

ENTWICKLUNG EINES GLOBALEN MARKTMODELLS FÜR WASSERSTOFF

Philipp ORTMANN¹, Stefan REUTER¹, Stefan STRÖMER¹

Motivation und Fragestellung

Wasserstoff wird einen essenziellen Bestandteil des zukünftigen Energiesystems darstellen. Derzeit liegen die Erzeugungskosten von grünem Wasserstoff deutlich über jenen von fossilen Alternativen [1]. Vor allem in Mitteleuropa sind die Erzeugungspotentiale für grünen Wasserstoff beschränkt, weshalb der Import in einem wachsenden Markt eine zunehmende Rolle spielen wird.

In vergangenen Arbeiten wurden die Erzeugungskosten an einzelnen Standorten ermittelt [2] [6] [7], gezielte Importrouten kalkuliert [2] [6], Transportkosten abgeschätzt [1] [2] [6], oder das Flächenpotenzial zur H₂-Erzeugung beurteilt [2]. Die vorliegende Arbeit führt diese vorhandenen Fundamentaldaten in einem globalen Marktmodell zusammen, um eine kostenminimale Gleichgewichtslösung für den weltweiten Wasserstoffhandel zu finden.

Methodik und Daten

Erzeugungskosten & -kapazitäten

Durch Verschneidung der projektierten Wasserstofferzeugungsprojekte laut IEA-Datenbank [5] sowie Daten zu Erzeugungskosten und Flächenpotenzial [2] wird für jede Region der Welt eine Angebotskurve für die Erzeugung von grünem Wasserstoff konstruiert. Somit können den geplanten Erzeugungsprojekten spezifische Kosten zugewiesen werden, die die begrenzte Ressourcenverfügbarkeit berücksichtigen. Abbildung 1 gibt einen Überblick zu den weltweiten H₂-Gestehungskosten.



Abbildung 1: H₂-Erzeugungskosten je Land für das günstigste Potenzial laut [2]

Wasserstoff Nachfrage

Es existieren Schätzungen für die Nachfrage nach Wasserstoff von rund 115 Mt/a im Jahr 2030 [1]. Basierend auf Wirtschaftsindikatoren wird diese Nachfrage auf Regionen verteilt. Es ist zu erwarten, dass die Nachfrage im Jahr 2030 das Angebot an grünem Wasserstoff bei weitem übersteigt, weshalb ein großer Teil des Bedarfs aus fossilen Quellen gedeckt wird.

Transportkosten & -kapazitäten

Basierend auf [1] wurden lineare Kostenfunktionen in Abhängigkeit der Transportdistanz für den Transport via Schiff oder Pipeline angenommen. Annahmegemäß bestehen Schiffsverbindungen zwischen allen Küstenländern sowie Pipelineverbindungen zwischen allen Nachbarländern. Die

¹ AIT Austrian Institute of Technology, Giefinggasse 6 1210 Wien; Kontakt: philipp.ortmann@ait.ac.at

Transportkapazitäten für Schiffsverbindungen wurden unlimitiert angesetzt, während Verbindungen via Pipeline in Europa laut European Hydrogen Backbone [8] festgelegt wurden. Für alle übrigen Nachbarländer wurde eine Transportkapazität, die einer kleinen Pipeline entspricht, angenommen.

Optimierungsframework

IESopt ist ein eigens entwickeltes gemischt-ganzzahliges lineares Energiesystem Optimierungsmodell, das arbiträre Energieträger und -flüsse mit vielfältigen Konversionstechnologien (wie H₂-Elektrolyse, Pumpspeicher Kraftwerke, ...) kombiniert. Das Framework ist in Julia implementiert und ermöglicht – durch die Nutzung von JuMP [3] starke Performancegewinne im Aufbau des Modells², direkte Verknüpfung mit komplexeren Algorithmen zur Betrachtung von stochastischen Unsicherheiten, sowie die Nutzung von Open Source Solvern (wie HiGHS [4]) oder kommerziellen Alternativen je nach Anwendungsfall. Ein Python Wrapper vereinfacht weiters die direkte Integration in übliche Modellierungs-Toolchains.

In der hier betrachteten Konfiguration ergeben sich nicht nur monatliche Kosten für Wasserstoff in jedem einzelnen Land, die als ‚fundamentale Gleichgewichtspreise‘ interpretiert werden können, sondern auch Handelsbilanzen und Transportflüsse, die einem globalen Optimum entsprechen, d.h. in jedem Land wird die Nachfrage möglichst kostengünstig gedeckt. Die Preise ergeben sich aus den marginalen Kosten (Duals), die zur Deckung der marginalen Nachfrage anfallen. Weiters können Schattenpreise für Transportkapazitäten bestimmt werden, die einer möglichen Investitionsbereitschaft entsprechen.

Ergebnisse

Ohne der Implementierung von geplanten EU-Vorgaben zur europäischen Eigenerzeugung wird ein überwiegender Teil der europäischen H₂-Nachfrage durch Importe gedeckt. Daher pendeln sich Preise für Wasserstoff unter den Erzeugungskosten in Mitteleuropa auf etwa 3.5 \$/kg ein, was den Erzeugungskosten in Export-Ländern plus Transportkostenaufschlag entspricht. Die Ergebnisse sind als Annäherung an ein ideales Marktresultat im Jahr 2030 sowie als Proof-of-concept eines globalen H₂-Marktmodells zu verstehen, tatsächliche Preise in einem zukünftigen Markt können aufgrund von nationalen Zielen, Förderungen und Verzerrungen in der Nachfrage ggf. stark abweichen.

Fördergeberhinweis

Diese Arbeit ist Teil des Projekts H2REAL und wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms „Vorzeigeregion Energie“ gefördert, welches von der FFG abgewickelt wird.

Referenzen

- [1] International Energy Agency. “Global Hydrogen Review”, OECD, Paris, 2022.
- [2] G. Brändle, M. Schönfish and S. Schulte, “Estimating Long Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen”, *Applied Energy*, vol. 302, ISSN 0306-2619, 2021.
- [3] M. Lubin, O. Dowson, J.D. Garcia, et al. “JuMP 1.0: recent improvements to a modeling language for mathematical optimization”, *Math. Prog. Comp.*, vol. 15, pp. 581–589, 2023.
- [4] Q Huangfu, J.A.J. Hall, “Parallelizing the dual revised simplex method”, *Math. Prog. Comp.* vol. 10, pp. 119–142, 2018.
- [5] International Energy Agency, Hydrogen Production and Infrastructure Projects Database, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-production-and-infrastructure-projects-database>
- [6] J. Kathan, J. Kapeller, S. Reuter, P. Ortman, A. Rodgarkia-Dara, M. Reger, G. Brändle, C. Gatzen, „Importmöglichkeiten für erneuerbaren Wasserstoff“, *Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie*, 2022.
- [7] PWC Green Hydrogen Cost Tool. Available: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/energy-utilities-resources/future-energy/green-hydrogen-cost.html#data-explorer-tool>
- [8] R. van Rossum, J. Jens, G. La Guardia, A. Wang, L. Kühnen, and M. Overgaag, “European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure Vision covering 28 countries”, Guidehouse, 2022.

² Ein vereinfachtes Modell, das nur Wasserstoff als Energieträger berücksichtigt, besteht bereits aus knapp 20.000 Komponenten und rund 5,7 Mio. Variablen und 11,2 Mio. Nebenbedingungen für den Zeitraum 2025-2050.