

## Informationen zum Elektrolyse-Rechner

Dieses Dokument enthält weiterführende Informationen zum Elektrolyse-Rechner der TH Köln. Im ersten Schritt werden die verwendeten Begriffe bestimmt. Anschließend folgt die Darstellung der Berechnungsmethodik inklusive der den Berechnungen zugrundeliegenden Annahmen sowie die Zusammenstellung der verwendeten Literatur.

## Begriffsbestimmungen

**Nennleistung:** Maximale elektrische Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs im Dauerbetrieb (Betrieb bei Volllast).

**Teillastbegrenzung\*:** Abschaltung des Elektrolyseurs im Teillastbetrieb, sobald die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien die minimale Leistung des Elektrolyseurs unterschreitet (EE-Erzeugung < minimale Leistung Elektrolyse). Die minimale Leistung des Elektrolyseurs ist prozentual bezogen auf die Nennleistung angegeben.

**Maximallastbegrenzung\*:** Begrenzung des Elektrolyseurbetriebs auf die Nennleistung, sobald die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien die angegebene Nennleistung überschreitet (EE-Erzeugung > Nennleistung Elektrolyse).

**Volllaststunden:** Äquivalente Betriebsstunden, welche der Elektrolyseur unter Einbeziehung der Betriebsstunden im Teillastbetrieb innerhalb eines Jahres in Volllast betrieben würde. Die Volllaststunden ergeben sich aus dem Quotienten der im Elektrolyseur genutzten Strommenge ( $MWh_{el}/a$ ) und der Nennleistung ( $MW_{el}$ ).

\*: Die nicht im Elektrolyseur genutzte Strommenge aufgrund von Teillast- oder Maximallastbegrenzung kann anderweitig genutzt werden, z.B. durch Einspeisung in ein Stromnetz

## Methodik

Der Elektrolyse-Rechner der TH Köln basiert auf einem zeitreihenbasierten Ansatz. Dazu bilden Erzeugungszeitreihen der erneuerbaren Energien (EE) in stündlicher Auflösung die Grundlage. Die Betriebsweise des Elektrolyseurs richtet sich direkt nach der erneuerbaren Energieerzeugung, d.h. es besteht eine Zeitgleichheit zwischen Stromerzeugung und Nutzung im Elektrolyseur. Bei der EE-Erzeugung wird zwischen der Stromerzeugung aus Photovoltaik (PV), Onshore-Wind, Offshore-Wind und Wasserkraft in Deutschland unterschieden. Die Standorte wurden dabei so gewählt, dass die sich ergebenden Volllaststunden einem mittleren Erzeugungsstandort in Deutschland entsprechen [1, 2].

Die Erzeugungszeitreihen sind normiert bezogen auf die installierte Erzeugerleistung im Modell hinterlegt. Eine Skalierung der Erzeugungszeitreihen erfolgt über die Einstellung der jeweiligen EE-Generatorleistungen durch den Anwender. Durch die Kombination verschiedener EE-Erzeuger ergibt sich ein Summen-Erzeugungsprofil, welches den EE-Strommix für den Betrieb des Elektrolyseurs definiert.

Anhand technologiespezifischer Annahmen des Elektrolyseurs (siehe Tabelle: Annahmen) wird der Elektrolysebetrieb charakterisiert. Hierbei bildet die durch den Anwender ausgewählte Nennleistung des Elektrolyseurs den Grenzwert für die Maximal- und Teillastbegrenzung. Ausgehend vom EE-Erzeugungsprofil ergibt sich so ein stündliches Betriebsprofil für den Elektrolyseur, anhand dessen die Betriebsparameter der Elektrolyse bestimmt werden.

Ausgehend von den Betriebsparametern der Elektrolyse werden zur Veranschaulichung mögliche Anwendungsfälle dargestellt. Hierzu wird die errechnete Menge Wasserstoff und die ermittelte Abwärme der Elektrolyse als Ausgangsgröße definiert. Für den Verkehrssektor bilden Annahmen für jährliche Laufleistungen und Verbräuche von Brennstoffzellen-Bussen und -Pkw die Berechnungsgrundlage. Über den spezifischen Wasserstoffbedarf eines Hochofenprozesses mittels Direktreduktion wird eine theoretische Erzeugungsmenge an Rohstahl als Beispiel für die Anwendung im Industriesektor berechnet. Für den Gebäudesektor wird eine mögliche Wärmeversorgung, sowohl durch Verbrennung des erzeugten Wasserstoffs in einem Wasserstoffbrennwertkessel als auch die Nutzung der Abwärme aus der Elektrolyse abgebildet. Für den Wärmebedarf eines Hauses wird ein gewichteter Mittelwert ausgehend von der prozentualen Verteilung der Energieeffizienzklassen im Gebäudebestand Deutschlands angesetzt [3].

Hierbei ist zu beachten, dass die Nutzung von Abwärme der Elektrolyse immer zusätzlich zur Nutzung des Wasserstoffs in den verschiedenen Anwendungen möglich ist. Bei den direkten Wasserstoffanwendungen sind die Daten für alternative Nutzungen in den jeweiligen Anwendungen (Busse, Pkw, Stahlerzeugung, Gebäudewärme) dargestellt (nicht kumulativ).

Die Ermittlung des gravimetrischen ( $\text{€/kg H}_2$ ) und energetischen ( $\text{ct/kWh}_{\text{brennwertbezogen}}$ ) Wasserstoffpreises erfolgt über die Berechnung der Wasserstoffgestehungskosten (LCOH) und bezieht grundlegende Kostenkomponenten mit ein. Betrachtet werden annuitätische Kapitalkosten berechnet aus der einstellbaren Angabe zu leistungsspezifischen Investitionskosten des PEM-Elektrolyseurs. Die Betriebskosten setzen sich aus Kosten für den

Bezug von Wasser und Strom zusammen. Für die Kosten des Stroms werden einzeln einstellbare Parameter für Stromgestehungskosten (LCOE) aus Photovoltaik, Wasserkraft und Windenergie On-/Offshore zugrunde gelegt. Wartungskosten werden leistungsspezifisch entsprechend angegebener Literatur berücksichtigt (siehe Tabelle: Annahmen). Ausgehend von wählbaren Preisermittlungsszenarien berücksichtigt die Preiskalkulation zum einen Erlöse aus der Abwärmenutzung, zum anderen kann das Gesamtsystem als Direktkopplung zwischen erneuerbarer Erzeugung und Elektrolyse oder Netzgekoppelt definiert werden. Im Fall der Direktkopplung wird für die Stromkosten der gesamte erneuerbar erzeugte Strom als Betriebskostenposition berücksichtigt, sodass nicht genutzter Strom als kostenwirksamer Verlust anzusehen ist. Wird die Netzkopplung gewählt, so wird für die Preisermittlung lediglich der vom Elektrolyseur genutzte Strom kostenwirksam. Stromüberschüsse werden ins Netz abgegeben, wobei eine potenzielle Vergütung des eingespeisten Stroms keine Berücksichtigung findet. [2, 4]

Die getroffenen Werteanahmen können in der nachfolgenden Tabelle eingesehen werden.

## Annahmen

Konstanten			
Wasserstoff	Heizwert ( $H_i$ )	33,33 kWh/kg	
	Brennwert ( $H_o$ )	39,41 kWh/kg	
Wasser	Dichte	998 kg/m <sup>3</sup>	
Erzeugung			
Erzeugungsprofil	Wind und PV	Renewable Ninja	[5]
Wind	Offshore Standort (Nordsee, Norderney)	4058 Volllaststunden	[2]
	Onshore Standort (Oldenburg)	2789 Volllaststunden	
PV	Deutschland, Köln	986 Volllaststunden	[1]
Wasserkraft	Deutschland, Iffezheim (Rhein)	7170 Volllaststunden	[6, 7]
Elektrolyseur	Wirkungsgrad	Elektrisch: 62,5 % Thermisch: 20 %	[8, 9]
	Teillastbegrenzung	10 %	
	Sauerstoff-Faktor (gravimetrisch)	1:8 ( $H_2:O_2$ )	
	Wasserbedarf pro kg $H_2$	17 kg $H_2O$	[10]
Versorgung			
Pkw	Durchschnittliche Laufleistung	13700 km/a	[11]
	Verbrauch	1,0 kg $H_2$ /100 km	[12]
Bus	Durchschnittliche Laufleistung	45000 km/a	[13]
	Verbrauch	9,5 kg $H_2$ /100 km	[14]
Wohngebäude*	Durchschnittliche Wohnfläche	140 m <sup>2</sup>	[15]
	Spezifischer Wärmebedarf	155 kWh/m <sup>2</sup> *a	[3, 16]
	Wirkungsgrad ( $H_i$ ) $H_2$ - Brennwertkessel	~105 %	[17]
Stahlproduktion	Spezifischer Wasserstoffbedarf	57,1 kg $H_2$ /t Rohstahl	[18]
Wasserstoffpreis			
PEM-Elektrolyseur	Spezifische Investitionskosten	200 – 1500 €/kW	[4]
	Spezifische Wartungskosten	20 €/kW	
Stromgestehungskosten (LCOE)	Photovoltaik Freifläche & Dachanlagen mit/ohne Batteriespeicher	3,12 – 19,72 ct/kWh	[2, 19]
	Windenergie Onshore	3,94 – 8,29 ct/kWh	
	Windenergie Offshore	7,23 – 12,13 ct/kWh	
	Wasserkraft	~ 8,50 ct/kWh	
Preisannahmen	Spezifische Erlöse Wärme	25 €/MWh <sub>Therm</sub>	[20]
	Wasserbezugspreis	1,66 €/m <sup>3</sup>	[21]
Annuität	Annuitätenfaktor Kapital	0,0672157	

\*: gemittelttes Gebäude basierend auf dem Gebäudebestand Deutschlands

## Urheber und Mitwirkende

**Autoren:** Prof. Dr.-Ing. Peter Stenzel<sup>1</sup>, B.Eng. Marvin Benedict Brands<sup>1</sup>

**Webentwicklung:** B.Eng. Marvin Benedict Brands<sup>1,2</sup>


**Mitwirkende:** M.Sc. Florian Dennewitz<sup>1,2</sup>, Christina Baumgart<sup>1</sup>

- 1) Technische Hochschule Köln, Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE), Betzdorfer Str. 2, 50679 Köln
- 2) Projektteam, Energy-System-Solutions, Verantwortlicher: Florian Dennewitz, Middeweg 65, 46240 Bottrop

### Zitervorschlag:

P. Stenzel, M. Brands, and F. Dennewitz, C. Baumgart, *Elektrolyse-Rechner*: Technische Hochschule Köln, 2023. [Online]. Available: <https://elektrolyserechner.web.th-koeln.de/>

## Kontakt

 [elektrolyserechner@f09.th-koeln.de](mailto:elektrolyserechner@f09.th-koeln.de)

## Literatur

- [1] Wirth H, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf>. Zugriff am: 2023.
- [2] C. Kost, S. Shammugam, V. Fluri, D. Peper, A. D. Memar und T. Schlegl, „Stromgestehungskosten erneuerbare Energien“, Fraunhofer ISE, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf). Zugriff am: 15. Juni 2023.
- [3] Statista Research Department, *Verteilung der Energieeffizienzklassen bei Immobilien in Deutschland im Jahr 2021*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1284714/umfrage/verteilung-energieeffizienzklassen-immobilien/?locale=de> (Zugriff am: 2023).
- [4] M. Holst, S. Aschbrenner, T. Smolinkam, C. Voglstätterm und G. Grimm, „Cost Forecast for Low-Temperature Electrolysis: Technology Driven Bottom-Up Prognosis for PEM and Alkaline Water Electrolysis Systems“, Fraunhofer ISE, Freiburg, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/cost-forecast-for-low-temperature-electrolysis.pdf>. Zugriff am: 15. Juni 2023.
- [5] Pfenninger S. et al., *Renewables.ninja*. [Online]. Verfügbar unter: <https://renewables.ninja/> (Zugriff am: 2023).
- [6] WSV, *PEGEL ONLINE: Stammdaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=23500600> (Zugriff am: 2023).
- [7] EnBW, *Rheinkraftwerk Iffezheim*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/rheinkraftwerk-iffezheim/> (Zugriff am: 2023).
- [8] La Camera F, „Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyseurs to meet the 1.5°C climate goal“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA\\_Green\\_hydrogen\\_cost\\_2020.pdf?v=4ce868aa69b54674a789f990e85a3f00](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf?v=4ce868aa69b54674a789f990e85a3f00). Zugriff am: 2023.
- [9] Aichinger J, „Das Power-to-Gas Projekt "Energiepark Mainz": Power-to-Gas im Energiepark Mainz - Betriebsführung und Ausblick“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.tsb-energie.de/fileadmin/Redakteure/Veranstaltungen/Wind/2018/Vortraege/Aichinger\\_\\_Jonas\\_-\\_Mainzer\\_Stadtwerke\\_AG.pdf](https://www.tsb-energie.de/fileadmin/Redakteure/Veranstaltungen/Wind/2018/Vortraege/Aichinger__Jonas_-_Mainzer_Stadtwerke_AG.pdf). Zugriff am: 2023.
- [10] Newborough M. et al., „Green hydrogen: water use implications and opportunities“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: [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). Zugriff am: 2023.
- [11] Kords M, *Fahrleistung der Personenkraftwagen in Deutschland nach Merkmalen in den Jahren 2019 und 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246069/umfrage/laufleistung-privater-pkw-in-deutschland/#:~:text=Die%20Statistik%20zeigt%20das%20Ergebnis,2020%20bei%20rund%2013.700%20Kilometern> (Zugriff am: 2023).
- [12] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, *Wasserstoffautos: Alle Modelle im Überblick*. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.live/fahren/> (Zugriff am: 2023).
- [13] Statista Research Department, *Durchschnittliche Fahrleistung von Kraftomnibussen in Deutschland von 1998 bis 2012 (in 1.000 Kilometer)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251746/umfrage/durchschnittliche-fahrleistung-von-kraftomnibussen-in-deutschland/> (Zugriff am: 2023).

- [14] Hof E, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV: Fahrzeuge, Infrastruktur und betriebliche Aspekte“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere\\_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf](https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2018/12/NOW-Broschuere_Wasserstoffbusse-im-OePNV.pdf). Zugriff am: 2023.
- [15] Statista Research Department, *Wohnfläche von Eigenheimen in West- und Ostdeutschland im Jahresvergleich 2009 und 2012*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/73157/umfrage/immobilien-wohnflaeche-in-westdeutschland-und-ostdeutschland/?locale=de> (Zugriff am: 2023).
- [16] Verbraucherzentrale NRW e.V., *Energieausweis: Was sagt dieser Steckbrief für Wohngebäude aus?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/energetische-sanierung/energieausweis-was-sagt-dieser-steckbrief-fuer-wohngebaeude-aus-24074> (Zugriff am: 22. März 2023).
- [17] SHK-Journal.de, *Remeha Kessel „Hydra“ im ersten H2-Pilotprojekt Deutschlands*. Emsdetten, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.shk-journal.de/news/remeha-kessel-hydra-im-ersten-h2-pilotprojekt-deutschlands.html>
- [18] Albrecht U. et al., „Emissionsfreie Stahlerzeugung: Metastudie zu den technischen, technologischen und wirtschaftlichen Parametern für die Umstellung der deutschen Stahlindustrie auf eine emissionsarme Stahlproduktion auf Basis von grünem Wasserstoff“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://lbt.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST\\_Emissionsfreie\\_Stahlerzeugung.pdf](https://lbt.de/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-30-HySteel-LBST_Emissionsfreie_Stahlerzeugung.pdf). Zugriff am: 2023.
- [19] S. Lorenczik und J. H. Keppler, „Project Costs of Generation Electricity“, IEA, Paris, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>. Zugriff am: 3. November 2023.
- [20] R. Hanke-Rauschenbach und F. Peterssen, „Die Wasserelektrolyse als künftige Abwärmequelle: Eine Ersteinschätzung“. Frankfurt a.M., 4. Nov. 2021. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/7.%20BMU-Fachtagung%202021\\_11\\_Hanke-Rauschenbach.pdf](https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/7.%20BMU-Fachtagung%202021_11_Hanke-Rauschenbach.pdf)
- [21] o. A., *NRW: Trinkwasser war 2022 im Schnitt um vier Cent je Kubikmeter, Abwasser um 21 Cent je Kubikmeter teurer als vor zehn Jahren*. Düsseldorf, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.it.nrw/nrw-trinkwasser-war-2022-im-schnitt-um-vier-cent-je-kubikmeter-abwasser-um-21-cent-je-kubikmeter>