegel der Niedrigwasserampel in Brandenburg. Bildschirmabdruck, abgerufen auf der Auskunftsplattform Wasser Land Brandenburg [eAPW] am 24.09.2023 mit Markierung ausgewählter Pegel zur Darstellung der Abflussverhältnisse

Abbildung 3-11 (links) zeigt das 19.358 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet des Pegels **Rathenow in der Unteren Havel**. Vom Landesamt für Umwelt wurde im Nachgang zum sehr warmen und relativ niederschlagsarmen Jahr 2018 eine hydrologische Einordnung des Niedrigwasserereignisses 2018 und die Einschätzung der in den Flussgebieten zu verzeichnenden wasserwirtschaftlichen Situationen erarbeitet [LfU 2019]. Für die Ermittlung der Überschreitungsdauern wurde die langjährige Messreihe zu den Abflüssen von 1952 bis einschließlich 2018 ausgewertet. In Abbildung 3-11 (rechts) werden alle Vergleichsjahre gezeigt, deren NM90Q (niedrigstes arithmetisches Mittel von 90 aufeinanderfolgenden Tageswerten des Abflusses) kleiner ist als das 15%-Perzentil der NM90Q aus der Vergleichsreihe 1991 – 2015. Als Ergebnis der Gegenüberstellung der Unterschreitungsdauerlinien ist in der Unteren Havel am Pegel Rathenow das Jahr 2018 als das bis dato stärkste Niedrigwasserereignis einzustufen. Wie Abbildung 3-12 zeigt, wurden auch in den Jahren 2019 und 2022 ähnliche Niedrigwasserereignisse mit 90 bis 100 Tagen Unterschreitung der Warnstufe (rot) beobachtet. Insgesamt zeigt die Abflussganglinie in den letzten Jahren eine deutliche Abnahme der Abflüsse und dies insbesondere in den Sommermonaten.

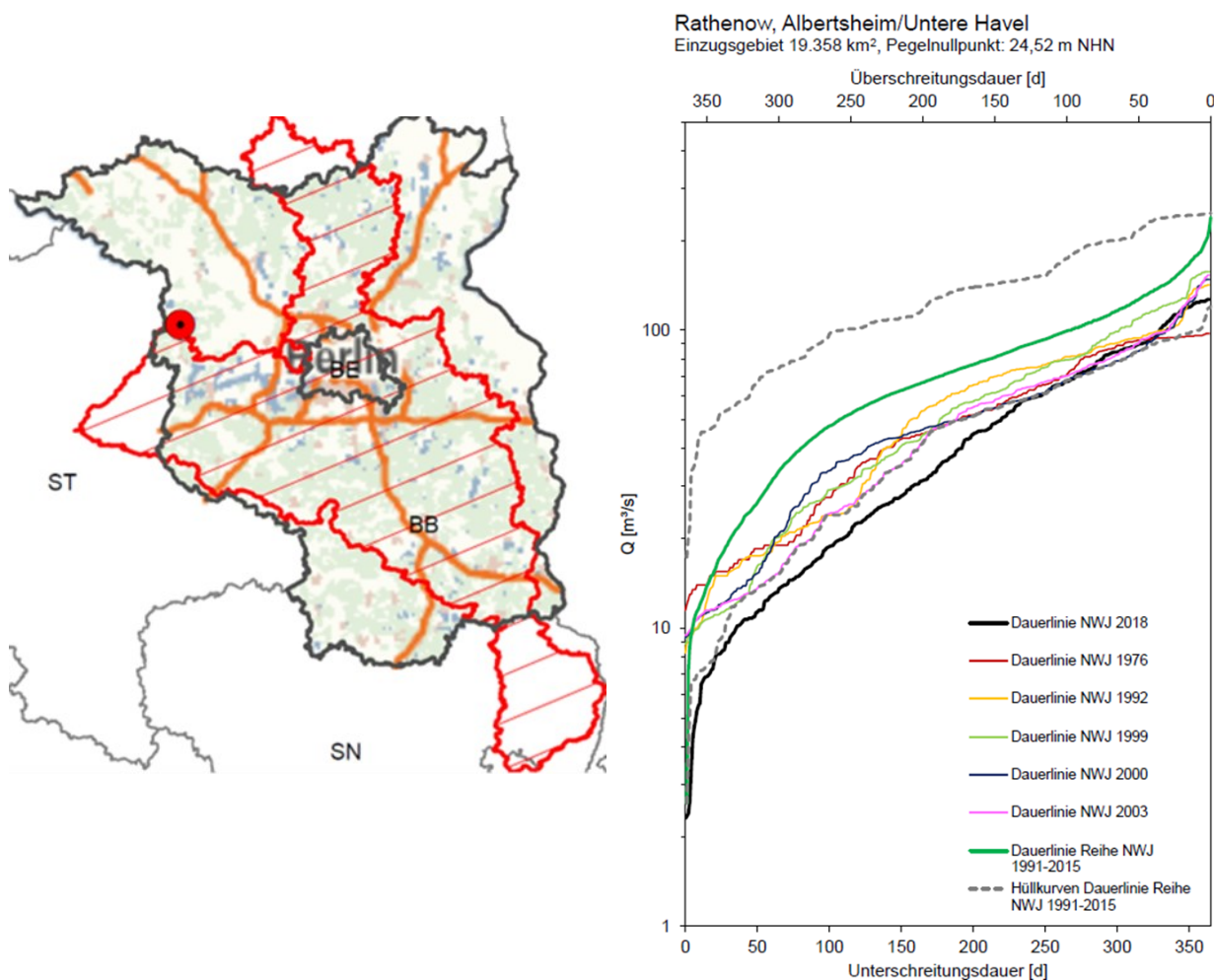


Abbildung 3-11: Einzugsgebiet des Pegels Rathenow / Untere Havel (links) und Auswertung der Unterschreitungsdauern (rechts).

Quelle: [LfU 2019], unveröffentlicht

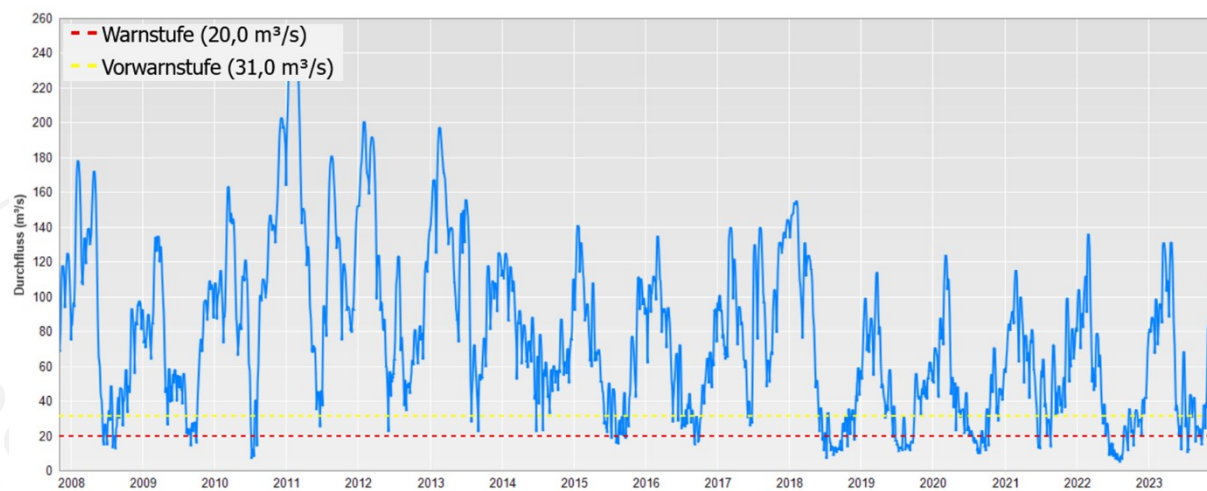


Abbildung 3-12: Abflussganglinie am Pegel Rathenow/ Untere Havel für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel.

Quelle: [eAPW]



In Abbildung 3-13 ist die Abflussganglinie am Pegel **Rhinow im Rhin** für den Zeitraum 2008–2023 mit den Warnstufen der Niedrigwasserampel dargestellt. Hieraus abzuleiten sind auch die Anzahl der Unterschreitungstage der Warnstufen der Niedrigwasserampel in den Sommerhalbjahren 2017–2022. Die Warnstufe (rot) wurde in den Jahren 2018, 2019, 2020 und 2022 an 160 bis 180 Tagen unterschritten, d. h. fast das komplette Sommerhalbjahr. Im Einzugsgebiet des Rhin gibt es die Rhinspeicher zur Niedrigwasseraufhöhung. Die Entwicklung des Abflusses in den letzten Jahren zeigt, dass die vielfältigen Nutzungsansprüche so stark über dem Abflussdargebot liegen, dass trotz der Speicherbewirtschaftung am Gebietsauslass die Schwellenwerte unterschritten werden und ein ökologischer Mindestabfluss im Sommer über Monate nicht gewährleistet ist.

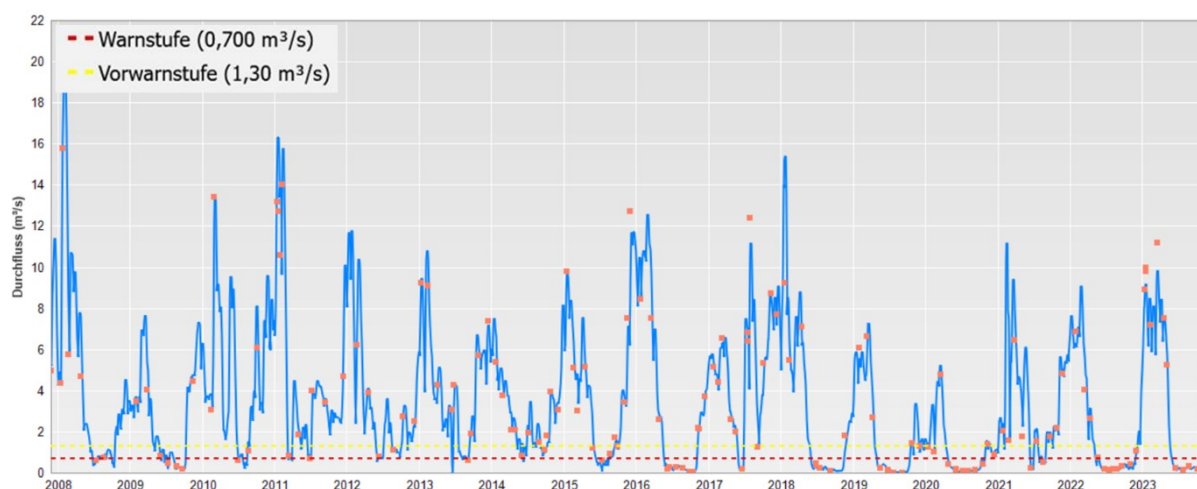


Abbildung 3-13: Abflussganglinie am Pegel Rhinow / Rhin für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel.

Quelle: [eAPW]

In Abbildung 3-14 ist die Abflussganglinie am Pegel **Leibsch in der Spree** für den Zeitraum 2008–2023 mit den Warnstufen der Niedrigwasserampel dargestellt. Auch hier zeigen sich insbesondere in den Sommerhalbjahren 2017 – 2022 eine große Anzahl an Unterschreitungstagen der Warnstufen der Niedrigwasserampel: Trotz der Sumpfungswassereinleitungen aus den Tagebauen sowie den Niedrigwasseraufhöhungen aus den Talsperren und Speichern in Sachsen und Brandenburg liegen seit 2018 jedes Jahr (bis auf 2022) die sommerlichen Abflüsse 100 bis 130 Tage unterhalb der Warnstufe (rot) am Pegel Leibsch. Dies stellt sowohl eine Gefährdung für das Ökosystem Spreewald und die unterschiedlichen Wassernutzer im Land Brandenburg (Industrie, Teichwirtschaften, Landwirtschaft, Tourismus, Naturschutz etc.) als auch für die Wasserversorgung Berlins dar.

Der Pegel Leibsch ist ein wichtiger Bezugspegel für die Wassermengen- und Sulfatlaststeuerung bis Berlin und aktuell stark durch die Sumpfungswassereinleitungen geprägt. Nach Rückgang bzw. Auslaufen der Braunkohleförderung im Lausitzer Revier werden sich die über Jahrzehnte verfügbaren Sumpfungswassermengen in den nächsten zwei Jahrzehnten auf null reduzieren. Im Einzugsgebiet der Spree beliefen sich im Jahr 2020 die Einleitungsmengen an Sumpfungswasser durch die LEAG im Durchschnitt auf etwa 5 m<sup>3</sup>/s (entspricht etwa 158 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr). Diese Mengen sollen nach Angaben des Unternehmens zeitlich gestaffelt bis 2035 auf 4 m<sup>3</sup>/s (126 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr) und dann bis 2050 (Beendigung der Sanierungsarbeiten) auf schließlich 0 m<sup>3</sup>/s sinken. Mittelfristig entsteht zum Ausgleich der Folgen des noch aktiven Bergbaus

ein zusätzlicher hoher Wasserbedarf für die Flutung der Tagebaue (Auffüllung Tagebauhohlraum und Grundwasserabsenktrichter). Das heißt, die Abflüsse in der Spree werden sich nach Beendigung des Bergbaus deutlich reduzieren, gleichzeitig steigen die Wasserbedarfe sowohl für die Bergbausanierung als auch für die vielfältigen Nutzungsanforderungen in Brandenburg und Berlin<sup>25</sup>. Welchen Einfluss klimabedingte Folgen auf die Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser vor Ort haben werden, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Zusammenfassend muss demnach mit einem deutlichen Rückgang des Wasserdargebots einerseits bei tendenziell steigenden Bedarfen gerechnet werden. Es sei abschätzbar, „dass nicht alle Bedarfe mit dem nachbergbaulich bestehenden Dargebot vollumfänglich zu jeder Zeit gedeckt werden können“ [LfU 2024a]. Die vorhandenen Speicher sind nicht ausreichend, daher wurden Handlungsoptionen zur Erweiterung der Speicherkapazitäten sowie Überleitungen aus anderen Flussgebieten zur Erhöhung des Dargebots erarbeitet [UBA 2023].

Da in Verbindung mit dem Braunkohleausstieg 2038 auch der hohe Wasserbedarf für die Kraftwerke (Kühlung) entfällt, ist im Gesamtkontext zu prüfen, ob eine Wasserentnahme für die Wasserstoffproduktion an der Spree zugelassen werden kann. Im Ergebnis der UBA-Studie zu wasserwirtschaftlichen Folgen des Braunkohleausstiegs wird eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs im Spreegebiet als nicht realisierbar eingeschätzt [UBA 2023].

Bei der Prüfung einer Wassernutzung aus der Spree die hohe Sulfatkonzentration aufgrund der Bergbaubeeinflussung und der damit verbundene ggf. erhöhte Aufbereitungsaufwand zu berücksichtigen.

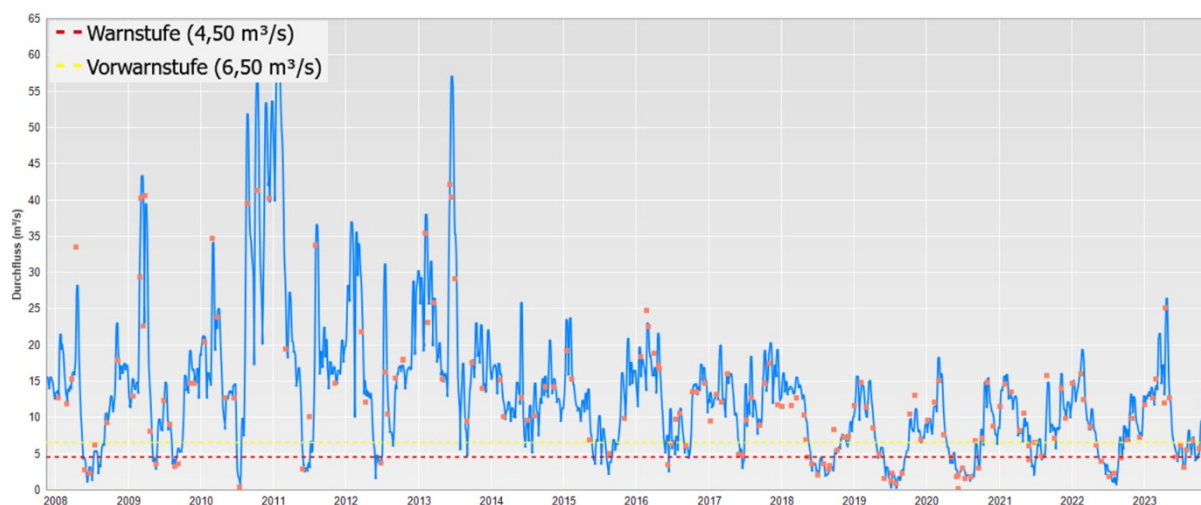


Abbildung 3-14: Abflussganglinie am Pegel Leibsch / Spree für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel.

Quelle: [eAPW]

In Abbildung 3-15 ist die Abflussganglinie am Pegel **Hohensaaten-Finow in der Oder** für den Zeitraum 2008–2023 mit den Warnstufen der Niedrigwasserampel dargestellt. Im Einzugsgebiet der Oder waren nach Auswertungen des Landesamts für Umwelt die sich ähnelnden Niedrigwasserereignisse 2015 und 2018 die bisher niedrigsten [LfU 2023 d]. Wie die Darstellung zeigt, werden die Warnstufen seitdem aber weiterhin

<sup>25</sup> Etwa durch zunehmenden Bedarf für die Trinkwasserversorgung in Berlin, Bewässerung der Landwirtschaft, Industrieansiedlungen, inkl. Wasserstoffproduktion oder Wasserbedarfe für Flutung der Tagebaufolgeseen sowie zur Wiederherstellung des nachbergbaulichen Wasserhaushalts.

im Sommer lang anhaltend unterschritten. Auch wenn die Oder nicht trockenfallen wird und im Sommer an dem Pegel noch Abflüsse über 150 m<sup>3</sup>/s (entspricht ca. 13 Mio m<sup>3</sup>/d) aufweist, so ist im Detail zu prüfen, ob für eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs Wasserentnahmen aus der Oder bzw. den Wasserstraßen genehmigt werden können, da die Mindestabflüsse zu gewährleisten sind. Eine Genehmigung einer neuen Wasserentnahme direkt aus der Oder ist aufgrund der Eigenschaft als Grenzfluss auszuschließen. Unabhängig von der konkreten Entnahmestelle ist die Beschaffenheit des Oder-Wassers in Bezug auf den Aufbereitungsaufwand für die Elektrolyse zu prüfen (v. a. Chlorid).

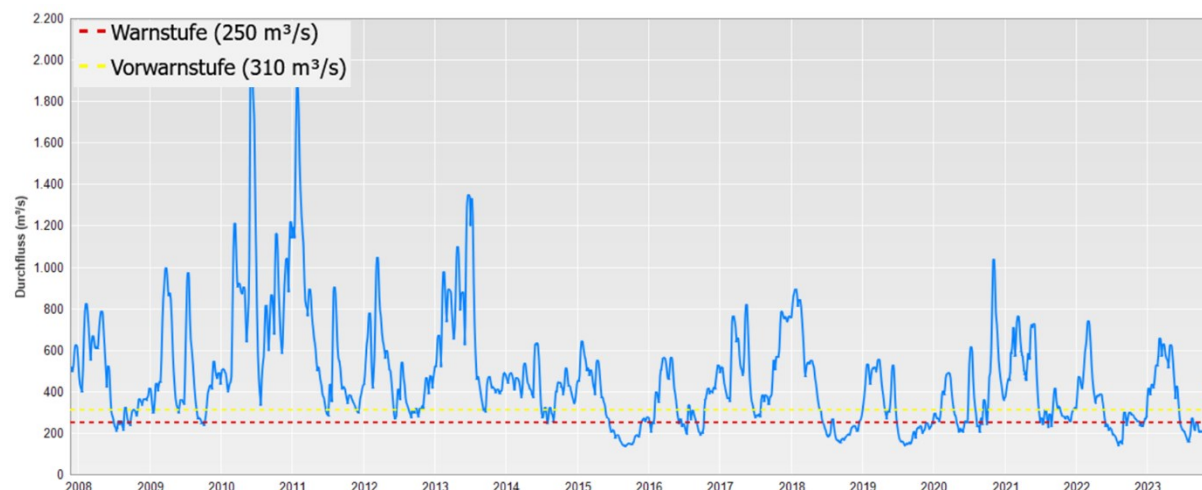


Abbildung 3-15: Abflussganglinie am Pegel Hohensaaten-Finow / Oder für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel.

Quelle: [eAPW]

Die dargelegten Ausführungen zeigen, dass selbst in den Gewässern 1. Ordnung die Mindestabflüsse in den letzten Jahren nicht eingehalten werden konnten. Die aktuelle Bewirtschaftung und die Nutzungen führen landesweit häufig und langanhaltend zur Unterschreitung der Warnstufen im Sommer führen. Das heißt, für eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs kann pauschal nicht gewährleistet werden, dass ganzjährig die entsprechenden Wasserbedarfe über die Entnahme von Oberflächenwasser gedeckt werden können. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

Nutzbare Abflüsse sind nur in den Wintermonaten vorhanden, sodass ggf. eine Kombination von Wasserquellen für die Wasserstoffproduktion einen Lösungsansatz darstellen kann (Oberflächenwasser im Winter, Grundwasser und Abwasser als kontinuierliche Quelle für die Deckung der Wasserbedarfe im Sommer). Dies ist ebenfalls standortkonkret zu prüfen.

Bei der Nutzung von Wasser aus der Spree oder der Oder sind zudem bei der Bewertung der Eignung und Effizienz die Wasserqualitäten und der damit verbundene ggf. höhere Aufbereitungsaufwand aufgrund vor allem der Sulfat- bzw. Chloridkonzentrationen zu berücksichtigen.

### 3.3.4. Gereinigtes Abwasser

Gereinigtes Abwasser ist eine kontinuierliche Wasserquelle mit konstanter Beschaffenheit. Gereinigtes Abwasser ist nicht direkt für die Elektrolyse nutzbar (siehe Kapitel 2.3.3), kann aber nach Aufbereitung eine wertvolle Ressource darstellen. Das bei der Vorbehandlung für die Elektrolyse anfallende Konzentrat ist erneut einer Kläranlage zuzuführen, was bei den Planungen entsprechend Berücksichtigung finden sollte.

Die Nutzung von gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffproduktion kann vor allem für mittlere Anlagen eine Option zur Schonung der natürlichen Wasserressourcen darstellen. Dies betrifft insbesondere die Region um Berlin, wo ein hohes Abwasseraufkommen besteht und gleichzeitig die natürlichen Wasserdargebote ausgeschöpft sind bzw. die Sicherung der Trinkwasserversorgung zu gewährleisten ist. In den Klärwerken der Berliner Wasserbetriebe ist in den kommenden Jahren schrittweise die Einrichtung der vierten und nachfolgend der fünften Reinigungsstufen vorgesehen (diese werden in Kapitel 4.3.3 kurz erklärt). Für die Wasserstoffproduktion größeren Umfangs kann gereinigtes Abwasser einen Anteil am Gesamtwasserversorgungskonzept bilden. Für kleinere Anlagen ist wahrscheinlich der Aufbereitungsaufwand zu hoch und nicht effektiv.

Neben der Region Berlin empfiehlt sich auch in größeren Städten mit relevantem Abwasseranfall (s. Abbildung 4-12) die Prüfung der Nutzung gereinigten Abwassers für die Wasserstoffproduktion: In den größeren Kläranlagen erfolgt zumeist eine bessere Reinigung des Abwassers und es steht somit ein qualitativ besser gereinigtes Abwasser für die weitere Aufbereitung zur Verfügung. Zudem können Synergieeffekte z. B. zur Abwärmenutzung in den Städten genutzt werden.

Generell ist bei den Überlegungen zur Nutzung gereinigten Abwassers zu berücksichtigen, dass die Einleitung in die Gewässer teilweise einen wichtigen Anteil am Abfluss bildet, insbesondere in den Sommermonaten, und diese Nutzungsansprüche bei der Konzeption der Abwassernutzung zu berücksichtigen sind.

### 3.4. Statistische Daten zum Wasserhaushalt Brandenburgs

Das Amt für Statistik Berlin-Brandenburg stellt im Rahmen von jährlichen bzw. mehrjährigen Erhebungen grundlegende Informationen zur öffentlichen und nicht-öffentlichen Wasserversorgung sowie Abwasserentsorgung für wasserwirtschaftliche Analysen und Planungen bereit [Amt für Statistik-BE-BB 2022]. Die aktuellen Daten beziehen sich auf das Berichtsjahr 2019. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über wesentliche Größen des Wasserhaushalts Brandenburgs und Berlins geben.

#### Übersicht Wasserhaushalt Brandenburg

Im Jahr 2019 wurde in Brandenburg nach [Amt für Statistik BB 2022] eine Wassermenge von ca. 615 Mio. m<sup>3</sup>/a gewonnen, wovon ca. 164 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die öffentliche und ca. 451 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die nicht-öffentliche Wasserversorgung entfielen (siehe Abbildung 3-16). Hinzu kommen weitere 406 Mio. m<sup>3</sup>/a, die in Berlin gewonnen wurden [Amt für Statistik BE 2022]. Diese verteilen sich zu 209 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die öffentliche Wasserversorgung und 197 Mio. m<sup>3</sup>/a auf die nicht-öffentliche Wasserversorgung (= Eigengewinnung durch Unternehmen).

Der Wassergewinnung wird im Rahmen der Statistik die Wassernutzung gegenübergestellt. Diese umfasst für Brandenburg im Sinne dieser Statistik sowohl die öffentliche Abgabe von Wasser an Letztverbraucher (127 Mio. m<sup>3</sup>/a), als auch das sogenannte Wasseraufkommen (nicht-

öffentlich) in Höhe von 505 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2019. Letzteres teilt sich auf in Wasser, das in Betrieben eingesetzt wird (220 Mio. m<sup>3</sup>/a) sowie ungenutzt wieder abgeleitetes Wasser (247 Mio. m<sup>3</sup>/a)<sup>26</sup> oder an

<sup>26</sup> Dies enthält etwa Sumpfungswasser in der Braunkohleförderung, das dem Oberflächenwasser (z. B. der Spree) zugeführt wird.

Dritte abgegebenes Wasser (38,9 Mio. m<sup>3</sup>/a). Um Doppelzählungen zu vermeiden, wird die außerdem im Wasseraufkommen berücksichtigte Menge an Bezug von Wasser (z. B. aus dem öffentlichen Netz oder von Dritten) in Höhe von 55,0 Mio. m<sup>3</sup>/a aus der Gesamtsumme wieder herausgerechnet (siehe Abbildung 3-16).

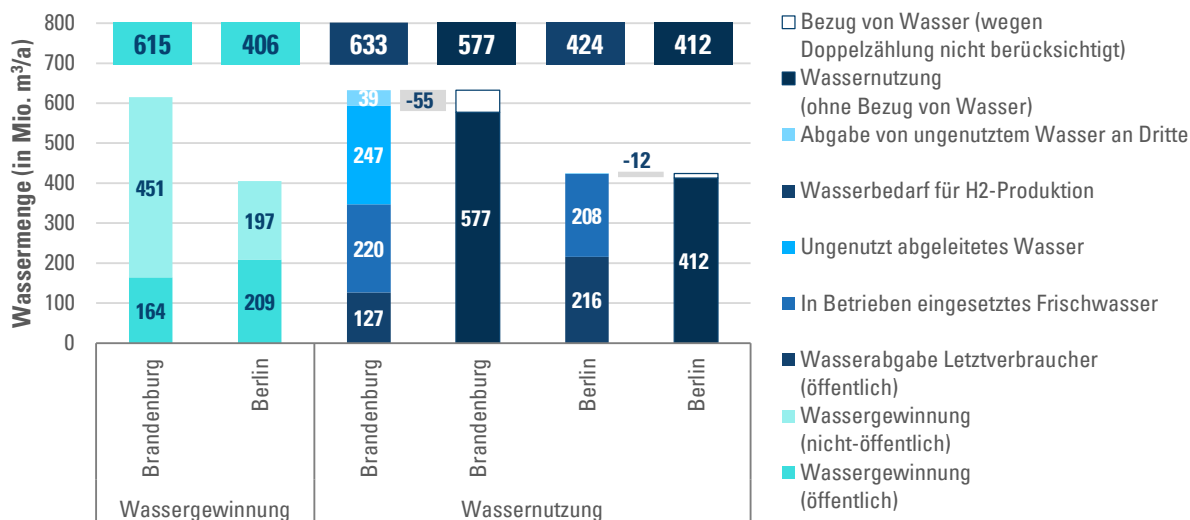
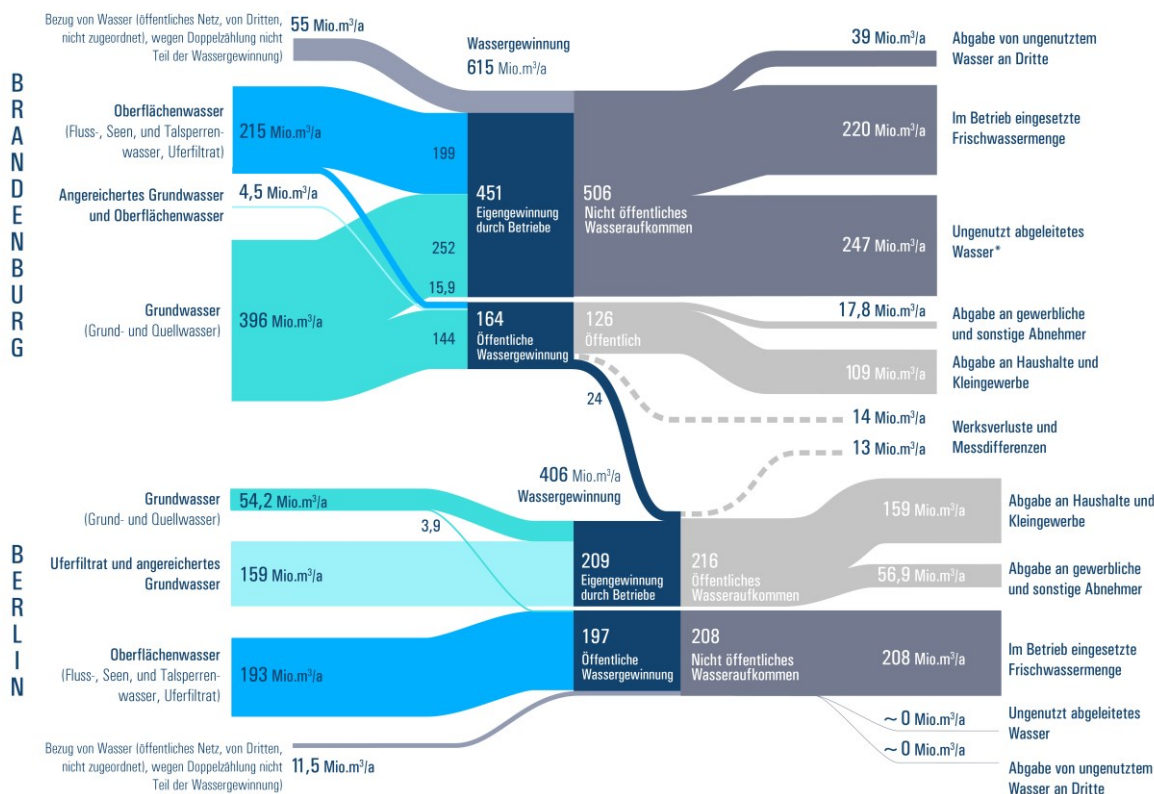


Abbildung 3-16: Statistische Daten zur Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin.

Quelle: LBST nach [Amt für Statistik BB-BE 2022]





\* Ungenutzt abgeleitetes Wasser beschreibt beispielsweise Sumpfungswasser, das direkt in einen Oberflächenwasserkörper abgeleitet wird.

\* Ungenutzt abgeleitetes Wasser beschreibt beispielsweise Sumpfungswasser im Braunkohletagebau, das direkt in einem Oberflächenwasserkörper abgeleitet wird.

Abbildung 3-17: Sankey-Diagramm des Wasserhaushalts für Brandenburg (oben) und Berlin (unten): Wassergewinnung (links) und Wasserabgabe bzw. -nutzung (rechts). Eigene Darstellung nach Daten aus [Amt für Statistik BB-BE 2022]

Das Sankey-Diagramm in Abbildung 3-17 stellt einige ausgewählte Daten nach [Amt für Statistik BB-BE 2022] dar, um einen Gesamtüberblick über den Wasserhaushalt Brandenburgs und Berlins zu ermöglichen.<sup>27</sup> Hierzu werden die Quellen der öffentlichen und nicht-öffentlichen Wassergewinnung (auf der linken Seite) der Wassernutzung durch den öffentlichen Bereich (Abgabe an Letztverbraucher) sowie dem nicht-öffentlichen Wasseraufkommen (rechte Seite) gegenübergestellt. Dabei ist auch dargestellt, dass aus der öffentlichen Wassergewinnung in Brandenburg rund 24,3 Mio. m<sup>3</sup>/a nach Angaben der Statistik nach Berlin fließen und dort einer Nutzung zugeführt werden.

Heruntergebrochen auf die einzelnen Landkreise ergibt sich hinsichtlich der Wassergewinnung (öffentlich sowie nicht-öffentliche Eigengewinnung) aus der Statistik das folgende Bild<sup>28</sup>. Wie in Abbildung 3-18 zusammengefasst, wurden mit etwa 312 Mio. m<sup>3</sup>/a die größten Wassermengen im Landkreis Spree-Neiße (ca. 50 %) entnommen. Knapp 65 % der Entnahmen in Brandenburg erfolgten direkt aus dem Grundwasser und ca. 35 % aus dem Oberflächenwasser.

<sup>27</sup> Hierbei sei auf Bilanzierungsungenauigkeiten der Statistik verwiesen.

<sup>28</sup> Hinweis: Die Angaben zum Bezug von Wasser wurden aus Gründen potenzieller Doppelzählung nicht berücksichtigt.



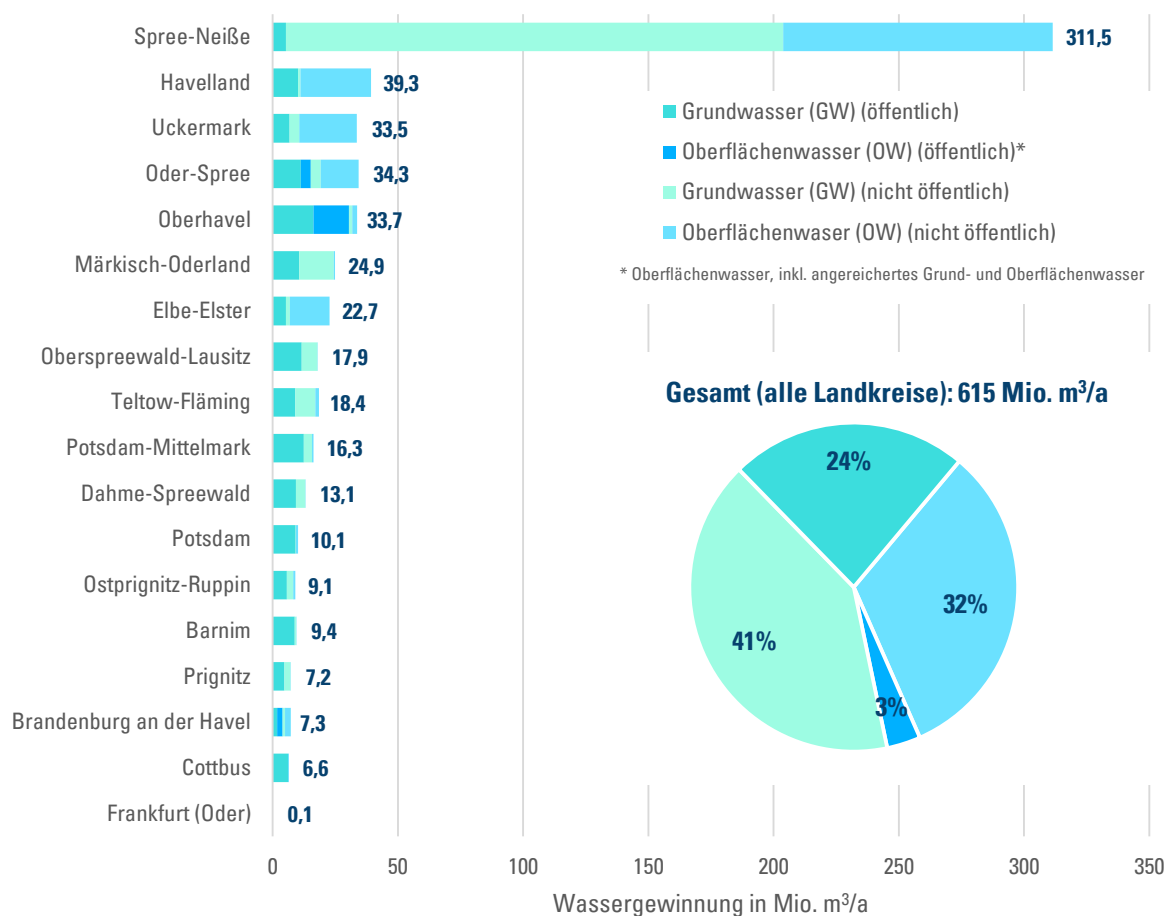


Abbildung 3-18: Öffentliche und nicht-öffentliche Wassergewinnung 2019 nach Landkreis. Eigene Darstellung nach [Amt für Statistik-BB 2022]

### Öffentliche Wassergewinnung und -nutzung

Im Jahr 2019 wurden in Brandenburg nach [Amt für Statistik-BB 2022] 164 Mio. m<sup>3</sup> Wasser durch die öffentliche Wasserversorgung gewonnen. Davon entfiel mit ca. 144 Mio. m<sup>3</sup> der überwiegende Teil (88 %) auf Grund- und Quellwasser und weitere 20,5 Mio. m<sup>3</sup> auf Uferfiltrat und angereichertem Grund- und Oberflächenwasser (12 %). Für Berlin betrug die öffentliche Wassergewinnung nach [Amt für Statistik-BE 2022] rund 209 Mio. m<sup>3</sup> (davon 50,3 Mio. m<sup>3</sup> (24 %) aus Grundwasser und 159 Mio. m<sup>3</sup> (76 %) aus Uferfiltrat und angereichertes Grundwasser). An Letztverbraucher in Brandenburg wurden im gleichen Jahr insgesamt 127 Mio. m<sup>3</sup> Wasser aus dem öffentlichen Leitungsnetz abgegeben. Diese verteilten sich mit 109 Mio. m<sup>3</sup> (86 %) zum größten Teil an Haushalte und Kleingewerbekunden<sup>29</sup> sowie zu den übrigen 14 % mit 17,8 Mio. m<sup>3</sup> an Gewerbeverbraucher und sonstige Abnehmer<sup>30</sup>. Die Wasserabgabe an

<sup>29</sup> Zum Kleingewerbe zählen z.B. Bäckereien, Friseure, Metzgereien, Arztpraxen.

<sup>30</sup> Rechnerische Differenz aus Wasserabgabe zum Letztverbrauch und Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe.

Letztverbraucher in Berlin betrug 216 Mio. m<sup>3</sup>, mit 159 Mio. m<sup>3</sup> (74 %) an Haushalte und Kleinverbraucher sowie 56,9 Mio. m<sup>3</sup> (26 %) an gewerbliche und sonstige Abnehmer.

**Nicht-öffentliche Wassergewinnung und -nutzung (=Wasseraufkommen)**

2019 entfielen in Brandenburg 73 % (>451 Mio. m<sup>3</sup>) der Wassergewinnung auf die nicht-öffentliche Wasserversorgung bzw. Industrieunternehmen. Die folgende Abbildung 3-19 fasst die Wasseraufkommen (eigene Wassergewinnung aus Grund- und Oberflächenwasser sowie Fremdbezug (55,0 Mio m<sup>3</sup>)) nach Wirtschaftszweig (WZ08)<sup>31</sup> der Branchen Bergbau, Energieversorgung, verarbeitendes Gewerbe und Land-/Forstwirtschaft sowie „Übrige“ zusammen. Mit 230 Mio. m<sup>3</sup>/a entfällt der größte Anteil der Wasserentnahme bzw. des -bezugs auf den Bergbausektor, wovon 194 Mio. m<sup>3</sup> aus dem Grundwasser (GW) und 36,4 Mio. m<sup>3</sup>/a aus Oberflächenwasser (OW) bezogen wurden. Die Eigengewinnung bzw. -fremdbezug der Energieversorgung belief sich auf 149 Mio. m<sup>3</sup>/a, gefolgt vom verarbeitenden Gewerbe mit 96,1 Mio. m<sup>3</sup>/a.

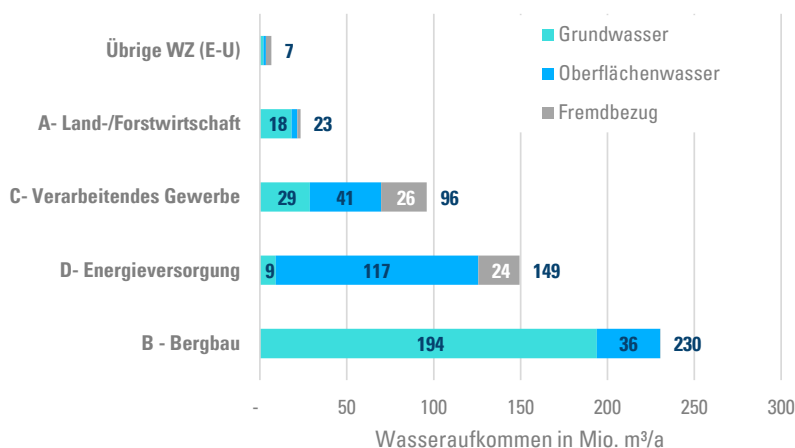


Abbildung 3-19: Wasseraufkommen (Eigengewinnung und Fremdbezug) nach Wirtschaftszweig. Eigene Auswertung LBST nach [Amt für Statistik BB 2022]

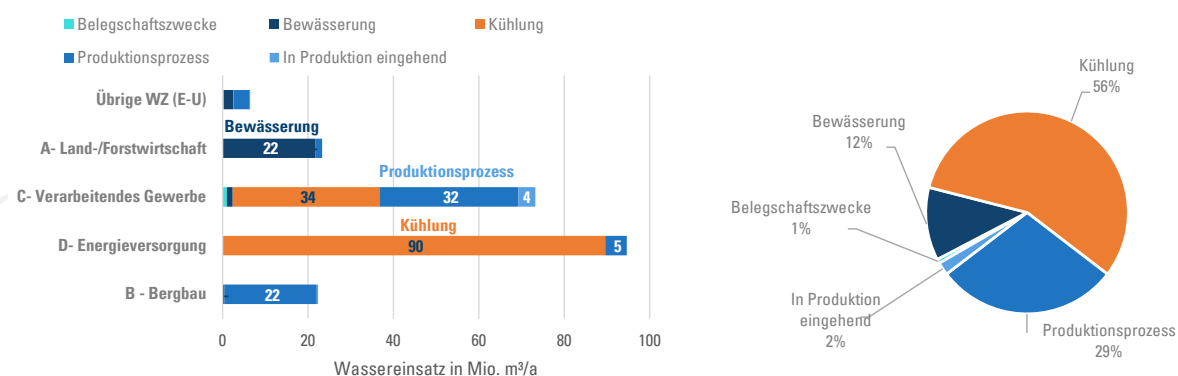


Abbildung 3-20: Wassereinsatz in der Industrie in Brandenburg 2019. Eigene Darstellung nach [Amt für Statistik-BB 2022]

<sup>31</sup> WZ08 <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2008.html>, zuletzt abgerufen am 27.11.2023.

Wie in Abbildung 3-20 dargestellt, findet mit 56 % bzw. 124 Mio. m<sup>3</sup>/a der größte Anteil des Wassereinsatzes zu Kühlzwecken in Kraftwerken und im verarbeitenden Gewerbe statt. Etwa 29 % bzw. 64,3 Mio. m<sup>3</sup> des Wassers werden für Produktionsprozesse bzw. sonstige Zwecke vor allem im verarbeitenden Gewerbe und Bergbau eingesetzt. Jedoch besteht hinsichtlich der erfassten und berichteten Wassermengen für die Bewässerung in der Landwirtschaft eine Unsicherheit, da nicht alle Daten erfasst bzw. berichtet werden.

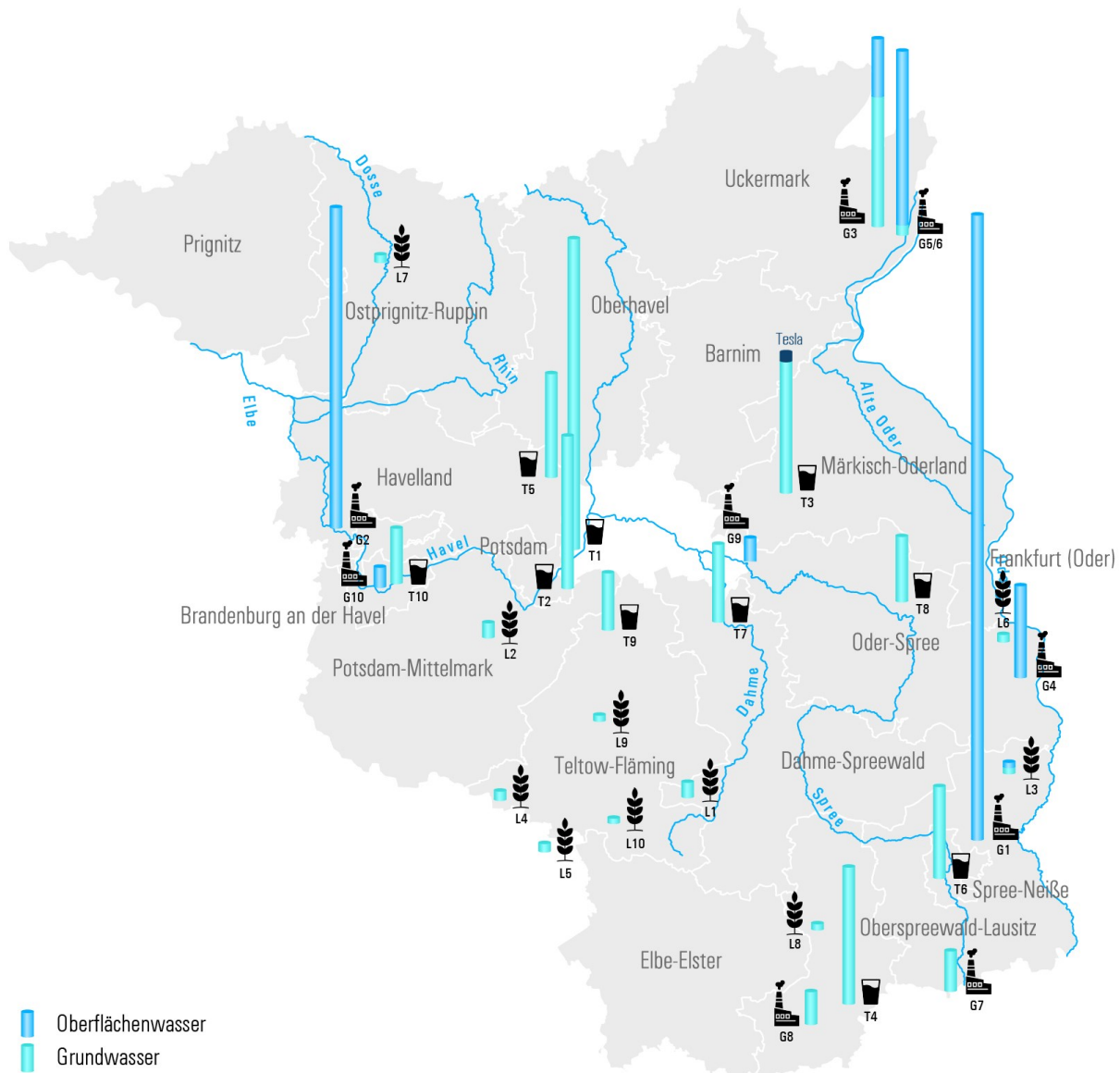
Ein großes Einsparpotenzial besteht bei der Vermeidung der Verdunstung von Wasser, insbesondere bei Kühl- und Produktionsprozessen. Laut [Amt für Statistik BB 2022] belief sich die Menge an bei der Nutzung verdunstetem Wasser auf über 62,2 Mio. m<sup>3</sup> im Jahr 2019.

### **Übersicht über die größten individuellen Wasserentnehmer in der Region**

Ergänzend zu der oben aufgeführten Auswertung der statistischen Daten kann auf Basis der verfügbaren Informationen eine Betrachtung der relevanten Wasserentnehmer in der Region vorgenommen werden. Insgesamt können hier die jeweils 10 größten Wasserentnehmer aus den drei Bereichen Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft und Gartenbau sowie der Wasserversorger mit einer Wasserentnahme von ca. 200 Mio. m<sup>3</sup>/a erfasst werden.

Infolge einer Landtagsanfrage im Jahr 2023 benannte die Landesregierung auf Basis von Angaben des LfU die größten Wasserentnehmer in Brandenburg für das Jahr 2021 [Landtag 2023]. Diese umfassen etwa das Kraftwerk Jänschwalde, die EEW Premnitz GmbH, die Wasserbetriebe und -werke sowie die PCK Raffinerie. Eine regionale Verteilung der größten Wasserentnehmer ist in Abbildung 3-21 dargestellt. Neben dem Kraftwerk Jänschwalde der LEAG, mit ca. 45 Mio. m<sup>3</sup>/a, der EEW Premnitz (ca. 23 Mio. m<sup>3</sup>/a), der PCK Raffinerie (ca. 13,5 Mio. m<sup>3</sup>/a) sowie den LEIPA-Standorten in Schwedt (zusammen 10,6 Mio. m<sup>3</sup>) haben vor allem die Betriebe zur Wasserversorgung (Grundwasser für die Trinkwasserversorgung) rund um Berlin sowie in Brandenburg an der Havel die größten Einzelentnahmen.

Tabelle 3-2 zeigt die Grund- und Oberflächenwasserentnahmen der einzelnen Unternehmen nach Kategorie (Industrie und Gewerbe, Landwirtschaft und Gartenbau, Wasserversorgung) sowie Zweck der Entnahme (Kühlwasser, Brauchwasser, Bewässerung und Trinkwasser) nach [Landtag 2023]. Wie in der Tabelle veranschaulicht, entfällt der Großteil der Wasserentnahme dieser Unternehmen in der Region auf die Kühlung von Energie-/Industrieprozessen (allein ca. 85 Mio. m<sup>3</sup>/a Oberflächenwasser und ca. 10 Mio. m<sup>3</sup>/a Grundwasser für die größten Wasserentnehmer Industrie).



### ÜBERSICHT GROSSER WASSERENTNEHMER IN BRANDENBURG



#### Gewerbe und Industrie

**G1.** LEAG Lausitz Energie Kraftwerke AG fuer Kraftwerk Jaenschwalde; **G2.** EEW Premnitz GmbH; **G3.** PCK Raffinerie GmbH Schwedt; **G4.** Arcelor Mittal Eisenhuettenstadt GmbH; **G5/6.** LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Sued / LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Nord; **G7.** Zweckverband Industriepark Schwarze Pumpe; **G8.** BASF Schwarzheide GmbH; **G9.** Prefere Resins Germany GmbH; **G10.** B.E.S. Brandenburger Elektrostahlwerke GmbH



#### Landwirtschaft und Gartenbau

**L1.** Landgut Schoeneiche Linkenheil & Seidel OHG; **L2.** Spargelhof Klaitow Produktions GmbH & Co.KG; **L3.** Luebbinchener Milch und Mast GbR mbH; **L4.** AFB Agrar GmbH Flaemingland Bloensdorf; **L5.** Gluecksburg Agrar eG Dixfoerda; **L6.** Bauerngenossenschaft Ziltendorfer Niederung GbR; **L7.** Brandenburger Gemuesekontor GmbH & Co. KG; **L8.** Landboden Bronkow Agrar GmbH; **L9.** LaProG Agrargesellschaft Gottow mbH; **L10.** NGH Agrar Nonnendorf GmbH



#### Trinkwasser

**T1.** Berliner Wasserbetriebe fuer Wasserwerk Stolpe; **T2.** Energie und Wasser GmbH Potsdam; **T3.** Wasserverband Strausberg-Erkner; **T4.** Wasserverband Lausitz Senftenberg; **T5.** Osthavellaendische Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung GmbH; **T6.** LWG Lausitzer Wasser GmbH & Co.KG; **T7.** DNWAB mbH fuer MAWV Maerkischer Trink- und Abwasserzweckverband; **T8.** Frankfurter Wasser- und Abwassergesellschaft mbH WW Briesen; **T9.** DNWAB mbH fuer WARL Wasser- und Abwasserentsorgungs-Zweckverband Region Ludwigfelde; **T10.** BRAWAG GmbH Wasser- und Abwassergesellschaft Brandenburg a.d.H.

Abbildung 3-21: Übersicht großer Wasserentnehmer in Brandenburg. Eigene Auswertung nach [Landtag 2023]

Tabelle 3-2: Wasserentnahme in Mio. m<sup>3</sup>/a der größten Wasserentnehmer in der Region  
 Eigene Darstellung nach [Landtag 2023]

	Wasserentnehmer	Zweck der Entnahme	Grundwasser	Oberflächenwasser	Gesamt
<b>G</b>	<b>Industrie und Gewerbe</b>		<b>15</b>	<b>92</b>	<b>109</b>
G1	LEAG Kraftwerk Jänschwalde	Kühlwasser	-	45	45
G2	EEW Premnitz GmbH	Kühlwasser	-	23	23
G3	PCK Raffinerie GmbH Schwedt	Kühlwasser	9	4	14
G4	ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH	Kühlwasser	0,0	6,6	6,7
G5	LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Süd	Kühlwasser	0,1	6,5	6,6
G6	LEIPA Georg Leinfelder GmbH Werk Schwedt Nord	Kühlwasser	0,6	3,4	4,0
G7	Zweckverband Industriepark Schwarze Pumpe	Brauchwasser	2,9	-	2,9
G8	BASF Schwarzheide GmbH	Brauchwasser	2,3	-	2,3
G9	Prefere Resins Germany GmbH	Kühlwasser	-	1,7	1,7
G10	B.E.S. Brandenburger Elektrostahlwerke GmbH	Kühlwasser	0,1	1,4	1,5
<b>L</b>	<b>Landwirtschaft und Gartenbau</b>		<b>6</b>	<b>0,4</b>	<b>7</b>
L1	Landgut Schöneiche Linkenheil & Seidel OHG	Bewässerung	1,1	-	1,1
L2	Spargelhof Klaietow Produktions GmbH & Co. KG	Bewässerung	1,1	-	1,1
L3	Lübbinchener Milch und Mast GbR mbH	Brauchwasser	0,5	0,4	0,8
L4	AFB Agrar GmbH Flämingland Blönsdorf	Brauchwasser	0,7	-	0,7
L5	Glücksburg Agrar eG Dixförda	Bewässerung	0,6	-	0,6
L6	Bauerngesellschaft Ziltendorfer Niederung GbR	Brauchwasser	0,6	-	0,6
L7	Brandenburger Gemüsekontor GmbH & Co. KG	Bewässerung	0,5	-	0,5
L8	Landboden Bronkow Agrar GmbH	Brauchwasser	0,4	-	0,4
L9	LaProG Agrargesellschaft Gottow mbH	Brauchwasser	0,4	-	0,4
L10	NGH Agrar Nonnendorf GmbH	Bewässerung	0,4	-	0,4
<b>T</b>	<b>(Trinkwasser-)versorgung</b>		<b>86</b>		<b>86</b>
T1	Berliner Wasserbetriebe für Wasserwerk Stolpe	Trinkwasser	22	-	22
T2	Energie und Wasser GmbH Potsdam	Trinkwasser	11	-	11
T3	Wasserverband Strausberg-Erkner* (inkl. Tesla)	Trinkwasser	10	-	10
T4	Wasserverband Lausitz Senftenberg	Trinkwasser	9,9	-	9,9
T5	Osthavelländische Trinkwasserversorgung & Abwasserbehandlung GmbH	Trinkwasser	7,5	-	7,5
T6	LWG Lausitzer Wasser GmbH & Co. KG	Trinkwasser	6,6	-	6,6
T7	DNWAB mbH für MAWV Märkischer Trink- und Abwasserzweckverband	Trinkwasser	5,6	-	5,6
T8	Frankfurter Wasser- und Abwassergesellschaft mbH WW Briesen	Trinkwasser	4,7	-	4,7
T9	DNWAB mbH für WARL Wasser- und Abwasserentsorgungs-Zweckverband Region Ludwigsfelde	Trinkwasser	4,1	-	4,1
T10	BRAWAG GmbH Wasser- und Abwassergesellschaft Brandenburg a.d.H.	Trinkwasser	4,0	-	4,0

Alle Angaben in Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr.

\* Hierunter fällt die Versorgung der Tesla Gigafactory mit ca. 452.000 m<sup>3</sup> im Jahr 2023; Erschließungsvertrag über ca. 1,4 Mio m<sup>3</sup>/a [LOS 2024]

## 4. DISKUSSION DER AUSWIRKUNGEN DER H<sub>2</sub>-PRODUKTION AUF DEN WASSERHAUSHALT ANHAND REGIONALER FALLBEISPIELE

- ❖ Der Gesamtwasserbedarf für eine zukünftige Wasserstoffproduktion in Brandenburg ist vergleichsweise gering: So würde der potenzielle Wasserbedarf zur Deckung der theoretischen heimischen H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenziale (20,7 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub>/a) ca. 1–6 % der heutigen Wassergewinnung Brandenburgs entsprechen. Dennoch muss lokal und projektspezifisch überprüft werden, ob geplante Elektrolysekapazitäten mit den lokalen Wasserverfügbarkeiten vereinbar sind.
- ❖ Brandenburg verfügt über gute Voraussetzungen zur dezentralen H<sub>2</sub>-Erzeugung aus erneuerbaren Energien. Elektrolyseanlagen (bis 10 MW<sub>el</sub>) haben aufgrund ihrer Größe und Verteilung nur einen begrenzten Einfluss auf den lokalen Wasserhaushalt und könnten auch direkt an das kommunale Trinkwassernetz angeschlossen werden.
- ❖ Bei urbaner H<sub>2</sub>-Erzeugung (bis 100 MW<sub>el</sub>) können durch die Nutzung von Abwasser als Rohwasserquelle für die Wasserstoffproduktion positive Synergieeffekte genutzt werden. Pilotprojekte könnten hier gezielt mit Kläranlagen im Berliner Umfeld entwickelt und für die Nutzung von Sauerstoff und Abwärme optimiert werden.
- ❖ Die industrielle H<sub>2</sub>-Erzeugung (1-GW<sub>el</sub>-Klasse) erfordert ganzheitliche, spezifische Konzepte zur Wassernutzung, um den lokalen Wasserhaushalt nicht zu überlasten. Beispielsweise könnte hier die heutige H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Erdgas durch erneuerbaren Wasserstoff in Raffinerieprozessen ersetzt werden, was die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich reduziert.

### 4.1. Zusammenfassung

Die Diskussion der Wasserbedarfe im Kontext einer zukünftigen Wasserstoffproduktion in Brandenburg steht im Fokus dieser Analyse. Dabei erlaubt ein Vergleich der abgeschätzten Mengen von etwa 8–37 Mio. m<sup>3</sup> Wasser pro Jahr (=Bedarf für Erzeugungspotenzial 2045 nach [Fhg IEG et al. 2023]) mit der heutigen Wassergewinnung von ca. 615 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr in Brandenburg rein quantitativ eine positive Ersteinschätzung: Zumindest in Bezug auf das gesamte Bundesland wäre die Wasserstoffproduktion nur für einen marginalen Anteil an der heutigen Wassergewinnung (ca. 1–6 %) verantwortlich. Insbesondere für Landkreise und Städte mit einer geringen eigenen Wassergewinnung würde eine Ausreizung dieses Potenzials aber zu einem hohen Anteil von bis zu 31,6 % (Ostprignitz-Ruppin), 35,2 % (Frankfurt (Oder)) sowie bis zu 47,2 % (Prignitz) führen.

Neben dieser rein quantitativen Abschätzung auf Ebene des Bundeslands bzw. der Landkreise und Städte ist jedoch eine spezifische Betrachtung der lokalen Verhältnisse für eine Bewertung und Eignung von Standorten notwendig und ergänzend vorzunehmen. Dabei ist neben dem Wasserdargebot und den aktuellen und bereits geplanten Wasserentnahmen auch auf Basis von hydrogeologischen Gutachten die weitere mögliche Entwicklung der potenziell zur Verfügung stehenden Rohwasserquellen zu bewerten.



Um im Rahmen dieser Studie dennoch erste Einschätzungen für die Entwicklung von Elektrolyseprojekten zur erneuerbaren Wasserstoffherzeugung in Brandenburg zu geben, wird anhand dreier ausgewählter Fallbeispiele die Produktion von Wasserstoff im regionalen Kontext diskutiert. Ausgehend von regionalen Strukturen und Projektankündigungen bzw. -ansätzen in Brandenburg und Berlin werden im Folgenden drei generische Fallbeispiele zur Wasserstoffproduktion im dezentralen, urbanen und industriellen Kontext vorgestellt und für die Regionen diskutiert:

**Dezentrale Anlagen (mit Elektrolyseuren bis zu 10 MW<sub>el</sub>)** für die erneuerbare H<sub>2</sub>-Produktion und -Anwendung vor Ort bieten großes Potenzial für die Regionen und Kommunen, um u. a. auch erneuerbare Stromerzeugungspotenziale im ländlichen Raum zu nutzen und Wertschöpfung lokal zu ermöglichen. Die Wasserversorgung der Anlagen erfolgt beispielsweise durch die Anbindung an existierende Wasserwerke über die bestehende Wasserversorgungsinfrastruktur. Potenzielle Risiken für regionale Wasserengpässe können grundsätzlich durch viele kleinere dezentrale Anlagen in dieser Leistungsklasse reduziert und geografisch verteilt werden. Für eine 5-MW<sub>el</sub>-Elektrolyse mit einer jährlichen H<sub>2</sub>-Produktion von etwa 400 t<sub>H<sub>2</sub></sub> beträgt der Wasserbedarf etwa 5.300 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> pro Jahr, vergleichbar mit der jährlichen (künstlichen) Bewässerung von etwa einem Fußballfeld. Gleichzeitig könnten mit dem produzierten Wasserstoff etwa 3.150 Brennstoffzellenfahrzeuge für 1 Jahr mit Kraftstoff versorgt werden (Fahrleistung: 12.300 km/a).

**Urbane Regionen (mit Elektrolyseuren bis zu 100 MW<sub>el</sub>)** haben dagegen Potenzial, die vor Ort erwarteten Bedarfe für Wasserstoff ganzheitlich in Kombination mit großen Mengen anfallender kommunaler Abwässer zu denken. Die hohen Qualitätsanforderungen für Elektrolyseure erfordern zwar eine intensive Wasseraufbereitung, jedoch ließe sich so die Notwendigkeit zusätzlicher Wasserentnahmen vermeiden. In bestimmten Fällen kann auch die Plasma-Pyrolyse stickstoffhaltiger Abwässer einen, wenn auch stark eingeschränkten, Beitrag zur Wasserstoffversorgung leisten. Für die Versorgung des 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs müssen etwa 120.000 m<sup>3</sup>/a gereinigtes Abwasser bereitgestellt werden. Hierdurch ließe sich aber die Entnahme von etwa 107.000 m<sup>3</sup>/a Grundwasser vermeiden, was dem Wasserbedarf von etwa 2.400 Personen in Brandenburg entspricht. Die so produzierte Menge an Wasserstoff ist ausreichend, um den jährlichen Kraftstoffbedarfs des öffentlichen Personennahverkehrs der Stadt Berlin durch Brennstoffzellenbusse sicherzustellen.

**Industrielle Standorte (mit Elektrolyseuren bis 1 GW<sub>el</sub> und mehr)** mit hohen erwarteten Wasserstoffbedarfen werden in Brandenburg auf einige wenige regionale Cluster beschränkt sein. Aufgrund der regionalen Konzentration sowie der hohen Anforderung an die (kontinuierliche) Verfügbarkeit geeigneter Rohwasserquellen sind hier jedoch ganzheitliche Konzepte unter Einbindung aller regionalen Akteure zu entwickeln. Der in dem Fallbeispiel exemplarisch für die PCK Raffinerie in Schwedt gezeigte Vergleich verdeutlicht dennoch die Machbarkeit und insbesondere Synergie- und Substitutionspotenziale dieser industriepolitisch wichtigen Projekte. Während Grund- und Oberflächenwasserkörper zwar prinzipiell als Rohwasserquelle zur Verfügung stehen, müssen gleichzeitig die existierenden Belastungen durch bestehende Entnahmen und Abwassereinleitungen berücksichtigt werden. Nach den Analysen erfordert der Betrieb eines Elektrolyseurs mit einer Größe von 1 GW<sub>el</sub> einem Wasserbedarf von etwa 1,1 Mio. m<sup>3</sup>/a (bei Anwendung einer Trockenkühlung) bis zu 4,7 Mio. m<sup>3</sup>/a (bei Abführung der Abwärme über Kühltürme bzw. Rückkühlwerke). Synergien mit den vor- und nachgelagerten Prozessen der PtL-Produktion in der Raffinerie, insbesondere durch zusätzlich bereitgestellte Wassermengen durch eine CO<sub>2</sub>-

Abscheidung aus der Luft, sollten gehoben werden, um so den Bezug von Grund- bzw. Oberflächenwasser zu reduzieren. Außerdem existieren direkte Substitutionseffekte der bestehenden Wasserstoffproduktion durch Dampfreformierung am Raffinerie-Standort in Schwedt (etwa 30.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a), die durch den Zubau von Elektrolysekapazitäten von etwa 400 MW<sub>el</sub> ersetzt werden können. Hierdurch ließe sich bis zu 400.000 m<sup>3</sup> (Grund-)Wasser pro Jahr direkt einsparen, was einen Anteil von etwa 10 % des gegenwärtigen Wasserverbrauchs<sup>32</sup> der Raffinerie entspricht, bei gleichzeitigen CO<sub>2</sub>-Emissionssenkungen in Höhe von etwa 320.000 t<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a.

## 4.2. Einordnung und Bewertung des potenziellen Wasserbedarfs im Kontext eines ambitionierten Wasserstoffhochlaufs in Brandenburg

Eine Bewertung des Einflusses einer künftigen H<sub>2</sub>-Produktion auf den regionalen Wasserhaushalt bedarf einen ersten Vergleich der benötigten Wassermengen mit den Werten der heutigen Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg sowie auf regionaler Ebene. Grundlage der Angaben zu den H<sub>2</sub>-Erzeugungspotenzialen sind dabei die Analysen der „Machbarkeitsstudie – Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen H<sub>2</sub>-Transportnetzes in Brandenburg“ im Auftrag des MWAE aus dem Jahr 2023 [Fhg IEG et al. 2023]. Demnach belaufen sich diese in Brandenburg bis zum Jahr 2045 auf 20,7 TWh/Jahr (= 620 t/Jahr<sup>33</sup>), was einer installierten Elektrolysekapazität von etwa 7.825 MW<sub>el</sub> entspricht.<sup>34</sup> Weitere 45,4 TWh/Jahr sollen außerdem im Jahr 2045 nach importiert werden (siehe Kapitel 2.2).

### Brandenburg

Die Abschätzung des Wasserbedarfs im Kontext dieser signifikanten Steigerung der H<sub>2</sub>-Produktion mittels Elektrolyse in Brandenburg ergibt nach den Analysen in Kapitel 2.4 eine Bandbreite von jährlich etwa 8–37 Mio. m<sup>3</sup> Wasser (in Trinkwasserqualität). Um diese Zahlen grundsätzlich einzuordnen, stellt Abbildung 4-1 die für diese Werte den verfügbaren Daten zur Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg des Jahres 2019 [Amt für Statistik-BB 2022] gegenüber.<sup>35</sup> Dargestellt sind zum einen die Mengen der Wassergewinnung in Berlin und Brandenburg (vgl. auch Kapitel 3.4): Diese umfassen die Wassergewinnung durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen sowie die nicht-öffentlich Wassergewinnung durch Betriebe (ohne Bezug von Wasser). Demgegenüber wird ein Näherungswert für die Wasserverwendung bzw. -nutzung angesetzt: Dieser umfasst die öffentliche Wasserabgabe an Letztverbraucher (Haushalte und Industrie) sowie die im Betrieb eingesetzte Menge an Frischwasser und ungenutzt wiedereingeleitetem Wasser. Um Doppelzählung zu vermeiden, wurden für die Analysen die von Betrieben bezogenen Wassermengen von der Gesamtsumme abgezogen (siehe Abbildung 3-16). Hierdurch ergibt sich eine Wassergewinnung von 615 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg und 1.021 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg inkl. Berlin. Demgegenüber steht eine eingesetzte Wassermenge in Haushalten, Unternehmen (inkl. ungenutzt wiedereingeleitetes Wasser und Abgabe ungenutzten Wassers an Dritte) von 577 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg und 989 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg inkl. Berlin. Die Differenz zwischen beiden Werten kann

<sup>32</sup> Bezogen auf Entnahme der Raffinerie abzüglich der wieder eingeleiteten Abwassermenge von etwa 70 %.

<sup>33</sup> Unter Berücksichtigung des Heizwertes H<sub>i</sub> von Wasserstoff von 33,33 kWh/kg.

<sup>34</sup> Bei Annahme von 4.000 Volllaststunden pro Jahr und 66,7 % Wirkungsgrad (elektrische Energie zu Wasserstoff basierend auf dem Heizwert H<sub>i</sub>).

<sup>35</sup> So erfolgt >10 % der öffentlichen Wassergewinnung Berlins in anderen Bundesländern (insb. Brandenburg). Auch wird ein signifikanter Teil der Abwasserströme der Berliner Wasserbetriebe (BWB) in eigenen Kläranlagen in Brandenburg gereinigt.

im Wesentlichen auf Wasserverluste, Wasserwerkseigenverbräuche sowie Messdifferenzen zurückgeführt werden. Auch sind Überlagerungen mit anderen Bundesländern denkbar.

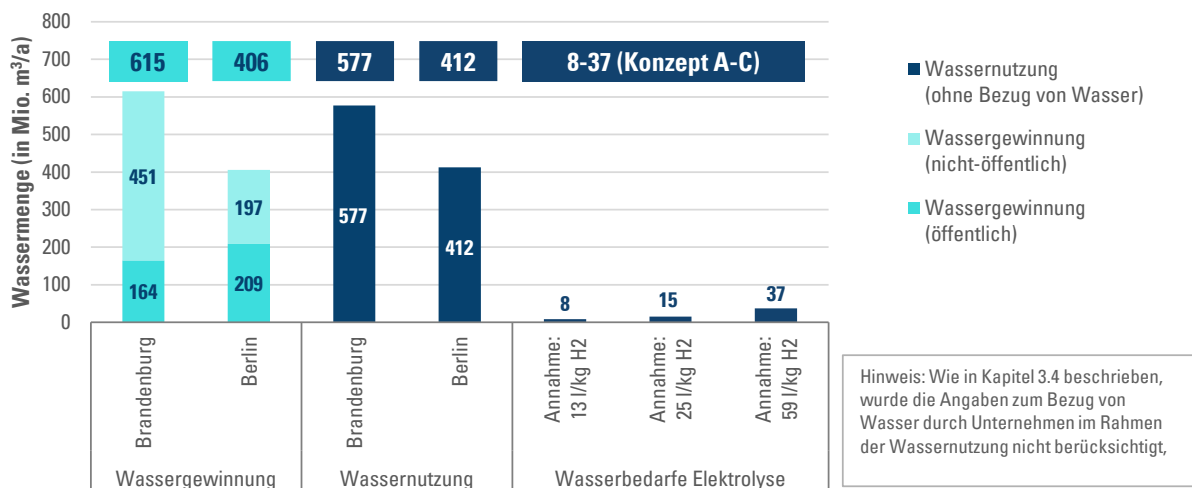


Abbildung 4-1: Einordnung der ermittelten (potenziellen) Wasserbedarfe der H<sub>2</sub>-Erzeugung in Brandenburg im Jahr 2045 im Vergleich zur heutigen Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin.

Datenquelle: [Amt für Statistik-BB 2022]

Folglich lässt sich zusammenfassen, dass selbst eine signifikante Wasserstoffproduktion von > 20 TWh/a mittels Elektrolyse im Vergleich zur heutigen Wassergewinnung und -nutzung insgesamt nur einen kleinen zusätzlichen Wasserbedarf darstellen würde. Unter den getroffenen Annahmen zum spezifischen Wasserbedarf sowie zum Betrieb der Elektrolyse läge der durch die H<sub>2</sub>-Produktion direkt erforderliche Wasserbedarf (in Abhängigkeit des Konzeptes A-C) mit etwa 8-37 Mio. m<sup>3</sup>/a bei etwa 1,3-6,0 % der heutigen Wassergewinnung von etwa 615 Mio. m<sup>3</sup>/a (hiervon entfallen heute etwa 250 Mio. m<sup>3</sup> auf ungenutzt abgeleitetes Wasser, siehe Abbildung 3-17). Dies steht etwa den heutigen Bedarfen des Energiesektors in Brandenburg von etwa 95 Mio. m<sup>3</sup>/a (davon alleine etwa 90 Mio. m<sup>3</sup>/a für Kühlzwecke) gegenüber (siehe Abbildung 3-20). Daraus lässt sich ableiten, dass die rein mengenmäßige Bereitstellung von Wasser für Brandenburg insgesamt somit keine „wesentliche Barriere für die Skalierung erneuerbaren Wasserstoffs“ [Blanco 2021] darstellt. Diese Einschätzung deckt sich mit Aussagen in anderen Studien im regionalen (z. B. [INFRACON & IKEM 2023]), nationalen (z. B. [DVGW 2023]) oder globalen Kontext (z. B. [Newborough & Cooley 2021, Blanco 2021, WorldBank & Hydrogen Council 2022, IRENA & Bluerisk 2023]).

### Landkreisebene

Neben der bundeslandweiten Betrachtung ist auch die Einschätzung Bilanz hinsichtlich der einzelnen Landkreise zu berücksichtigen. Abbildung 4-3 zeigt ferner die Bandbreite der erforderlichen Wassermenge für die H<sub>2</sub>-Produktion auf Basis der in mit der jeweiligen in den Landkreisen heute (stand 2019) aufgeführten Wassergewinnung<sup>36</sup> ins Verhältnis. Dabei wird das in Kapitel 2.3.4 beschriebene (auf geringen Wasserbedarf optimierte) Anlagenkonzept A mit einem Wasserbedarf von 13 l/kg<sub>H2</sub> ebenso der Abschätzung zugrunde gelegt wie die wasserintensiveren Konzepte B und C (25 bzw. 59 l/kg<sub>H2</sub>). Es sei

<sup>36</sup> Wassergewinnung = öffentliche Wassergewinnung + Eigengewinnung durch Betriebe.

jedoch zu beachten, dass insbesondere in Regionen mit eingeschränkter Wasserverfügbarkeit effiziente Wassermanagement-Systeme im Rahmen der Wasseraufbereitung sowie wassersparende Kühlsysteme wichtige Elemente der Projektplanung darstellen sollten.

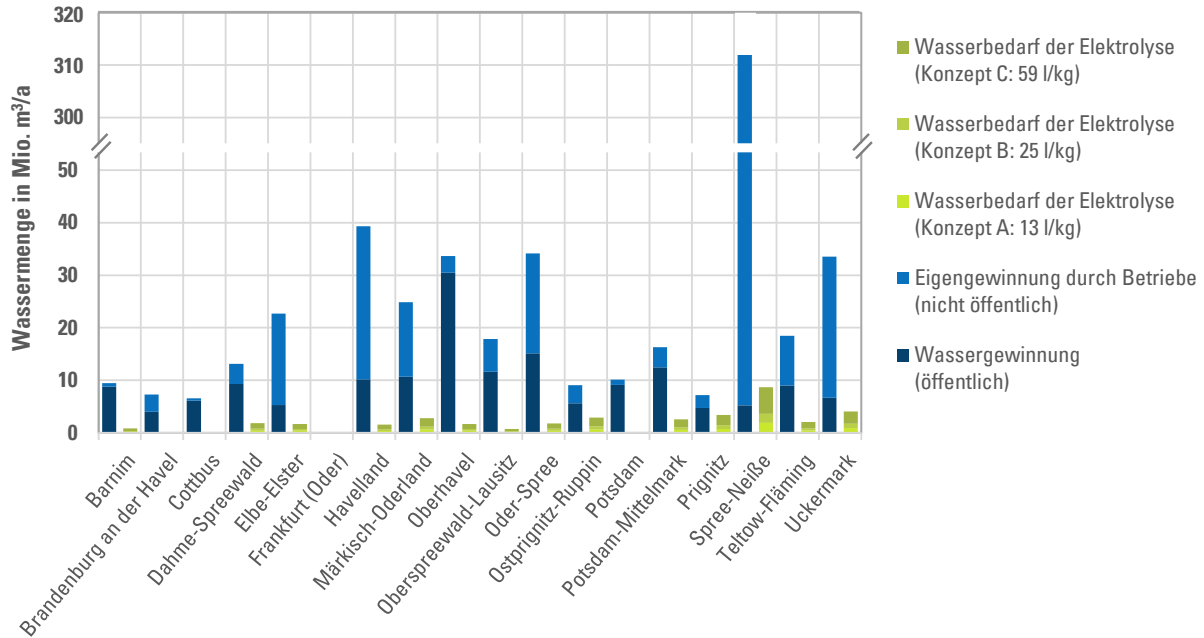


Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der für eine künftige H<sub>2</sub>-Produktion in Brandenburg im Jahr 2045 für die Elektrolyse benötigten Wassermengen mit der heutigen Wassergewinnung nach Landkreis.  
Quelle: LBST auf Basis von [Fhg IEG et al. 2023] und [Amt für Statistik-BB 2022]

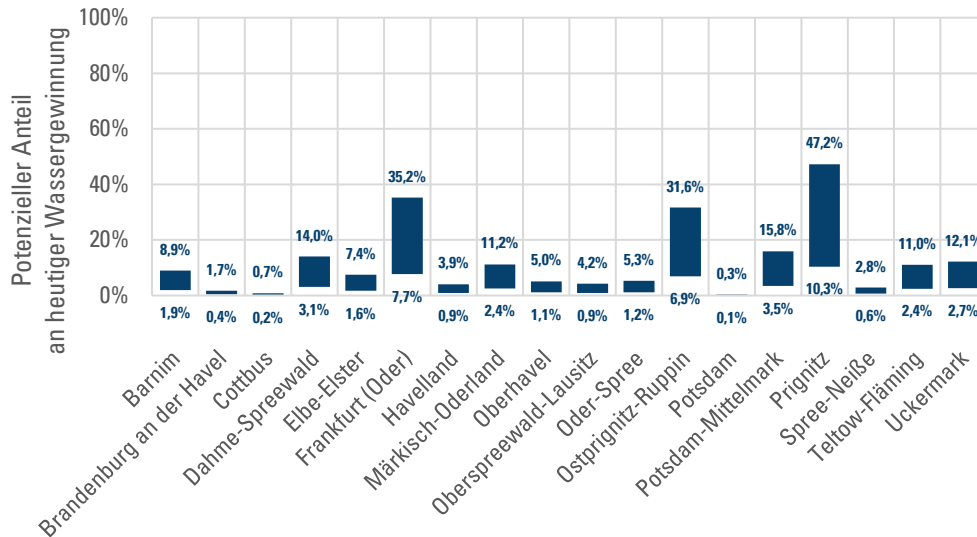


Abbildung 4-3: Anteil des potenziellen Wasserbedarfs für eine künftige H<sub>2</sub>-Produktion in Brandenburg im Jahr 2045 an der heutigen Wassergewinnung pro Landkreis.  
Quelle: LBST auf Basis von [Fhg IEG et al. 2023] und [Amt für Statistik-BB 2022].  
Annahme: Bandbreite unter Berücksichtigung der spez. Wasserbedarfe nach Konzept A mit 13 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> und Konzept C mit 59 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (siehe Kapitel 2.4).

Während eine Übersetzung der in [Fhg IEG et al. 2023] ermittelten potenziellen Wasserstoffproduktionsmengen im Jahr 2045 in Brandenburg mit einem Wasserbedarf von etwa 8-37 Mio. m<sup>3</sup>/a einen Anteil von etwa 1,3-6,0 % an der Wassergewinnung ausmacht, so liegt dieser Wert für einzelne Landkreise zum Teil deutlich darüber. Insbesondere für Landkreise und Städte mit einer geringen eigenen Wassergewinnung würde eine Ausreizung dieses Potenzials zu einem hohen Anteil von bis zu 31,6 % (Ostprignitz-Ruppin), 35,2 % (Frankfurt (Oder) sowie bis zu 47,2 % (Prignitz) führen.

Neben einem reinen Mengenvergleich ist aber auch die zukünftige Verfügbarkeit geeigneter Rohwasserquellen auf regionaler Ebene ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der Auswirkungen einer steigenden Wasserstoffproduktion auf den Wasserhaushalt. Wie in Kapitel 3.2 erläutert, liefern die verfügbaren Datengrundlagen für Brandenburg in dieser Hinsicht jedoch nur ein unvollständiges Bild. So stellt das „Web-Tool-GW-Bilanz“ des LfU zwar ein wichtiges Element mit grundsätzlichen Informationen zur Auslastung des Grundwasserangebots in den unterschiedlichen Regionen Brandenburgs zur Verfügung (unter Berücksichtigung der langjährigen Mittelwerte) (siehe Kapitel 3.3). Für Aspekte im Zusammenhang mit Einflüssen auf grundwasserabhängige Ökosysteme oder den ökologischen Mindestabfluss sind weitergehende Analysen erforderlich, etwa im Rahmen eines hydrogeologischen Gutachtens (inkl. geohydraulischer Modellierung).

So ergibt sich beispielsweise auch für wasserintensive (Industrie-)Ansiedlungen der Bedarf einer individuellen Prüfung der lokalen Wasserverfügbarkeiten und der Auswirkungen des Projekts auf den regionalen Wasserhaushalt [RMI 2023, ANL 2015]. Diese regionale Standortprüfung sollte insbesondere auch saisonale und extremwetterbedingte Schwankungen in der Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser einbeziehen [Fraunhofer ISI et al. 2022].

Die nachfolgenden Kapitel diskutieren in Form von generischen Fallbeispielen regionaler Wasserstoffprojekte die unterschiedlichen Aspekte der Wasserbereitstellung und -nutzung.

### 4.3. Regionale Fallbeispiele

Die Produktion und Nutzung von Wasserstoff kann für Brandenburg neben einem Beitrag zur THG-Emissionsminderung in Industrie (Raffinerie, chemische Industrie, Stahlbranche oder Glasbranche) sowie weiteren Sektoren wie Mobilität, Stromerzeugung und (Fern-)Wärmeversorgung auch einen Beitrag zu regionalen Wertschöpfung liefern [MWAE 2021]. Neben einer ersten (rein quantitativen) Abschätzung zu den Auswirkungen dieses potenziellen Hochlaufs einer heimischen Wasserstoffproduktion auf den regionalen Wasserhaushalt in Kapitel 4.2 sollen im Folgenden diverse Aspekte möglicher Projektimplementierung anhand ausgewählter Fallbeispiele diskutiert werden.

Die einheitliche Diskussion der verschiedenen Beispiele mit Blick auf die Auswirkungen der H<sub>2</sub>-Produktion auf den Wasserhaushalt in einem regional eingeschränkten Gebiet erfolgt mittels folgender Struktur:

- (1) Kurzbeschreibung des Fallbeispiels,
- (2) Einbettung in den regionalen Kontext (regionale Projektideen aus Brandenburg),
- (3) Konzeptausarbeitung (eines generischen Fallbeispiels),

- (4) Diskussion der Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt sowie  
 (5) Einordnung der Ergebnisse pro Fallbeispiel.

#### 4.3.1. Übersicht und Annahmen der Fallbeispiele

Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Kernelemente und Rahmenbedingungen der drei gewählten Fallbeispiele.

Tabelle 4-1: Übersicht & Konzeption der Fallbeispiele als Grundlage der weiterführenden Diskussion

Fallbeispiel	1 - Dezentrale Anwendung	2 - Urbane Region	3 - Industriestandort
<b>Beschreibung Standortbesonderheit</b>	Regionaler Wind- und PV-Überschuss, lokale H <sub>2</sub> -Abnehmer	Hohe Abwasser-verfügbarkeit	Hohe erneuerbare Energiepotenziale, Industriestandort
<b>Installierte Elektrolysekapazität</b>	Bis zu 10 MW <sub>el</sub>	Bis zu 100 MW <sub>el</sub>	1 GW <sub>el</sub> und mehr
<b>Stromquelle<sup>1</sup></b>	Regionale EE-Erzeugung (Wind und PV)		
<b>Potenzielle Rohwasserquelle</b>	(Kommunale) Trinkwasserversorgung	Abwasser aus kommunaler Kläranlage	Grund- bzw. Oberflächenwasser, ggf. industrielle Abwasser
<b>Kühlung (potenzielle Abwärmenutzung)</b>	Luftkühlung	Abwärmenutzung z. B. Wärmenetze, ggf. für Kläranlage, ggf. Luftkühlung	Abwärmenutzung für Industrieprozesse (sofern möglich)
<b>Potenzielle Sauerstoffnutzung</b>	keine	Kläranlage	Industrieprozesse
<b>H<sub>2</sub>-Abnehmer</b>	Mobilität (Tankstelle)	Mobilität, Industrie (Beispiel: Flughafenfahrzeuge BER)	Industrie (Raffinerie)
<b>Potenzielle Beispielprojekte</b>	Dezentrale H <sub>2</sub> -Projekte (siehe H <sub>2</sub> -Marktplatz Localiser)	Kläranlage Waßmannsdorf (BWB)	PCK Raffinerie (Schwedt)

<sup>1</sup>: ggf. ergänzt durch Stromspeicherkapazitäten vor Ort.

Ziel der Fallbeispiele ist dabei nicht die Erstellung eines regionalen Konzepts zur Wassernutzung im industriellen bzw. projektspezifischen Umfeld (diese müssten fallspezifisch im Kontext der jeweiligen Projektkonzeption durchgeführt werden). Auch ist es im Rahmen der Studie nicht möglich, eine Wasserbilanz oder ein hydrogeologisches Gutachten für die Untersuchungsgebiete zu erstellen. Das Ziel ist vielmehr die Identifizierung und Diskussion relevanter Fragestellungen und Aspekte, die vor dem Hintergrund der jeweiligen Rahmenbedingungen der Fallbeispiele Relevanz für eine potenzielle Projektkonzeption entfalten.



Dazu erfolgte die Entwicklung dreier Projektkonstellationen, die sich jeweils in ihren Grundannahmen zu wesentlichen Rahmenbedingungen (z. B. Projektgröße, Rohwasserquelle sowie Wasserstoffnutzung) unterscheiden.

Im Folgenden werden die wesentlichen und einheitlichen Grundannahmen hinsichtlich der Prozesse und Stoffströme für die unterschiedlichen Aspekte der H<sub>2</sub>-Produktion für die Konzeption der jeweiligen Fallbeispiele beschrieben und zusammengefasst. Diese beinhalten

- (a) die Elektrolyse (inkl. des Kühlkonzepts) sowie
- (b) als Eingangsstoffe die erneuerbare Stromproduktion und
- (c) die Wasseraufbereitung.

Tabelle 4-2 fasst die jeweiligen Annahmen für das konzeptionelle Gerüst einer entsprechenden Elektrolyseanlage zusammen, inklusive Wasser- und Strombedarf, Kühlbedarfe sowie Produktionsmengen für Wasserstoff und Sauerstoff. Die Einordnung der jeweiligen Anwendungsfälle erfolgt separat in den Kapiteln der einzelnen Fallbeispiele 4.3.2 bis 4.3.4.

Tabelle 4-2: Konzeption der Fallbeispiele – allgemeine Annahmen

Parameter	Einheit	Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3	Kommentar / Quelle
<b>a) Elektrolyseur</b>					
Elektrolyse	MW <sub>el</sub>	5	100	1.000	
Wirkungsgrad elektrisch	%	66,7			Bezogen auf Heizwert H <sub>i</sub>
Produktionsmenge H <sub>2</sub> (nominal)	t/h	0,1	2	20	Bei Volllast
Volllaststunden (VLS)	h	4.000			
Spezifischer Reinstwasserbedarf	l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	10			Annahme: nach ASTM I bzw. II), Hinweis: stöchiometr. Wasserbedarf etwa 9 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>
Produktionsmenge H <sub>2</sub>	t/a	400	8.000	80.000	Unter Berücksichtigung der VLS
Produktionsmenge O <sub>2</sub>	t/a	3.200	64.000	640.000	
Kühlbedarf / Abwärme	MW	bis zu 1,3–1,53	bis zu 26,5–30,0	bis zu 265–300	[ISPT 2022], abh. von Lebensdauer des Stacks
<b>b) Erneuerbare Stromerzeugung</b>					
Stromquelle	-	PV + Wind-Hybridkraftwerk			
Erneuerbare Stromproduktion	GWh/a	20	400	4.000	Annahme: 50 kWh <sub>el</sub> /kg <sub>H<sub>2</sub></sub> (η = 66,7 %) [Blanco 2021]
Volllaststunden (VLS)	h	Bis zu 1.400 (PV) + 2.700 (Wind onshore)			[Dekeyser et al. 2024]
Installierte Leistung (je für PV und Wind)	MW <sub>el</sub>	5 + 5	100 + 100	1.000 + 1.000	Annahme (Mindestwerte zur Abdeckung des Strombedarfs dar)

Parameter	Einheit	Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3	Kommentar / Quelle
<b>c) Wasseraufbereitung (inkl. Abwasser)</b>					
Rohwasserquelle	-	Trinkwasser (öffentliche Wasserversorgung)	Gereinigtes Abwasser (Kläranlage)	Grund- bzw. Oberflächenwasser	
Reinigungseffizienz Wasseraufbereitung (Vorbehandlung + Reinigungsschritt)	%	100 %+75 % = 75,0 %	90 %+75 % = 67,5 %	98 %+75 % = 73,5 %	Nach [EUROWATER 2021]; abhängig von Rohwasserquelle und Aufbereitungstechnologie und Zielqualität
Anlagengröße (Kapazität)	l/h	1.300	29.600	272.000	Wasseraufbereitungsanlage, ohne Redundanz
Spezifischer Rohwasserbedarf <sup>1</sup>	l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>	13,3	14,8	13,6	Elektrolyse inkl. Wasseraufbereitung
	m <sup>3</sup> /h	1,33	29,6	272	Unter Berücksichtigung nominaler Produktion
Rohwasserbedarf	m <sup>3</sup> /a	5.300	120.000	1.090.000	Elektrolyse inkl. Wasseraufbereitung
Abwassermenge	m <sup>3</sup> /a	1.300	38.500	290.000	Von Wasseraufbereitung
Rohwasserverbrauch	m <sup>3</sup> /a	4.000	80.000	800.000	Bedarf abzüglich Abwassermenge
Mehreinsatz für die Rohwasseraufbereitung, um Reinstwasserqualität zu erreichen	in %	25 %	33 %	27 %	gegenüber spez. Reinstwasserbedarf von 10 l/kg <sub>H<sub>2</sub></sub>

<sup>1</sup> Unter den Rohwasserbedarf fallen zunächst die Wasserbedarfe für die Bereitstellung des Prozesswassers, inkl. Aufreinigung auf Reinstwasserqualität. Bedarfe im Zuge der Vorkettenemissionen der Elektrolyseur-Herstellung sowie aus der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien (z. B. Reinigung PV-Module) bleiben unberücksichtigt.

## Elektrolyse

Die Größenauslegung der Elektrolyse ist ein wesentliches Unterscheidungskriterium zwischen den drei Fallbeispielen. Je nach Einsatzbereich und regionalen Rahmenbedingungen reicht die installierte Kapazität von 5 MW<sub>el</sub> in Fallbeispiel 1 über 100 MW<sub>el</sub> (Fallbeispiel 2) bis zu einer Großanlage mit 1 GW<sub>el</sub> in Fallbeispiel 3. Trotz dieser unterschiedlichen Auslegung werden die wesentlichen Grundannahmen hinsichtlich der H<sub>2</sub>-Produktion über alle Fallbeispiele hinweg im Sinne einer ersten Abschätzung als identisch angenommen. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf eine Niedertemperatur-Technologie (AEL, PEMEL oder Kombination aus beiden) sowie ein Referenzsystem eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs. Bei kleinerer Anlagenauslegung in Fallbeispiel 1 bzw. 2 skalieren die Werte entsprechend.

Für die Analysen wird von einer **Betriebszeit** des Elektrolyseurs von 4.000 Stunden pro Jahr ausgegangen, da dieser an die Stromproduktion aus erneuerbaren und regionalen Quellen gekoppelt ist. Aufgrund der im Allgemeinen geringeren Volllaststunden für Wind- und PV-Anlagen in Deutschland ist eine Überdimensionierung der Stromerzeugung erforderlich, ggf. ergänzt durch zusätzliche Stromspeicher in Form von Batteriespeichern. Der angenommene **Systemwirkungsgrad** (Strom zu Wasserstoff) beträgt

66,7 %<sup>37</sup> und berücksichtigt damit bereits erwartete technische Entwicklungen in der mittel- bis langfristigen Perspektive. Bezogen auf das Referenzsystem eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs (Fallbeispiel 3) ergibt sich dadurch eine nominale stündliche Produktionsmenge von ca. 20.000 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/h bzw. 160.000 kg<sub>O<sub>2</sub></sub>/h. Bei einer Betriebszeit von 4.000 Stunden beträgt die jährliche Produktionsmenge folglich 80.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a (1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseur). Für die Anlagengrößen 5 und 100 MW<sub>el</sub> betragen die entsprechenden Mengen 400 bzw. 8.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a.

Basierend auf den Angaben in [ISPT 2022] wird für das Gesamtsystem (Elektrolyseur, inkl. Wasseraufbereitung und Gleichrichter / Transformatoren) im Folgenden von einer Auslegung des Kühlsystems für einer erforderlichen Kühlleistung von 265–300 MW (EoL) ausgegangen. Das für die Fallbeispiele gewählte Kühlsystem umfasst in allen Fällen einen geschlossenen Kühlkreislauf mit Luftkühlung bzw. bei Möglichkeit die Nutzung eines Wärmetauschers zur Abwärmeauskopplung über einen sekundären Kühlkreislauf mit einem externen Verbraucher.<sup>38</sup> Die Temperatur der Wärmeauskopplung beträgt je dabei zunächst, abhängig von der Elektrolysetechnologie, etwa 55–60 °C [Herco 2023]. Durch Wärmepumpen kann diese aber auch auf höhere Temperaturen gehoben werden. Zusätzliche Wasserbedarfe durch offene sekundäre Kühlkreisläufe<sup>39</sup> fallen in diesem Fall nicht an.

Je nach Größe der Anlage und der Anzahl des vor Ort beschäftigten Personals sind für die Gesamtwasserversorgung der Anlage außerdem gewisse **zusätzliche Mengen Trinkwasser für das Personal** vorzusehen. [BGD ECOSAX GmbH 2023] gehen von einem Trinkwasserbedarf von etwa 120 l pro Tag pro Person aus. Für ein in der Studie analysiertes Projekt mit einem 700-MW-Elektrolyseur inkl. einer nachgeschalteten Methanolproduktionsanlage liegt demnach der Personalbedarf bei etwa 200 Personen und der Gesamtwasserbedarf bei 1.000 l/h. Übersetzt auf die produzierte H<sub>2</sub>-Menge sind dies etwa 0,09 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, wobei in diesen Zahlen auch die Wasserbedarfe der Methanolproduktion berücksichtigt sind. Mit Blick auf den Rohwasserbedarf von etwa 13 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> werden diese geringen Mengen in den nachfolgenden Diskussionen nicht berücksichtigt.

### Erneuerbare Stromerzeugung (EE)

Unter den getroffenen Annahmen liegt der jährliche Strombedarf eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs (Fallbeispiel 3) bei etwa 4 TWh<sub>el</sub>. Zur Abschätzung der erforderlichen installierten EE-Kapazitäten wird jeweils eine Kombination aus Wind- und PV-Anlagen angenommen. Bei optimistischer Annahme können durch PV-Parks und Windenergieanlagen in Brandenburg Volllaststunden von bis zu etwa 1.400 bzw. 2.700 Stunden erreicht werden [Dekeyser et al. 2024]. Dadurch ergibt sich beispielsweise ein Mindestbedarf für installierte Kapazitäten von je 1 GW<sub>el</sub> für PV und Wind. Um eine hohe Betriebsstundenzahl des Elektrolyseurs sicherstellen zu können, sind auch eine Überdimensionierung der EE-Erzeugung (mit Einspeisung der zusätzlichen Erzeugung ins Stromnetz), die Installation zusätzlicher lokaler Stromspeicher oder auch der Bezug von zusätzlichem Strom über das Netz mit Abschluss von Power Purchase Agreements (PPAs)

<sup>37</sup> Bezogen auf den Heizwert H<sub>i</sub> von 33,33 kWh/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>.

<sup>38</sup> Hierbei sei zu erwähnen, dass insbesondere bei Großprojekten (Elektrolyse >100 MW<sub>el</sub>) die Luftkühlung aus Kosten- und Platzgründen gegenwärtig nur in Regionen mit einem potenziellen Wassermangel als präferierte Lösung diskutiert wird. So umfassen die Planungen in [ISPT 2022] für einen Standort in den Niederlanden beispielsweise auch ein Hybridmodell mit geschlossenem Primär- und offenem Sekundärkühlkreis. Eine Beschreibung der unterschiedlichen Kühlsysteme sowie die Auswirkungen von Luft-, Durchlauf- sowie Verdampfungskühlung auf den Wasserbedarf der Anlage sind in Kapitel 2.3.4 zu finden.

<sup>39</sup> Beispielsweise Durchlauf- oder Verdampfungskühlung, wie in Anlagenkonzept B und C (siehe Kapitel 2.3.5) beschrieben.

denkbar.<sup>40</sup> Für die anderen Fallbeispiele ergeben sich folglich Mindestgrößen der EE-Erzeugung aus PV und Wind von je 5 MW<sub>el</sub> (Fallbeispiel 1) oder 100 MW<sub>el</sub> (Fallbeispiel 2).

### **Wasseraufbereitung (aus Grund- und Oberflächenwasser)**

Die Anforderungen an die Auslegung der Wasseraufbereitung hängen im hohen Maße von der Qualität des zur Verfügung stehenden Rohwassers sowie den Anforderungen des Elektrolyseurs ab (siehe Kapitel 2.3.2). Dabei ist zwischen Trinkwasserqualität (kommunale Wasserversorgung) (Fallbeispiel 1), gereinigtes Abwasser aus einer kommunalen Abwasseraufbereitung (Fallbeispiel 2) sowie Grund- bzw. Oberflächenwasser (in Fallbeispiel 3) zu unterscheiden.

Die Herstellerangaben für den spezifischen Reinstwasserbedarf der Elektrolyse zur Speisung der internen Wasserversorgung variieren von 9–11 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (siehe Tabelle 2-5). Für die nachfolgenden Berechnungen wird von einem Reinstwasserbedarfs von 10 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> ausgegangen. Bei einer angenommenen Ausbeute der Wasseraufbereitung von Trink- zu Reinstwasserqualität durch Umkehrosmose und Elektrodeionisation von etwa 75 % (siehe Abbildung 2-13) ergibt sich ein spezifischer Rohwassereinsatz von 13,3 l/kg Wasserstoff. Im Vergleich mit den zuvor beschriebenen Anlagenkonzepten liegt dies am unteren Ende der von 13 bis 33 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> reichenden Bandbreite (Tabelle 2-5), die aus unterschiedlichen Herstellerangaben ermittelt wurde. Dieser eher geringe spezifische Wasserbedarf erscheint mit Blick auf die Projektgröße im MW-Maßstab sowie einer erwartbaren Sensibilisierung potenzieller Projektbeteiligter in der Region hinsichtlich eines effizienten Umgangs mit Wasser in wasserarmen Regionen angemessen. Insbesondere durch offene Kühlkreisläufe bei Nasskühlung mit Kühltürmen würde sich der Wasserbedarf potenziell jedoch deutlich erhöhen. Zu Vergleichszwecken soll in Fallbeispiel 3 daher auch die erforderliche Rohwassermenge bei einem spezifischen Wasserbedarf von 59 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> berechnet und diskutiert werden.

Je nach Rohwasserquelle sind weitere Schritte zur Vorreinigung (etwa durch Feinsiebung, Koagulation und Filtration) notwendig, die durch zusätzliche Wasserverluste Eingang in die Berechnungen finden. Bei Nutzung von Grund- bzw. Oberflächenwasser oder auch gereinigtem Abwasser als Rohwasserquelle der Elektrolyse sind gegenüber den Anforderungen an Trinkwasser gewisse Verunreinigungen, etwa in Form gelöster Stoffe oder auch (pathogener) Mikroorganismen, zu berücksichtigen. Als mögliche Vorbehandlungsstufen seien Oxidation (zur Reduktion organischer Belastung oder gelöster Ammoniak-, Eisen- oder Manganverbindungen) mittels Chlor oder Ozon, die Koagulation (d. h. Ausflockung) und Filtration von Schwebepartikeln sowie die Desinfektion durch Chlorierung oder UV-Behandlung genannt. Mit den zusätzlichen Vorreinigungsstufen sind auch gewisse zusätzliche Einbußen bei der Ausbeute verbunden (siehe hierzu Kapitel 2.3.3). Nach [Eurowater 2021] liegen diese bei normaler Filtration für Grundwasser bei etwa > 98 %, während die Ultrafiltration für Oberflächenwasser oder geklärtes Abwasser eher mit 90–95 % angegeben werden.

Für die Berechnungen wird für gereinigtes Abwasser (Fallbeispiel 2) von einer Ausbeute der Vorbehandlung von 90 % ausgegangen, für Grundwasser (Fallbeispiel 3) von 98 %. Unter konservativer Annahme eines Reinstwasserbedarfs von 10 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> sowie einer Ausbeute der Wasseraufbereitung von Trink- zu Reinstwasserqualität von etwa 75 % [Eurowater 2021] ergibt sich ein Gesamtwasserbedarf von

---

<sup>40</sup> Hinsichtlich der Anforderungen an die Stromerzeugung für die Produktion und Anrechenbarkeit von grünem / erneuerbarem Wasserstoff wird auf die delegierten Rechtsakte der Europäischen Kommission auf Basis der Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II bzw. RED III) sowie deren Umsetzung ins nationale Recht, etwa im Rahmen der 37. BImSchV, verwiesen.

etwa 14,8 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (gereinigtes Abwasser, Oberflächenwasser), 13,6 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (Grundwasser) sowie 13,3 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> (Trinkwasser).<sup>41</sup> Bei Nutzung von Oberflächenwasser stellt die saisonal schwankende Wasserverfügbarkeit eine zusätzliche Herausforderung dar.

Am Beispiel eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs mit einer nominalen H<sub>2</sub>-Produktion von etwa 20 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/h lässt sich danach eine **Aufbereitungskapazität** der Wasseraufbereitungsanlage von etwa 270.000 l/h Rohwasser (Grundwasser) ableiten.<sup>42</sup> [EUROWATER o. D.] beschreibt auf der eigenen Firmenwebseite Referenzanlagen mit Kapazitäten von 1.200 l/h (Anwendungsfall: 5 MW<sub>el</sub> PEM-Elektrolyse, nicht-chloriertes Leitungswasser), 4.500 l/h (20 MW<sub>el</sub> AEL, nicht-chloriertes Leitungswasser) sowie 10.000 l/h, (50 MW<sub>el</sub> PEM-Elektrolyse, Grundwasser).<sup>43</sup> Im Rahmen der Machbarkeitsstudie eines 1 GW Elektrolyseur in [ISPT 2022] wird die Wasseraufbereitung durch eine Demineralisierungsanlage (230.000 l/h) und einer Reinstwassererzeugung mittels Umkehrosmose und Nachbehandlung bereitgestellt. Für die praktische Größenauslegung der Wasseraufbereitungsanlage ist überdies die Frage der Redundanz zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Wasserversorgung in die Planung einzubeziehen – verbunden mit den zusätzlichen Platzbedarfen. Erfahrungen aus der Wasseraufbereitung im Kraftwerksbereich (Kühlwasser) legen beispielsweise die Möglichkeit einer Überdimensionierung nahe. Ein denkbare Beispiel sind etwa 3 Aufbereitungsanlagen mit je 50 % der erforderlichen Gesamtkapazität, um eine Abdeckung von 150 % sicherzustellen.

Vereinfachend wurde der **Strombedarf für die Wasseraufbereitung** an dieser Stelle mit 3 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> für die Umkehrosmose (UO) angenommen [Blanco 2021]. Der überwiegende Energiebedarf der Wasseraufbereitung ist dabei für die der UO vorgeschaltete Hochdruckpumpe erforderlich. [Herco 2023] beschreibt den Energiebedarf dagegen mit etwas höheren Werten von ca. 4,6 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>. Bezogen auf die in Tabelle 4-2 dargestellten Daten liegt dieser bei etwa 0,10–0,15 % des Energiebedarfs der Elektrolyse.<sup>44</sup> Selbst im Falle sehr aufwendiger Aufreinigungsverfahren (etwa im Falle einer Meerwasserentsalzungsanlage mit anschließender Aufreinigung) geben [RMI 2023, Blanco 2021] Werte für den zusätzlichen Energiebedarf von maximal 1 % des Strombedarfs der Elektrolyse an.

Die durch die Wasseraufbereitung anfallenden **Abwassermengen** (= aufkonzentriertes Rohwasser) variieren je nach Konzeption der Aufbereitungsanlage und Rohwasserqualität. In den angenommenen Fallbeispielen liegen diese (bezogen auf den Rohwassereinsatz) bei etwa 25 % für Trinkwassernutzung und bis zu 33 % im Falle der Aufbereitung von gereinigtem Abwasser. Unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Wasserbedarfs der Elektrolyse von 9 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> liegt der Mehreinsatz an Rohwasser sogar bei 33–40 %. Das Abwasser stellt ein Konzentrat der aus der Rohwasserquelle abgetrennten Verunreinigungen und Salze dar. Je nach Ausgangskonzentrationen kann neben der direkten Entsorgung

<sup>41</sup> Nach anderen Quellen sich im Zuge der Wasseraufbereitung auch höhere Ausbeuten von bis zu 90 % möglich [Dagg 2023].

<sup>42</sup> Diese Anlagengröße von etwa 27 m<sup>3</sup>/h (=27.000 l/h) ist dabei etwa um den Faktor 10 größer als die heute beispielsweise im Kraftwerksbereich durch die Firma Herco Wassertechnik GmbH eingesetzten Anlagen [Herco 2023].

<sup>43</sup> Die im Vergleich leicht geringeren Angaben können etwa durch geringere tatsächliche Wirkungsgrade der Elektrolyse in heutigen Projekten (ca. 60 %) sowie optimistischen Annahmen hinsichtlich des spezifischen Wasserbedarfs erklärt werden.

<sup>44</sup> [Eurowater 2021] beschreibt den Energieaufwand, je nach Rohwasserquelle, mit 2 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (Grundwasser), 2,2 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (gereinigtes Abwasser) und 7 kWh<sub>el</sub>/m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> (Meerwasser).



über die Kanalisation auch die vorherige Aufreinigung nötig sein.<sup>45</sup> Aufgrund der potenziell hohen Mengen sollten dabei jedoch mögliche Ableitungsgebühren (z. B. in Form von Kanalabwassergebühren) berücksichtigt werden. Je nach Region können diese bei mehreren Euro pro Kubikmeter Wasser liegen, gleichzeitig aber auch einen Anreiz zur besseren internen Wasseraufbereitung und Mehrfachnutzung der Wasserströme darstellen.

### 4.3.2. Fallbeispiel 1: Dezentrale Anwendung

#### Kurzbeschreibung

In diesem ersten Fallbeispiel wird die dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung durch Elektrolyse betrachtet. Hierbei handelt es sich um Elektrolysekapazitäten von typischerweise 1 bis 10 MW<sub>el</sub>, kombiniert mit lokaler Stromerzeugung durch erneuerbare Energien und einer direkten Nutzung des Wasserstoffs im Mobilitätssektor. In Brandenburg gibt es zahlreiche Projekte zur dezentralen H<sub>2</sub>-Erzeugung in dieser Größenordnung, von denen sich die ersten bereits in Umsetzung befinden.

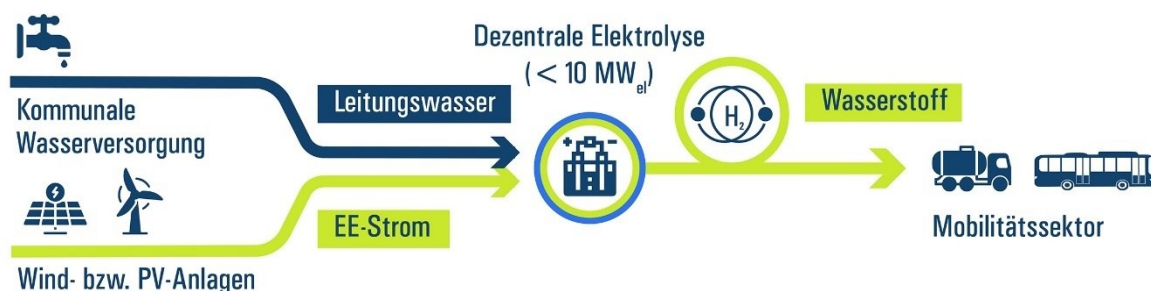


Abbildung 4-4: Übersicht Fallbeispiel 1.

Abbildung 4-4 zeigt eine Übersicht zur Konzeption der dezentralen H<sub>2</sub>-Erzeugung. Hierbei werden verschiedene Wertschöpfungsschritte an einem Standort kombiniert: Lokale Wind- und PV-Anlagen liefern Strom für den Elektrolyseur, mit dem dann aus aufbereitetem Wasser aus der lokalen Trinkwasserversorgung der Wasserstoff erzeugt wird. Dieser wird in diesem Fallbeispiel an einer direkt angrenzenden Wasserstofftankstelle an Busse, Lkw und ggfs. Pkw weitergegeben. Potenziell weitere Einsatzbereiche, wie etwa die Nutzung bei Industriekunden oder zur Wärmeerzeugung, werden in diesem Fallbeispiel aufgrund der Skalierung des Elektrolyseurs nicht betrachtet. Entsprechend findet auch keine Einspeisung in ein potenzielles Wasserstoffnetz statt.

#### Regionaler Kontext

Bereits heute existiert in Brandenburg eine große Anzahl an Projekten zur dezentralen H<sub>2</sub>-Erzeugung. Diese sind hauptsächlich auf den Einsatzbereich im Mobilitätssektor ausgerichtet. Anhand dieser bestehenden Projekte soll im Folgenden auch das generische Fallbeispiel im Rahmen dieser Studie abgeleitet werden.

<sup>45</sup> [Dagg 2023] beschreibt außerdem die Möglichkeit der Soleaufbereitung im Rahmen eines „Zero Liquid Discharge“-Prozesses. Hierbei wird durch weitere Aufkonzentration der salzhaltigen Abwasserströme und anschließender thermischer Behandlung auch das Abwasser den internen Wasserströmen der Wasseraufbereitung wiederzugeführt und der salzhaltige Rückstand als Feststoff entsorgt.

Eine Übersicht zu existierenden Projekten in Brandenburg bietet der sogenannte „Wasserstoffmarktplace Localiser“ [Localiser RLI 2023].<sup>46</sup>

Der H<sub>2</sub>-Marktplace ist eine Plattform, auf der Akteure sogenannte „Gesuche“ und „Angebote“ zu Wasserstoffnutzung und -erzeugung melden und so zusammenfinden können. Seit der Veröffentlichung im März 2022 wurden bereits über 350 Projekte registriert. Die Projekte sind georeferenziert und datengestützt und erleichtern somit das Zusammenkommen verschiedener Marktteilnehmer mit unterschiedlichen Bedürfnissen. Abbildung 4-5 zeigt die Benutzeroberfläche des Marktplaces mit ausgewählten Projekten.

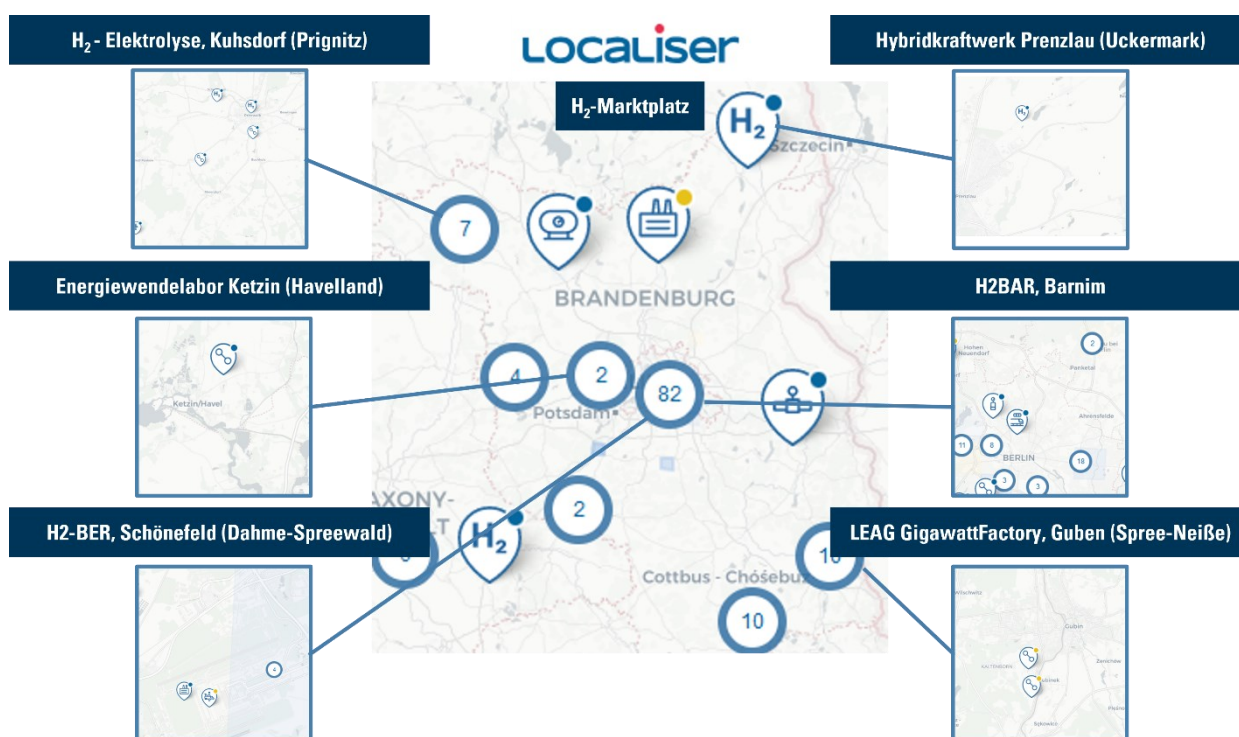


Abbildung 4-5: Ausgewählte Projektansätze für regionale H<sub>2</sub> Nutzung (Erzeugung und Bedarfe) aus der H<sub>2</sub>-Marktplace Datenbank.

Eigene Darstellung nach Bildschirmabdruck, abgerufen am 13.03.2024 [Localiser 2023]

Tabelle 4-3 zeigt ausgewählte Projektansätze aus der H<sub>2</sub>-Marktplace-Datenbank sowie weiteren Quellen, die im Folgenden als Beispiele für die dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung herangezogen werden. Die Beispiele liegen an verschiedenen Standorten über Brandenburg verteilt und sind teilweise schon in Betrieb (Tankstelle auf Flughafen Berlin Brandenburg (BER)) oder in der Planung. Es wurden sowohl Projekte im urbanen Kontext betrachtet als auch Vorhaben im ländlichen Raum (Kuhsdorf, Barnim, Guben).

An der Umsetzung der Projekte sind meist mehrere Unternehmen beteiligt. So kann die Wertschöpfung fast ausschließlich vor Ort erfolgen, von der Stromerzeugung über die Erzeugung des Wasserstoffs bis hin zur

<sup>46</sup> Der Marktplace wurde durch den Betreiber Localiser RLI GmbH im Rahmen der Wasserstoffstartnetz-Studie im Auftrag des MWAE aufgesetzt.

Betankung von Fahrzeugen und Nutzung des Wasserstoffs. Die Standortfaktoren werden hier bestimmt durch das lokale Erzeugungspotenzial erneuerbarer Energie sowie dem lokalen Bedarf an Wasserstoff für den Mobilitätssektor. Tendenziell ist das EE-Erzeugungspotenzial in Flächen-/ländlichen Regionen größer als in urbanen Gebieten und der Bedarf an Wasserstoff für die Mobilität in urbanen Gebieten größer als in Flächenregionen bzw. ländlichen Regionen (siehe etwa [Fhg IEG et al. 2023]).

Tabelle 4-3: Ausgewählte Projektbeispiele aus dem H<sub>2</sub>-Marktplatz

Quelle: [Localiser 2023, Recherche LBST]

Region	Projektname	H <sub>2</sub> -Erzeugung	Konzept/H <sub>2</sub> -Nutzung	Relevante Akteure
Barnim, Oberhavel	H2BAR	Elektrolyse (4 MW <sub>el</sub> )	Mobilität / Tankstelle (7 Wasserstoffzüge, 6 BZ-Busse, Abfallsammelfahrzeuge), H <sub>2</sub> -Speicher (bis zu 1.800 kg) [Wasserstoffschiene-Heidekrautbahn 2024]	ENERTRAG SE Kreiswerke Barnim Barnimer Busgesellschaft Niederbarnimer Eisenbahn
Stadt Guben	LEAG GigawattFactory	k. A.	Mobilität / Tankstelle, kommunale Wärmeversorgung, grüne H <sub>2</sub> -Nutzung für Industrieprozess (Lithiumhydroxid für Elektrofahrzeugbatterien) [LEAG 2023c]	Stadt Guben Rock Tech LEAG
Kuhdorf	H <sub>2</sub> -Elektrolyse	Elektrolyse (5 MW <sub>el</sub> )	Einspeisung in die Pipeline-Infrastruktur angestrebt	VOSS Energy GmbH
Spree-Neiße	LEAG GigawattFactory	Elektrolyse (1 MW <sub>el</sub> , Erweiterung angestrebt)	Mobilität / Tankstelle (Busse/ ÖPNV/ Lkw/ Pkw) [LEAG o.D.]	LEAG Cottbusverkehr
Ketzin	Energiewendelabor Ketzin	Elektrolyse (3 MW <sub>el</sub> )	Mobilität (kommunale Bus- und Abfallbetriebe), Einspeisung in Pipeline geplant, Abwärmenutzung	E.DIS GASAG
Prenzlau	Hybridkraftwerk Prenzlau	Elektrolyse (0,5 MW <sub>el</sub> )	Mobilität / Nutzung in zwei BHKWs [ENERTRAG 2024]	ENERTRAG SE
BER Flughafen	H2-BER	Elektrolyse (0,5 MW <sub>el</sub> )	Mobilität / Tankstelle (Pkw und Busse); BHKW, H <sub>2</sub> -Speicher (bis zu 100 kg) [NOW-GmbH 2020]	Flughafen BER

Auf Basis dieser bestehenden und angekündigten Projekte wurde ein generisches Fallbeispiel für die folgende Diskussion abgeleitet.

## Konzept

Abbildung 4-6 veranschaulicht das Konzept für die dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung anhand von konkreten Zahlen zu verschiedenen Komponenten der Anlage, aufbauend auf den getroffenen Annahmen und Berechnungen in Tabelle 4-2.

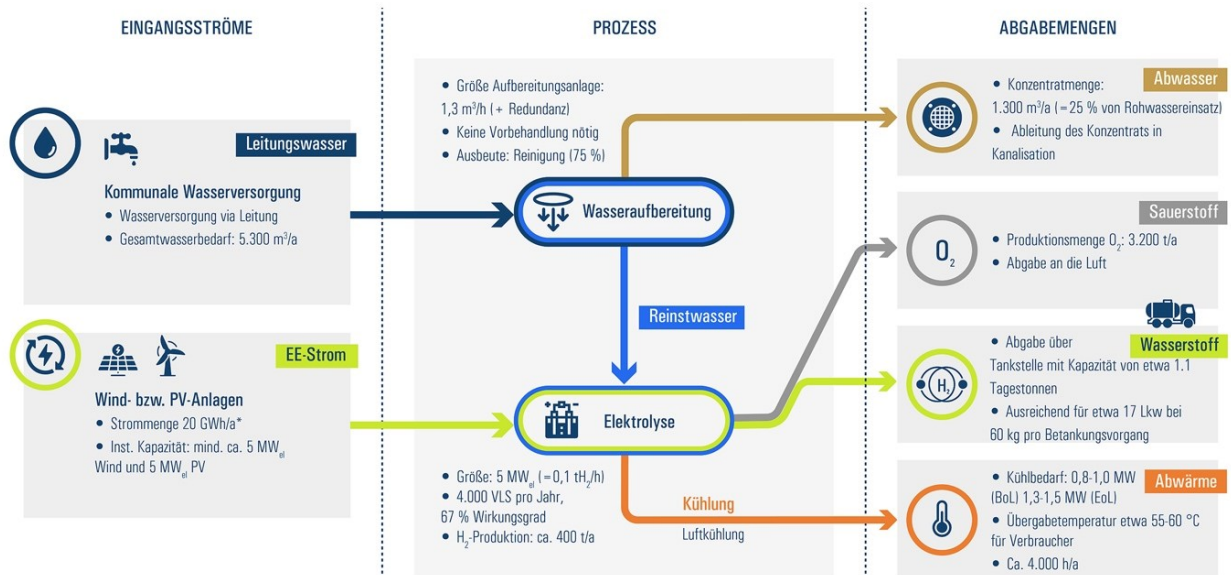


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts eines 5-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs in Fallbeispiel 1.

Die typische **Elektrolyseurgröße** in diesem ersten Fallbeispiel beträgt maximal 5 MW<sub>el</sub> (reicht je nach Projektbeispiel in

Tabelle 4-3 von 0,5 MW<sub>el</sub> bis 5 MW<sub>el</sub>) bei einer nominalen Produktionsmenge von 100 kgH<sub>2</sub>/h. Bei einer angenommenen Betriebsdauer von 4.000 Stunden pro Jahr und einem Systemwirkungsgrad von 66,7 % ergibt sich eine Jahresproduktion von etwa 400 Tonnen Wasserstoff.

Die Versorgung mit Reinstwasser (etwa 10 l/kgH<sub>2</sub>) wird durch eine **Wasseraufbereitungsanlage sichergestellt**. Bei einem spezifischen Wasserbedarf von 13,3 Liter Rohwasser (75 % Ausbeute) pro kg Wasserstoff ergibt sich eine erforderliche Anlagengröße von 1,3 m<sup>3</sup>/h. Durch Nutzung von Trinkwasser ist keine weitere Vorbehandlung erforderlich. Die Menge an Rohwasser beträgt etwa 5.300 m<sup>3</sup>/a. Davon werden 1.300 m<sup>3</sup>/a als Abwasser über die Kanalisation zurückgeleitet, sodass mit einem Wasserverbrauch der Anlage von 4.000 m<sup>3</sup>/a gerechnet werden kann.

Für die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse werden jährlich etwa 20 GWh **Strom** benötigt. Um diese Menge zu produzieren, beträgt die installierte EE-Kapazität mindestens je 5 MW<sub>el</sub> aus Windenergie- und PV-Anlagen. Weitere Strombedarfe für die Wasseraufbereitung des Leitungswassers oder der Kühlaggregate (aufgrund der vergleichsweise geringen Beiträge) hier nicht berücksichtigt.

Als **Kühlkonzept** wird ein geschlossener Kühlkreislauf mit Trockenkühlung (=Luftkühlung) angenommen. Die Anlagenauslegung erfolgt auf Basis des angenommenen Kühlbedarfs bei Ende der Lebenszeit der Stacks. Diese liegt bei etwa 1,3–1,5 MW (inkl. Kühlbedarf Wasseraufbereitung) [ISPT 2022]. Die

abgegebene Wärme würde während der Betriebsstunden des Elektrolyseurs mit etwa 55–60 °C für eine Auskopplung zur Verfügung stehen. Aufgrund der Größe der Anlage ist allerdings nur die Nutzung für einzelne Abnehmer in der direkten Umgebung interessant. Ansonsten würde die Wärmeabgabe direkt an die Umgebungsluft erfolgen.

Der **erzeugte Wasserstoff** (400 t/a) wird in diesem Fallbeispiel im Mobilitätssektor eingesetzt und über Tankstellen an Lkw, Busse und ggf. auch Pkw abgegeben. Mit der produzierten H<sub>2</sub>-Menge (und zusätzlich erforderlichen) H<sub>2</sub>-Speichern ergibt sich eine tägliche Abgabemenge von etwa 1,1 Tonnen Wasserstoff.<sup>47</sup> Basierend auf den Projektbeispielen in

Tabelle 4-3 wären auch weitere Anwendungen des erzeugten Wasserstoffs, etwa zum Betrieb eines Blockheizkraftwerks [ENERTRAG 2024], für die Industrie [LEAG 2023c], zur Einspeisung in die (zukünftige) Pipelineinfrastruktur [Localiser 2023] oder zur Zwischenspeicherung [NOW-GmbH 2020, Wasserstoffschiene-Heidekrautbahn 2024], denkbar.

Neben Wasserstoff werden auch 3.200 t **Sauerstoff** pro Jahr produziert. Diese werden im Rahmen in kleinen Projekten typischerweise an die Luft abgegeben, sofern regional kein potenzieller Verbraucher existiert.

### Wasserhaushalt

Die Wasserversorgung des Elektrolyseurs erfolgt über die lokale Wasserversorgungsinfrastruktur, d. h., es wird von Trinkwasser ausgegangen. Diese Annahme entspricht auch dem Großteil der heute verwirklichten Elektrolyseprojekte in Deutschland in dieser Größenordnung. Damit liegt der Wasserbedarf für die jährliche Produktion von etwa 400 t<sub>H<sub>2</sub></sub> bei etwa 5.300 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub> pro Jahr, von denen rund 3.600 m<sup>3</sup> tatsächlich in den Produkten Wasserstoff und Sauerstoff „fixiert“ werden. Detaillierte Informationen zur Aufbereitung des Trinkwassers zu Reinstwasser sind in Abschnitt 2.3.3 nachzulesen.

In der H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie wird ein potenzieller H<sub>2</sub>-Bedarf für den Mobilitätssektor in Brandenburg von 4,6 TWh (= 138 kt/a) im Jahr 2045 prognostiziert (davon etwa 2,3 TWh auf Lkw und 1,7 TWh auf Pkw<sup>48</sup>), was in etwa einer Menge von 380 Tonnen Wasserstoff pro Tag entspricht. Um diesen potenziellen Bedarf zu decken, wären somit in etwa 345 dieser dezentralen Projekte in Brandenburg notwendig.<sup>49</sup>

Somit ergibt sich ein theoretischer Gesamt-Rohwasserverbrauch (Leitungswasser) von etwa 1,85 Mio. m<sup>3</sup>/a, wenn der potenzielle H<sub>2</sub>-Bedarf Brandenburgs aus dem Mobilitätssektor 2045 ausschließlich mit dezentralen Projekten gedeckt werden würde. Abbildung 4-7 setzt dies in Vergleich zu der Gesamtabgabe an Wasser aus dem öffentlichen Leitungsnetz an Letztverbraucher in Brandenburg (siehe Kapitel 3.3.5). So wurden im Jahr 2019 insgesamt rund 127 Mio. m<sup>3</sup> Wasser abgegeben, davon 109 Mio. m<sup>3</sup> an Haushalte und Kleingewerbekunden und 17,8 Mio. m<sup>3</sup> an Gewerbeverbraucher und Sonstige. Somit liegt der Wasserbedarf für die dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung zur Deckung des gesamten potenziellen H<sub>2</sub>-Bedarfs für

---

<sup>47</sup> Dies würde den Mindestanforderungen der AFIR (Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe) genügen, wonach bis zum Jahr 2030 an allen städtischen Knotenpunkten sowie alle 200 km entlang des TEN-V-Kernetzes eine Wasserstofftankstelle mit einer Mindestkapazität von 1 Tagedonne errichtet werden soll. Diese Menge reicht in etwa zur Betankung von etwa 17 Lkw pro Tag bei einer Betankungsmenge von 60 kg pro Betankungsvorgang) aus.

<sup>48</sup> Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Werte auf den Analysen der Langfristszenarien des BMWK für das Szenario TN-H2 mit einem hohen Wasserstoffeinsatz im Verkehr basieren [Lux et al. 2021].

<sup>49</sup> Bei einer Fläche von etwa 30.000 km<sup>2</sup> für Brandenburg (ohne Berlin) entspricht dies etwa einem 5 MW<sub>el</sub>-Elektrolyseur mit Tankstelle alle 86 km<sup>2</sup>. Ein zusätzlicher Wasserstoffbedarf im Mobilitätssektor von weiteren 4,3 TWh wird für das Stadtgebiet Berlin angegeben, der hier unberücksichtigt bleibt.



den Mobilitätssektor in Brandenburg im Jahr 2045 nach [Fhg IEG et al. 2023] bei nur etwa 1,5 Prozent der Gesamtwasserabgabe an Letztverbraucher aus dem öffentlichen Leitungsnetz.

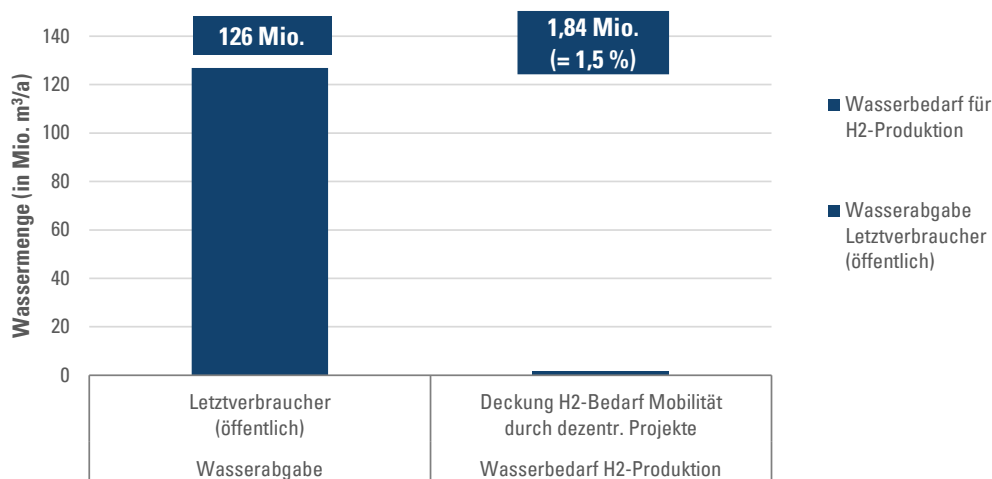


Abbildung 4-7: Vergleich potenzieller Wasserbedarf für gesamten Mobilitätssektor in Brandenburg vs. Wasserabgabe an Letztverbraucher über das Leitungsnetz im Jahr 2019.

### Einordnung der Ergebnisse und Fazit

Die dezentrale H<sub>2</sub>-Erzeugung bietet große Potenziale und Anwendungsmöglichkeiten in Brandenburg sowie diverse Vorteile: Lokal erzeugter, erneuerbarer Strom kann direkt vor Ort zur Wasserstoffherstellung durch Elektrolyse verwendet werden. Zudem bleibt der Wasserbedarf an den Projektstandorten aufgrund der geringen Elektrolysekapazitäten überschaubar. Kommunen können direkt lokal Wertschöpfung schaffen sowie Strukturen aufbauen und stärken.

Auch werden durch die Dezentralität Strom- als auch Wasserbedarfe über verschiedene Standorte in Brandenburg verteilt. Durch die Nutzung unterschiedlicher Standorte erleichtert sich die Verträglichkeit der Projekte mit den lokalen Begebenheiten, indem der Hochlauf an den Bedarf gekoppelt werden kann. Besonders im urbanen Raum, wo der H<sub>2</sub>-Bedarf für den Mobilitätssektor im Verhältnis zur vorhandenen erneuerbaren Energieerzeugung größer ausfällt, wird eine Wasserstoff-Anlieferung via Lkw-Trailer für die Tankstellen jedoch weiterhin erforderlich sein. Die im H<sub>2</sub>-Marktplatz Localiser bereits heute veröffentlichten Projekte und Projektideen zeigen bereits die große Zahl der Aktivitäten in diesem Bereich in Brandenburg.

Die hier untersuchte 5 MW<sub>el</sub>-Elektrolyseanlage hat einen Wasserbedarf von etwa 5.300 m<sup>3</sup>/a für die Erzeugung von rund 400 t<sub>H<sub>2</sub></sub>. Abbildung 4-8 ordnet diese Kennzahlen anschaulich ein.

Um den in der H<sub>2</sub>-Startnetz-Studie ermittelten potenziellen H<sub>2</sub>-Bedarf des Transportsektors in Brandenburg von etwa 4,6 TWh [Fhg IEG et al. 2023] zu decken, würden etwa 345 solcher Projekte mit einer Elektrolysekapazität von je 5 MW<sub>el</sub> (insg. 1,75 GW<sub>el</sub>) sowie je einer Tankstelle mit einer Kapazität von 1,1 Tagestonnen in Brandenburg erforderlich bzw. möglich sein. Dies hätte einen Wasserbedarf von etwa 1,5 Prozent der Gesamtwasserabgabe aus dem öffentlichen Leitungsnetz in Brandenburg zur Folge.

Insgesamt ist zu erwarten, dass die künftige Wasserstoffproduktion in Brandenburg aber in einer Kombination von dezentralen und zentralen (siehe Fallstudien 2 und 3) Projekten existieren wird.

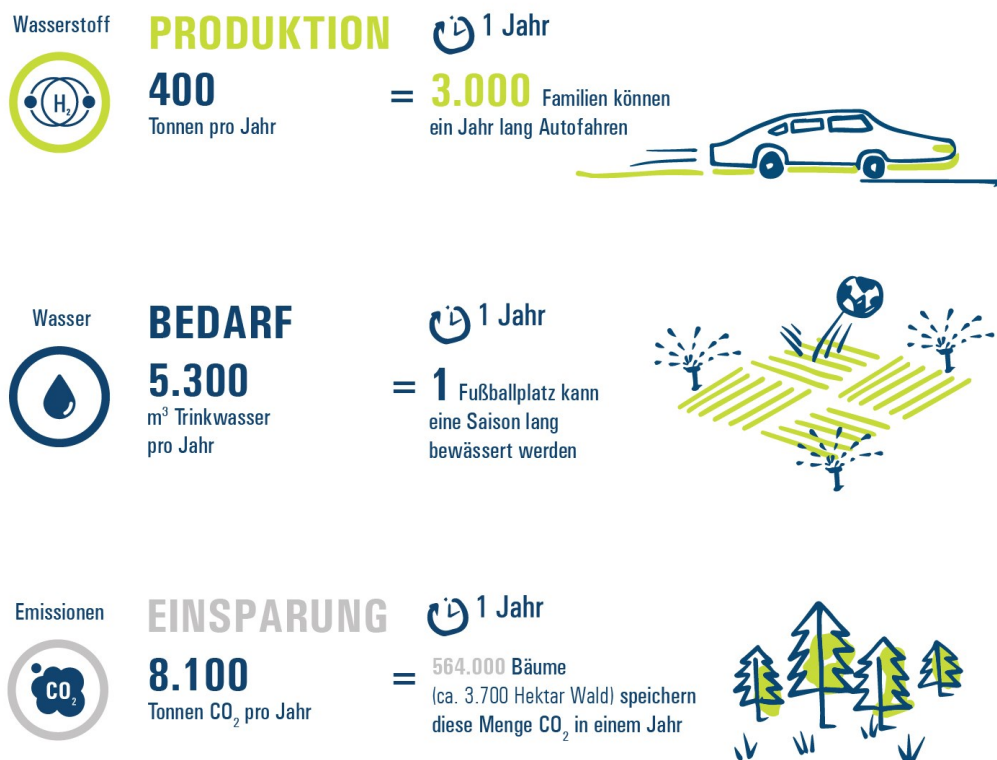


Abbildung 4-8: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 1 (5 MW<sub>el</sub>-Anlage).

Annahmen:

Bedarfs- und Produktionswerte für eine 5 MW<sub>el</sub>-Anlage (Tabelle 4-2),

Wasserbedarf (Trinkwasser): Bewässerung: 3-mal pro Woche eines 7.140 m<sup>2</sup> großen Fußballplatzes, Saison: 20 Wochen pro Jahr,

Wasserstoffbedarf zur Nutzung in Mobilitätssektor: jährlicher Durchschnitt pro Pkw: 12.300 km [BMDV 2024], H<sub>2</sub>-Verbrauch: 1,04 kg/100 km (basierend auf Angaben für Hyundai Nexa Blue);

THG-Emissionen: Einsparungen gegenüber Diesel-Pkw; 173,0 g CO<sub>2</sub>/Pkm für Diesel [UBA 2024], 23 gCO<sub>2</sub>/Pkm

Brennstoffzellenauto (Annahme Strommix Deutschland für Tankstellenversorgung), 1,4 Personen pro Fahrzeug [UBA 2024]), CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Kiefern: 14,4 kg pro Jahr, Baumdichte: 150/ha

### 4.3.3. Fallbeispiel 2: Urbane Region

#### Kurzbeschreibung

Im zweiten Fallbeispiel wird die Wasserstoffproduktion in einem urbanen Kontext Berlin/Brandenburgs beleuchtet. Ziel ist insbesondere die Diskussion der potenziellen Nutzbarkeit von (kommunalem) Abwasser als Rohwasserquelle für die Wasserstoffproduktion. Die gewählte Wasserstoffproduktionskapazität beträgt 100 MW<sub>el</sub> und wird betrieben durch erneuerbaren Strom aus einem PV-Wind-Hybridkraftwerk (siehe Abbildung 4-9). Das als Eingangsstoff genutzte Abwasser muss zunächst in einer Kläranlage gereinigt werden, bevor es durch zusätzliche Wasseraufbereitungsschritte vor der Elektrolyse zu Reinstwasser aufbereitet wird. Der produzierte Wasserstoff soll im Rahmen dieses Fallbeispiels regional in den Bereichen Industrie und Mobilität eingesetzt werden, zu denen im Folgenden einzelne Projektideen aufgeführt werden. Weiterhin werden in dieser Fallstudie mit der Wasserstoffproduktion einhergehenden Stoffströme beschrieben und potenzielle Synergien mit der Abwasseraufbereitung sowie mögliche Chancen und Herausforderungen hinsichtlich der in Brandenburg verfügbaren Abwassermengen diskutiert.

Internationale Beispielprojekte für die Nutzung (kommunaler) Abwasserströme als Ausgangsstoff der Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse finden sich unter anderem in Australien [Monash University 2021], den USA [Plug Power 2022b], Dänemark [H2 Energy 2024] und Schottland [SHFCA 2024]<sup>50</sup>. Im Falle von [H2 Energy 2024] handelt es sich beispielsweise um eine 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseanlage im dänischen Esbjerg. Dabei sollen der Wasserfußabdruck der Wasserstoffproduktion durch die direkte Nutzung von über 1 Mio. m<sup>3</sup>/a an gereinigtem Abwasser und so der Einfluss auf die Trink- oder Grundwasserverfügbarkeit signifikant gesenkt werden.

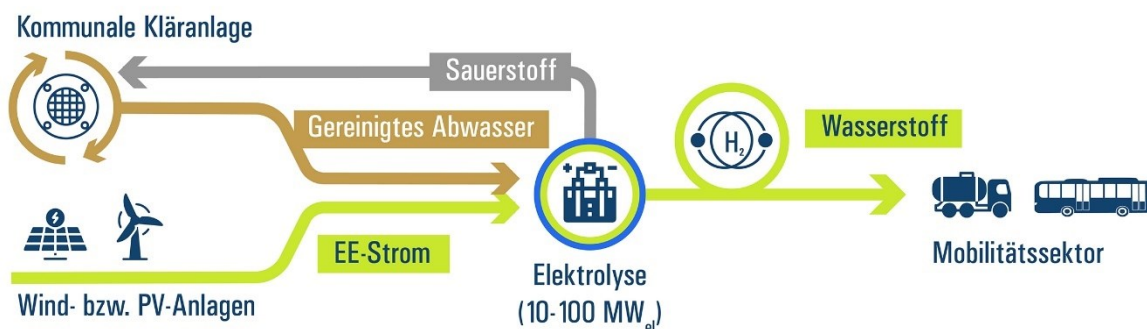


Abbildung 4-9: Übersicht Fallbeispiel 2.

#### Regionaler Kontext

In Brandenburg sind bislang erst wenige Projekte zur (großskaligen) Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse im Zusammenhang mit der Abwasseraufbereitung bekannt.<sup>51</sup> Für die nachfolgenden Analysen

<sup>50</sup> Detailplanungen zu den genannten Projekten wurden bislang jedoch nicht veröffentlicht.

<sup>51</sup> Die Wasserstoffproduktion aus Reststoffen oder Biomasse durch Vergärung oder Fermentation sei an dieser Stelle, wegen des geringeren Einflusses auf den Wasserhaushalt, bewusst ausgeklammert. Ein Sonderfall stellt die Plasmalyse von ammoniakhaltigen Abwasserströmen dar, wie sie etwa im Klärwerk Waßmannsdorf durch die Firma Graforce getestet wurde. Details hierzu finden sich im Anhang.

wurde das Klärwerk Waßmannsdorf der BWB als generisches Fallbeispiel für die mögliche Nutzung von gereinigtem Abwasser für die Elektrolyse untersucht.

Hinsichtlich der Wasserstoffnutzung im urbanen Umfeld bieten sich punktuelle Großabnehmer aus Industrie oder Mobilität an, die aufgrund von fehlender EE-Erzeugung oder nicht integrierter Anlagenführung nicht selbst als Produzent des erneuerbaren Wasserstoffs auftreten (anders etwa als eine Raffinerie).

Die Berliner Wasserbetriebe beschreiben in der Studie „Wasserstoffpotenzial in Berlin 2025“ vom Juli 2020 eigene Einsatzpotenziale für Wasserstoff. So werden Projektideen für den Betrieb ihrer Kanalfahrzeuge, von Lkw und anderen Nutzfahrzeugen (in Summe ca. 600 Stück bei einem Gesamtpotenzial von ca. 330 t<sub>H2</sub>/a) aufgeführt. Auch ein perspektivischer Einsatz von Wasserstoff in der Wärmeversorgung über BHKWs wird mit einem Gesamtpotenzial von bis zu 660 t<sub>H2</sub>/a beschrieben [H2Berlin 2020]. Ein weiterer möglicher Einsatzbereich ist demnach etwa auch die Umstellung der Flughafenbodenflotte des Flughafens BER auf H<sub>2</sub>-Fahrzeuge, ohne jedoch genaue Zahlen zu nennen.

### Konzept

Vor diesem Hintergrund wurde für die Diskussion im Fallbeispiel 2 der Bau eines Elektrolyseurs von bis zu 100 MW<sub>el</sub> angenommen. Ausgehend von den in Tabelle 4-2 gezeigten Grundannahmen lassen sich hierfür die in Abbildung 4-10 gezeigten Stoffströme identifizieren.

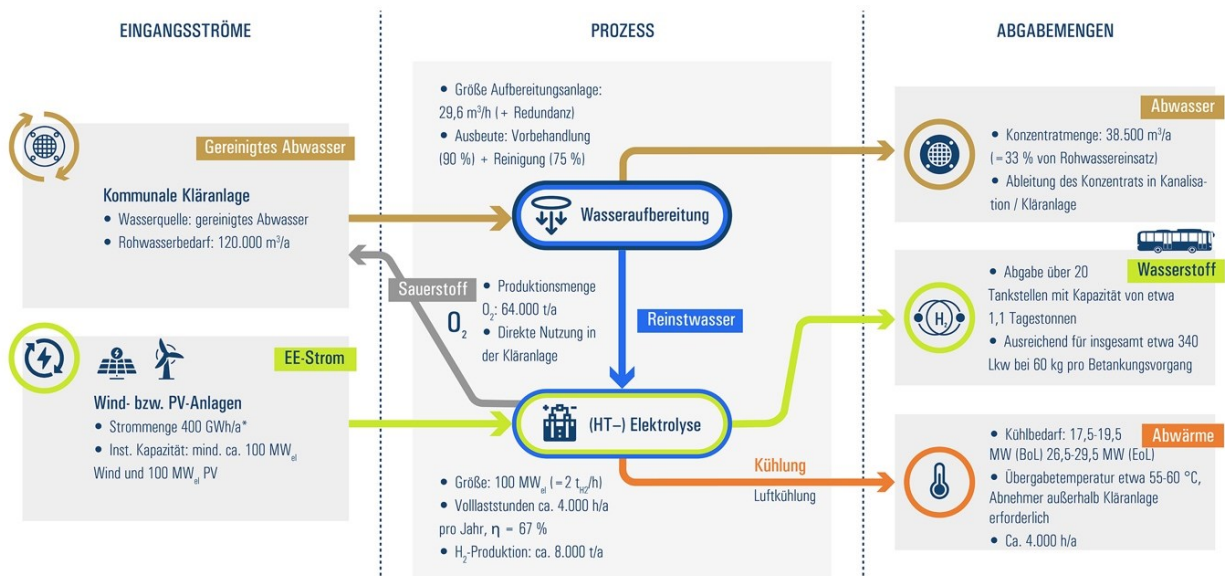


Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts eines 100 MW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs in Fallbeispiel 2.

Die **Elektrolysekapazität** beträgt in diesem Fall 100 MW<sub>el</sub> (= 2 t/h). Bei den angenommenen 4.000 Volllaststunden entspricht dies einer Menge von 8.000 t<sub>H2</sub>/a. Zusätzlich ergibt sich ein **Strombedarf** von etwa 400 GWh pro Jahr, der durch Erneuerbare-Energien-Kapazitäten vor Ort (inkl. Stromspeicher) oder durch Strombezug aus dem Netz mit entsprechende PPAs abgesichert werden müsste. Der zusätzliche

Energiebedarf durch die Wasseraufbereitung liegt bei 0,08 % des Gesamtstrombedarfs der Elektrolyse und wird damit im Folgenden vernachlässigt.

Als **Rohwasserquelle** dient in diesem Zusammenhang eine Kläranlage nach dem Vorbild von Berlin Waßmannsdorf. Die Anlage hat mit einer Gesamtabwassermenge von 76 Mio. m<sup>3</sup>/a<sup>52</sup> eine deutlich größere Kapazität als die erforderlichen etwa 120.000 m<sup>3</sup>/a gereinigtes Abwasser, die für die 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyse erforderlich wären (ausgehend von einem spezifischen Rohwasserbedarf von 14,8 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>). Die Aufreinigung erfolgt durch einen mehrstufigen Prozess in der Kläranlage, welcher im Folgenden kurz dargestellt wird.

Eine moderne Abwasserbehandlungsanlage verfügt in der Regel über drei Reinigungsstufen, die das Abwasser durchläuft.

In der ersten Reinigungsstufe, der mechanischen Abwasserreinigung, wird zunächst grober Unrat durch einen Rechen entfernt. Anschließend lagert sich im Sandfang unter anderem Kies und Sand am Boden ab. In der abschließenden Vorklärung setzen sich feine Schwebstoffe als Schlamm am Boden ab und Leichtstoffe wie Fette und Mineralöle an der Wasseroberfläche werden in einen Behälter abgelassen. Insgesamt werden bei der mechanischen Reinigung etwa 30 Prozent der Schmutzstoffe des Abwassers entfernt.

In der zweiten Reinigungsstufe, der biologischen Reinigung, werden zunächst in einem sog. Belebtschlammbecken organische Abwasserstoffe durch Kleinstlebewesen unter Sauerstoffzufuhr abgebaut. Hierbei werden auch Schadstoffe wie beispielsweise Schwermetalle, aufgenommen. Im darauffolgenden Nachklärbecken sinken diese Kleinstorganismen als Schlammflocken zu Boden und werden dann entweder erneut in das Belebungsbecken gepumpt oder beseitigt. Nach den ersten beiden Reinigungsstufen ist das Abwasser zu etwa 90 Prozent gereinigt.

Die dritte Stufe entfernt zur weitergehenden Abwasserreinigung durch spezielle Verfahren verschiedene chemische Stoffe wie Stickstoff und Phosphor. Das gereinigte Abwasser kann anschließend in natürliche Gewässer eingeleitet werden. Der Klärschlamm aus der Anlage wird weiterverwendet, indem zunächst der Wassergehalt gesenkt wird und der Schlamm schließlich in einen Faulbehälter zur Erzeugung von Faulgas für Heizzwecke geleitet wird [\[BMUV o.D.\]](#).

Manche Kläranlagen sind zudem mit einer vierten Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination ausgerüstet. Hierfür existieren verschiedene Verfahren, welche u.a. nach lokaler Gegebenheit, Abwasserbeschaffenheit und Zielsetzung ausgewählt werden. Die Eliminationsleistungen sind dabei sehr unterschiedlich, da sie von den auftretenden Spurenstoffen abhängen [\[HLNUG o.D.\]](#).

Eine fünfte Reinigungsstufe könnte weiterhin Mikroverunreinigungen wie antibiotikaresistente Keime entfernt werden. Eine solche Erweiterung ist beispielsweise im Klärwerk Steinhäule in Neu-Ulm in Planung [\[Process 2018\]](#).

Wie in Kapitel 2.3.2 dargestellt, erfolgt anschließend die Herstellung von Reinstwasser durch weitere Stufen der Vorbehandlung und Wasseraufbereitung/Reinigung. Die nominale Größe der Aufbereitungsanlage liegt bei etwa 29,6 m<sup>3</sup>/h (ohne Berücksichtigung möglicher Redundanzen).

---

<sup>52</sup> Diese Zahl bezieht sich auf die durchschnittliche Jahresmenge unter Berücksichtigung von Regen- und Trockenwetter. Die Trockenwettermengen für Waßmannsdorf betragen 44 Mio. m<sup>3</sup>/a.



Gereinigtes Abwasser wird analog zu Oberflächenwasser behandelt, wobei besonders die Entfernung von Partikeln, Nährstoffen und Mikroorganismen von Bedeutung ist. Zur Vorbehandlung wird deshalb Ultrafiltration sowie eine UV-Anlage verwendet. Die anschließende Wasseraufbereitung durch Umkehrosmose und Elektrodeionisation erfolgt analog zu Grundwasser oder Leitungswasser. Etwa 33 % der eingesetzten Wassermenge (ca. 38.500 m<sup>3</sup>/a) fallen als Abwasser (Konzentrat) an und können direkt der Kläranlage wieder zugeführt werden.

Das **Kühlkonzept** sieht einen geschlossenen Wasserkreislauf vor. Dabei ist sowohl eine Luftkühlung als auch die Auskopplung in ein Nah- bzw. Fernwärmenetz denkbar. Der Kühlbedarf bzw. die Abwärme beträgt etwa bis zu 26,5–30,0 MW [nach ISPT 2022].

Das Klärwerk stellt keinen geeigneten Abnehmer für diese Abwärme dar, da die Nutzung des hier produzierten Klärgases über den Großteil des Jahres den Wärmebedarf der Anlage deckt und darüber hinaus zeitweise ein Wärmeüberschuss vorliegt [BWB 2024].

Die **Produktion an Wasserstoff** beträgt nominal bei Vollbetrieb 2 t<sub>H<sub>2</sub></sub> pro Stunde. Bei einer Benutzungsdauer von 4.000 Stunden im Jahr ergibt sich eine Gesamtproduktion von etwa 8.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>. Diese ist zunächst deutlich höher als die von den BWB selbst für eigene Anwendungen in Mobilität oder BHKWs angegebenen Projekte (Potenzial: etwa 1.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a) [H2Berlin 2020]. Insofern könnten auch weitere Abnehmer mit dem Wasserstoff versorgt werden. Aufgrund der Nähe potenziellen Nähe zum urbanen Raum ist etwa der Einsatz für Flottenbetrieb im ÖPNV oder Großabnehmer (beispielsweise Flughafen Berlin) denkbar.

Für den bei der Elektrolyse als Nebenprodukt anfallenden **Sauerstoff** ergeben sich mit dem Einsatz in der Kläranlage weitere Synergiepotenziale. Hier besteht ein Sauerstoffbedarf für Ozonungsanlagen, da im Belebungsbecken in der Regel kein Reinsauerstoff eingesetzt wird. Wird eine erforderliche Ozonmenge von 9,1 g O<sub>3</sub>/m<sup>3</sup> Abwasser angenommen, ergibt sich für das Klärwerk Waßmannsdorf ein Bedarf von etwa 4.000 t O<sub>2</sub>/a und für alle sechs Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe zusammen ein Bedarf von 14.000 t O<sub>2</sub>/a [BWB 2024]. Demgegenüber stünde eine jährliche Produktion des Elektrolyseurs von etwa 64.000 t/a. Weitere internationale Aktivitäten beschäftigen sich mit der direkten Nutzung von Sauerstoff statt Luft, was die Effizienz dieser Reinigungsstufe potenziell erhöhen könnte [ITM Power 2021]. Durch diese Belüftung von Mikroorganismen mit reinem Sauerstoff ließe sich die Sauerstoff-Transfereffizienz von 15–20 % auf bis zu 100 % erhöhen [Donald & Saunders 2020].

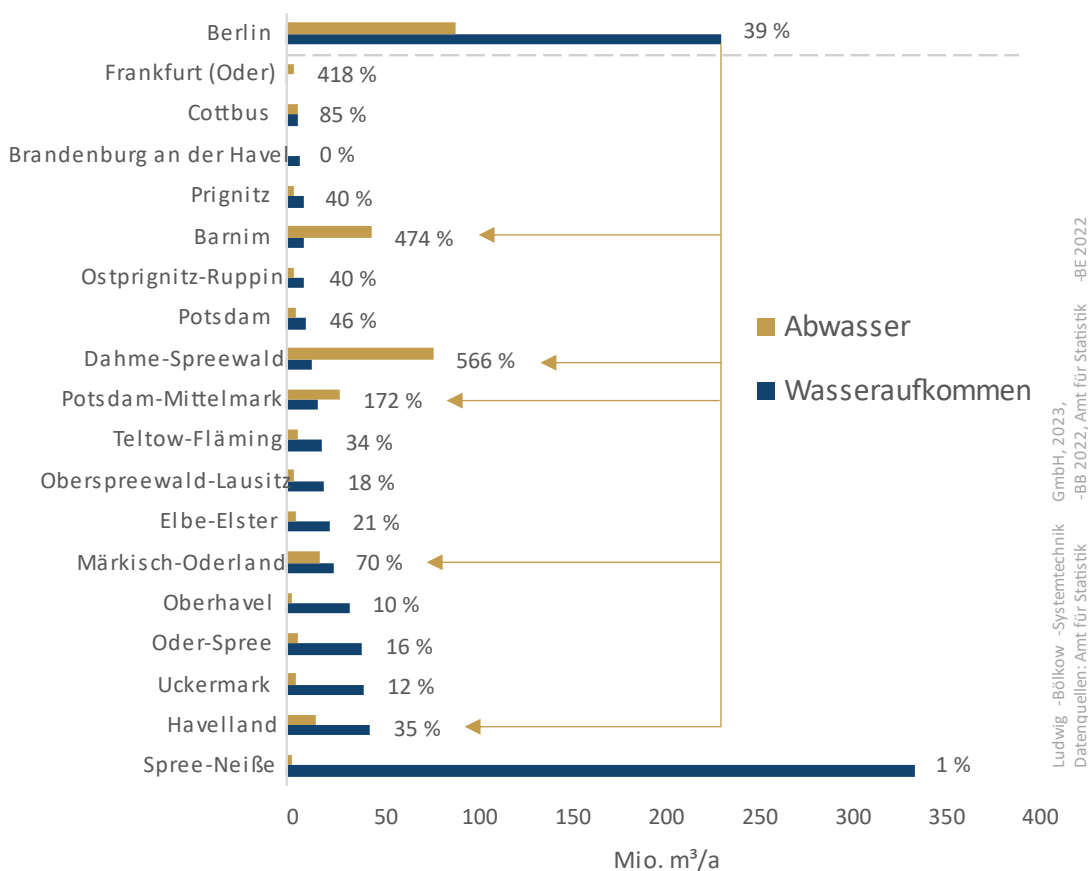
### **Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt**

Um die Auswirkungen der Wasserstoffproduktion in diesem Fallbeispiel auf den regionalen Wasserhaushalt zu diskutieren, sollen im Folgenden die erforderlichen Rohwassermengen in Form von gereinigtem Abwasser mit den in Berlin und Brandenburg anfallenden Wassermengen verglichen werden. Die Jahresabwassermengen je Landkreis wurden bereits in Kapitel 3.3.4 diskutiert. Demnach betrug im Jahr 2019 die Jahresabwassermenge in Brandenburg 242 Mio. m<sup>3</sup>/a Abwasser. Von diesen waren 223 Mio. m<sup>3</sup>/a Schmutzwasser, 14 Mio. m<sup>3</sup>/a Niederschlagswasser und 5 Mio. m<sup>3</sup> Fremdwasser (nicht behandlungsbedürftiges Wasser abgesehen von Niederschlagswasser, das in Abwasserkanäle eingedrungen ist) [Amt für Statistik-BB 2022].

In Abbildung 4-11 ist für Berlin sowie für jeden Landkreis Brandenburgs der Anteil des anfallenden Abwassers am Wasseraufkommen (öffentliche und nicht-öffentliche Wassergewinnung) für das Jahr 2019 aufgeführt. In den vier Kommunen Frankfurt (Oder), Barnim, Dahme-Spreewald und Potsdam-Mittelmark

übersteigt die Abwassermenge das lokal gewonnene Wasser. Diese Diskrepanzen lassen sich dadurch erklären, dass das anfallende Abwasser nur teilweise der Wassergewinnung der jeweiligen Landkreise entstammt. Innerhalb des Stadtgebiets Berlin wurden nach [Amt für Statistik-BE 2022] im Jahr 2019 insgesamt 233 Mio. m<sup>3</sup>/a gewonnen und 90 Mio. m<sup>3</sup>/a Abwasser gereinigt. Das restliche Abwasser wurde in Klärwerke außerhalb Berlins geleitet.

### Anteil Abwasser an Wasseraufkommen 2019



Ludwig-Böllkow-Systemtechnik GmbH, 2023, -BB 2022, Amt für Statistik -BE 2022  
Datenquellen: Amt für Statistik

Abbildung 4-11: Anteil Abwassermenge an Wasseraufkommen in Berlin und Brandenburg für das Jahr 2019. Eigene Darstellung nach [Amt für Statistik-BB 2022]

Abbildung 4-12 visualisiert die Standorte kommunaler Kläranlagen in Brandenburg. Auf der Karte sind zahlreiche kleine Anlagen erkennbar, während fünf Werke im Berliner Umkreis die größten Abwassermengen behandeln. Die Zahlen beziehen sich auf die Durchschnittsmengen im Jahr, unter Berücksichtigung von Regen- und Trockenwetter. Das Klärwerk Waßmannsdorf stellt mit einer Gesamtabwassermenge von 76 Mio. m<sup>3</sup>/a den größten Standort dar und befindet sich im Brandenburger Landkreis Dahme-Spreewald. Das Klärwerk Schönerlinde mit 41 Mio. m<sup>3</sup>/a wird dem Landkreis Barnim zugerechnet und Stahnsdorf mit 20 Mio. m<sup>3</sup>/a dem Landkreis Potsdam-Mittelmark. Zuletzt sind die Anlagen Münchehofe mit 15 Mio. m<sup>3</sup>/a in Märkisch-Oderland und Wansdorf mit 13 Mio. m<sup>3</sup>/a in Havelland abwassertechnisch relevant. Alle fünf genannten Standorte gehören zu den Berliner Wasserbetrieben

(BWB) und stellen zusammen mit dem Klärwerk Ruhleben in Berlin die sechs Großkläranlagen der Bundeshauptstadt dar [BWB 2023].



**KOMMUNALE KLÄRANLAGEN IN BRANDENBURG,  
EIGENE DARSTELLUNG NACH [MLUK 2021]**

Abwassermengen kommunaler Kläranlagen in Mio m<sup>3</sup>/a, 2019



Abbildung 4-12: Kommunale Kläranlagen in Brandenburg.  
Eigene Darstellung nach [LfU 2021]

Die hohen Abwassermengen Brandenburgs der Landkreise Dahme-Spreewald, Barnim, Potsdam-Mittelmark, Märkisch-Oderland und Havelland lassen sich somit hauptsächlich auf fünf Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe zurückführen. Diese Wasserströme wurden größtenteils im Stadtgebiet Berlins gewonnen und nicht in den Brandenburger Landkreisen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Wasserbedarf für die Elektrolyse mit in diesem Fallbeispiel mit etwa 0,12 Mio. m<sup>3</sup>/a nur einen sehr geringen Teil der gereinigten Abwassermenge in Waßmannsdorf von über 76 Mio. m<sup>3</sup> darstellt. Mehr als 99,8 % des behandelten Wassers würde somit auch weiterhin für andere Nutzungen oder die Rückleitung in Oberflächengewässer zur Verfügung stehen. Somit ist kein relevanter Einfluss der Wasserstoffproduktion auf den regionalen Wasserhaushalt zu erwarten.

Abbildung 4-13 stellt den potenziellen Wasserbedarf der hier untersuchten 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyseanlage von 120.000 m<sup>3</sup>/a gereinigtem Abwasser den Abwassermengen ausgewählter Kläranlagen in Brandenburg gegenüber, darunter der größten (Waßmannsdorf), der kleinsten (Schönhöhe) sowie der Durchschnittsgröße (Mittelwert) und dem Median aller Kläranlagen in Brandenburg gegenüber.

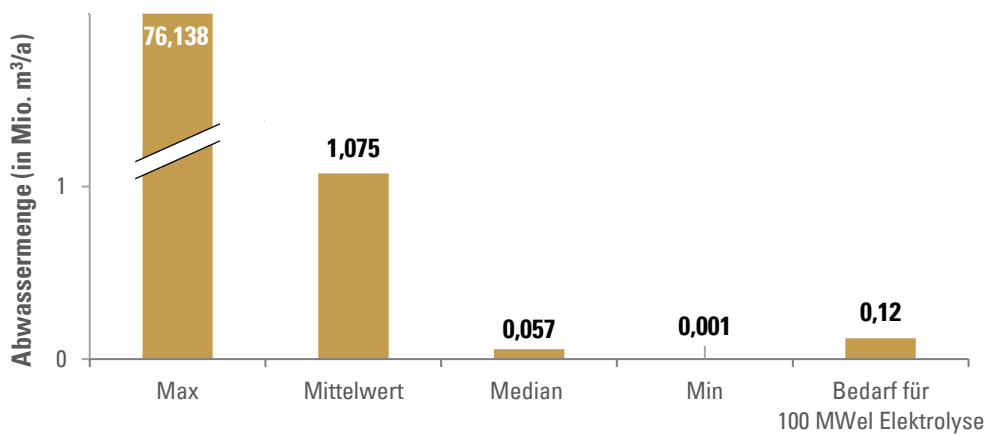


Abbildung 4-13: Vergleich Abwasserbedarf für 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyse mit existierenden Kläranlagen in Brandenburg.

In einem zweiten Vergleich in Abbildung 4-14 wird die Gesamtabwassermenge kommunaler Kläranlagen in Brandenburg von 248,4 Mio. m<sup>3</sup>/a [LfU 2021] mit dem abgeschätzten Wasserbedarf zur Deckung der potenziellen H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Kapitel 2.4 gegenübergestellt. Dazu wird der Rohwasserbedarf für die Elektrolysekapazität von 100 MW in diesem Fallbeispiel auf die prognostizierte Kapazität im Jahr 2045 von 7,8 GW<sub>el</sub> hochgerechnet. Es ergibt sich ein Bedarf von 9,4 Mio. m<sup>3</sup>/a Abwasser.

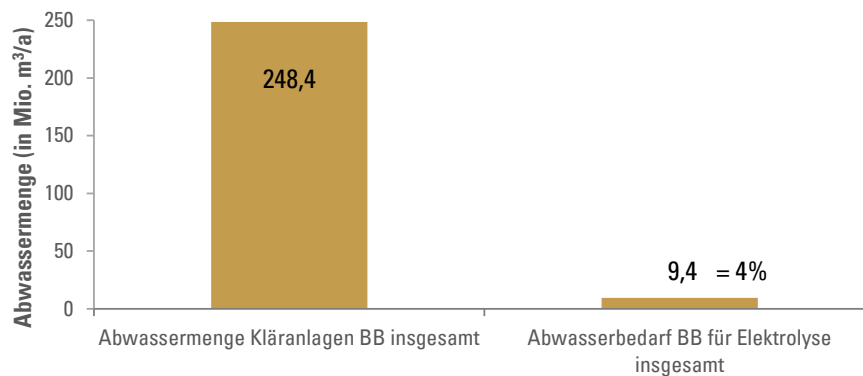


Abbildung 4-14: Vergleich Abwasseraufkommen vs. potenzieller Abwasserbedarf für 7,8 GW<sub>el</sub> H<sub>2</sub>-Produktion in Brandenburg.

## Einordnung der Ergebnisse und Fazit

Im Rahmen dieser Fallstudie wurde aufgezeigt, dass durch den Einsatz von etwa 120.000 m<sup>3</sup>/a gereinigtem Abwasser die Produktion von etwa 8.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub> durch eine 100-MW<sub>el</sub>-Elektrolyse ermöglicht werden können. Abbildung 4-15 gibt eine grafische Einordnung dieser Kennwerte. Gleichzeitig ist die produzierte Menge an Wasserstoff von 8.000 t<sub>H<sub>2</sub>/a</sub> ausreichend, um die Versorgung der Busse des öffentlichen Nahverkehrs einer Stadt wie Berlin für etwa 1 Jahr sicherzustellen. Auf diese Weise könnten überdies damit Einsparungen von 88.000 Tonnen CO<sub>2</sub> ermöglicht werden.

Durch die Nutzung von gereinigtem Abwasser kann ein kontinuierlicher Rohwasserstrom für die Elektrolyse sichergestellt werden. Dabei ist sowohl eine vollumfängliche Abdeckung der benötigten Wassermengen möglich als auch die anteilige Deckung im Rahmen eines Gesamtwasserversorgungskonzepts. Bei großen Kläranlagen (z. B. Waßmannsdorf mit über 76 Mio. m<sup>3</sup>/a) würde dagegen auch bei einer Großanlage von 100 MW<sub>el</sub> nur ein Bruchteil des verarbeiteten Abwassers benötigt werden, sodass es weiterhin auch weiteren potenziellen Nutzern oder für die Einleitung in Gewässer zur Verfügung steht.

Gerade in den fünf brandenburgischen Landkreisen rund um Berlin lässt sich ein hohes Abwasseraufkommen beobachten. Dieses lässt sich insbesondere auf die Klärwerke der Berliner Wasserbetriebe (BWB) zurückführen und entstammt größtenteils der Wassergewinnung im Berliner Stadtgebiet. Nach der Reinigung wird das Wasser in umliegende Gewässer eingeleitet. In diesen Bereichen stellt das Abwasser einen relevanten Beitrag zu dem Abfluss dar, gerade in den Sommermonaten kann dies oft einen Großteil des Abflusses betragen. Folglich ist in jedem Fall eine genaue Überprüfung erforderlich, wie viel Wasser dem Abwasserstrom entnommen werden kann.

Daneben existiert auch in den größeren Städten Brandenburgs ein größeres Abwasseraufkommen mit einer mehrstufigen Abwasseraufbereitung, sodass sich auch hier interessante Anwendungsfälle ergeben könnten. Inwieweit auch industrielle Abwässer eine interessante Rohwasserquelle darstellen können, ist stark von den enthaltenen Kontaminationen und dem erforderlichen Reinigungsbedarf im jeweiligen Einzelfall abhängig. Neben der Nutzung von Abwasser zeigen sich außerdem Synergiepotenziale bei der Verwendung von Sauerstoff für die Ozonungsanlage von Klärwerken<sup>53</sup> sowie bei der Abwärmenutzung außerhalb der Kläranlage.

---

<sup>53</sup> Für Waßmannsdorf beträgt der Sauerstoffbedarf etwa 4000 t/a [BWB 2024]



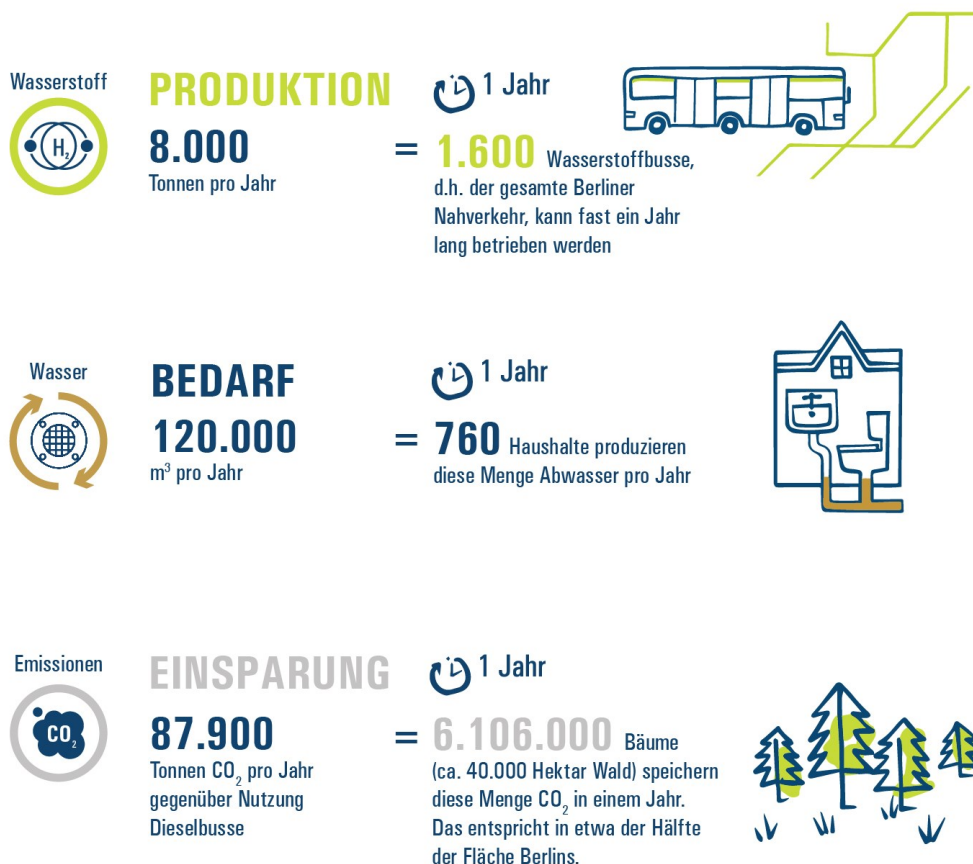


Abbildung 4-15: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 2 (100 MW<sub>el</sub>-Anlage).

Annahmen:

Bedarfs- und Produktionswerte für eine 100 MW<sub>el</sub>-Anlage (Tabelle 4-2),

Wasserbedarf: 120,1 l täglicher Wasserbedarf pro Person in Brandenburg [Amt für Statistik BB 2022], 90 % des täglichen Wasserbedarfs werden von Haushalten wieder als Abwasser abgegeben,

Wasserstoffbedarf zur Nutzung in Mobilitätssektor: H<sub>2</sub>-Verbrauch: 11,3 kg/100 km (H<sub>2</sub>-Gelenkbus) und 8,5 kg/100 km (H<sub>2</sub>-Solobus) [RLI & EMCEL 2022], Fahrzeugkilometer Berliner Omnibusse pro Jahr: 92.890.000 km [[Amt für Statistik-BE 2022b],

THG-Emissionen: Einsparungen gegenüber Diesel-Bus; 90 g<sub>CO2</sub>/Pkm für Diesel [UBA 2024], 14 gCO<sub>2</sub>/Pkm

Brennstoffzellenbus, Sitze pro Bus: 88, durchschnittliche Auslastung: 16 % [UBA 2024], CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Kiefern: 14,4 kg pro Jahr, Baumdichte: 150/ha

#### 4.3.4. Fallbeispiel 3: Industrie

##### Kurzbeschreibung

In diesem dritten Fallbeispiel steht die (groß)industrielle Wasserstoffproduktion im Fokus. Zielgröße ist der Bau einer Elektrolysekapazität von etwa 1 GW<sub>el</sub>, verbunden mit entsprechenden Kapazitäten erneuerbarer Stromproduktion (durch Windkraft- und PV-Anlagen). Projektkonzepte und Einsatzoptionen in dieser Größenordnung beschränken sich im Wesentlichen auf wenige Industriestandorte in Brandenburg, wobei anzumerken ist, dass sich bislang kein Einzelprojekt einer Wasserstoffproduktion in dieser Größenordnung in der konkreten Umsetzung befindet.

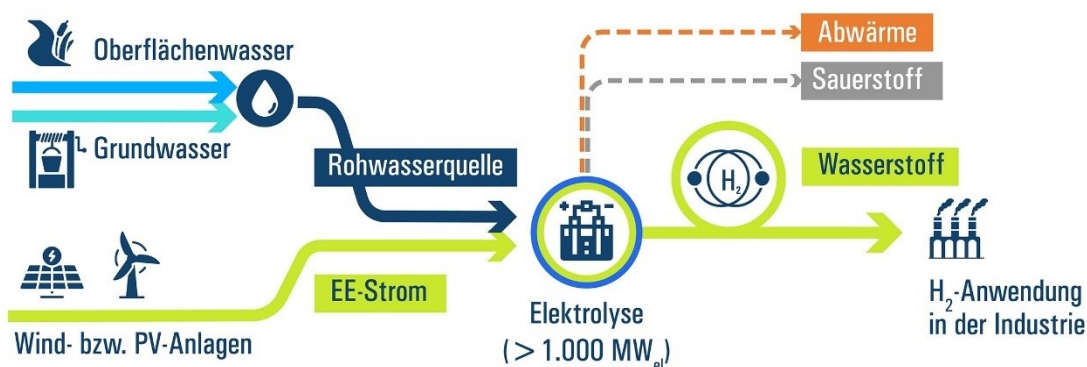


Abbildung 4-16: Übersicht Fallbeispiel 3.

Wie in Abbildung 4-16 gezeigt, dient die Wasserstoffproduktion in diesem Beispiel insbesondere der Deckung eines industriellen Wasserstoffbedarfs vor Ort, beispielsweise aus der chemischen Industrie. Dafür wird am Standort des Verbrauchszentrums der Bau eines Elektrolyseurs angenommen. Dieser bezieht den erforderlichen grünen Strom direkt aus regionalen Wind- und PV-Parks, wo nötig ergänzt durch Lieferverträge mit anderen regionalen Erzeugungsstandorten. Des Weiteren wird angenommen, dass das erforderliche Prozesswasser aufgrund der erforderlichen Menge nicht direkt aus dem Leitungsnetz bezogen werden kann. Stattdessen wird es vor Ort entweder über Brunnen direkt dem Grundwasserleiter oder als Oberflächenwasser einem Fließgewässer entnommen und auf die notwendige Qualität aufgereinigt. Dies entspricht folglich dem Versorgungskonzept der meisten industriellen Großanlagen, die ihr Wasser bereits heute zu überwiegender Teil aus Eigengewinnung bereitstellen. Mögliche Synergien mit industriellen Prozessen sind denkbar, etwa durch die Nutzung der entstehenden Abwärme des Kühlkreislaufs in anderen Industrieprozessen oder Nutzung des als Nebenprodukt anfallenden Sauerstoffs. Die nachfolgenden Diskussionen fokussieren sich auf den Einsatz einer Niedertemperatur-Elektrolyse. Gerade im industriellen Umfeld kann jedoch auch die Integration einer Hochtemperatur-Elektrolyse in ein bestehendes industrielles Dampf- bzw. Wärmenetz große (Effizienz-)Vorteile bieten und sollte standortabhängig geprüft werden.

##### Regionaler Kontext

Das gewählte Fallbeispiel eines Großelektrolyseurs lässt sich naturgemäß an unterschiedlichen (Industrie-) Standorten innerhalb Brandenburgs verorten. Ein wesentliches Beispiel innerhalb der Region ist dabei die Umstellung der Kraftstoffproduktion in der Raffinerie Schwedt bis 2045 von der heutigen Rohölveredelung auf die Produktion synthetischer Kraftstoffe. Neben der bereits kurzfristig angedachten

Substitution der H<sub>2</sub>-Produktion aus Erdgas durch Elektrolyse sind auch langfristig deutlich steigende Wasserstoffbedarfe zu erwarten. Weitere mögliche Standorte für eine industrielle Wasserstoffproduktion mit Direktabnehmern finden sich auch an anderen Stellen: Zu nennen sind hier beispielsweise der Industriepark Schwarze Pumpe sowie die regionale Glas- oder Stahlproduktion [Fhg IEG et al. 2023]. Auch Pläne im Rahmen der „LEAG GigawattFactory“ zum Aufbau von bis zu 7 bzw. bis zu 14 GW erneuerbarer Stromerzeugung bis 2030 bzw. 2040 in der brandenburgischen und sächsischen Lausitz bergen Potenzial für den Aufbau einiger Produktionsstätten für Wasserstoff. Dabei ist jedoch zumeist keine Direktnutzung (etwa in den ebenfalls geplanten H<sub>2</sub>-Ready-Kraftwerken) zu erwarten, sondern eine Einspeisung in ein überregionales H<sub>2</sub>-Transportnetz. Nach Angaben des Unternehmens im Rahmen eines Experteninterviews sind bis 2030 zunächst mehrere dezentrale Elektrolyseanlagen mit einer Gesamtleistung von unter 500 MW<sub>el</sub> angedacht [LEAG 2024]. Das im Folgenden beschriebene generische Fallbeispiel orientiert sich aufgrund des insgesamt hohen potenziellen H<sub>2</sub>-Bedarfs gezielt an dem Standort der PCK Raffinerie in Schwedt.

Als einer der größten Raffineriestandorte in Deutschland, benötigt die PCK Raffinerie (siehe Abbildung 4-17) in Schwedt bereits heute signifikante Mengen an Wasserstoff. Dieser wird bislang vor Ort durch Dampfreformierung aus Erdgas bereitgestellt.<sup>54</sup> In den vergangenen Jahren wurden diverse Konzepte zum Aufbau eigener Elektrolysekapazitäten erarbeitet, die im Folgenden kurz vorgestellt werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Pläne aktuell, aufgrund der Veränderungen in der Eigentümerstruktur der Raffinerie<sup>55</sup>, in Überarbeitung befinden [PCK 2024].

Im Rahmen des Projekts HyEast wurde angekündigt, schrittweise eine Elektrolysekapazität von 100 MW<sub>el</sub> zu errichten. Für die erste Anlage mit 40 MW<sub>el</sub> wurde im Jahr 2023 bereits das Basic-Engineering angekündigt. Ziel ist die stufenweise Substitution der heutigen Wasserstoffproduktion aus Erdgas [Gnorski 2023]. Überdies haben die PCK Raffinerie und der Projektentwickler ENERTRAG im Jahr 2023 Ergebnisse der Studie Hype+ vorgestellt, in der ein Konzept für den nachhaltigen Umbau des Raffineriestandortes hin zu erneuerbarer Strom- und Kraftstoffproduktion entwickelt wurde. Dabei soll der Standort bis 2045 Klimaneutralität erreichen und auf Basis eigener Wasserstoffproduktion sowie der Anbindung an ein deutsches Wasserstofftransportnetz synthetische Kraftstoffe sowie weitere chemische Produkte produzieren [PCK 2023]. Im Zuge dieser Transformation wurde auch der Aufbau von weiteren 300 MW<sub>el</sub> Elektrolysekapazität angekündigt, um in einem zweiten Schritt etwa 30.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr erzeugen zu können. Weitere Pläne sahen sogar den weiteren Ausbau auf 2 GW<sub>el</sub> Elektrolyse bzw. 160.000 t/Jahr vor. Daneben sind laut Studie weitere Kapazitäten von bis zu 3 GW<sub>el</sub> im erweiterten Einzugsbereich der Raffinerie denkbar [Gnorski 2023]. Die regionalen EE-Erzeugungspotenziale liegen nach Aussage des Unternehmens in der Region (Uckermark) bei etwa 30 TWh pro Jahr – und sind somit theoretisch ausreichend für eine regionale Wasserstoffproduktion von bis zu 7,5 GW<sub>el</sub>.<sup>56</sup>

Insgesamt wird der künftige (grüne) Wasserstoffbedarf des Standortes auf bis zu 800.000 t/Jahr geschätzt, um die geplante Produktionskapazität von ca. 3 Mio. Tonnen Raffinerieprodukte bis 2045 zu sichern [Gnorski

<sup>54</sup> Nach Angaben in [IHS Markit 2018] beträgt die heutige H<sub>2</sub>-Produktionskapazität der PCK Raffinerie etwa 28.000 t/a (0,93 TWh/a).

<sup>55</sup> So verkündete Shell im Dezember 2023 den Verkauf seiner 37,5-prozentigen Beteiligung an die Prax-Gruppe. [PCK 2023b]. Außerdem hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) am 14. September 2022 auf Grundlage des Energiesicherungsgesetzes die beiden deutschen Rosneft-Tochterunternehmen Rosneft Deutschland GmbH (RDG) und RN Refining & Marketing GmbH (RNRM) unter die Treuhandverwaltung der Bundesnetzagentur gestellt [BMWK 2023].

<sup>56</sup> Unter den allgemeinen Annahmen von 4.000 VLS und 66,7 % Wirkungsgrad.



2023]. Zwar liegt dies unterhalb der heutigen Produktionsmengen an Raffinerieprodukten<sup>57</sup>, doch wird erwartet, dass die Umstellung von einer Rohölveredelung auf eine integrierte erneuerbare Kraftstoffproduktion zu einer höheren regionalen Wertschöpfung führen kann, was auch mit einer steigenden Zahl an Arbeitsplätze verbunden ist. Als Rohstoff sind überdies etwa 6 Mio. t CO<sub>2</sub> erforderlich, die potenziell durch die regionalen Unternehmen VERBIO, LEIPA oder CEMEX sichergestellt werden könnten.<sup>58</sup> Neben der Produktion von synthetischen Kraftstoffen und Chemieprodukten (z. B. Methanol oder Fischer-Tropsch-Anlage) sind außerdem die Produktion von Biokraftstoffen, die Wärmeversorgung der Stadt Schwedt sowie die Bereitstellung von Strom für die Einspeisung ins Stromnetz aus Speichern und/oder Rückverstromung von Wasserstoff als Projektideen angedacht [Gnorski 2023].



Abbildung 4-17: Standort der PCK Raffinerie in Schwedt.

Foto: © PCK Raffinerie GmbH

### Konzept

Das dargestellte Beispiel der PCK Raffinerie zeigt, dass die Umsetzung eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs an einem einzelnen Industriestandort in Brandenburg mittelfristig geplant und erforderlich ist. Folglich gilt es im Rahmen dieser Fallstudie, die damit einhergehenden Stoffströme, Potenziale und Herausforderungen aufzuzeigen, insbesondere im Zusammenhang mit dem regionalen Wasserhaushalt.

Die im Rahmen von Kapitel 2 abgeleiteten spezifischen Wasserbedarfe einer H<sub>2</sub>-Produktion mittels Elektrolyse wurden hierfür auf eine (hypothetische) großskalige Elektrolyseanalyse übertragen. Abbildung

<sup>57</sup> Nach [Pieton et al. 2022] liegen die Rohölverarbeitungskapazitäten der PCK Raffinerie bei etwa 10,8 Mio t. Die Hauptprodukte der Raffinerie sind: Diesel/Heizöl 5.600 kt, Otto-Kraftstoffe 3.000 kt, Kerosin 430 kt, HVC 305 kt, Schwefel 125 kt, Bitumen 310 kt.

<sup>58</sup> Dabei ist zu beachten, dass für eine grüne Kraftstoffproduktion neben biogenen CO<sub>2</sub>-Quellen nur die Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft (*Direct Air Capture*) als geeignet angesehen wird. Hintergrund ist das Doppelanrechnungsverbot bei der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus Industrieanlagen.

4-18 zeigt die konzeptionelle Auslegung des generischen 1-GW<sub>el</sub>-Beispielfalles. Die beispielübergreifenden generellen Annahmen werden in Kapitel 4.3.1 (Tabelle 4-2) beschrieben.

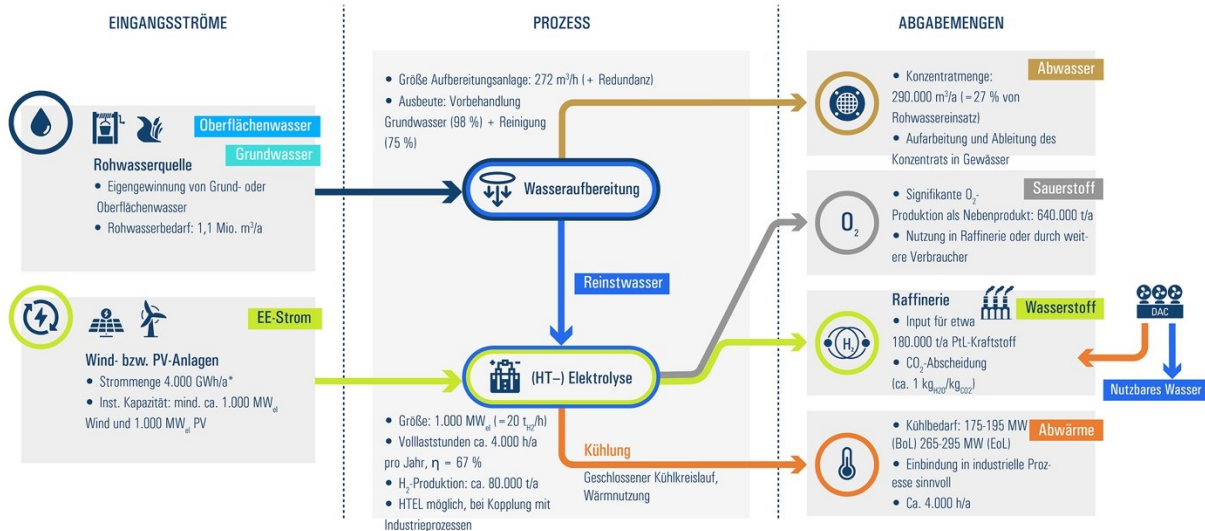


Abbildung 4-18: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts einer 1 GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs in Fallbeispiel 3.

Eine **Elektrolyse** mit 1 GW<sub>el</sub> Kapazität (= 20 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/h) ermöglicht unter den beschriebenen Annahmen die Produktion von etwa 80.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a. Gleichzeitig fallen in dem Prozess etwa 640.000 t Sauerstoff als Nebenprodukt an.

Für (Industrie-)Anlagen in dieser Größenordnung ist eine eigene **Wasserversorgung** des Standortes über Brunnen-, Uferfiltrate oder Oberflächenwasser gängig. So wird im vorliegenden Fall von einer Grundwasserversorgung ausgegangen. Die Versorgung mit Reinstwasser erfolgt durch eine Wasseraufbereitungsanlage vor Ort. Bei einem spezifischen Wasserbedarf von etwa 13,6 Liter Rohwasser pro kg Wasserstoff (Ausbeute Filtration ca. 98 % und Ausbeute UO und EDI ca. 75 %) ergibt sich eine erforderliche Anlagengröße zur Aufbereitung des Grundwassers von 272 m<sup>3</sup>/h. Die jährliche Bedarfsmenge an Rohwasser beträgt folglich 1,09 Mio. m<sup>3</sup>/a. Davon werden etwa 290.000 m<sup>3</sup>/a wieder als Abwasser (Konzentrat) abgeleitet bzw. einer internen Aufbereitung und Nachnutzung zugeführt.

Für die Elektrolyse werden unter diesen Annahmen jährlich etwa 4.000 GWh **Strom** benötigt, bereitgestellt durch eine installierte EE-Kapazität von mindestens je 1 GW<sub>el</sub> aus regionalen Windenergie- und PV-Anlagen. Bei Bedarf ist auch der Bezug zusätzlichen Grünstroms über (über-)regionale Lieferverträge (PPAs) für den Betrieb des Elektrolyseurs denkbar, gerade um von Projektbeginn an die hohe Anlagenauslastung von 4.000 VLS zu gewährleisten. Weitere Strombedarfe für die Wasseraufbereitung des Leitungswassers oder der Kühlaggregate sind aufgrund der insgesamt geringen Beiträge hier nicht berücksichtigt.



Als **Kühlkonzept** wird ein geschlossener Kühlkreislauf angenommen<sup>59</sup>, bei dem über Wärmetauscher auch Wärme an externe Verbraucher abgegeben werden kann. Auf diese Weise wird der Gesamtwasserbedarf der Anlage deutlich reduziert. Nach einer Machbarkeitsstudie in [ISPT 2022] beträgt der Kühlbedarf bzw. die nutzbare Wärmemenge je nach Technologie etwa 140–230 MW (AEL) bzw. 160–260 MW (PEMEL). Der Kühlbedarf der Wasseraufbereitung wird mit zusätzlichen 35 MW angegeben. Zur Auskopplung steht im Allgemeinen bei AEL oder PEM ein Temperaturniveau von etwa 55–60 °C zur Verfügung. Durch die Einbindung einer Wärmepumpe/Wärmetauscher kann auch ein höheres Niveau erreicht werden.

Für eine ganzheitliche Bewertung des Einflusses der Umstellung heutiger fossiler Energiebereitstellung und -nutzung auf wasserstoffbasierte Pfade auf den Wasserbedarf wird an dieser Stelle auch die Ausweitung der Analyse auf die potenzielle **Wasserstoffnutzung** vorgenommen. In diesem Fall umfasst dies den direkten Wasserstoffeinsatz für die Produktion synthetischer Kraftstoffe und potenzieller weiterer Auswirkungen auf den Wasserbedarf durch Einbeziehung dieser Prozesse.

Zusätzlich zu dem im Rahmen der individuellen Betrachtung eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs ermitteltem Wasserbedarf von etwa 1,1 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr soll ich Folgenden auch die potenziellen Synergiepotenziale mit einem Raffineriestandort beleuchtet werden.

Die Anwendung von Wasserstoff zur PtL-Produktion kann sowohl über die Methanol-Route als auch über die Fischer-Tropsch-Synthese geschehen. Für Details sei an dieser Stelle auf [UBA 2022] verwiesen. Unabhängig der Route werden in beiden Fällen Strom, Wasser und CO<sub>2</sub> als Primäreinsatzstoffe benötigt. Während neben der Elektrolyse weitere Wasserbedarfe für Kühlung oder Reinigung nachgelagerter Prozesse anfallen, so muss auch berücksichtigt werden, dass im Rahmen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft (DAC) sowie bei nachgelagerten Syntheseprozessen der Methanol- oder Fischer-Tropsch-Synthese bilanziell mehr Wasser freigesetzt als verbraucht wird. Dieses sollte im Rahmen von Kreislaufprozessen auch für alle zusätzlichen Wasserbedarfe aufgefangen, gereinigt und genutzt werden [Shell 2021]. Der erneute Einsatz als Rohstoff in der Elektrolyse erscheint dagegen aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen potenziell schwierig.

Basierend auf Analysen der LBST im Rahmen einer Studie für das Umweltbundesamt [UBA 2022] wird der spezifische Reinstwasserbedarf der PtL-Produktion nach der Methanol-Route langfristig mit 4,0–4,5 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (ohne Berücksichtigung von DAC) und 0,8–1,3 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (mit DAC)<sup>60</sup> angegeben. Dabei gehen die Autoren von einem Wasserbedarf der (HT-)Elektrolyse von 8,9 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> aus – also dem stöchiometrischen Wassereinsatz von Reinstwasser und damit dem Wasserverbrauch. Außerdem berücksichtigt werden für die Gesamtbilanz Wasserbedarfe für die Reinigung von PV-Paneele von etwa 0,022 kg/kWh Stromerzeugung (in DE) [DLR 2021]. Für den Fall, dass das benötigte CO<sub>2</sub> mittels Direktabscheidung aus der Luft gewonnen wird, fallen bei dem Prozess etwa 1 kg Wasser pro kg abgeschiedenes CO<sub>2</sub> an, das wiederum mit den spezifischen Wasserbedarfen verrechnet werden kann<sup>61</sup> [DLR 2021].

<sup>59</sup> Aufgrund des hierfür erforderlichen hohen Platzbedarfs sowie der im Vergleich zur Nasskühlung höheren Kosten, sind für Großelektrolyseure standortabhängig auch andere Konzepte denkbar. So kann beispielsweise auf die Nasskühlung mit einem mit einem geschlossenen Primärkreislauf und einem offenen Sekundärkreislauf bereits Einsparungen hinsichtlich der benötigten (Kühl-)Wassermengen ermöglicht werden.

<sup>60</sup> Originalwerte: 0,092-0,103 m<sup>3</sup>/GJ (ohne Berücksichtigung von DAC) und 0,019-0,030 m<sup>3</sup>/GJ (mit DAC).

<sup>61</sup> Wert abhängig von Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit.

Wie in Kapitel 2 gezeigt, sollten zur Ermittlung des Gesamtwasserbedarfes neben dem stöchiometrischen Wassereinsatz (Reinstwasser) auch die Wasserzu- und -abflüsse im Zuge der Wasseraufbereitung berücksichtigt werden. Bei der getroffenen Annahme einer Menge von 13,6 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> Grundwasser ergibt dies einen zusätzlichen Wasserbedarf gegenüber dem in der Studie angenommenen Reinstwasserbedarf von 4,7 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, die zur Ermittlung des Rohwasserbedarfs hinzugerechnet werden müssen. Wird dieser Wasserbedarf den Rechnungen zugrunde gelegt, ergibt sich aus dem spezifischen Wasserstoffbedarf von 446 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (Methanol-Route) bzw. 503 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (Fischer-Tropsch-Synthese) folgender spezifischer (Roh-)Wasserbedarf (siehe Tabelle 4-4): 6,1 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> bzw. 6,8 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub>. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der zusätzliche Wasserbedarf durch die H<sub>2</sub>O-Aufreinigung zu zusätzlichen Abwassermengen von 2,1 m<sup>3</sup>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (Methanol) bzw. 2,3 m<sup>3</sup>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> (FT-Synthese) führt, die für andere industrielle Prozesse aufbereitet werden sollten.

Unter Annahme unterschiedlicher Stromerzeugungstechnologien und der möglichen Nutzung des Kondensatwassers der Luftabscheidung ergeben sich perspektivisch folgende spezifischen Gesamtwasserbedarfe (dargestellt beispielhaft für die Methanol-Route):

Tabelle 4-4: (Roh-)Wasserbedarfe unterschiedlicher PtL-Produktionspfade (Methanol-Route)

Erneuerbare in m <sup>3</sup> <sub>H<sub>2</sub>O</sub> /t <sub>PtL-Kraftstoff</sub>	Stromerzeugung	PtL-Produktion (Methanol-Route)	PtL-Produktion (Methanol-Route) + DAC
<b>PV (inkl. Wasserbedarf zur Reinigung der Module)</b>		6,6	3,4
<b>Wind onshore (kein zusätzlicher Wasserbedarf)</b>		6,1	2,9
<b>Davon Abwasser der H<sub>2</sub>O-Aufbereitung (aufkonzentriertes Abwasser)</b>			je 2,1

Unter Berücksichtigung der angenommenen Wasserstoffproduktionsmenge von 80.000 t/a durch den 1-GW-Elektrolyseur ergibt sich mittels Methanol-Route eine potenzielle Erzeugungsmenge der angenommenen Anlage an PtL-Kraftstoff von 180.000 t/Jahr.<sup>62</sup> Die sich ergebende Bandbreite des spezifischen Wasserbedarfs aus 2,9 bis 6,6 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> lässt sich nun auch auf den tatsächlichen Wasserbedarf von 0,5–1,2 Mio. m<sup>3</sup> Rohwasser (hier Grundwasser) hochrechnen. Am oben genannten Beispiel der Raffinerie Schwedt mit einem finalen Wasserstoffbedarf durch Elektrolyse im Jahr 2045 von 800.000 t/Jahr (entspräche etwa 10-GW<sub>el</sub>-Elektrolyse) ergibt diese Abschätzung eine Steigerung um den Faktor 10 auf 5 bis 12 Millionen m<sup>3</sup> Wasserbedarf pro Jahr.<sup>63</sup>

### Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt

Um die lokale Verfügbarkeit der erforderlichen Wasserbedarfsmengen sowie potenzielle Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt abschätzen zu können, wird der ermittelte jährliche Rohwasserbedarf der Wasserstoffproduktion in diesem Fallbeispiel von 1,1 Millionen m<sup>3</sup> (gilt für 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseur) eingeordnet und diskutiert. Auf Basis der regionalen Verortung der zuvor beschriebenen Wasserstoffprojekte konzentrieren sich die folgenden Ausführungen und Überlegungen auf die

<sup>62</sup> Annahme: Wasserstoffbedarf 446 kg<sub>H<sub>2</sub></sub> pro Tonne PtL-Kraftstoff mittels Methanol-Route [UBA 2022].

<sup>63</sup> Darin berücksichtigt sind Wasseraufbereitung, Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyse sowie Reinigungswasserbedarfe der Stromerzeugung aus PV-Energie und potenziell verfügbare Wassermengen aus dem Prozess der Abscheidung von CO<sub>2</sub> aus der Luft. Weitere Prozesse der Raffinerie sind dabei ausgenommen.

Fokusregionen in Schwedt / Uckermark. Ziel ist es, einen Überblick über den regionalen Wasserhaushalt zu geben und potenzielle Risiken zu identifizieren. Dazu werden verfügbare Angaben zu genehmigten und tatsächlichen Entnahmen durch die beiden wesentlichen Wassernutzer in der Region (PCK Raffinerie und Papierfabrik LEIPA) beschrieben und mit den abgeschätzten Wasserbedarfen eines 1 GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs verglichen. Auch regionale Besonderheiten (etwa hinsichtlich der Wasserqualität oder Verunreinigungen) sowie Fragen der saisonal gegebenenfalls schwankenden Verfügbarkeit fließen in die Analysen ein.

Die wesentlichen **verfügbaren Wasserquellen** beschränken sich in der Region auf Grundwasser sowie Oberflächenwasser. Die Nutzung weiterer Wasserquellen (Niederschlagswasser inkl. erforderlicher Speicherbecken oder das Konzept einer Wasserüberleitung aus der Ostsee, inkl. der erforderlichen Entsalzung) wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Unter den Oberflächengewässern 1. Ordnung befinden sich im Raum Schwedt neben der Oder auch die Alte Oder sowie die Welse. Die Analysen in Kapitel 3.3.3 zum Oberflächendargebot am Beispiel Hohensaaten-Finow in der Oder zeigen bereits, dass bereits heute regelmäßig zur Unterschreitungstagen der Warnstufen der Niedrigwasserampel kommt. Zwar wird die Einschätzung gegeben, dass die Oder nicht trockenfallen wird und im Sommer an dem Pegel noch Abflüsse über 150 m<sup>3</sup>/s (entspricht ca. 13 Mio m<sup>3</sup>/d) aufweisen. Gleichzeitig wird eine neue Wasserentnahme direkt aus der Oder aufgrund der Eigenschaft als Grenzfluss ausgeschlossen. Weitere Entnahmen aus den Wasserstraßen seien jeweils im Detail zu prüfen. Sowohl Entnahmen als auch Einleitungen von Abwässern bedürfen der Gestattung nach den geltenden rechtlichen Vorgaben. Nach Aussage des LfU in einer Stellungnahme im Rahmen dieser Studie sind gegenwärtig keine Entnahmen aus dem Oberflächenwasser im Gebiet Schwedt bekannt, die im Zuständigkeitsbereich der oberen Wasserbehörde liegen. [LfU 2024b]. Weitere Daten sind direkt bei den unteren Wasserbehörden (für Entnahmen <2.000 m<sup>3</sup>/d) abzufragen. Unabhängig von der konkreten Entnahmestelle ist die Beschaffenheit des Oberflächenwassers (Wassergüte) in Bezug auf Verunreinigungen und den darauffolgenden zusätzlichen Aufbereitungsaufwand zu berücksichtigen. Nach [LfU 2024b] weist die Oder hier eine Belastung mit einer Vielzahl an Substanzen auf (darunter industrielle Schadstoffe, Pestizide und deren Abbauprodukte, Arzneimittelrückstände sowie Metalle), „deren Konzentrationen an mehreren Messstellen zum auch die Zielwerte der Wasserrahmenrichtlinie bzw. der Oberflächengewässerverordnung verletzen.“ Im Vergleich zum Durchschnitt der Brandenburger Gewässer fallen insbesondere hohe Chloridkonzentrationen auf. Nach Angaben der PCK Raffinerie erfolgt etwa die Kühlwasseraufbereitung heute vorwiegend aus Uferfiltrat, nachdem der direkte Einsatz von Oberflächenwasser hier in der Vergangenheit zu Problemen geführt hat [PCK 2024]. Die Abtrennung all dieser Stoffe kann im Rahmen der Reinstwasserherstellung für die Elektrolyse folglich auch mit zusätzlichem Aufwand und Kosten verbunden sein. Das Beispiel der Papierfabrik LEIPA zeigt die heutige Nutzung von Oberflächenwasser am Standort. Dort wird das Oberflächenwasser nach der Entnahme aus der Hohensaaten-Friedrichsthaler-Wasserstraße durch Filterverfahren von Trübstoffen gereinigt und Metallionen abgetrennt. Durch Chlorzugabe erfolgt anschließend eine antibakterielle Behandlung. Bevor das Wasser dann intern einer Mehrfachnutzung zugeführt wird und dabei mehrere Qualitätsstufen des Papiers durchläuft [Leipa 2022].

Demgegenüber hat der Grundwasserkörper vor Ort (ODR\_OD\_4) wegen der heute bereits hohen Entnahmen bereits eine Risikoeinstufung erhalten, sodass zusätzliche Entnahmen durch das LfU zunächst als ungünstig eingestuft werden [LfU 2024b].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine zusätzliche Wasserentnahme aus Grund- und Oberflächenwasser für die Wasserstoffproduktion am Standort Schwedt im Einzelfall geprüft werden muss. Folglich sollten Substitutionspotenziale und Einsparmöglichkeiten im heutigen industriellen Bedarf, etwa durch Ersatz der bestehenden Wasserstoffproduktion durch Dampfreformierung, in die Überlegungen einbezogen werden.

Die verfügbaren Einträge im elektronischen Wasserbuch zu **genehmigten Entnahmen** beschränken sich dabei auf lediglich zwei Einträge, die beide im Zusammenhang mit der Papierfabrik LEIPA stehen (Oberflächenentnahmen von jeweils 7 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr) [eAPW]. Überdies sind einige wenige Angaben zu Einleitungen in die regionalen Gewässer verfügbar. Ergänzende Angaben des Recherchenetzwerks CORRECTIV auf Basis von Angaben des Brandenburger Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (MLUK) zeigen neben den genehmigten Entnahmemengen von 14 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr der LEIPA Georg Leinfelder GmbH weitere genehmigte Entnahmemengen der PCK Raffinerie GmbH von 8 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr (Oberflächenwasser) bzw. etwa 11,8 Mio. m<sup>3</sup> (Grundwasser)<sup>64</sup> [CORRECTIV 2022].

Bedeutender als die genehmigten Entnahmen sind jedoch die **tatsächlichen Entnahmen** in der Region. Wie in Tabelle 3-2 aufgelistet, finden sich sowohl die PCK Raffinerie GmbH als auch die LEIPA Georg Leinfelder GmbH unter den größten industriellen Wasserentnehmern in Brandenburg. Das LfU beziffert diese für das Jahr 2021 auf insgesamt etwa 13,5 Mio. m<sup>3</sup> (PCK) und 10,4 Mio. m<sup>3</sup> (LEIPA) [Landtag 2023].

Abbildung 4-19 stellt die genehmigten und tatsächlichen Entnahmen dieser beiden Großverbraucher in der Region dem **ermittelten Bedarf der Wasserstoffproduktion einer hypothetischen 1-GW<sub>e</sub>-Elektrolyseanlage** gegenüber. Dabei wird, sofern Daten verfügbar, zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser unterschieden. Aufgrund der in der Industrie existierenden Unsicherheiten hinsichtlich der (ökonomischen) Umsetzbarkeit einer reinen Trockenkühlung bei Elektrolyseuren im GW-Maßstab, ist an dieser Stelle auch der Extremfall einer Anlage mit Verdunstungskühlung ergänzt. Letztere Angabe von 4,7 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr sollte jedoch als eine obere Grenze verstanden werden.<sup>65</sup> Als Vergleich ist auch der mit dem potenziellen Wasserstoffbedarf von 800.000 t<sub>H2</sub> im Jahr 2045 (=ca. 10 GW<sub>e</sub>) bei vollständiger Umstellung der Raffinerie auf erneuerbare Kraftstoffproduktion anfallende Wasserbedarf in Höhe von 11 bis 47 Mio. m<sup>3</sup> dargestellt. Hierbei sollten jedoch zweierlei Dinge beachtet werden:

- Es ist unwahrscheinlich, dass die PCK Raffinerie im Jahr 2045 ihren gesamten Wasserstoffbedarf durch heimische Produktion decken wird. Vielmehr ist eine (teilweise) Versorgung über das Wasserstoffnetz angedacht.
- Die gezeigte Bandbreite unter Berücksichtigung einer Trocken- und einer Nasskühlung stellt Extremwerte dar, deren Umsetzung durch lokale Wasserverfügbarkeit und genehmigungsrechtlicher Vorgaben beeinflusst wird.

<sup>64</sup> Die genehmigten Wasserentnahmen der PCK Raffinerie umfassen Oberflächenwasser aus der Schwedter Querfahrt und dem Kanalpumpwerk Gatow. Weitere Entnahmen umfassen die Brunnengalerie Gatow sowie die Werkzaufassung [MOZ 2023]. LEIPA bezieht einen Großteil des benötigten Wassers aus der Hohensaaten-Friedrichsthaler-Wasserstraße sowie, zu einem kleinen Teil, aus ufernahen Brunnen (Uferfiltrat) [MOZ 2023b].

<sup>65</sup> Die oben beschriebenen Synergiepotenziale aus dem Einsatz der Integration der Elektrolyse in die Raffinerieprozesse sowie möglicher zusätzlicher Wasserzuflüsse aus der CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft wurden für diese Vergleiche nicht berücksichtigt.

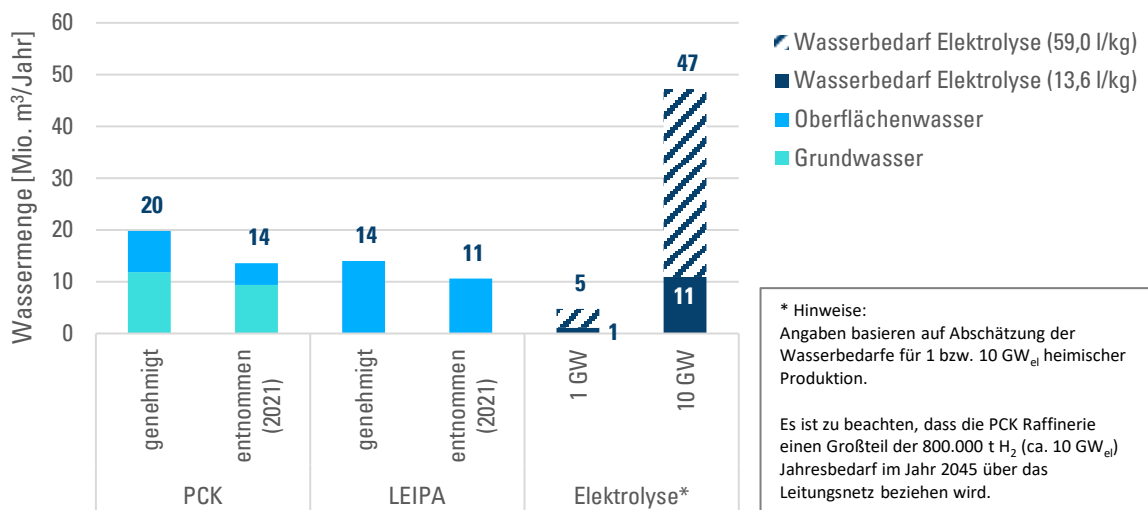


Abbildung 4-19: Gegenüberstellung genehmigter / entnommener Wassermengen der PCK Raffinerie & LEIPA – Vergleich mit erforderlichen Rohwassermengen für eine 1-GW<sub>el</sub>- bzw. 10-GW<sub>el</sub>-Elektrolyse.

Neben den entnommenen Wassermengen sind überdies auch die **wieder eingeleiteten Abwassermengen** für eine Gesamtschau des Wasserhaushalts erforderlich. Für die Einleitung von industriellen Abwässern gelten gesetzliche Vorgaben zu Grenzwerten. Entsprechend werden die industriellen Abwasserströme durch eigene Kläranlagen zunächst aufgearbeitet. Nach Angaben des Unternehmens wird etwa 70 % der entnommenen Wassermenge nach Aufbereitung als Abwasser an die Oberflächengewässer Welse, Oder sowie die Schwedter Querfahrt abgegeben [PCK 2024]. An dieser Stelle sollen auch exemplarisch die Abwasserströme der Papierwerke LEIPA diskutiert werden. Laut der vereinfachten Umwelterklärung zum Berichtsjahr 2021 stand dem nach eigenen Angaben etwa 10,7 Mio. m<sup>3</sup> entnommenen Frischwasser eine Menge von 9,4 Mio. m<sup>3</sup> Prozessabwasser (etwa 88 %) gegenüber [Leipa 2022]. Vor Rückleitung der Abwässer in die Oder erfolgt eine Aufreinigung in einer von zwei unternehmenseigenen Kläranlagen. Rückstände der Kläranlage (Klärschlamm) sowie die anfallenden Gase werden außerdem für die Dampferzeugung bzw. die Stromproduktion im eigenen Kraftwerk genutzt [MOZ 2023b].

### Einordnung der Ergebnisse und Fazit

Die Diskussionen rund um Fallbeispiel 3 zeigen, dass der Bau von Elektrolyseuren in der Größenordnung um 1 GW<sub>el</sub> mit einem Wasserbedarf von etwa 1,1 Mio. m<sup>3</sup>/a (bei Anwendung einer Trockenkühlung) durchaus einen signifikanten Wasserbedarf darstellt. Sollte die Abführung der Abwärme über Kühltürme (Rückkühlwerke) erfolgen, würden die benötigten Wassermengen noch einmal deutlich auf bis zu 4,7 Mio. m<sup>3</sup>/a ansteigen. Folglich sind fallspezifische Analysen im Austausch mit den zuständigen Wasserbehörden im Fall dieser Großprojekte unabdingbar. Synergien mit den vor- und nachgelagerten Prozessen der PtL-Produktion in der Raffinerie, insbesondere durch zusätzlich bereitgestellte Wassermengen durch eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus der Luft, sollten genutzt werden, um so den Bezug von Grund- bzw. Oberflächenwasser zu reduzieren.

Die H<sub>2</sub>-Produktionsmenge eines 1-GW<sub>el</sub>-Elektrolyseurs wird im vorliegenden Beispiel mit etwa 80.000 t<sub>H2</sub>/Jahr angenommen. Eine grafische Einordnung dieser Werte erfolgt in Abbildung 4-20. Verglichen mit der etwa von der Raffinerie Schwedt (wahrscheinlich der Hauptabnehmer für Wasserstoff in Brandenburg) angegebenen Menge von bis zu 800.000 t<sub>H2</sub> im Jahr 2045 zeigt sich, dass perspektivisch sogar



weitere Produktionsanlagen dieser Größenordnung in Brandenburg realisiert werden müssten. Außerdem wird auch der Import von Wasserstoff nach Brandenburg eine wichtige Säule der zukünftigen Versorgung einnehmen.

Als Rohwasserquellen stehen in Schwedt sowohl Oberflächenwasser als auch Grundwasser prinzipiell zur Verfügung. Nach Stellungnahme des [LfU 2024b] sowie der Analysen zum Oberflächenwasserdargebot in Kapitel 3.3.3 sind zusätzliche Entnahmen aufgrund der bestehenden Belastung der Wasserkörper jedoch kritisch zu prüfen. Dennoch sollte eine differenzierte Analyse auch absehbare Veränderungen und Substitutionspotenziale in der heutigen Wassergewinnung und -nutzung berücksichtigen.

So wird bereits heute am Raffinerie-Standort in Schwedt mit etwa 30.000 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a eine signifikante Menge Wasserstoff per Dampfreformierung für die Rohölveredelung produziert. Für die Substitution dieser Menge sind folglich Elektrolysekapazitäten von etwa 400 MW<sub>el</sub> am Standort erforderlich. Nach Angaben in [RMI 2021, IRENA & Bluerisk 2023] liegt der spezifische Wasserbedarf der H<sub>2</sub>-Produktion mittels Dampfreformierung bei etwa 21-27 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub>. Legt man die Wasserbedarfe der Elektrolyse im Falle einer Trockenkühlung von ca. 13,6 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> zugrunde, ließen sich so nach den Angaben in [IRENA & Bluerisk 2023] bis zu 400.000 m<sup>3</sup> Grundwasser pro Jahr einsparen. Gleichzeitig ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen in Höhe von etwa 320.000 t<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a [Hydrogen Council & LBST 2021].

Während in einem ersten Schritt vor allem der heutige Wasserbedarf der Dampfreformierung ersetzt wird, erfolgt in einem weiteren Schritt auch die Substitution weiterer Wasserbedarfe des Standorts, etwa Kühlwasserbedarfe für das interne Kraftwerk, das heute Reststoffe aus dem Raffinerieprozess in Wärme umsetzt und das künftig mit Wasserstoff betrieben werden könnte. Gerade im Kraftwerksbereich bietet Wasserstoff durch die hohe Effizienz moderner GuD-Kraftwerke signifikante Einsparpotenziale an Kühlwassermengen, die auf Nasskühlung mit Kühltürmen (Rückkühlwerken) verzichtet werden kann.

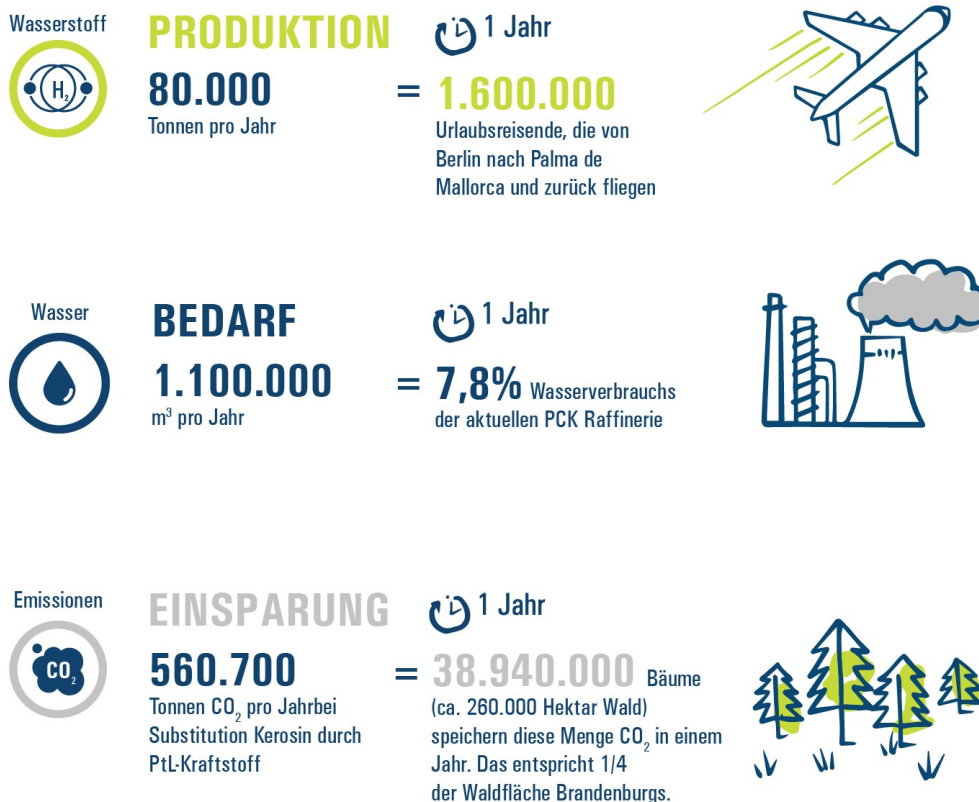


Abbildung 4-20: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 3 (1.000 MW<sub>el</sub>-Anlage).

Annahmen:

Bedarfs- und Produktionswerte für eine 1.000 MW<sub>el</sub>-Anlage (Tabelle 4-2),

Wasserstoffbedarf zur Erzeugung von PtL-Kraftstoff: 500 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/t<sub>PtL-Kraftstoff</sub> [UBA 2022], Substitution von 160.000 t Flugkraftstoff,

Kerosinverbrauch A320: 4,56 kg/km (2,43 l/100 km/Sitz) [SEI 2008], Kapazität: 150 Passagiere, Flugkilometer gesamt: 35.1 Mio. km (einfache Distanz: 1.650 km)

THG-Emissionen bei Substitution von Kerosin durch PtL-Kraftstoff: durchschn. Einsparungen: 3,5 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg PtL gegenüber Kerosin aus Rohöl (auf Basis [UBA 2022]); CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch Kiefern: 14,4 kg pro Jahr, Baumdichte: 150/ha.

## 5. FAZIT

- ❖ Die Transformation des „Lausitzer Kohlereviers“ und anderer Industriestandorte sowie die mögliche Neuansiedlung von Zukunftstechnologien eröffnet wirtschaftliche Chancen für die Region. Gleichzeitig bietet sich die Gelegenheit einer Optimierung der bestehenden Wassergewinnung und -nutzung, die heute v. a. durch Sumpfungswasser dominiert werden.
- ❖ Eine heimische H<sub>2</sub>-Produktion in Brandenburg hätte bezogen auf die Wassergewinnung im Bundesland nur einen geringen Anteil von 1–6 %.
- ❖ Durch dezentrale Anlagen können die Wasserentnahmen für die H<sub>2</sub>-Erzeugung regional verteilt werden.
- ❖ Lokale Wasserverfügbarkeiten sowie bestehende Wasserentnahmen und -nutzungen (insbesondere der Industrie und der Landwirtschaft) sind kritisch zu prüfen und auch, wo nötig, neuzudenken – auch um die wirtschaftlich bedeutende Ansiedlung neuer Industrien (und damit neuer „Wassernutzer“) zu ermöglichen.
- ❖ Regionale Standortanalysen sollten insbesondere auch saisonale und extremwetterbedingte Schwankungen in der Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser einbeziehen.
- ❖ Saisonale Schwankungen zeigen vor allem im Sommer zunehmend „Wasserstress“ (u. a. Niedrigwasser bei Oberflächengewässern und Mangel an Niederschlägen). Aufgrund der hohen Temperaturen und Verdunstungsraten in den Sommermonaten ist auch ein Anstieg der künftigen Wasserbedarfe wahrscheinlich.
- ❖ Einsparpotenziale für die effiziente Wassernutzung aus verschiedenen Rohwasserquellen sind in allen Sektoren konsequent zu erschließen und zu optimieren.
- ❖ Ein sparsamer und bewusster Umgang mit Wasser und die Sensibilisierung für das Thema sind wichtige Voraussetzungen und Aufgaben für die weitere Nutzung, Strukturplanung und -entwicklung.

Mit dieser Arbeit kann aufgezeigt werden, dass eine künftige Wasserstoffproduktion in Brandenburg nur verhältnismäßig geringe Wassermengen verbrauchen würde – insbesondere im Vergleich mit bestehenden wasserintensiven Branchen wie etwa der Energiegewinnung mit den existierenden Braunkohlekraftwerken, die einen hohen Kühlwasserbedarf (ca. 60 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr) aufweisen.

Eine Hochrechnung auf Basis der zugrunde gelegten Potenziale zur Wasserstofferzeugung in Brandenburg (ca. 20 TWh<sub>H<sub>2</sub></sub> pro Jahr), wie sie beispielsweise im Rahmen der Machbarkeitsstudie zu einem H<sub>2</sub>-Startnetz im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE) angenommen wurde, ergibt eine Bandbreite des Wasserbedarfs (in Trinkwasserqualität) von jährlich etwa 8 Mio. m<sup>3</sup> Wasser für optimierte Elektrolyseanlagen bis ca. 37 Mio. m<sup>3</sup> Wasser für Anlagen mit offenen Kühlsystemen und Verdunstungskühlung. Damit liegt der abgeschätzte Wasserbedarf für die Elektrolyse

deutlich unter den Mengen der heutigen Wassergewinnung in Höhe von ca. 615 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr für Brandenburg bzw. 1.021 Mio. m<sup>3</sup> pro Jahr für Brandenburg inkl. Berlin. Bezogen auf das Bundesland hätte die Wasserstoffproduktion damit nur einen Anteil von ca. 1 % bis 6 % relativ zur Wassergewinnung des Jahres 2019. Zum Vergleich lag die eingesetzte Wassermenge (Wassernutzung) in Haushalten und Unternehmen (inkl. ungenutzt wieder eingeleiteter oder an Dritte abgegebener Wassermengen) bei 577 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg und ca. 989 Mio. m<sup>3</sup>/a für Brandenburg inkl. Berlin.

### **Erneuerbarer Wasserstoff: Schlüssel für den Erfolg der Energiewende**

Die Klimaschutzziele können nur durch eine entschlossene Umsetzung der Energiewende erreicht werden. Die Dekarbonisierung und der Umbau der Energieversorgung stellen zentrale und nicht verschiebbare Aufgaben und Herausforderungen dar. Fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Erdgas müssen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten durch erneuerbare Energie ersetzt werden, um so den Anteil an klimaschädlichen Treibhausgasen deutlich reduzieren zu können.

Brandenburg verfügt in Deutschland über ein überdurchschnittlich hohes und bislang nur zum Teil ausgeschöpftes Potenzial für die Erzeugung erneuerbarer Energie. Die Nutzung regionaler Wind- und PV-Potenziale zur Erzeugung erneuerbaren Wasserstoffs und damit zur (langfristigen) Speicherung des erneuerbaren Stroms ist ein wichtiger Lösungsbaustein und auch eine Chance für Brandenburg. Das Land verfügt über Perspektiven zur Erhöhung und Schaffung der lokalen Wertschöpfung, indem regionale Projekte mit Wind- und PV-Anlagen grünen Wasserstoff für die Mobilität und stationäre Anwendungen erzeugen und damit direkt lokale und regionale Strukturen in Brandenburg stärken und ausbauen können.

Erneuerbarer Wasserstoff ist ein Schlüssel für den Erfolg der Energiewende und stellt eine Lösung für den Strukturwandel in Brandenburg und ganz Deutschland dar. Darüber hinaus kann und sollte in weitere Zukunftstechnologien am Standort Brandenburg investiert werden, wie z. B. die Produktion von PtL, grünen Stahl oder nachhaltige Chemieproduktion. Die Landesregierung hat bereits eine H<sub>2</sub>-Strategie mit Plänen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in Brandenburg erarbeitet und beschlossen sowie mit der „Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg“ eine weitere Grundlage geschaffen.

Die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse ist die wesentliche Produktionstechnologie für den Aufbau einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Wird Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, so können die Gesamtkettenemissionen (inkl. Vorkettenemissionen der Brennstoffförderung oder Stromproduktion) gegenüber den etablierten Herstellungspfaden deutlich reduziert werden, z. B. um ca. 95–99 % gegenüber H<sub>2</sub> aus Erdgas.

Der (Roh-)Wasserbedarf und -verbrauch der Elektrolyse ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig: (1) Elektrolysetechnologie, (2) Qualitätsanforderungen und damit einhergehende Wasseraufbereitung, (3) zur Verfügung stehende Wasserquelle und Wasserqualität und (4) verwendetes Anlagenkonzept, inkl. Kühltechnologie. Anhand dreier unterschiedlicher beispielhafter Anlagenkonzepte mit einem spezifischen Wasserbedarf von 13 bis 59 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> wurden die Diskussionen um die Auswirkungen auf den Standort Brandenburg geführt.

Für die weitere Entwicklung und Erprobung von Elektrolyseanlagen wird empfohlen, vor allem die Kühlung und Abwärmenutzung zu optimieren, um die Wasserbedarfe mit einem geschlossenen Kühlkreislauf bzw. Luftkühlung auf ein Minimum zu reduzieren. Zusätzlich sollten durch erste Pilotprojekte auch

Abwasserströme aus kommunalen oder industriellen Kläranlagen als neue Rohwasserquellen erschlossen werden.

### **Wasserstress – ein globales und regionales Thema**

Wasserverfügbarkeit und -nutzung ist sowohl ein globales wie auch regionales Thema, das durch den Klimawandel und Trockenwetterereignisse genauso verstärkt wird wie durch fortschreitende Urbanisierung, landwirtschaftliche Aktivität und nicht nachhaltige Nutzungen. Saisonale Schwankungen zeigen vor allem im Sommer zunehmend „Wasserstress“ (u. a. Niedrigwasser bei Oberflächengewässern und Mangel an Niederschlägen). Aufgrund der hohen Temperaturen und Verdunstungsraten in den Sommermonaten ist auch ein Anstieg der künftigen Wasserbedarfe wahrscheinlich, insbesondere getrieben durch die Landwirtschaft, Kühlbedarfe und Trinkwasserversorgung – aber auch durch die Wasserbedarfe zur Flutung der Tagebaufolgeseen sowie zur Wiederherstellung des nachbergbaulichen Wasserhaushalts.

Regional sind zunehmend zurückgehende Grundwasserverfügbarkeiten und teilweise auch Niederschläge zu verzeichnen und durch den Klimawandel forciert weiter zu erwarten. Hiervon sind auch Brandenburg und Berlin betroffen. Eine besondere Charakteristik in der Region ist dabei auch die enge Verbundenheit und Abhängigkeit der Trinkwasser- und Abwasserentsorgung der Hauptstadt mit dem Wasserhaushalt Brandenburgs, v. a. den Wassermengen der Spree und der Grundwasserverfügbarkeiten in Wassereinzugsgebieten Berlins. Außerdem gilt es, den langjährigen Einfluss des Braunkohletagebaus in der brandenburgischen Lausitz sowie die absehbaren Veränderungen auf den Wasserhaushalt durch den anstehenden Ausstieg aus der Braunkohleförderung und -verstromung in Einklang mit den Folgeaktivitäten zu berücksichtigen.

Die Pläne in Brandenburg für den Aufbau einer grünen Wasserstoffwirtschaft treffen auf die laufenden Transformationsprozesse im Rahmen des Strukturwandels (inkl. der Umstrukturierung der Energieversorgung) und auf einen bereits heute regional zum Teil angespannten Wasserhaushalt. Der Umbau der Energieversorgung, aber auch großer Teile der chemischen, Stahl- oder Glasindustrie hin zur Nutzung erneuerbaren Wasserstoffs bietet gleichzeitig jedoch auch enorme Potenziale und Chancen zur Optimierung der bestehenden Wassernutzung. Dies ergibt sich einerseits durch den hohen Wirkungsgrad moderner Gaskraftwerke, die Trockenkühlungskonzepte erlauben, und andererseits durch die Umgestaltung und Anpassung der bestehenden Industrieprozesse vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Transformation. Gleichzeitig sind lokale Wasserverfügbarkeiten sowie bestehende Wasserentnahmen und -nutzungen kritisch zu prüfen und auch, wo nötig, neuzudenken – auch um die wirtschaftlich bedeutende Ansiedlung neuer Industrien (und damit neuer „Wassernutzer“) zu ermöglichen. Diese regionale Standortanalyse sollte insbesondere auch saisonale und extremwetterbedingte Schwankungen in der Verfügbarkeit von Grund- und Oberflächenwasser einbeziehen.

Bezüglich der Datengrundlagen zum Wasserhaushalt ist festzustellen, dass es für das Land Brandenburg keine einheitliche, vollständige Datengrundlage zu den Wassernutzungen und zum Wasserdargebot gibt. Daher erfolgte ausführlich die Darstellung und Bewertung der verfügbaren Daten, Modellierungen, Gutachten und Studien. Zum Wasserdargebot wurden die prinzipiell verfügbaren Wasserquellen Niederschlagswasser, Grundwasser, Oberflächenwasser und gereinigtes Abwasser beschrieben. Im Rahmen der Arbeiten fanden Interviews und Gespräche mit Akteuren und Experten statt und auch mit wissenschaftlichen Vertretern wurde diskutiert und reflektiert.



Hinsichtlich der Verfügbarkeit und Nutzung von Grundwasser ist festzustellen, dass das ausgewiesene verfügbare Dargebot aktuell bereits in einigen Regionen stark ausgelastet ist bzw. nicht mehr für eine weitere Nutzung und Entnahme bereitsteht. Insgesamt ist regional sogar ein langjähriger Trend der sinkenden Grundwasserstände mit komplexen Ursachen zu beobachten, u. a. aufgrund sich ändernder klimatischer Bedingungen, die zu verringerten Grundwasserneubildungen führen, wie auch einer intensiven Entwässerung der Landschaft in Zusammenhang mit der landesweiten Komplexmelioration sowie der Übernutzung der Grundwasserleiter durch Grundwasserentnahmen. In den letzten fünf trockenen Jahren wurde zudem landesweit eine besonders starke Abnahme der Grundwasserspiegel mit Auswirkungen in grundwasserabhängigen Landökosystemen sowie mit sinkenden Seewasserspiegeln oder verringerten Abflüssen bzw. (temporärem) Trockenfallen von Fließgewässern beobachtet. Dies hängt vor allem mit den geringeren Neubildungswirksamen Niederschlägen durch Verschiebungen im Auftreten der Niederschläge im Jahresverlauf bzw. generell geringeren Niederschlagsmengen sowie mit den hohen Verdunstungsraten aufgrund höherer Temperaturen zusammen. Zudem erfolgte besonders in den Sommermonaten in den Wasserwerken eine fast doppelt so hohe Entnahme im Vergleich zum Winterhalbjahr. Ebenso wird der Wasserbedarf- und -verbrauch in der Landwirtschaft und vermutlich auch in der Industrie im Sommer deutlich höher sein und generell in den letzten Jahren aufgrund des Klimawandels zugenommen haben.

Bei der Bewertung der Grundwasserverfügbarkeit handelt es sich ausschließlich um eine Mengenzugangsbetrachtung. Die Bilanzierung entbindet nicht von der Einzelfallentscheidung im Zusammenhang mit der standortkonkreten Prüfung zur Auswirkung von neuen Grundwasserentnahmen. Es sind die lokalen hydrogeologischen Verhältnisse und das Wasserdargebot zu betrachten und zusammen mit den anderen Wasserbedarfen (Grundwasserentnahmen, Naturschutz, Fischerei, Wasserrahmenrichtlinie, Schifffahrt etc.) zu bewerten. Dazu sind hydrogeologische Gutachten zu erstellen, die je nach Umfang der geplanten Grundwasserentnahme zusätzliche Erkundungen und numerische Modellierungen (Grundwasserströmungsmodellierung oder bei Bedarf auch integrierte Wasserhaushaltsmodellierungen mit Gesamtbetrachtung von Wasserhaushalt und Grundwasser) zur Berücksichtigung der oben genannten Einflussfaktoren beinhalten. Wenn die Nutzung von Grundwasser als Wasserquelle für die Wasserstoffherstellung erfolgen soll, dann kann das prinzipiell über eine eigene neue Wasserfassung (Brunnen) oder über bereits vorhandene Wasserfassungen in Trinkwasserwerken oder an Industriestandorten geschehen. In jedem Fall ist die Auswirkung zusätzlicher Entnahmen zu prüfen. Wenn Wasserwerke noch Kapazitäten in ihren Wasserrechten haben, die über den Bedarf der Trinkwasserversorgung hinausgehen, dann kann ggf. bereits aufbereitetes Trinkwasser „aus der Leitung“ für die H<sub>2</sub>-Herstellung genutzt werden. Das kann vor allem für dezentrale Standorte eine Option sein. Gemeinsam mit dem Wasserversorger und der Wasserbehörde sind das Wasserdargebot und die Auswirkungen der zusätzlichen Entnahme unter den aktuellen Rahmenbedingungen zu prüfen. Wenn die vorhandenen Wasserrechte genutzt werden können, ist kein neues Wasserrechtsverfahren notwendig. Wenn eine neue Wasserfassung (Brunnen) errichtet werden soll oder eine Erhöhung der Entnahmerechte an bereits vorhandenen Grundwasserentnahmestandorten erfolgen soll, sind umfangreiche Gutachten zu erstellen (hydrogeologisches Gutachten, Wasserrechtsantrag, UVP-Vorprüfung und ggf. weitere). Der Genehmigungsaufwand ist bei der Planung von Anlagen zur Wasserstoffherstellung zu berücksichtigen. Bei der Installation von größeren Elektrolyseuren empfiehlt sich eine Kombination von Wasserquellen, um möglichst die Grundwasserressourcen zu schonen. Zusätzlich zu Grundwasser als saisonal unabhängige

Wasserressource ist im Wasserversorgungskonzept die Nutzung von gefasstem Niederschlagswasser, Oberflächenwasser in Überschusszeiten und ggf. Abwasser zu integrieren.

In Zusammenhang mit den aktuellen klimatischen Bedingungen ist das Oberflächenwasserdargebot in Brandenburg keine unbeschränkt nutzbare Wasserquelle. Relevante Entnahmen für Industrie und Gewerbe erfolgen nur in den Gewässern 1. Ordnung, die noch ganzjährig Abfluss haben, d. h. in der Spree, der Oder sowie an der Havel. Bei der Entnahme von Oberflächenwasser ist zu beachten, dass die festgelegten Mindestabflüsse gewährleistet werden müssen. Vor allem in den Sommermonaten der letzten Jahre lagen die Abflüsse langanhaltend unter den Schwellenwerten. Somit kann eine kontinuierliche Entnahme zur Wasserversorgung mit Oberflächenwasser nicht gewährleistet werden. In den Wintermonaten gibt es zumeist hohe Abflüsse mit Überschusswasser, das zur Entnahme zur Verfügung steht, in den Sommermonaten kann hingegen die Entnahme von Oberflächenwasser stark eingeschränkt sein. Die Saisonalität dieser Wasserquelle ist bei der Planung von Wasserversorgungskonzepten für Elektrolysestandorte zu beachten.

An die größeren Oberflächengewässer in Brandenburg bestehen bereits aktuell vielfältige Nutzungsansprüche, u. a. für die Schiffbarkeit, die Bereitstellung von Wasser für die landwirtschaftliche Bewässerung sowie Entnahmen für Industrie und Gewerbe, für Teichwirtschaften, für den Naturschutz, für Wasserqualitätssteuerungen etc., so dass bereits heute die Wasserbilanz in länger andauernden Trockenphasen nicht ausgeglichen ist. Es wird also mehr Wasser entnommen als zugeführt bzw. sind in den Sommermonaten die Niederschläge und die grundwasserbürtigen Basisabflüsse aus dem Einzugsgebiet einfach zu gering. Die dargelegten Ausführungen zeigen, dass selbst in den Gewässern 1. Ordnung die Mindestabflüsse in den letzten Jahren nicht eingehalten werden konnten. Die aktuelle Bewirtschaftung und die Nutzungen führen landesweit häufig und langanhaltend zur Unterschreitung der Warnstufen im Sommer führen. Das heißt, für eine Wasserstoffproduktion größeren Umfangs kann pauschal nicht gewährleistet werden, dass ganzjährig die entsprechenden Wasserbedarfe über die Entnahme von Oberflächenwasser gedeckt werden können. Dies ist im Einzelfall zu prüfen. Nutzbare Abflüsse sind nur in den Wintermonaten vorhanden, sodass ggf. eine Kombination von Wasserquellen für die Wasserstoffproduktion einen Lösungsansatz darstellen kann (Oberflächenwasser im Winter, Grundwasser und Abwasser als kontinuierliche Quelle für die Deckung der Wasserbedarfe im Sommer). Dies ist ebenfalls standortkonkret zu prüfen. Bei der Nutzung von Wasser aus der Spree oder der Oder sind zudem bei der Bewertung der Eignung und Effizienz die Wasserqualitäten und der damit verbundene ggf. höhere Aufbereitungsaufwand zu berücksichtigen.

In den letzten Jahren seit 2018 wurden mehrfach deutlich geringere Jahresniederschlagsmengen und vor allem langanhaltende Trockenphasen beobachtet. Für die Nutzung von Niederschlagswasser ist aber neben den mittleren Mengen vor allem die innerjährliche Niederschlagsverteilung relevant. Niederschlag ist eine diskontinuierliche Wasserquelle, es können aufeinanderfolgend mehrere Tage bis Monate mit wenig oder fast gar keinem Niederschlag auftreten. In Kombination mit dem anderen Extrem der Starkregenereignisse sind diese Dürrezeiten in den Jahressummen teilweise nicht erkennbar. Sie sind jedoch für die Nutzung des Niederschlagswassers als Wasserquelle für die Industrie bzw. hier insbesondere für die Wasserstoffproduktion bedeutend, da keine gleichmäßige Wasserversorgung gewährleistet werden kann. Speicherbecken können die Trockenphasen überbrücken. Wegen sowohl der Verdunstung als auch der Verschmutzungsgefahr (insbesondere organisches Material) sollten die

Speicher abgedeckt bzw. geschlossen sein. Aufgrund der in Brandenburg zu berücksichtigenden, längeren Trockenphasen wird Niederschlagswasser nicht als alleinige Wasserquelle eingesetzt werden können. Es kann aber einen Anteil an einem Gesamtwasserversorgungskonzept bilden.

Die Nutzung von gereinigtem Abwasser für die Wasserstoffproduktion kann vor allem für mittlere Anlagen eine Option zur Schonung der natürlichen Wasserressourcen darstellen. Dies betrifft insbesondere die Region um Berlin, wo ein hohes Abwasseraufkommen besteht und gleichzeitig die natürlichen Wasserdargebote ausgeschöpft sind bzw. die Sicherung der Trinkwasserversorgung zu gewährleisten ist. Generell ist bei den Überlegungen zur Nutzung gereinigten Abwassers zu berücksichtigen, dass die Einleitung in die Gewässer teilweise einen wichtigen Anteil am Abfluss bildet, insbesondere in den Sommermonaten, und diese Nutzungsansprüche bei der Konzeption der Abwassernutzung zu berücksichtigen sind.

Ein sparsamer und bewusster Umgang mit Wasser und die Sensibilisierung für das Thema sind wichtige Voraussetzungen und Aufgaben für die weitere Nutzung und der weiteren Strukturplanung und -entwicklung.

### **Brandenburg steht vor einem Strukturwandel mit Chancen für die Region**

- Der Umbau der Stromversorgung in Brandenburg eröffnet auch wichtige Potenziale zur Optimierung der Wassernutzung. Brandenburg ist Vorreiter hinsichtlich nachhaltiger Wasserbewirtschaftung. Die Transformation der Energieversorgung und der Industriestandorte bietet die Chance, die zukünftige Entwicklung des Wasserhaushalts in Brandenburg weiter zu optimieren und Wasserentnahmen wie auch -nutzungen auf den Prüfstand zu stellen bzw. zu verbessern. Zubau von Elektrolyseanlagen und die grüne Wasserstofferzeugung in Brandenburg können die Wertschöpfung in der Region erhöhen und regionale Strukturen stärken.
- Die Diskussion der Fallbeispiele hat gezeigt, dass v. a. auch die Nutzung von Abwasser eine große Chance darstellt. Jedoch sind hier weitere „Aufreinigungsaufwände“ mit zusätzlichen Kosten verbunden. Hier sollte der Ansatz für eine Zusammenarbeit zwischen öffentlicher und privater Hand geprüft werden, um konkrete Projekte und Lösungen zu initiieren.
- Auch wird die Überprüfung und (Neu-)Regelung des Wasserentnahmerechts bzw. der Kosten für Abwassereinleitung empfohlen, um gezielt Anreize zur Wiedernutzung und Aufbereitung der Abwasserströme zu schaffen. Striktere Vorgaben zur effizienten Wassernutzung (wo nötig) sind, insbesondere in Bezug auf die Kühlungstechnik von Elektrolyseuren und anderen Industrieanlagen, weiter einzuführen, um die Wassernutzung entsprechend den Verfügbarkeiten anzupassen.
- Weitere Einsparpotenziale für die effiziente Wassernutzung aus verschiedenen Rohwasserquellen in allen Sektoren sind konsequent zu erschließen und zu optimieren. Dazu können Pilotprojekte helfen, den ressourcensparenden Umgang aufzuzeigen und Akzeptanz zu schaffen. Auch für die weitere Entwicklung von Projekten zur Wasserstofferzeugung durch die Wasserelektrolyse ist die Umweltverträglichkeit der Wasserentnahme von Beginn an sicherzustellen.

Diese Studie hat aufgezeigt, dass die heimische Wasserstoffproduktion den „Wasserstress“ in Brandenburg nicht zwangsläufig erhöht – sondern sogar helfen kann, die „Wasserwende“ einzuleiten, insbesondere vor dem Hintergrund der Transformation des „Lausitzer Kohlereviere“ und bestehender

sowie zukünftiger Industriestandorte. Dennoch wird auch der Bau von Elektrolyse, wie auch bei der Wasserentnahme eines Gewerbe- und Industrieunternehmens in den einzelnen Regionen spezifisch zu prüfen sein. Die individuelle Prüfung vor Ort stellt damit eine wichtige Voraussetzung für eine weitere Beurteilung und Eignung von Standorten für die H<sub>2</sub>-Erzeugung aus Elektrolyse dar, auch wenn diese Studie grundsätzlich belegt, dass Wasserstoff in einem integrierten Konzept im Vergleich zu heutigen Wasserverbräuchen einen geringeren „Fußabdruck“ aufweist.

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

### Abkürzungen

(C)EDI	(kontinuierliche) Elektrodeionisation (engl. Continuous Electrodeionisation)	LK	Landkreis
AEL	alkalische Elektrolyse	MEG	Membranentgaser
AEMEL	Elektrolyse mit Anionenaustauschmembran (engl. Anion Exchange Membran)	NÖ	nicht-öffentlich
BHKW	Blockheizkraftwerk (Strom- und Wärmeerzeugung)	OPEX	Betriebskosten
BoL	Betriebsstart (Beginning of Life)	OW	Oberflächenwasser
BZ	Brennstoffzelle	Ö	öffentlich
CAPEX	Investitionskosten	PEMEL	Elektrolyse mit Protonenaustauschmembran (engl. Proton Exchange Membrane)
DAC	Direct Air Capture	PPA	Power Purchase Agreement
EE	erneuerbare Energien	PtG	Power-to-Gas
EoL	Lebensdauerende (End of Life)	PtL	Power-to-Liquid
EW	Einwohner	THG	Treibhausgas
GuD	Gas- und Dampfturbinen- Kombikraftwerk	TW	Trinkwasser
GW	Grundwasser	UO	Umkehrosmose
H <sub>2</sub>	Wasserstoff	UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
H <sub>2</sub> O	Wasser	VLS	Volllaststunden
HRS	Wasserstofftankstelle (engl. Hydrogen Refueling Station)	WVU	Wasserver- & entsorgungsunternehmen
HTEL	Hochtemperaturelektrolyse, auch Festoxidelektrolyse (engl. Solide Oxide Electrolysis Cell, SOEC)	WZ08	Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008

### Einheiten

MW <sub>el</sub>	Megawatt (elektrische Leistung)	t	Tonne
GW <sub>el</sub>	Gigawatt (elektrische Leistung)	l	Liter
kg	Kilogramm	m <sup>3</sup>	Kubikmeter (= 1.000 l)



## QUELLENVERZEICHNIS

- [ABO Kraft & Wärme 2023] Luther, M. (ABO Kraft & Wärme AG). Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) am 29.11.2023.
- [AFRY 2023] AFRY Management Consulting (AFRY): LEAG reicht den mit AFRYs Unterstützung erarbeiteten Genehmigungsantrag für eine der größten Power-to-X Anlagen in Deutschland ein. 2023.  
<https://www.presseportal.de/pm/168662/5550663>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [Amt für Statistik BE-BB 2022] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung in Berlin und Brandenburg, <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/q-i-1-3j>, zuletzt abgerufen am 1.03.2024.
- [Amt für Statistik-BB 2022] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Wasserversorgung und Abwasserversorgung im Land Brandenburg 2019, 2. korrigierte Ausgabe, [https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/5712b8385f0a6757/4c126718f6af/SB\\_Q01-01-00\\_2019j03\\_BB.pdf](https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/5712b8385f0a6757/4c126718f6af/SB_Q01-01-00_2019j03_BB.pdf), zuletzt abgerufen am 1.03.2024.
- [Amt für Statistik-BE 2022] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Wasserversorgung und Abwasserversorgung im Land Berlin 2019, [https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/8aa3e90596fd5286/da0b20259db6/SB\\_Q01-01-00\\_2019j03\\_BE.pdf](https://download.statistik-berlin-brandenburg.de/8aa3e90596fd5286/da0b20259db6/SB_Q01-01-00_2019j03_BE.pdf), zuletzt abgerufen am 1.03.2024.
- [Amt für Statistik-BE 2022b] Amt für Statistik Berlin-Brandenburg, Personenverkehr mit Bussen und Bahnen <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/h-i-6-j>, abgerufen am 14.03.2024
- [ANL 2015] Argonne National Lab. (ANL): Development of a Life Cycle Inventory of Water Consumption Associated with the Production of Transportation Fuels. United States: N. p., 2015. Web. doi:10.2172/1224980.
- [Asahi Kasei 2023] Asahi Kasei: Product data sheet Aqualyzer – Large-scale alkaline water electrolyzer system for producing hydrogen. 2023.
- [Aydin et al. 2022] Aydin et al.: A comparative review on clean hydrogen production from wastewaters. 2022.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479720317187?via%3Dihub> ,  
zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [BAH 2022] Büro für Angewandte Hydrologie GmbH [BAH]: Einzugsgebietsmodell des Landes Brandenburg auf der Grundlage von ArcEGMO, Aktualisierung der Abflussspendenkarte der mittleren Abflüsse – Abschlussbericht, Berlin, 2022.
- [BAH 2023] Büro für Angewandte Hydrologie GmbH [BAH]: Studie zum Gebietswasserhaushalt und Abflussgeschehen in Brandenburg auf Basis von Klimaprojektionsdaten mittels des

Landesmodells ArcEGMO-PSCN für das Landesamt für Umwelt Brandenburg, Berlin, Juni 2023.

- [Baldinelli et al. 2022] Baldinelli A. et al.: Hydrogen Production from Low-Quality Water: Challenges and Perspectives. J. Phys.: Conf. Ser. 2385 012048.
- [BDEW 2023] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Zahlen und Fakten Erdgas, 2023, [https://www.gewerbegas.info/wp-content/uploads/2023/08/Zahlen\\_und\\_Fakten\\_Erdgas.pdf](https://www.gewerbegas.info/wp-content/uploads/2023/08/Zahlen_und_Fakten_Erdgas.pdf)
- [Becker H. et al. 2023] Becker, H. et al.: Impact of impurities on water electrolysis: a review., Sustainable Energy Fuels, 7, 1565-1603, 2023.  
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/se/d2se01517j>
- [Blanco 2021] Blanco H. (IRENA): Hydrogen production in 2050: how much water will 74EJ need?, 2021, <https://energypost.eu/hydrogen-production-in-2050-how-much-water-will-74ej-need/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [BMDV 2024] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV): Verkehr in Zahlen, 2024.
- [BMG 2020] Bundesministerium für Gesundheit (BMG): „Europaparlament verabschiedet Neufassung der Trinkwasserrichtlinie“, Pressemitteilung vom 17. Dezember 2020. Verfügbar unter <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/presse/pressemitteilungen/2020/4-quartal/trinkwasserrichtlinie.html>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [BMUV o.D.] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Kurzinfo Abwasser – Kläranlage, o.D., <https://www.bmuv.de/themen/wasser-und-binnengewasser/abwasser/klaeranlage-kurzinfo>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024
- [BMWK 2019] BMWK – Monitoring der Energiewende, 2019.  
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/monitoring-prozess.html>
- [BMWK 2023] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Bundesverwaltungsgericht weist Klage von Rosneft ab – Anordnung der Treuhand rechtmäßig, Pressemitteilung vom 14.03.2023.  
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/03/20230314-rosneft-anordnung-treuhand-rechtmaessig.html>, zuletzt abgerufen am 23.02.2024.
- [BMWK 2024] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): Wasserstoffnetz für die Energiewende – wichtige Weichen für koordinierten und privatwirtschaftlichen Aufbau sind gestellt, Pressemitteilung vom 26.01.2024.  
<https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2024/02/07-wasserstoffnetze-energiewende.html>, zuletzt abgerufen am 01.03.2024
- [Brandenburg SHK 2006] Brandenburg SHK – BIOMASSE, 2006. <https://www.brandenburg-shk.de/de/verbraucher/erneuerbare-energien/biomasse/>

- [Brannock et al. 2022] Brannock, M.; Dagg, B.; Mitchell, K. (GHD): Water for hydrogen production: Challenges and opportunities supported by real-world case studies. The international Desalination Association World Congress, 2022.
- [BWB 2023] Berliner Wasserbetriebe, Wasserkreislauf, 2023, <https://www.bwb.de/de/wasserkreislauf.php>, zuletzt abgerufen am 28.11.2023.
- [BWB 2024] Berliner Wasserbetriebe, Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Yanni Astono (LBST) am 29.02.2024.
- [CORRECTIV 2022] CORRECTIV: Kampf um Wasser – Diese Unternehmen dürfen Wasser auf Jahrzehnte entnehmen. 22.11.2022. <https://correctiv.org/aktuelles/kampf-um-wasser/2022/11/22/klimawandel-wasser-knapp-industrie-hat-jahrzehntelange-entnahmerechte/>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [Correia et al. 2023] Correia, V.; Silva, P.D.; Pires, L.C. Energy Requirements and Photovoltaic Area for Atmospheric Water Generation in Different Locations: Lisbon, Pretoria, and Riyadh. *Energies* **2023**, *16*, 5201. <https://doi.org/10.3390/en16135201>.
- [Cummins 2021] Cummins: HYDROGEN - THE NEXT GENERATION DISCOVER CUMMINS ELECTROLYZER TECHNOLOGIES, 2021, <https://www.cummins.com/sites/default/files/2021-08/cummins-hydrogen-generation-brochure-20210603.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.
- [Cummins 2021b] Cummins: Hylzyer Water Electrolyser. Data Sheet HyLYZER 1000. Bulletin 5676518, 06/2021.
- [Dagg 2023] Dagg, B: Does green hydrogen have a water supply problem? 28.02.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/does-green-hydrogen-have-water-supply-problem-brendan-dagg>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [Dagg et al. 2022] Dagg, B., Swan, A., Potts, K., Brannock, M., & Swan, A. (GHD): Introducing Hydrogen for Energy as a new Water User. 2022. [https://www.brendandagg.com/documents/Tassie22\\_Introducing-Hydrogen-for-Energy-as-a-New-Water-User\\_FINAL-PAPER.pdf](https://www.brendandagg.com/documents/Tassie22_Introducing-Hydrogen-for-Energy-as-a-New-Water-User_FINAL-PAPER.pdf), zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [DEBRIV 2017] DEBRIV – Bundesverband Braunkohle: BODENSCHATZ BRAUNKOHLE, 2017. <https://braunkohle.de/wp-content/uploads/2019/08/Bodenschatz-Braunkohle-%E2%80%93-Langfassung.pdf>
- [Dekeyser et al. 2024] Dekeyser, J.; Soler, A.; Gordillo, V.; Lilley, W.; Schmidt, P.; Weindorf, W.; Houghton, T.; Dell’Orco, S.: E-Fuels: A techno-economic assessment of European domestic production and imports towards 2050 - update; 2024 (noch nicht veröffentlicht)
- [DHI WASY 2023] DHI WASY, Wasserwirtschaftliches Großraummodell der Flussgebiete Spree, Schwarze, Elster und Lausitzer Neiße, 2023.
- [DLR 2021] Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), Stuttgart, Institut für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme, Saarbrücken, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal: MENA Fuels: Multikriterielle Bewertung von Bereitstellungstechnologien synthetischer Kraftstoffe, Teilbericht Nr. 3 (D2.1), Februar 2021.

- [Dresp et al. 2019] Dresp, S.; Dionigi, F.; Klingenhof M.; Strasser, P.: Direct Electrolytic Splitting of Seawater: Opportunities and Challenges, *ACS Energy Letters* **2019** 4(4), 933-942.
- [DVGW 2023] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V. (DVGW): Dr. Florencia Saravia und Dr. Frank Graf (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT) Dr. Stefanie Schwarz und Frank Gröschl (DVGW): Genügend Wasser für die Elektrolyse - Wieviel Wasser wird für die Erzeugung von grünem Wasserstoff benötigt und gibt es ausreichende Ressourcen? 2023.  
<https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/h2o-fuer-elektrolyse-dvgw-factsheet.pdf>, zuletzt abgerufen am 31.10.2023.
- [eAPW] Auskunftsplattform Wasser Brandenburg, <https://apw.brandenburg.de/>, zuletzt abgerufen am 01.03.2024
- [EHB 2023] European Hydrogen Backbone Initiative (EHB): The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative, 2023. <https://ehb.eu/>, zuletzt abgerufen am 01.03.2024
- [Elogen 2021] Elogen: PEM – Electrolysers (Proton Exchange Membran). Data Sheet. 2021.
- [Enapter 2022] Enapter: Draft datasheet AEM Multicore, 2022.
- [Enapter o. D.] Enapter: Water Purification System (WPS).  
[https://handbook.enapter.com/electrolyser/wps20/downloads/Enapter\\_Datasheet\\_WPS\\_EN.pdf](https://handbook.enapter.com/electrolyser/wps20/downloads/Enapter_Datasheet_WPS_EN.pdf), zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [ENERTRAG 2024] ENERTRAG: Das ENERTRAG Hybridkraftwerk Prenzlau: Das weltweit erste seiner Art. <https://enertrag.com/leistungen/gruener-wasserstoff/hybridkraftwerk-prenzlau>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [EUROWATER 2021] Eurowater: Water treatment for green hydrogen - WHAT YOU NEED TO KNOW, reprinted from Hydrogen Tech World magazine, 2021.  
[https://www.eurowater.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiles%2feurowater%2fCountry%2fInternational%2fLeaflets%2fWhite-paper\\_water-treatment-for-hydrogen\\_EUROWATER.pdf](https://www.eurowater.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2fFiles%2fFiles%2feurowater%2fCountry%2fInternational%2fLeaflets%2fWhite-paper_water-treatment-for-hydrogen_EUROWATER.pdf), zuletzt abgerufen am 29.11.2023.
- [EUROWATER o. D.] EUROWATER: Wasseraufbereitung für die Wasserstoffproduktion.  
<https://www.eurowater.com/de/wasserstoffproduktion>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [EUWA o. D.] UV Anlagen zur Wasseraufbereitung. <https://www.euwa.com/uv-anlagen-zur-wasseraufbereitung.html>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [eWB] Elektronisches Wasserbuch, <https://apw.brandenburg.de/>
- [FAO 2018] FAO Land and Water Discussion, Wrathall, D. J., Hoek, J., Walters, A., & Devenish, A.: Water stress and human migration: a global, georeferenced review of empirical research. 2018, <https://www.fao.org/3/i8867en/i8867en.pdf>.
- [Fhg IEG et al. 2023] Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG (Fhg IEG), Fraunhofer-Einrichtung für System- und Innovationsforschung ISI (Fhg ISI), Reiner Lemoine Institut (RLI), INFRACON Infrastruktur Service GmbH & Co. KG (INFRACON): Machbarkeitsstudie: Auf- und Ausbau eines leistungsfähigen

Wasserstofftransportnetzes in Brandenburg, Studie im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE), 2023.

- [Fhg ISE et al. 2024] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Consentec GmbH, ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Technische Universität Berlin: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 -T45-Szenarien, Modul Verkehr, Studie im Auftrag von Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 09.02.2024, [https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3\\_T45\\_Verkehr\\_V2\\_0\\_barrierefrei.pdf](https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Verkehr_V2_0_barrierefrei.pdf), zuletzt abgerufen am 21.02.2024.
- [FNB 2023] FNB Gas e.V: Wasserstoff-Kernnetz. 2023. <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz-wasserstoff-kernnetz/>, zuletzt abgerufen am 22.02.2024.
- [Fraunhofer ISI 2021] Fraunhofer ISI: Langfristszenarien 3, Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands, 2021. <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/index.php>, zuletzt abgerufen am 09.03.2024.
- [Fraunhofer ISI et al. 2022] Fraunhofer ISI, Thomann, J.; Edenhofer, L.; Hank, C.; Lorych, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Stamm, A.; Thiel, Z.; Weise, F. (2022): Hintergrundpapier zu nachhaltigem grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten. HYPAT Working Paper 01/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).
- [FRPZF o. D.] Hebei Zhaofeng Umweltschutz Technology Co., Ltd. – GFK Reinstwasserspeicher. <http://de.frpzf.com/frp-ultrapure-water-storage-tank-product/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [Gascade et al. 2023] GASCADE: Ontras, terranets bw: flow – making hydrogen happen. Das Leitungsnetz für Wasserstoff, 2023, <https://www.flow-hydrogen.com/>, zuletzt abgerufen am 22.02.2024.
- [GHD 2023] Brannock, M.; Dagg, B.; Brown, L. (GHD): Navigating waters role in the green hydrogen economy, 08.08.2023. <https://www.ghd.com/en-au/insights/navigating-waters-role-in-the-green-hydrogen-economy>, zuletzt abgerufen a, 05.12.2023
- [GHS 2023] Green Hydrogen Systems: Technical Specs A-Series & X-Series 2023.
- [GHS 2023b] Green Hydrogen Systems: HYPROVIDE X-SERIES <https://www.greenhydrogensystems.com/electrolysers/hyprovide-x-series-6mw-modular-electrolyser>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.
- [Gnorski 2023] Henry Gnorski (2023): Transformation der PCK Raffinerie GmbH zur Raffinerie der Zukunft. 2023. [https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2023/12/01\\_SB158-0.pdf](https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2023/12/01_SB158-0.pdf) zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [Graforce 2023] Opitz K. (Graforce GmbH). Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) am 21.11.2023.
- [Graforce o. D.] Graforce: Schmutzwasser Plasmalyse. Wasserstofferzeugung und Reinigung von Schmutzwasser, Broschüre. [https://www.synreform.com/images/pdfs/Broschuere\\_Schmutzwasser\\_Plasmalyse\\_dt.pdf](https://www.synreform.com/images/pdfs/Broschuere_Schmutzwasser_Plasmalyse_dt.pdf), zuletzt abgerufen am 08.11.2023.



- [Gross Wassertechnik o. D.] Wassertechnik Shop / Gross Wassertechnik: Permeat(ion): Das Wichtigste kompakt erklärt. <https://wassertechnik-shop.com/wissen/permeat>, zuletzt abgerufen am 5.12.2023.
- [H2 Energy 2024] H2Energy: Denmark's 1GW green hydrogen production facility receives important environmental approval from authorities, 2024, <https://h2energy.ch/en/denmarks-1gw-green-hydrogen-production-facility-receives-important-environmental-approval-from-authorities/>, zuletzt abgerufen am 15.02.2024.
- [H2B2 2022] H2B2 Electrolysis Company: product specifications for electrolyser products.
- [H2Berlin 2020] H2Berlin: Wasserstoffpotenzial in Berlin 2025. Eine Analyse im Auftrag der Initiative H2Berlin, 2020.  
<https://www.bwb.de/de/assets/downloads/wasserstoffpotenzial-in-berlin.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.02.2023.
- [Herco 2023] Wiechmann, A. (Herco Wassertechnik GmbH). Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) am 01.12.2023.
- [Herco o. D.] Herco: Wasseraufbereitung für grünen Wasserstoff.  
<https://www.hercowater.com/de/wasseraufbereitung-anlagen-industrie/gruener-wasserstoff.html>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [HLNUG o.D.] Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie: Vierte Reinigungsstufe zur Spurenstoffelimination, o.D. <https://www.hlnug.de/themen/wasser/abwasser/vierte-reinigungsstufe-zur-spurenstoffelimination#>, zuletzt abgerufen am 11.03.2024
- [H-TEC 2023] H-TEC SYSTEMS: PEM-Elektrolyseur -ME450. Datenblatt. [https://www.h-tec.com/fileadmin/user\\_upload/produkte/produktseiten/ME450-1400/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-ME450-DE-23-08.pdf](https://www.h-tec.com/fileadmin/user_upload/produkte/produktseiten/ME450-1400/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-ME450-DE-23-08.pdf), zuletzt abgerufen am 26.10.2023.
- [H-TEC 2023b] H-TEC SYSTEMS: PEM-Elektrolyseur -Hydrogen Cube System. Datenblatt. [https://www.h-tec.com/fileadmin/user\\_upload/produkte/produktseiten/HCS/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-HCS-DE-23-03.pdf](https://www.h-tec.com/fileadmin/user_upload/produkte/produktseiten/HCS/spec-sheet/H-TEC-Datenblatt-HCS-DE-23-03.pdf), zuletzt abgerufen am 26.10.2023.
- [Huesa 2022] J. Huesa Water Technology: Water needs associated with hydrogen production. <https://smartwatermagazine.com/news/j-huesa-water-technology/water-needs-associated-hydrogen-production>, zuletzt abgerufen am 29.11.2023.
- [Hydrogen Council & LBST 2021] Hydrogen Council, LBST & McKinsey: Hydrogen decarbonization pathways - A life-cycle assessment. 2021. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/04/Hydrogen-Council-Report-Decarbonization-Pathways-Part-1-Lifecycle-Assessment.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.11.2023.
- [Hydrogen Pro 2019] Hydrogen Pro: High pressure alkaline electrolyzers for large-scale hydrogen production: Technical information, 2019.
- [Hydrogroup 2023] Hydrogroup: Membranentgasung, 2023.  
<https://www.hydrogroup.de/produkte/prozesswasseraufbereitung/membranentgasung.html>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.

- [IHS Markit 2018] IHS Markit: Hydrogen Data Workbook, 2018.
- [INFRACON & IKEM 2023] INFRACON Infrastruktur Service GmbH & Co. KG (INFRACON) & Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. (IKEM): KURZFASSUNG - Machbarkeitsstudie leitungsgebundenes Wasserstofftransportnetz in der Lausitz. Studie im Auftrag des Landkreises Spree-Neiße, 11.12.2023, [https://daten.verwaltungsportal.de/dateien/news/8/9/2/3/9/2/H2\\_Lausitz-Machbarkeitsstudie\\_2023.pdf](https://daten.verwaltungsportal.de/dateien/news/8/9/2/3/9/2/H2_Lausitz-Machbarkeitsstudie_2023.pdf), zuletzt abgerufen am 01.03.2024.
- [IPCC, 2018] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- [IRENA & Bluerisk 2023] IRENA & Bluerisk: Water for hydrogen production, 2023, Abu Dhabi, United Arab Emirates. [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA\\_Bluerisk\\_Water\\_for\\_hydrogen\\_production\\_2023.pdf?rev=4b4a35632b6d48899eb02bc54fd1117f](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Dec/IRENA_Bluerisk_Water_for_hydrogen_production_2023.pdf?rev=4b4a35632b6d48899eb02bc54fd1117f), zuletzt abgerufen am 03.03.2024.
- [IRENA 2020] IRENA: Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [ISO-Norm 22734:2019] ISO-Norm 22734:2019: Hydrogen generators using water electrolysis — Industrial, commercial, and residential applications. <https://www.iso.org/standard/69212.html>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [ISPT 2022] ISPT: Hydrohub GigaWatt Scale Electrolyser: Report A 1 GW Hydrogen Plant: Advanced Design and Total Installed-Capital Costs. 2022. <https://ispt.eu/media/Public-report-gigawatt-advanced-green-electrolyser-design.pdf>, zuletzt abgerufen am: 24.11.2023.
- [ITM Power 2022] ITM Power: HGAS3SP - Our medium-sized containerised PEM electrolyser system. Product data, 2022.
- [JMP 2023] Progress on household drinking water, sanitation, and hygiene 2000–2022: special focus on gender. New York: United Nations Children’s Fund (UNICEF) and World Health Organization (WHO), 2023, <https://washdata.org/reports/jmp-2023-wash-households>, zuletzt abgerufen am 04.12.2023.
- [John Cockerill 2023] John Cockerill: DQ1000 Alkaline Electrolyser Produktdatenblatt, <https://hydrogen.johncockerill.com/wp-content/uploads/sites/3/2023/04/dq-1000-def-2-hd-en.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.

- [Kakoulaki et al. 2021] Kakoulaki, Georgia, et al.: "Green hydrogen in Europe—A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables." Energy Conversion and Management 228, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649>
- [Kyros 2023] Kyros: Technology - Technical specifications. Kyros turnkey electrolyzer. <https://kyroshydrogensolutions.com/technology-decentralized-turnkey-hydrogen-solution/>, zuletzt abgerufen am 26.10.2023.
- [Landtag 2023] Landtag Brandenburg, Drucksache 7/8194, Antwort der Landesregierung auf die Kleine Anfrage der Grünen Fraktion, ausgegeben am 08.08.2023.
- [LEAG 2023] LEAG: Das Innovative Speicherkraftwerk Jänschwalde. <https://www.leag.de/de/gigawattfactory/h2-kraftwerke/innovationskraftwerk/>, zuletzt abgerufen am: 29.02.2024.
- [LEAG 2023b] LEAG: Braunkohlenkraftwerk Jänschwalde soll zum grünen Zukunftsstandort umgebaut werden. Pressemitteilung, 29.06.2023. <https://www.leag.de/de/news/details/braunkohlenkraftwerk-jaenschwalde-soll-zum-gruenen-zukunftsstandort-umgebaut-werden/>, zuletzt abgerufen am: 29.02.2024.
- [LEAG 2023c] LEAG: Stadt Guben und LEAG legen Grundstein für grünen Industrie- und Gewerbepark. Pressemitteilung, 10.02.2023. <https://www.leag.de/de/news/details/stadt-guben-und-leag-legen-grundstein-fuer-gruenen-industrie-und-gewerbepark/> ; <https://www.leag.de/de/news/details/lausitzer-lithium-soll-klimaneutral-werden/>, zuletzt abgerufen am: 29.02.2024.
- [LEAG 2024] Koch, T.; Bayer, M.; Kosel, D. (LEAG). Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) und Katja Eulitz (DHI) am 08.03.2024.
- [LEAG o.D.] LEAG: GigawattFactory. <https://www.leag.de/de/gigawattfactory/>, zuletzt abgerufen am: 29.02.2024.
- [Lee 2023] Lee, K. (Sensus): The Water Impact of Hydrogen - Understanding the effects of green hydrogen production, 2023. <https://blog.sensus.com/the-water-impact-of-hydrogen/>, zuletzt abgerufen am 05.03.2024.
- [Leipa 2022] LEIPA Georg Leinfelder GmbH Standort Schwedt: Vereinfachte Umwelterklärung 2022, Berichtsjahr 2021 [https://www.leipa.com/de/nachhaltigkeit/verantwortung?file=files/leipa-content/downloads/various/LEIPA\\_SDT\\_Umwelterklaerung\\_2021\\_DE.pdf&cid=12715](https://www.leipa.com/de/nachhaltigkeit/verantwortung?file=files/leipa-content/downloads/various/LEIPA_SDT_Umwelterklaerung_2021_DE.pdf&cid=12715), zuletzt abgerufen am: 29.02.2024.
- [Lenntech o. D.] Lenntech: Deionisiertes und demineralisiertes Wasser. <https://www.lenntech.de/anwendungen/prozess/demineralisiert/deionisiertes-demineralisiertes-wasser.htm>, zuletzt abgerufen am 29.11.2023.
- [LfU 2019] LfU Brandenburg, Erweiterung des Hydrologischen Wochenberichtes, Arbeitsstand Dezember 2019, unveröffentlicht.
- [LfU 2021] LfU Brandenburg, Übersicht zu Kommunalen Kläranlagen, Stand 2019.

- [LfU 2022] LfU Brandenburg, Wasserversorgungsplanung Brandenburg, Sachlicher Teilabschnitt mengenmäßige Grundwasserbewirtschaftung, März 2022.
- [LfU 2023a] LfU Brandenburg, Übersicht zu Wasserwerksentnahmen, Stand 2019.
- [LFU 2023b] LfU Brandenburg, Bilanzierung des Grundwasserangebotes für das Land Brandenburg, Bericht Arbeitsstand September 2023, unveröffentlicht.
- [LfU 2023c] LfU Brandenburg, Trendkarten der Grundwasserstände, Arbeitsstand Oktober 2023, unveröffentlicht.
- [LfU 2024a]. LfU Brandenburg, Antwort zur Anfrage zum künftigen Wasserangebot in der Lausitz vom 05.05.2023, Cottbus, 11. Mai 2023, Gesch-Z.: LfU\_W13-3030/ 45+3#176095/2023
- [LfU 2024b] LfU Brandenburg, Antwort zur Anfrage Schwedt vom 13.02.2024, Cottbus, 13. März 2024, Gesch-Z.: LfU\_W13-3036/100+50#51555/2024
- [LfU 2024c] LfU Brandenburg, Gegenüberstellung der Wasserrechte zu den Wasserwerksentnahmen, Arbeitsstand März 2024, unveröffentlicht.
- [LfULG 2010] Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG): Untersuchung und Einschätzung regionalgeologischer Einheiten von Sachsen bezüglich einer CO<sub>2</sub>-Speicherung. 2010. [https://www.geologie.sachsen.de/download/CCS\\_27092010.pdf](https://www.geologie.sachsen.de/download/CCS_27092010.pdf), zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [Localiser 2023] Localiser, H<sub>2</sub>-Marktplatz, <https://www.localiser.de/h2marktplatzbbb>, zuletzt abgerufen am 28.11.2023.
- [LOS 2024] Mittelleitung Untere Wasserbehörde Landkreis Oder-Spree am 26.03.2024.
- [Lux et al. 2021] Lux, B.; Sensfuß, F.; Kiefer, C.; Bernath, C.; Deac, G.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Energieangebot, Karlsruhe, 2021.
- [McPhy 2020] McPhy: McLyzer Technical Datasheet May 2020.
- [McPhy 2023] McPhy: MCLYZER PRODUCT LINE - Pressurized alkaline electrolysis. Technical specifications. Juni 2023.
- [MLUK 2021] Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg, Landesniedrigwasserkonzept Brandenburg, 15.02.2021  
<https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Landesniedrigwasserkonzept-Brandenburg.pdf>
- [Monash University 2021] Monash University: Incorporating used water into hydrogen production to develop a more sustainable energy source, 2021,  
<https://www.monash.edu/news/articles/incorporating-used-water-into-hydrogen-production-to-develop-a-more-sustainable-energy-source>, zuletzt abgerufen am 15.02.2024.
- [MOZ 2023] Thorsten Pifan (Märkische Onlinezeitung, MOZ): PCK-Erdölraffinerie in Schwedt: Hat die Uckermark genug Wasser für die Transformation? 21. Dezember 2023,

[https://www.moz.de/lokales/schwedt/pck-raffinerie-in-schwedt-hat-die-uckermark-ausreichend-wasser-fuer-die-transformation\\_-72512565.html?refreshSession=1](https://www.moz.de/lokales/schwedt/pck-raffinerie-in-schwedt-hat-die-uckermark-ausreichend-wasser-fuer-die-transformation_-72512565.html?refreshSession=1), zuletzt abgerufen am 12.02.2024.

- [MOZ 2023b] Wagner, M. (Märkische Onlinezeitung, MOZ): Leipa und das Wasser: Papierindustrie in Schwedt – wie das Unternehmen die Ressource nutzt. 16. September 2023, [https://www.moz.de/lokales/schwedt/papierindustrie-in-schwedt-leipa-und-das-wasser\\_-wie-das-unternehmen-die-ressource-nutzt-71697005.html](https://www.moz.de/lokales/schwedt/papierindustrie-in-schwedt-leipa-und-das-wasser_-wie-das-unternehmen-die-ressource-nutzt-71697005.html), zuletzt abgerufen am 12.02.2024.
- [MWAE 2021] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie (MWAE) des Landes Brandenburg (2021): Maßnahmenkonkrete Strategie für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft im Land Brandenburg. [https://mwae.brandenburg.de/media/bb1.a.3814.de/Wasserstoffstrategie\\_Brandenburg\\_2021.pdf](https://mwae.brandenburg.de/media/bb1.a.3814.de/Wasserstoffstrategie_Brandenburg_2021.pdf)
- [Nel 2020] Nel Hydrogen Electrolyser: The World's Most Efficient and Reliable Electrolyser. März 2020. <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2020/03/Electrolysers-Brochure-Rev-D.pdf>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.
- [Nel 2021] Nel Hydrogen: M-Series Containerized – Proton Exchange Membrane (EM) Hydrogen Generation Systems, 2021, <https://nelhydrogen.com/wp-content/uploads/2021/01/M-Series-Containerized-Spec-Sheet-Rev-F.pdf>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [Nel 2021b] Nel Hydrogen Electrolysers. C Series PEM Hydrogen Generation Systems. 2021.
- [Nel 2023] Nel Hydrogen: A SERIES Atmospheric Alkaline Electrolyser, 2023, <https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.
- [Nel o. D.] Nel Hydrogen Electrolyser: FAQ <https://nelhydrogen.com/faq/>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [Newborough & Cooley 2021] Newborough, M., & Cooley, G.: Green hydrogen: Water use implications and opportunities. Fuel Cells Bulletin, 2021(12), 12-15. [https://itm-power-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/Green\\_Hydrogen\\_Water\\_Use\\_56b96f577d.pdf](https://itm-power-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/Green_Hydrogen_Water_Use_56b96f577d.pdf), zuletzt abgerufen am 31.10.2023.
- [NOW-GmbH 2020] NOW-GmbH: H<sub>2</sub>-BER – Wind-Wasserstoff-Produktionsanlage und angegliederte weltweit erste CO<sub>2</sub>-neutrale Tankstelle. 2020. [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/08/03bv232\\_h2-tankstelle-ber\\_nip-projektsteckbrief-1.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/08/03bv232_h2-tankstelle-ber_nip-projektsteckbrief-1.pdf), zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [ontras 2023a] Ontras: doing hydrogen – der Wasserstoff-Hub für Ostdeutschland. 2023. <https://www.doinghydrogen.com/>, zuletzt abgerufen am 22.02.2024.
- [ontras 2023b] Ontras: H<sub>2</sub>-Startnetz - Ein ostdeutsches Wasserstoffnetz. 2023. <https://www.ontras.com/de/h2-startnetz>, zuletzt abgerufen am 22.02.2024.



- [PCK 2023] PCK Raffinerie: Weiterentwicklung der Raffinerie: HyPE+-Studie mit ENERTRAG SE fertiggestellt, Schwedt, 8. Mai 2023  
<https://www.pck.de/formatierungsseite/news/detailansicht/weiterentwicklung-der-raffinerie-hype-studie-mit-enertrag-se-fertiggestellt>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [PCK 2023b] PCK Raffinerie: Shell vereinbart Verkauf der Beteiligung an der Raffinerie PCK Schwedt an die Prax-Gruppe, Pressemitteilung vom 15.12.2023,  
<https://www.pck.de/medien#accordion-118>, zuletzt abgerufen am 23.02.2024.
- [PCK 2024] Laban, D., Kowal, D. (PCK Raffinerie GmbH). Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) am 23.02.2024.
- [Pieton et al. 2022] Pieton, N.; Neuwirth, M.; Jahn, M.; Ragwitz, M.: Policy Paper zur Sicherstellung einer mittel- bis langfristigen klimaneutralen Rohstoffversorgung der Raffinerie Schwedt. Cottbus: Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Dresden: Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS. 2022.  
[https://www.cines.fraunhofer.de/content/dam/zv/cines/dokumente/publikationen/energie-system/20221123\\_TransHyDE\\_Policy\\_Paper\\_Raffinerie\\_Schwedt.pdf](https://www.cines.fraunhofer.de/content/dam/zv/cines/dokumente/publikationen/energie-system/20221123_TransHyDE_Policy_Paper_Raffinerie_Schwedt.pdf), zuletzt abgerufen am 23.02.2024.
- [Plug Power 2022] Plug Power: Electrolyzers and Water: Saving Water, Powering the World with Green Hydrogen, Blogbeitrag, 11. August 2022. Verfügbar unter:  
<https://www.plugpower.com/water-electrolysis-powering-the-world-with-green-hydrogen/>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [Plug Power 2022b] Plug Power: Plug's California Green Hydrogen Plant Saves Water, Creates New Energy Source, Blogbeitrag, 6. Dezember 2022. Verfügbar unter:  
<https://www.plugpower.com/plugs-california-green-hydrogen-plant-saves-water-creates-new-energy-source/>, zuletzt abgerufen am 24.11.2023.
- [Plug Power o. D.] Plug Power: Plug EX-2125D, Produktdatenblatt.
- [Potts 2023] Potts, K (GHD): Water and the Hydrogen Rainbow, Presentation in Webinar-Serie: Water's role in the hydrogen economy, 15. Februar 2023,  
<https://ccstatic.ccindex.cn/event/40/90/22/3/rt/1/documents/resourceList1675970450630/waterandthehydrogenrainbowozwaterslides1675970448311.pdf>, zuletzt abgerufen am 05.03.2024.
- [Process 2018] Process: Macht 4. Oder 5. Reinigungsstufe resistenter Keime den Garaus? 2018.  
<https://www.process.vogel.de/macht-4-oder-5-reinigungsstufe-resistenten-keimen-den-garaus-a-697730/>, zuletzt abgerufen am 11.03.2024
- [Prognos et al. 2023] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut: Souveränität Deutschlands sichern – Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045. Studie im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität – Langfassung, 2023  
[https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Resiliente-Lieferketten\\_Langfassung.pdf](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Resiliente-Lieferketten_Langfassung.pdf), zuletzt abgerufen am 26.10.2023.

- [RLI & EMCEL 2022] Reiner Lemoine Institut gGmbH (RLI) & EMCEL: Elektrifizierungsstrategie für die Busflotte im Stadtgebiet Potsdam. Studie im Auftrag der Landeshauptstadt Potsdam und des Verkehrsbetriebs Stadtwerke Potsdam, 2022.
- [RLI & Rebel 2022] Reiner Lemoine Institut gGmbH (RLI) & Rebel Deutschland GmbH (Rebel): Prignitz-Oberhavel - Potenzialstudie für eine regionale Wasserstoffwirtschaft, 30.06.2024.  
<https://www.prignitz-oberhavel.de/fileadmin/dateien/dokumente/REM/Wasserstoffpotenzialstudie/Endbericht.pdf>, zuletzt abgerufen am 01.03.2024.
- [RLI et al. 2023] Reiner Lemoine Institut gGmbH (RLI), IAV GmbH, consulting4drive GmbH, Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V.: HyExpert H2VL – Wasserstoffregion Havelland, 2023.  
[https://www.havelland.de/fileadmin/dateien/amt66/Klimaschutz/HyExpert\\_H2VL\\_Studie\\_f inal.pdf](https://www.havelland.de/fileadmin/dateien/amt66/Klimaschutz/HyExpert_H2VL_Studie_f inal.pdf), zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [RMI 2023] Rocky Mountain Institute (RMI): Hydrogen Reality Check: Distilling Green Hydrogen’s Water Consumption. 2023. <https://rmi.org/hydrogen-reality-check-distilling-green-hydrogens-water-consumption/>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [SEI 2008] Stockholm Environment Institute, Carbon Offsetting & Air Travel Part 1: CO<sub>2</sub>-Emissions Calculations.  
[https://web.archive.org/web/20101231170424/http://www.terrapass.com/images/blogposts/Air\\_Travel\\_Emissions\\_Paper.pdf](https://web.archive.org/web/20101231170424/http://www.terrapass.com/images/blogposts/Air_Travel_Emissions_Paper.pdf), zuletzt abgerufen am 26.03.2024.
- [SenMVKU 2022] Senatsverwaltung für Mobilität, Verkehr, Klimaschutz und Umwelt, Masterplan Wasser Berlin, 1. Bericht, Berlin, 30.09.2022 <https://www.berlin.de/sen/uvk/umwelt/wasser-und-geologie/masterplan-wasser/>, zuletzt abgerufen am 26.03.2024.
- [SenStadt 2001] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Berlin: Abwasserbeseitigungsplan Berlin unter besonderer Berücksichtigung der Immissionszielplanung. Stand der kommunalen Abwasserbeseitigung in Berlin und die mittelfristige Planung, 2001.
- [Shell 2021] Shell: Producing water in the desert. 2021. <https://www.shell.com/what-we-do/major-projects/pearl-gtl/producing-water-in-the-desert.html#vanity-aHR0cHM6Ly93d3cuc2hlbGwuyY29tL2Fib3V0LXVzL21ham9yLXBByb2pY3RzL3BIYXJsLWd0bC9wcm9kdWNpbmctd2F0ZXltaW4tdGhlLWRlc2VydC5odG1s>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [SHFCA 2024] Scottish Hydrogen & Fuel Cell Association: H<sub>2</sub> from wastewater for shore power, 2024, <https://www.shfca.org.uk/news/2024/1/26/h2-from-wastewater-for-shore-power>, zuletzt abgerufen am 15.02.2024.
- [Siemens Energy 2022] Data sheet Silyzer 300 PEM Elektrolyse, <https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a193b68f-7ab4-4536-abe2-c23e01d0b526/datasheet-silyzer300.pdf>, zuletzt abgerufen am 26.10.2023.
- [Statistik BBB 2023] Statistik BBB – Energie, 2023. <https://www.statistik-berlin-brandenburg.de/energie>

- [Sunfire 2021] Sunfire: SUNFIRE-HYLINK SOEC, Produktdatenblatt, 03.02.2023. Verfügbar unter [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20\(neu\)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Sunfire.de%20(neu)/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC-20210303.pdf), zuletzt abgerufen am 25.11.2023.
- [Sunfire 2022] Sunfire: RENEWABLE HYDROGEN FOR ALL APPLICATIONS - SUNFIRE-HYLINK ALKALINE. Product data sheet, 10/2022.
- [Sunfire 2024] Suckow, T. (Sunfire): Persönliche Kommunikation (Experteninterview) mit Christopher Kutz (LBST) am 30.01.2024.
- [Synreform 2022] Synreform: Schmutzwasser-Plasmalyse. 2022.  
<https://www.synreform.com/produkte/schmutzwasser-plasmalyzer>, zuletzt abgerufen am 08.11.2023.
- [Thyssenkrupp 2022] Thyssenkrupp: Large-scale water electrolysis for green hydrogen production. 2022.
- [Topsoe 2021] Topsoe A/S: SOEC high-temperature electrolysis. Produktdatenblatt. 2021/Rev.2  
<https://www.topsoe.com/hubfs/DOWNLOADS/DOWNLOADS%20-%20Brochures/SOEC%20high-temperature%20electrolysis%20factsheet.pdf?hsCtaTracking=dc9b7bfd-4709-4e7e-acb5-39e76e956078%7C20d976e0-d884-4c00-9fcf-3af3d0850476>, zuletzt abgerufen am 19.10.2023.
- [UBA 2021] Umweltbundesamt (UBA) (2021): Die Risiken des Klimawandels für Deutschland - Ergebnisse der Klimawirkungs- und Risikoanalyse. 2021.  
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-risiken-des-klimawandels-fuer-deutschland-0>
- [UBA 2022] Umweltbundesamt (UBA): Power-to-Liquids - A scalable and sustainable fuel supply perspective for aviation. 2022.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/background\\_paper\\_power-to-liquids\\_aviation\\_2022.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/background_paper_power-to-liquids_aviation_2022.pdf), zuletzt abgerufen am 31.10.2023.
- [UBA 2023] Umweltbundesamt (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz, Abschlussbericht.  
[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/90\\_2023\\_texte\\_wasserwirtschaftliche\\_folgen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/90_2023_texte_wasserwirtschaftliche_folgen.pdf)
- [UBA 2024] Umweltbundesamt (UBA): Emissionsdaten, 2024.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/emissionsdaten#hbefa>, zuletzt abgerufen am 21.03.2024.
- [UNESCO 2023] United Nations, The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. UNESCO, Paris.  
<https://www.unesco.de/sites/default/files/2023-03/WWDR%202023%20REPORT%20EN.pdf>, zuletzt abgerufen am 04.12.2023.
- [UNESCO-IHE 2008] UNESCO-IHE: Water footprint of bioenergy and other primary energy carriers, 2008.  
<https://www.waterfootprint.org/resources/Report29-WaterFootprintBioenergy.pdf>

- [Veolia Water Technologies o. D.] Veolia Water Technologies: Umkehrosmose (RO).  
<https://www.veoliawatertechnologies.de/verfahren/umkehrosmose>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [Viebahn et al. 2019] Viebahn, P.; Scholz, A.; Zelt, O. The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis. *Energies* **2019**, *12*, 3443. <https://doi.org/10.3390/en12183443>
- [Wasserstoffschiene-Heidekrautbahn 2024] Wasserstoffschiene Heidekrautbahn: Erste grüne Schiene im Land Brandenburg. <https://www.wasserstoffschiene-heidekrautbahn.de/projekt>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [Wassertechnik-Shop o. D.] Wassertechnik-Shop: Vollentsalzer: verwandeln Leitungswasser in reines Wasser. <https://wassertechnik-shop.com/vollentsalzer>, zuletzt abgerufen am 10.11.2023.
- [WORLD BANK 2016] World Bank Group. 2016. High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy. © World Bank, Washington, DC. <http://hdl.handle.net/10986/23665> License: CC BY 3.0 IGO.
- [World Bank 2023] Internal Presentation during UN Water Conference in New York, March 2023.
- [WorldBank & Hydrogen Council 2022] WorldBank & Hydrogen Council: Moreira, S., & Laing, T. J.: Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen. 2022. <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/12/WB-Hydrogen-Report-2022.pdf>, zuletzt abgerufen am 29.02.2024.
- [WRI 2023a] World Resources Institute (WRI), Aqueduct – Water Risk Atlas, <https://www.wri.org/aqueduct>, zuletzt abgerufen am 4.12.2023.
- [WRI 2023b] World Resources Institute. 25 Countries, Housing One-quarter of the Population, Face Extremely High Water Stress <https://www.wri.org/insights/highest-water-stressed-countries>, zuletzt abgerufen am 04.12.2023.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Globale Trends und regionale Herausforderungen & Chancen. ....	6
Abbildung 2: Einordnung der ermittelten (potenziellen) Wasserbedarfe der H <sub>2</sub> -Erzeugung in Brandenburg im Vergleich zur heutigen Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin.....	8
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Wasserströme im Kontext der Elektrolyse.....	9
Abbildung 4: Spezifischer Wasserbedarf in Abhängigkeit zu unterschiedlichen Anlagendesigns.....	10
Abbildung 5: Auslastungsgrad [%] für das Trockenwetterszenario. ....	12
Abbildung 6: Übersicht großer Wasserentnehmer in Brandenburg.....	13
Abbildung 7: Vergleich der potenziell erforderlichen Wassermengen für die Elektrolyse mit der heutigen Wassergewinnung pro Landkreis, sowie Einordnung des Anteils geplanter H <sub>2</sub> -Erzeugung auf Landesebene.....	14
Abbildung 8: Konzept für die dezentrale H <sub>2</sub> -Elektrolyse (bis 10 MW <sub>el</sub> ) mit Wind- und PV-Anlagen sowie der Nutzung von Leitungswasser. ....	15
Abbildung 9: Konzept für urbane H <sub>2</sub> -Elektrolyseure mit Wind- und PV-Anlagen und der Nutzung von gereinigtem Abwasser.....	15
Abbildung 10: Konzept für industrielle H <sub>2</sub> -Elektrolyseure mit Wind- und PV-Anlagen sowie der Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser für industrielle H <sub>2</sub> -Anwendungen sowie der Abwärmenutzung. ....	16
Abbildung 1-1: Megatrends – Herausforderungen für die weitere Entwicklung der Wasser- und Energiewirtschaft.....	18
Abbildung 1-2: Weltkarte des Wasserstress auf europäischer und deutscher Ebene auf Wassereinzugsgebiete bzw. nationaler Ebene aggregiert [WRI 2023a], Potential für erneuerbaren Strom auf Staatenebene [Kakoulaki et al. 2021], sowie Potential für erneuerbare Energie pro Energieregion in Deutschland nach T-45 Szenarien [Fraunhofer ISI 2021].....	19
Abbildung 1-3: Veranschaulichung der grundsätzlichen Kritikalität der Wasserversorgung in Abhängigkeit von der Wassernachfrage und der Besiedlungsdichte (Fläche, ländlich, urban). ....	22
Abbildung 1-4: Studienrahmen und Vorgehen. ....	24
Abbildung 2-1: H <sub>2</sub> -Startnetz-Studie: Potenziale für Wasserstoffbereitstellung und -verwendung (in TWh).30	
Abbildung 2-2: H <sub>2</sub> -Startnetz-Studie: Technische Potenziale für mögliche Wasserstoffbedarfe der Industrie. ....	31
Abbildung 2-3: H <sub>2</sub> -Startnetz-Studie: Technische Potenziale für Wasserstoff im Verkehr.....	32
Abbildung 2-4: H <sub>2</sub> -Startnetz-Studie: Technische Potenziale für Fernwärme. ....	32
Abbildung 2-5: H <sub>2</sub> -Startnetz-Studie: Potenziale für die Rückverstromung von Wasserstoff. ....	33
Abbildung 2-6: Ermittelte Wasserstofferzeugungspotenziale nach Landkreisen und Städten in Brandenburg. ....	34
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Wasserströme im Kontext der Elektrolyse. ....	36
Abbildung 2-8: Teilreaktionen innerhalb der unterschiedlichen Elektrolysezellen.....	38
Abbildung 2-9: Mögliche Schritte der Vorbehandlung und Aufbereitung im Rahmen der Wasserbereitstellung für die Elektrolyse (Beispiel: PEMEL).....	47



Abbildung 2-10: Schematische Darstellung der Enthärtung mittels Ionenaustauscherharz. ....	49
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der Umkehrosmose. ....	50
Abbildung 2-12: Funktionsschema Membranentgasung. ....	51
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der Wasserversorgung (inkl. -aufbereitung) eines Elektrolyseurs bei der Nutzung von Rohwasser aus unterschiedlichen Quellen. ....	54
Abbildung 2-14: Konzept A: Wasserströme für Wasseraufbereitung und Elektrolyse. ....	60
Abbildung 2-15: Konzept B: Wasserströme für Wasseraufbereitung und Elektrolyse. ....	60
Abbildung 2-16: Konzept C: Wasserströme für Wasseraufbereitung und Elektrolyse für ein System mit Verdampfungskühlung. ....	61
Abbildung 2-17: Spezifischer Wasserbedarf in Abhängigkeit zu unterschiedlichen Anlagendesigns. ....	62
Abbildung 2-18: Abschätzung mittlerer Wasserbedarfe für die H <sub>2</sub> -Erzeugungspotenziale und Elektrolysekonzepte in den Regionen. ....	64
Abbildung 3-1: Übersicht zu den Auswertungen zum Wasserhaushalt Brandenburg. ....	67
Abbildung 3-2: Kreislaufschema Niedrigwasservorsorge & Niedrigwassermanagement. ....	72
Abbildung 3-3: Jahreswerte der korrigierten Niederschlagshöhe [mm] im Land Brandenburg. ....	75
Abbildung 3-4: Niederschlagsdiagramme an zwei exemplarisch gewählten Stationen in Brandenburg mit Gegenüberstellung der langjährigen monatlichen Niederschlagsverteilung 1981– 2010 zu den Monatsniederschlägen im Zeitraum 11/2017 – 03/2019. ....	76
Abbildung 3-5: Bilanzierungsschema zur Ermittlung der Grundwasserdargebots. ....	77
Abbildung 3-6: Verfügbares Grundwasserdargebot [m <sup>3</sup> /d] bei mittleren Verhältnissen. ....	78
Abbildung 3-7: Auslastungsgrad [%] des Grundwasserdargebots bei mittleren Verhältnissen. ....	79
Abbildung 3-8: Auslastungsgrad [%] für das Trockenwetterszenario. ....	80
Abbildung 3-9: Trend der Jahresmittelwerte der Grundwasserstände in cm/a in den Grundwasserleiterkomplexen 1 und 2 (Reihen 1976–2020). ....	82
Abbildung 3-10: Karte der Flussgebiete und Pegel der Niedrigwasserampel in Brandenburg. ....	85
Abbildung 3-11: Einzugsgebiet des Pegels Rathenow / Untere Havel (links) und Auswertung der Unterschreitungsdauern (rechts). ....	86
Abbildung 3-12: Abflussganglinie am Pegel Rathenow/ Untere Havel für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel. ....	86
Abbildung 3-13: Abflussganglinie am Pegel Rhinow / Rhin für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel. ....	87
Abbildung 3-14: Abflussganglinie am Pegel Leibsch / Spree für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel. ....	88
Abbildung 3-15: Abflussganglinie am Pegel Hohensaaten-Finow / Oder für den Zeitraum 2008–2023 mit Darstellung der Warnstufen der Niedrigwasserampel. ....	89
Abbildung 3-16: Statistische Daten zur Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin. ....	91
Abbildung 3-17: Sankey-Diagramm des Wasserhaushalts für Brandenburg (oben) und Berlin (unten): Wassergewinnung (links) und Wasserabgabe bzw. -nutzung (rechts). ....	92
Abbildung 3-18: Öffentliche und nicht-öffentliche Wassergewinnung 2019 nach Landkreis. ....	93

Abbildung 3-19: Wasseraufkommen (Eigengewinnung und Fremdbezug) nach Wirtschaftszweig.....	94
Abbildung 3-20: Wassereinsatz in der Industrie in Brandenburg 2019. ....	94
Abbildung 3-21: Übersicht großer Wasserentnehmer in Brandenburg. ....	96
Abbildung 4-1: Einordnung der ermittelten (potenziellen) Wasserbedarfe der H <sub>2</sub> -Erzeugung in Brandenburg im Jahr 2045 im Vergleich zur heutigen Wassergewinnung und -nutzung in Brandenburg und Berlin.....	101
Abbildung 4-2: Gegenüberstellung der für eine künftige H <sub>2</sub> -Produktion in Brandenburg im Jahr 2045 für die Elektrolyse benötigten Wassermengen mit der heutigen Wassergewinnung nach Landkreis. ....	102
Abbildung 4-3: Anteil des potenziellen Wasserbedarfs für eine künftige H <sub>2</sub> -Produktion in Brandenburg im Jahr 2045 an der heutigen Wassergewinnung pro Landkreis. ....	102
Abbildung 4-4: Übersicht Fallbeispiel 1.....	110
Abbildung 4-5: Ausgewählte Projektansätze für regionale H <sub>2</sub> Nutzung (Erzeugung und Bedarfe) aus der H <sub>2</sub> -Marktplatz Datenbank.....	111
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts eines 5-MW <sub>el</sub> -Elektrolyseurs in Fallbeispiel 1. ....	113
Abbildung 4-7: Vergleich potenzieller Wasserbedarf für gesamten Mobilitätssektor in Brandenburg vs. Wasserabgabe an Letztverbraucher über das Leitungsnetz im Jahr 2019. ....	115
Abbildung 4-8: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 1 (5 MW <sub>el</sub> -Anlage). ....	116
Abbildung 4-9: Übersicht Fallbeispiel 2.....	117
Abbildung 4-10: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts eines 100 MW <sub>el</sub> -Elektrolyseurs in Fallbeispiel 2. ....	118
Abbildung 4-11: Anteil Abwassermenge an Wasseraufkommen in Berlin und Brandenburg für das Jahr 2019. ....	121
Abbildung 4-12: Kommunale Kläranlagen in Brandenburg.....	122
Abbildung 4-13: Vergleich Abwasserbedarf für 100-MW <sub>el</sub> -Elektrolyse mit existierenden Kläranlagen in Brandenburg. ....	123
Abbildung 4-14: Vergleich Abwasseraufkommen vs. potenzieller Abwasserbedarf für 7,8 GW <sub>el</sub> H <sub>2</sub> -Produktion in Brandenburg. ....	123
Abbildung 4-15: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 2 (100 MW <sub>el</sub> -Anlage). ....	125
Abbildung 4-16: Übersicht Fallbeispiel 3.....	126
Abbildung 4-17: Standort der PCK Raffinerie in Schwedt. ....	128
Abbildung 4-18: Schematische Darstellung des generischen Anlagenkonzepts einer 1 GW <sub>el</sub> -Elektrolyseurs in Fallbeispiel 3. ....	129
Abbildung 4-19: Gegenüberstellung genehmigter / entnommener Wassermengen der PCK Raffinerie & LEIPA – Vergleich mit erforderlichen Rohwassermengen für eine 1-GW <sub>el</sub> - bzw. 10-GW <sub>el</sub> -Elektrolyse. ....	134
Abbildung 4-20: Infografik zur Einordnung der Kennwerte von Fallbeispiel 3 (1.000 MW <sub>el</sub> -Anlage). ....	136
Abbildung A-1: Prozessübersicht der Schmutzwasser-Plasmalyse.....	164
Abbildung A-2: Inputs und Outputs der Schmutzwasser-Plasmalyse.....	164

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Übersicht unterschiedlicher Wasserelektrolyse-Technologien .....	38
Tabelle 2-2: Übersicht untersuchter Elektrolysehersteller nach Technologie .....	39
Tabelle 2-3: Anforderungen nach ASTM-Standard D1193 2011 .....	43
Tabelle 2-4: Technischen Spezifikationen und Grenzwerte für Verunreinigungen für Elektrolyseure der Firma Sunfire .....	44
Tabelle 2-5: Übersicht: Ermittelte Wasserbedarfe nach Elektrolysetechnologie .....	45
Tabelle 2-6: Übersicht: Eigenschaften unterschiedlicher Rohwasserquellen und Auswirkungen auf Wasseraufreinigung .....	53
Tabelle 2-7: Qualitative Übersicht unterschiedlicher Kühlstrategien.....	56
Tabelle 2-8: Kurzbeschreibung unterschiedlicher potenzieller Kühlungsstrategien für Elektrolyseure .....	56
Tabelle 2-9: Vergleich unterschiedlicher Anlagenkonzepte hinsichtlich ihrer Wasserbilanz.....	63
Tabelle 3-1: Übersicht verfügbarer Studien und Statistiken .....	68
Tabelle 3-2: Wasserentnahme in Mio. m <sup>3</sup> /a der größten Wasserentnehmer in der Region.....	97
Tabelle 4-1: Übersicht & Konzeption der Fallbeispiele als Grundlage der weiterführenden Diskussion....	104
Tabelle 4-2: Konzeption der Fallbeispiele – allgemeine Annahmen.....	105
Tabelle 4-3: Ausgewählte Projektbeispiele aus dem H <sub>2</sub> -Marktplatz.....	112
Tabelle 4-4: (Roh-)Wasserbedarfe unterschiedlicher PtL-Produktionspfade (Methanol-Route) .....	131
Tabelle A-1: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (AEL) .....	166
Tabelle A-2: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (PEMEL) .....	167
Tabelle A-3: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (HTEL).....	169
Tabelle A-4: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (AEM) .....	169

## ANHANG

### Anhang Exkurs: Schmutzwasser-Plasmalyse zur Produktion von Wasserstoff

Neben der Elektrolyse von Reinwasser bietet das Verfahren der Schmutzwasser-Plasmalyse der Firma Graforce die Möglichkeit, auch aus Abwasser grünen Wasserstoff herzustellen [German Energy Solutions Initiative 2022]. Hierbei wird Strom (aus erneuerbaren Energiequellen) eingesetzt, um stickstoffhaltige Abwasser aus Klär- oder Biogaslagern sowie auch aus Industrieprozessen in elementarem Stickstoff und Wasserstoff zu zerlegen [Graforce 2023].

Im Gegensatz zur bereits von diversen Firmen etablierten Methan- (CH<sub>4</sub>-)Plasmalyse (eine Form der Methanpyrolyse<sup>66</sup>) wird bei Anwendung dieser Technologie Stickstoff (NH<sub>3</sub>) aus konzentriertem, ammoniumhaltigem Abwasser in die Gasphase überführt und in einem hochfrequenten Spannungsfeld (= Plasma) zerlegt. Die dabei entstehenden Gase werden anschließend durch eine Gasmembran separiert, ggf. gereinigt und stehen für den Einsatz in diversen Endanwendungen zur Verfügung.

Die aktuell von der Firma Synreform (bzw. Graforce)<sup>67</sup> angebotenen Plasmalyse-Anlagen zur Reduktion des Stickstoffgehalts in Abwässern bei gleichzeitiger Produktion von Wasserstoff weisen gegenwärtig nach Unternehmensangaben Kapazitäten von etwa von 5 bis 100 m<sup>3</sup>/h (= 5.000–100.000 l/h) (Schmutzwasser) auf.

Die (weltweit) erste Pilotanlage dieser Technologie wurde im Klärwerk Waßmannsdorf (Brandenburg) mit einem Durchsatz von 3 m<sup>3</sup>/h (= 3.000 l/h) Schmutzwasser betrieben. Die theoretisch erzeugbare Menge Wasserstoff wurde von Unternehmensseite mit 50 kg/Tag angegeben, ist aber stark von der Stickstoffkonzentration im Abwasser sowie der Abwassermenge abhängig. Gegenwärtig ist die Anlage zu Testzwecken zur Behandlung von Brüdenwasser nach Bremerhaven ausgeliehen.

Abbildung A-1 zeigt beispielhaft die Prozessübersicht des Verfahrens für ammoniumhaltiges Abwasser aus einem Faulturm<sup>68</sup> einer Kläranlage, aus welchem Stickstoff und Wasserstoff gewonnen wird. Dazu wird in einem ersten Schritt der Klärschlamm aus der Anlage gespült und entwässert. Die Anforderung für einen sinnvollen Betrieb der Anlage liegt dabei bei > 1 kg gelöstem Ammonium pro m<sup>3</sup> Zentratwasser. Außerdem muss der Zentratwasserstrom extern von etwa 35–40 °C auf die Prozesstemperatur von ca. 75 °C vorgeheizt werden. Das Zentratwasser wird im Folgenden weiter aufkonzentriert, sodass ein Konzentrat mit hohem Gehalt an gelöstem Ammonium entsteht. Im Rahmen dieses Behandlungsschrittes erhält man auch „gereinigtes“ Abwasser mit einer deutlich reduzierten NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-Fracht, das in der Regel der Abwasseraufbereitung im Rahmen der Kläranlage wieder zugeführt werden kann. Das stark ammoniumhaltige Konzentrat wird anschließend in dem eigentlichen Kernprozessschritt in die Gasphase überführt und durch ein Plasma bei hoher Temperatur in Stickstoff und Wasserstoff aufgespalten. Abschließend findet die Gastrennung mittels Membranen sowie ggf. die Reinigung und Kompression der

<sup>66</sup> Neben Graforce bieten beispielsweise Monolith Materials, Hazer, BASF, Gazprom und weitere Technologien zur Methan- bzw. Erdgaspyrolyse an. Dabei wird Methan thermisch in festen Kohlenstoff und gasförmigen Wasserstoff gespalten. Durch die hohen Prozesstemperaturen findet keine prozessbedingte Bildung von CO<sub>2</sub> statt.

<sup>67</sup> Die in Berlin beheimatete Firma Graforce beschäftigt aktuell knapp 40 Mitarbeitende. Während der Unternehmensteil Graforce Hydro Carb sich auf die Entwicklung und Vermarktung der Methan-Plasmalyse konzentriert, arbeitet der Unternehmensteil Synreform an der Entwicklung der Stickstoff-Plasmalyse, insb. aus ammoniumhaltigen Abwässern.

<sup>68</sup> Behälter zur kontrollierten und gesteuerten Durchführung anaerober Abbauprozesse, z. B. in Klär- oder Biogasanlagen.

Produktgase statt. Je nach Reinigung und Aufbereitung kann die Anwendung von Wasserstoff von der Verbrennung im Blockheizkraftwerk (BHKW) bis zum Einsatz in der Mobilität reichen.

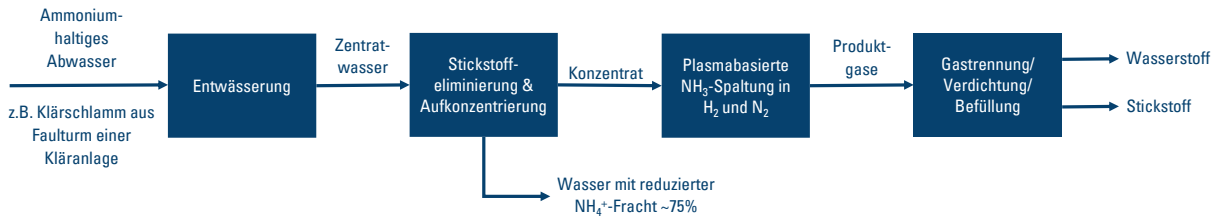


Abbildung A-1: Prozessübersicht der Schmutzwasser-Plasmalyse.

Quelle: LBST nach [Synreform 2022]

Nach Herstellerangaben werden für den Prozess der Ammoniakspaltung im Plasma etwa 20 kWh Strom für die Erzeugung von 1 kg Wasserstoff benötigt. Weitere Energiebedarfe für periphere Geräte belaufen sich auf etwa 3 kWh [Graforce 2023].

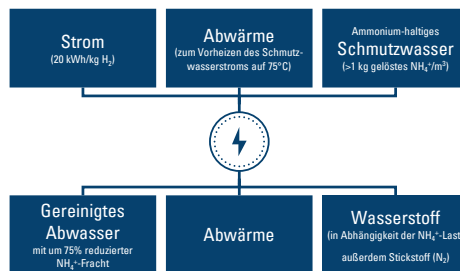


Abbildung A-2: Inputs und Outputs der Schmutzwasser-Plasmalyse.

Quelle: LBST nach [Graforce o. D.]

Neben der oben erwähnten Pilotanlage für den Prozess der Schmutzwasser-Plasmalyse sind aktuell keine weiteren Projekte hierzu bekannt. Die potenziellen Einsatzbereiche fokussieren sich gegenwärtig stärker auf den Markt der Deammonifikation von ammoniumhaltigen Wasserströmen, insbesondere in Kläranlagen. Durch die Stickstoffeliminierung kann in diesen Prozessen die Emission von Lachgas (N<sub>2</sub>O) (THG-Wirkung etwa 300-mal stärker als CO<sub>2</sub>) vermieden werden. Für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage sind dabei insbesondere Wasserquellen mit hohem Stickstoffgehalt zu berücksichtigen. Hierzu zählen beispielsweise Mono-Klärschlammanlagen, Brüdenwasser (mit hoher Stickstoffbelastung), Güllevergärung oder auch Anlagen zur Co-Vergärung mit z. B. Schlachtabfällen oder Abwasser aus der galvanischen oder Papierindustrie. Kommunale Abwässer in klassischen Kläranlagen reichen dagegen allein nicht aus.

Für die großskalige Wasserstoffproduktion erscheinen neben der Wasserelektrolyse dagegen auch die Methan-Plasmalyse bzw. -pyrolyse<sup>69</sup> geeignete Verfahren zu sein, wenn ausschließlich Biomethan oder

<sup>69</sup> Während die Methanpyrolyse (auch Kvaerner-Prozess) allgemein die thermische Zersetzung von Methan oder auch anderen Kohlenwasserstoffen in Kohlenstoff und Wasserstoff beschreibt, beschreibt die Plasmalyse jene Pyrolyseprozesse, in denen die erforderliche Energie unter Einsatz eines Plasmas erzeugt wird.



ggf. auch bestimmte schwer verwertbare Reststoffe (z. B. Rotorblätter von Windkraftanlagen<sup>70</sup>) als Ausgangsmaterialien in dem Prozess eingesetzt werden. In jedem Fall ist vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele der Einsatz erneuerbarer Energien die Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Wasserstoffproduktion, um die Treibhausgasemissionen der Prozesse gegenüber der heutigen, meist erdgasbasierten Wasserstoffproduktion mittels Dampfreformierung zu reduzieren.

---

<sup>70</sup> Die Neue Energie Premnitz (NEP) plant im brandenburgischen Premnitz eine entsprechende Verwertungsanlage ausgemusterter Rotorblätter unter Nutzung der Plasmagasifizierungs-Technologie der Firma Plagazi mit einer jährlichen Produktionskapazität von bis zu 7.500 t/a Wasserstoff [Reiner Lemoine Institut et al. 2023]. Bei dem Verfahren werden Abfälle nicht verbrannt, sondern bei sehr hohen Temperaturen (> 3000 °C) in die Bestandteile zerlegt. Weitere Hersteller mit ähnlichen Verfahren sind etwa InEnTec oder SGH2.

**Anhang: Herstellerangaben zu relevanten Wasserparametern**

Tabelle A-1: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (AEL)

#	AEL-Hersteller	Produktname	Modul / Produktgröße [MW]	Produktionsmenge H <sub>2</sub> [kg/h]	Wasserbedarf (Prozesswasser) [l/kg H <sub>2</sub> ]	Wassertemperatur [°C]	Wasserdruck [bara]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Qualitätsanforderungen <sup>1</sup>	Wasseraufbereitung verfügbar	Angaben zu Kühlwasserbedarf	Quelle
1	Asahi Kasei	Aqualyzer 10	10,0	179,8	10,01	k. A.	k. A.	k. A.	Deionisiertes Wasser	k. A.	k. A.	[Asahi Kasei 2023]
2	Cockerill Jingli Hydrogen	DQ1000	5,0	89,9	10,23	k. A.	k. A.	< 1	Demineralisiertes Wasser	Optional	k. A.	[John Cockerill 2023]
3	Cummins Inc.	HySTAT 100-10	0,5	9,0	13–17 (inkl. H <sub>2</sub> O-Reinigung)	k. A.	k. A.	k. A.	Deionisiertes Wasser	Integriert	k. A.	[Cummins 2021]
4	Green Hydrogen Systems (GHS)	HyProvide A-Series 180	~0,8	16,2	33,4 (Leitungswasser)	k. A.	k. A.	> 5	Leitungswasser	Integriert		[GHS 2023]
		HyProvide® X-1200	~6,0	107	9,5	k. A.	k. A.	< 5	Demineralisiertes Wasser	Optional	Max. Kühlleistung (flüssig): 1.800 kWh <sub>th</sub>	[GHS 2023b]
5	HydrogenPro	High Pressure Alkaline Electrolysers	5,0	90	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	Demineralisiertes Wasser	Integriert	k. A.	[Hydrogen Pro 2019]
6	McPhy Energy	McLyzer 3200	16,0	290	~11,1	k. A.	k. A.	k. A.	Demineralisiertes Wasser	Integriert	Kühlaggregate nicht integriert	[McPhy 2020, McPhy 2023]
7	Nel Hydrogen	A-Series Atmospheric AEL	18,0	350	~11,1	k. A.	k. A.	k. A.	Demineralisiertes Wasser	k. A.	k. A.	[Nel 2020, Nel 2023]
8	Peric	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
9	Sunfire	HYLINK ALKALINE	10,0	195	9-2.9,5	45°C	atm.	<0,5	Demineralisiertes Wasser (techn. Spezifikationen zu beachten)	Bereitstellung durch Kunden	BoL: 150 m³/h EoL (10 years): 285 m³/h	[Sunfire 2022, Sunfire 2024]
10	thyssenkrupp nucera	tkn 20 MW AWE	20,0	360	< 11,1	k. A.	k. A.	k. A.	Demineralisiertes Wasser	k. A.	k. A.	[Thyssenkrupp 2022]

<sup>1</sup> Technische Spezifikationen und Grenzwerte der jeweiligen Hersteller sind einzuhalten.

Hinweis: 11,1 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entspricht 1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>.

BoL: Beginning of Life, EoL = End of Life

Tabelle A-2: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (PEMEL)

#	PEMEL- Hersteller	Produkt- name	Modul / Produkt- größe [MW]	Produktions- menge [kg/h]	H <sub>2</sub>	Wasserbedarf (Prozesswasser) [l/kg H <sub>2</sub> ]	Wasser- temperatur [°C]	Wasser- druck [bara]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Qualitätsan- forderungen <sup>1</sup>	Wasseraufbereitung verfügbar	Angaben Kühlwasserbedarf	zu Quelle
1	Cummins Inc.	HyLYZER 1000-30	5	90	9	13–17 (inkl. H <sub>2</sub> O- Reinigung)	k. A.	k. A.	k. A.	Demineralisiertes Wasser	Bei > 5 MW nicht integriert	Max. 2.500 l/min (5-40 °C, max. delta 10 °C)	[Cummins 2021, Cummins 2021b]
2	Elogen	E1000	5	90	< 22,2		5–35	2–6	k. A.	Leitungswasser (98/83/EG)	Integriert (UO und EDI)	k. A.	[Elogen 2021]
3	H2B2	EL800N	4 (4 Zell- stacks)	72	< 11,1		5–40	3–4	> 10 MΩcm (<0.1 µS/cm); TOC < 30 ppb	Demineralisiertes Wasser	Optional	Wärmemanagment integriert (kein Kühlwasserbedarf)	[H2B2 2022]
4	H-Tec Systems	ME450	1	18,75	13,9		k. A.	k. A.	k. A.	Leitungswasser TrinkwV 2020   EU- Richtlinie 2020/2184-EU	Integriert	Wärmeleistung: 170 kW (BoL) und 350 kW (EoL) 57 °C Übergabe an Kundensystem	[H-TEC 2023]
4	H-Tec Systems	2 MW HCS	2	37,5	16,0		k. A.	k. A.	k. A.	Leitungswasser EU-Richtlinie 2020/2184-EU VE-Wasser (vollentsalzt) ohne Wasserauf- bereitung	Optional	k. A.	[H-TEC 2023b]
5	ITM POWER	HGAS3SP	2	36	< 25		k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	Integriert		[ITM Power 2022]
6	Kyros	900	1 (6 Zell- stacks)	15,6	12,2		k. A.	k. A.	k. A.	Leitungswasser (EU-Richtlinie 2020/2184-EU)	Integriert	Kühlaggregate und Wärmetauscher integriert	[Kyros 2023]

#	PEMEL- Hersteller	Produkt- name	Modul / Produkt- größe [MW]	Produktions- menge [kg/h]	H <sub>2</sub>	Wasserbedarf (Prozesswasser) [l/kg H <sub>2</sub> ]	Wasser- temperatur [°C]	Wasser- druck [bara]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Qualitätsan- forderungen <sup>1</sup>	Wasseraufbereitung verfügbar	Angaben Kühlwasserbedarf	zu Quelle
7	Nel Hydrogen	C30	0,15	2,7		9,9	5–40	2– 5	Mind. ASTM Typ II Empfohlen: ASTM Typ I	VE-Wasser	Optional (UO/EDI)	Flüssig. Kühlmedium, 5 to 35°C, max. 200 l/min	[Nel 2021b]
7	Nel Hydrogen	MC500	2,5	44,25		24,9	5–35	3,7–5,5	k. A.	Leitungswasser	Umkehrosmose und Elektrodeionisation integriert	k. A.	[Nel 2021]
8	Peric	k. A.	k. A.	k. A.		k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
9	Plug Power	Plug EX- 2125D	5	88,9		13	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	Integriert	k. A.	[Plug Power o. D.]
10	Siemens Energy	Silyzer 300 (24 Module)	17,5	335		10	k. A.	k. A.	k. A.	VE-Wasser	Integriert	k. A.	[Siemens Energy 2022]

<sup>1</sup> Technische Spezifikationen und Grenzwerte der jeweiligen Hersteller sind einzuhalten.

Hinweis: 11,1 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entspricht 1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>.

Tabelle A-3: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (HTEL)

#	HTEL-Hersteller	Produktname	Modul Produktgröße [MW]	/	Produktionsmenge H <sub>2</sub> [kg/h]	Wasserbedarf (Prozesswasser) [l/kg H <sub>2</sub> ]	Wassertemperatur [°C]	Wasserdruck [bara]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Qualitätsanforderungen <sup>1</sup>	Wasseraufbereitung verfügbar	Angaben zu Kühlwasserbedarf	Quelle
1	Elcogen AS	k. A.	k. A.		k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
2	Topsoe	SOEC 100 MW	100		2877,0	9,4	k. A.	k. A.	< 0.2	Demineralisiertes Wasser	k. A.	Geschlossener Dampfkreislauf	[Topsoe 2021]
3	Sunfire	HYLINK SOEC	2,68		67,4	~9	150–200 (Dampf)	3,5–10 (Dampf)	< 0.2	Demineralisiertes Wasser	Bereitstellung durch Kunden	geschlossener Dampfkreislauf, Kondensat zur Ableitung in Kläranlagen	[Sunfire 2021, Sunfire 2024]
4	Sylfen	k. A.	k. A.		k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

<sup>1</sup> Technische Spezifikationen und Grenzwerte der jeweiligen Hersteller sind einzuhalten.

Hinweis: 11,1 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entspricht 1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>.

Tabelle A-4: Angaben zu Wasserbedarf und Qualitätsanforderung (AEM)

#	AEMEL-Hersteller	Produktname	Modul Produktgröße [MW]	/	Produktionsmenge H <sub>2</sub> [kg/h]	Wasserbedarf (Prozesswasser) [l/kg H <sub>2</sub> ]	Wassertemperatur [°C]	Wasserdruck [bara]	Leitfähigkeit [µS/cm]	Qualitätsanforderungen <sup>1</sup>	Wasseraufbereitung verfügbar	Angaben zu Kühlwasserbedarf	Quelle
1	Enapter (DE)	AEM Multicore	1,008		18,8	10,1 (0,19 m <sup>3</sup> /h)	6–30	1.5–5	k. A.	Aufgereinigtes Wasser	k. A.	k. A.	[Enapter 2022]
2	EVOLOH (US)	k. A.	k. A.		k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

<sup>1</sup> Technische Spezifikationen und Grenzwerte der jeweiligen Hersteller sind einzuhalten.

Hinweis: 11,1 l/kg<sub>H<sub>2</sub></sub> entspricht 1 l/Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>.





Ludwig Bolkow Systemtechnik

Ludwig-Bolkow-Systemtechnik GmbH (LBST)  
Daimlerstr. 15 | 85521 Ottobrunn | Germany [www.LBST.de](http://www.LBST.de)