

# Berichtsblatt BWPLUS

## Analyse verschiedener Versorgungsoptionen Baden-Württembergs mit Wasserstoff und Wasserstoffderivaten

von

Marius Holst, Ombeni Ranzmeyer, Tobias Eißler, Connor Thelen,  
Tim Ruckteschler, Lucas Edenhofer, Verena Fluri, Christoph Kost

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Förderkennzeichen: L75 24115

Laufzeit: 15.05.2024 - 30.11.2024

Finanziert aus Landesmitteln, die der Landtag Baden-Württemberg beschlossen hat.

März 2025



**Baden-Württemberg  
Ministerium für Umwelt, Klima  
und Energiewirtschaft**

## 1 Kurzbeschreibung der Projektergebnisse

Im Projekt „Analyse verschiedener Versorgungsoptionen Baden-Württembergs mit Wasserstoff und Wasserstoffderivaten“ wurden verschiedene Wege zur Bereitstellung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff sowie dessen Derivaten (Methanol und Ammoniak) für Baden-Württemberg bis 2032 und 2040 untersucht. Die Analyse umfasste eine techno-ökonomische Bewertung der Produktion an 16 internationalen und vier nationalen Standorten sowie des Imports über geplante Pipelines und den Seeweg. Acht internationale Exportregionen (Algerien, Marokko, Spanien, Schottland, Norwegen, Finnland, VAE und Kanada) wurden hinsichtlich ihres EE-Potenzials analysiert.

Eine zentrale Erkenntnis ist, dass der Import von gasförmigem Wasserstoff (gH<sub>2</sub>) über Pipelines langfristig die kostengünstigste Option darstellt. Die prognostizierten Bereitstellungskosten liegen 2032 zwischen 3,2 und 6,0 EUR/kg und sollen bis 2040 auf 2,4 bis 4,2 EUR/kg sinken, was auf höhere Pipeline-Auslastung und technologischen Fortschritt zurückzuführen ist. Besonders europäische Regionen wie Schottland, Finnland und Spanien bieten Kostenvorteile durch kürzere Transportwege. Die lokale Wasserstoffproduktion in Baden-Württemberg ist konkurrenzfähig, wird jedoch durch begrenzte Flächenpotenziale für EE-Anlagen eingeschränkt. Die Erzeugungskosten liegen 2032 zwischen 4,3 und 4,9 EUR/kg und 2040 zwischen 3,4 und 3,8 EUR/kg. Angesichts eines steigenden Wasserstoffbedarfs auf rund 90 TWh im Jahr 2040 wird erwartet, dass ein Großteil des Wasserstoffbedarfs importiert werden muss.

Der Import von Wasserstoff über Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>) und Ammoniak (NH<sub>3</sub>) ist teurer, bietet jedoch Flexibilität. Die höheren Kosten ergeben sich aus komplexen Anlagen und signifikanten Investitionen in Infrastruktur. Die Studie analysierte auch die Kosten für Ammoniak (820 bis 1.180 EUR/Tonne 2032, 610 bis 1.400 EUR/Tonne 2040) und Methanol (960 bis 1.370 EUR/Tonne 2032, 750 bis 1.260 EUR/Tonne 2040).

## 2 Durch die Projektergebnisse erzielte Fortschritte

Die Projektergebnisse liefern eine fundierte techno-ökonomische Grundlage für die zukünftige Wasserstoffstrategie Baden-Württembergs. Im Projekt wurden kosteneffiziente Importrouten und -regionen identifiziert und die Bedeutung des geplanten europäischen Wasserstoffnetzes und des deutschen Wasserstoff-Kernetzes für Baden-Württemberg herausgearbeitet. Die Analyse der lokalen Erzeugungspotenziale und deren Grenzen trägt zur realistischen Einschätzung der zukünftigen Energieversorgung bei.

Weiterhin werden die Bereitstellungskosten verschiedener Energieträger (gasförmiger und flüssiger Wasserstoff, Ammoniak, Methanol) transparent dargestellt und verglichen.

Die Ergebnisse des Projektes unterstreichen die Notwendigkeit von Wasserstoffimporten zur Deckung des langfristigen Bedarfs in Baden-Württemberg und betonen die Bedeutung des Aufbaus von Energiepartnerschaften.

- Im Projekt wurde ein detaillierter techno-ökonomischer Vergleich verschiedener Optionen für die Wasserstoffversorgungskette, einschließlich verschiedener Produktionsstandorte, Transportmethoden (Pipeline vs. Schiff) und Energieträger (gasförmiges H<sub>2</sub>, LH<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, MeOH) durchgeführt. **Dies**

### **ermöglicht einen fundierteren Entscheidungsprozess für die zukünftige Energiestrategie Baden-Württembergs.**

- Die GIS-gestützte Analyse der Potenziale für erneuerbare Energien in acht internationalen Exportregionen bietet ein räumlich explizites Verständnis dafür, wo eine kosteneffiziente Produktion von grünem Wasserstoff möglich ist, wobei Faktoren wie Wind- und Solarressourcen sowie die Verfügbarkeit von Land berücksichtigt werden. **Dies hilft bei der Festlegung von Prioritäten für potenzielle Importpartner.**
- Die Projektergebnisse zeigen die Grenzen einer alleinigen lokalen Wasserstoffproduktion in Baden-Württemberg auf und betonen die Notwendigkeit erheblicher Importmengen zur Deckung des prognostizierten Bedarfs. **Dies unterstreicht, wie wichtig es ist, sich auf internationale Kooperationen und den Aufbau einer robusten Importinfrastruktur zu konzentrieren.**
- Des Weiteren wird die entscheidende Rolle des sich entwickelnden europäischen Wasserstoff-Backbone und des deutschen Wasserstoff-Kernnetzes für die zukünftige Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit Baden-Württembergs mit Wasserstoff basierend auf den Projektergebnissen hervorgehoben.

## **3 Nutzen und praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen**

Die in dem Projekt erstellte Studie liefert eine detaillierte, datengestützte Grundlage für die in der „Wasserstoff-Roadmap Baden-Württemberg“ skizzierten strategischen Stoßrichtungen. Sie bietet wertvolle Erkenntnisse zur Notwendigkeit von Wasserstoffimporten, da Baden-Württemberg stark auf diese angewiesen sein wird; dies unterstreicht die Erkenntnis, dass die lokale Produktion erneuerbarer Energien den zukünftigen Wasserstoffbedarf nicht allein decken kann.

Die Studie kommt zu dem Schluss, dass der Pipelinetransport langfristig die kostengünstigste Option für die Einfuhr von gasförmigem Wasserstoff darstellt. Dies stimmt mit dem Schwerpunkt der Roadmap überein, die eine zuverlässige Wasserstoffversorgung über europäische Transportnetze auf Basis von Pipelines anstrebt, insbesondere durch relevante Pipelinekorridore wie SouthH2 und H2med.

Zudem liefert die Studie spezifische Kostenprognosen für verschiedene Versorgungspfade bis 2032 und 2040, die als Grundlage für wirtschaftliche Überlegungen zur Umsetzung des Fahrplans dienen können. Die Analyse der acht internationalen Exportregionen, von denen einige bereits Energiepartnerschaften mit Baden-Württemberg haben, unterstützt die Strategie der Roadmap, internationale Kooperationen auszubauen und Prioritäten für Partnerschaftsbemühungen zu setzen. Obwohl die Studie die Grenzen der lokalen Produktion aufzeigt, wird auch deren Potenzial für kostengünstige Wasserstoffherzeugung in Baden-Württemberg anerkannt, insbesondere für die kurzfristige Unterstützung und Markteinführung.

Ein wichtiger Punkt der Analyse ist die anfänglich geringe Auslastung der Wasserstoff-Pipeline-Infrastruktur im Jahr 2032, die die Transportkosten in die Höhe treibt. Um dem entgegenzuwirken, könnten gezielte Anreizprogramme oder politische Maßnahmen entwickelt werden, die die frühe Wasserstoffnachfrage und -abnahme in Baden-Württemberg stimulieren, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit von Pipeline-Importen in den ersten Jahren der Wasserstoffwirtschaft zu verbessern.

Zusätzlich wird auf die Herausforderung hingewiesen, dass der Zugang zum geplanten Wasserstoff-Kernnetz in der Anfangsphase für alle Regionen in Baden-Württemberg begrenzt ist. Hier könnten Machbarkeitsstudien und die Entwicklung regionaler Wasserstoff-Hub-Konzepte, die lokale Elektrolyse und flexible Transportlösungen einbeziehen, einen umfassenden Zugang zu Wasserstoff über die Hauptpipelinetrassen hinaus ermöglichen. Schließlich werden auch potenzielle Entwicklungsprojekte in den Bereichen Transportlogistik und Technologie-Upscaling angesprochen.

## 4 Konzept zum Ergebnistransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die techno-ökonomischen- und GIS-Analysen des Projektes können als Grundlage für weitere Forschungsprojekte dienen, beispielsweise zur Untersuchung spezifischer Anwendungsfälle von Wasserstoff in verschiedenen Industriebranchen in Baden-Württemberg (z.B., Papier-, Zement-, Chemieindustrie). Die Erkenntnisse über die Kosten und Potenziale verschiedener Wasserstoffderivate können für Unternehmen relevant sein, die Ammoniak oder Methanol als Rohstoffe oder Energieträger in Betracht ziehen.

Der methodische Rahmen und die H2ProSim-Toolbox, die in der Studie zur Modellierung von Wasserstoffversorgungsketten verwendet wurden, können für die Analyse ähnlicher Szenarien in anderen deutschen Bundesländern oder sogar europäischen Regionen angepasst werden. Durch die Anpassung der Eingabeparameter in Bezug auf die lokalen erneuerbaren Energieressourcen, die Verfügbarkeit der Infrastruktur und die wirtschaftlichen Bedingungen kann das Modell genutzt werden, um optimale Wasserstoffversorgungsoptionen für verschiedene geografische Gebiete zu bewerten, die vor ähnlichen Herausforderungen der Energiewende stehen.

Die GIS-gestützte Methode zur Bewertung des Wind- und Photovoltaikpotenzials, einschließlich der Ausschlusskriterien und der Berücksichtigung der Nähe zur Infrastruktur, kann als Vorlage für andere Regionen dienen, die geeignete Standorte für Projekte zur Nutzung erneuerbarer Energien als Grundlage für die Erzeugung von grünem Wasserstoff suchen. Dieser Ansatz bietet eine strukturierte Möglichkeit, die Eignung von Flächen zu bewerten und dabei ökologische und logistische Zwänge zu berücksichtigen.

Die Projektergebnisse, insbesondere die Kostenvergleiche zwischen verschiedenen Technologien und Versorgungsketten, können Bereiche aufzeigen, in denen weitere technologische Entwicklung und Innovation am nötigsten sind, um die Effizienz zu verbessern und die Kosten zu senken. So könnten beispielsweise die relativ höheren Kosten von LH<sub>2</sub>- und NH<sub>3</sub>-Routen im Vergleich zu Pipelines weitere Forschung und Entwicklung in den Bereichen Verflüssigung, Ammoniak-Cracking und Transporttechnologien anregen. Dies steht im Einklang mit dem Schwerpunkt des Fahrplans auf der Förderung von Forschung und Entwicklung.

Des Weiteren können die Projektergebnisse Bildungseinrichtungen und politischen Entscheidungsträgern als Informationsquelle dienen, um die Komplexität der Wasserstoffversorgung zu verstehen und fundierte Entscheidungen zu treffen.

Durch die Veröffentlichung der barrierefreien PDF-Version über den Publikationsdienst der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg wird eine breite Zugänglichkeit der Ergebnisse gewährleistet.