

Entwicklung eines Dimensionierungswerkzeugs für die überschlägige Auslegung dezentraler Wasserstofferzeugungs- und Verbrauchsinfrastrukturen für die H₂-Mobilität

Nicole Meyer¹, Mark F. Jentsch¹, Saskia Wagner¹

¹ Professur Energiesysteme, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar

Schwanseestraße 1a, 99423 Weimar

ABSTRACT

Das Interesse an der Umsetzung von kleinen Wasserstofferzeugungs- und Verbrauchsinfrastrukturen ist derzeit sehr ausgeprägt, was durch eine Vielzahl von entsprechenden Studien und Voruntersuchungen belegt wird. Allerdings müssen hierfür in der Regel für jeden Einzelfall neue Dimensionierungsrechnungen durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird ein Simulationsmodell vorgestellt, das zur grundlegenden Systemdimensionierung von Elektrolyseanlagen an kleinen bis mittleren dezentralen Erneuerbaren-Energien-Anlagen genutzt werden kann und somit dazu beiträgt, eine Beschleunigung in der Bewertung eines Standortes bzw. einer Systemkonfiguration zu erzielen. Das aus diesem Modell resultierende Softwaretool erlaubt es, eine grundlegende Dimensionierung eines Elektrolyseurs und der dazugehörigen stationären H₂-Speicher auf Grundlage des Energiedargebots aus erneuerbaren Energien sowie der H₂-Abnahme von verschiedenen Standorten vorzunehmen und die notwendige Transportlogistik mit mobilen Speichern zu dimensionieren. Dabei wird aufgezeigt, wie sich die Dimensionierung auf ein dezentrales Wasserstoffversorgungssystem bestehend aus Erzeugung, Verteilung und Fahrzeugnutzung auswirkt, so dass ein am Bedarf orientiertes Gesamtsystem zur dezentralen Wasserstofferzeugung, -verteilung und -nutzung in Verbindung mit einer Kompakttankstelle entsteht.

1. EINLEITUNG

Es gibt verschiedene Systemstudien zur Integration von Wasserstoffsystemen mit Erneuerbaren-Energien-Anlagen mit dem Ziel der Realisierung einer vollständig grünen Wasserstoffgestehungskette für Mobilitätsanwendungen, die sich jedoch in der Regel auf einer eher übergeordneten Ebene bewegen. Weiterhin gibt es in der Literatur Betrachtungen zur Dimensionierung und Bewertung von Teilkomponenten von Wasserstoffinfrastruktursystemen, wie zum Beispiel zur Modellierung und gegebenenfalls Optimierung einzelner Bau- oder Anlagenteile wie dem Elektrolyseur [1] oder zur Prozessoptimierung wie dem Befüllprozess von H₂-Fahrzeugen [2]. Ganzheitliche Betrachtungen zur Untersuchung angepasster Betriebsweisen von kleinskaligen Elektrolysesystemen an Erneuerbaren-Energien-Anlagen sind hingegen bisher, bis auf einzelne Ausnahmen [3,4], kaum durchgeführt worden. Bei den bisherigen Modellierungen wird sich darüber hinaus meist entweder auf technische Fragestellungen konzentriert oder auf Berechnungen zu den CAPEX- und OPEX-Kosten sowie deren Optimierung. Zudem handelt es sich bei diesen Betrachtungen häufig um rein hypothetische Analysen, in die zwar Betriebsdaten von Erneuerbaren-Energien-Anlagen einfließen, die jedoch kein detailliertes Betriebs- und Regelungskonzept beinhalten.

Übergeordnete Optimierungsfragen im Zusammenhang mit Wasserstoffsystemen beziehen sich unter anderem auf Managementfragestellungen in sogenannten Microgrids, um eine unterbrechungsfreie Versorgung mit Elektrizität zu gewährleisten [5]. Aber auch Untersuchungen zu wasserstoffbasierten Energiezentralen oder zum Einsatz von Elektrolyseuren als flexible Last im Elektrizitätsnetz sind bereits durchgeführt worden [6,7]. Gleiches gilt für Modellierungen sowie Untersuchungen zum Energiemanagement von Wasserstoffsystemen auf der Ebene von Wohngebäuden [8] und größeren

Gebäudekomplexen [9]. Zudem sind bereits vereinfachte Planungswerkzeuge für die Integration von Elektrolyseuren und Photovoltaikanlagen [10] sowie Elektrolyseuren und Windkraftanlagen [11] entwickelt worden. Was jedoch all diesen Studien in der Regel fehlt, ist der direkte Abgleich mit einer realen Anlagenkonfiguration, so dass das Teillastverhalten, die tatsächliche Nachfrage- und Speichersituation sowie Störanfälligkeiten oftmals nur unzureichend dargestellt werden können. Systemuntersuchungen wie die von Kelly, Gibson und Ouwerkerk [4] oder Skalierungsrechnungen wie die von Jentsch und Büttner [12] im Rahmen des HYPOS-Vorhabens LocalHy, die auf einer realen Versuchsanlage basieren, sind eine Ausnahme. An diesem Punkt setzt das hier beschriebene Dimensionierungswerkzeug an, indem die Modellentwicklung und -überprüfung parallel zur Entwicklung eines technischen Systems erfolgen und eine Validierung mit Monitoringdaten ermöglicht wird.

2. DIMENSIONIERUNGSWERKZEUG FÜR DEZENTRALE WASSERSTOFFSYSTEME

Das in den folgenden Abschnitten beschriebene Dimensionierungswerkzeug ist Bestandteil der Entwicklungsarbeiten im vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben h2well-compact, das die Entwicklung und Erprobung eines kompakten, kleinskaligen Wasserstoffversorgungssystems für dezentrale Mobilitätsanwendungen zum Ziel hat. Über die mit diesem System gewonnenen Erfahrungen werden die Voraussetzungen für eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Implementierung solcher Infrastrukturen in einem größeren Maßstab an regionalen Erneuerbaren-Energien-Anlagen geschaffen. Im Rahmen des Vorhabens soll konkret an einer bestehenden Kleinwasserkraftanlage im Ortsteil Oberroßla der Stadt Apolda in Thüringen eine kompakte Elektrolyseanlage entstehen, die den Wasserstoff mit einem Ausgangsdruck von 100 bar zur Verfügung stellt und in einem stationären Wasserstoffspeicher zwischenspeichert. Von diesem wird der Wasserstoff über einen Verdichter auf einer Wechselbrücke auf einen Speicherdruck von 300 bar gebracht und an eine kompakte Tankstelle ohne eigenen Verdichter bei einem lokalen Abnehmer transportiert, um einen Gabelstapler zu betanken. Abbildung 1 zeigt ein Schema dieses Infrastruktursystems, das die Grundlage für das hier vorgestellte Dimensionierungswerkzeug bildet.

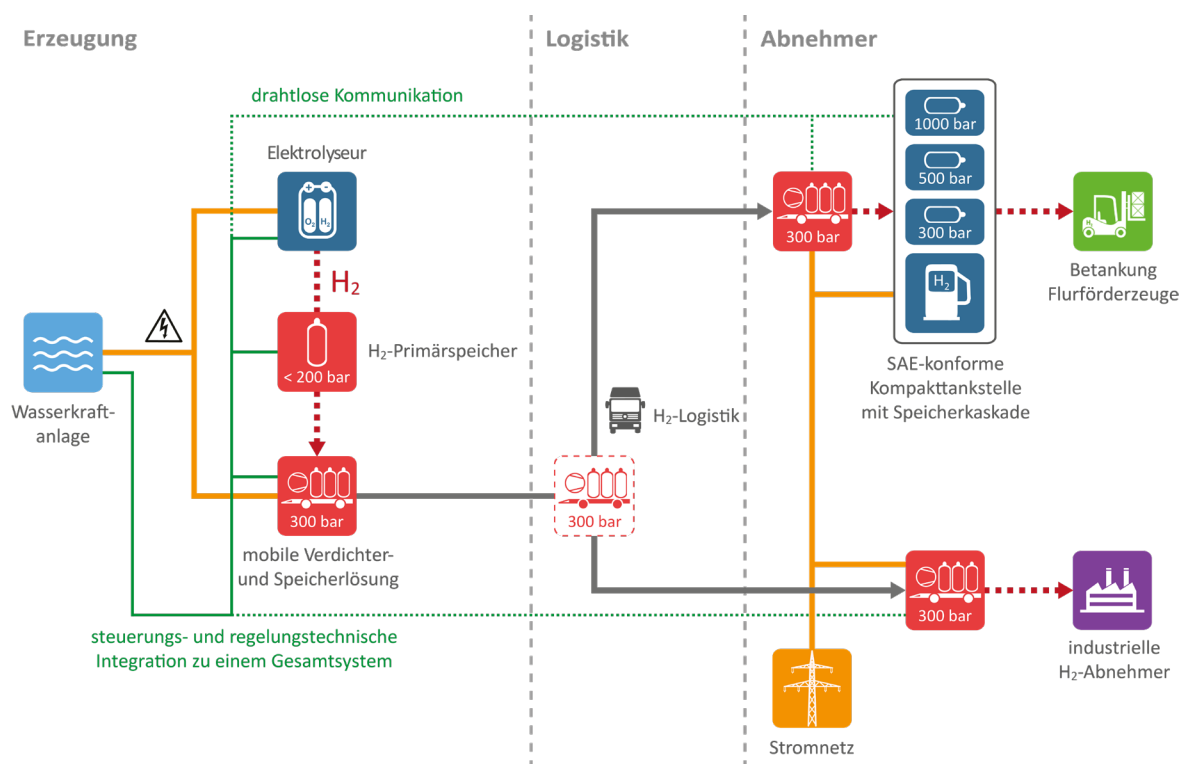


Abbildung 1: Schematische Darstellung des in Apolda zur Umsetzung kommenden H₂-Systems

Analog zum Forschungsvorhaben ermöglicht das Dimensionierungswerkzeug es dem Nutzer, eine dezentrale Wasserstofferzeugungs- und Verbrauchsinfrastruktur für einen oder mehrere Abnehmer in ihren Bestandteilen zu dimensionieren. Das modellierte System besteht hierbei aus einer oder mehreren Erneuerbaren-Energien-Anlagen, einem Elektrolyseur, einem stationären Wasserstoffspeicher, einem mobilen Wasserstoffspeicher, einem Verdichter sowie den Wasserstoffabnehmern. Diese können z.B. Wasserstofftankstellen für Fahrzeuge oder industrielle Abnehmer mit unterschiedlichen Anforderungen sein. Um dieses System mit seinen Bestandteilen (Elektrolyseur, Speicher, Tankstelle) zu dimensionieren, sind zunächst Nutzereingaben zu mindestens einer Erneuerbaren-Energien-Anlage und zum Nutzungsprofil eines Abnehmers wie z.B. einem Fahrzeug erforderlich. Neben der Dimensionierung der Systemkomponenten, ist es bei Bedarf zudem möglich, die erforderliche Transportlogistik zwischen dem Elektrolyseur und dem Wasserstoffabnehmer mitsamt der dazugehörigen Routenplanung zu planen und zu bewerten. Abbildung 2 gibt einen schematischen Überblick über die erforderlichen Nutzereingaben und die Funktionen des Dimensionierungswerkzeugs.

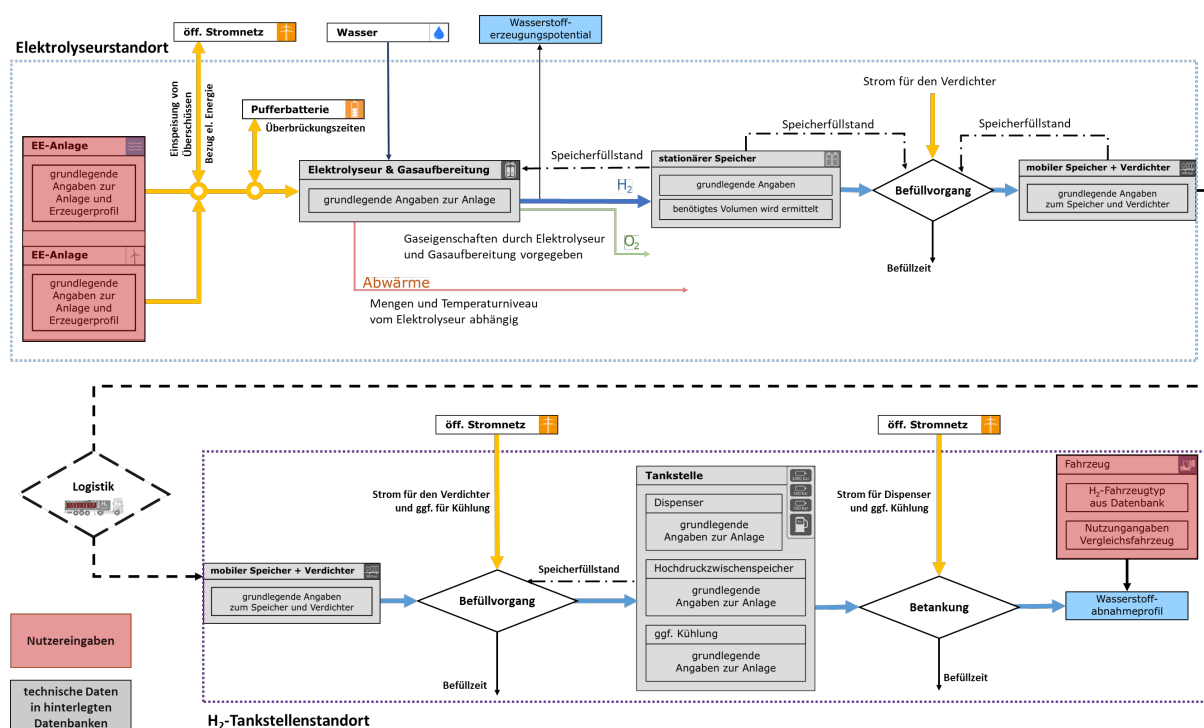


Abbildung 2: Fließschema zum Dimensionierungswerkzeug mit Ein- und Ausgabeparametern

3. EINGABE UND AUSWERTUNG VON LASTPROFILIEN ERNEUERBARER-ENERGIEN-ANLAGEN

Die Benutzerführung des Dimensionierungswerkzeugs erfolgt in einem schrittweisen Prozess. In einem ersten Schritt ist durch den Nutzer eine Erneuerbare-Energien-Anlage zu definieren, die bei Bedarf um weitere Anlagen ergänzt werden kann. Die Eingabe umfasst hierbei den genauen Standort, den Typ (Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft) und die installierte Leistung der Anlage, wobei der Standort direkt über der Online-Plattform OpenStreetMap [13] verknüpft wird, um spätere Routenberechnungen für die Transportlogistik zu ermöglichen. Über eine Importfunktion lassen sich in der Folge durch den Nutzer in einer Excel-Datei hinterlegte Lastgänge einer bestehenden Erneuerbare-Energien-Anlage einlesen, die je nach Anlagentyp in Auflösungen von Minuten-, Stunden- oder Tageswerten vorliegen können. In der Excel-Datei können dabei mehrere Jahre an Lastdaten spaltenweise hinterlegt sein, wodurch genauere Auswertungen und Prognosen für die Dimensionierung der H₂-Anlagen zur Verfügung stehen als für ein einzelnes Jahr. Aus diesen Daten wird dann eine empfohlene Elektrolyseurgröße ermittelt. Hierfür werden bei mehrjährigen Daten die einzelnen Jahre des gesamten Lastprofils in Jahresdauerlinien

überführt und der leistungsbezogene Median der einzelnen Jahre ermittelt. Der Median stellt hierbei die Leistung dar, welche zeitlich 50 % des Jahres mit der Erneuerbaren-Energien-Anlage erreicht wird. Die einzelnen Jahre werden anschließend nach dem Median der Größe nach sortiert. Die Werte des oberen Drittels werden dabei gestrichen und der Mittelwert der verbleibenden Jahre bildet die empfohlene Elektrolyseurgröße. Dies dient dazu, um eine Überdimensionierung des Elektrolyseurs zu vermeiden, damit in möglichst vielen Jahren ein möglichst langer Betrieb unter Volllast gewährleistet ist. Weiterhin werden aus den verbleibenden Lastgängen der tägliche Medianwert und dessen Standardabweichung ermittelt, um ein repräsentatives Lastprofil für den Standort zu erhalten.

In Abbildung 3 wird exemplarisch die Auswertung der jährlichen Lastprofile der oben eingeführten Kleinwasserkraftanlage in Oberroßla bei Apolda dargestellt. Auf der linken Seite werden hierbei die Jahresdauerlinien der zur Verfügung stehenden 21 Jahre an täglichen Leistungsdaten aufgeführt und auf der rechten Seite die Auswertung des Medianverlaufes mitsamt der Standardabweichung gezeigt. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, hat das Wasserdargebot in diesem Beispiel einen deutlichen saisonalen Einfluss auf die Kleinwasserkraftanlage. Die entsprechend der oben eingeführten Methode ermittelte empfohlene Elektrolyseurgröße liegt bei 24,5 kW. Mit dieser Leistung sollte der Elektrolyseur an der Kleinwasserkraftanlage im Regelfall 50 % des Jahres unter Volllast laufen können und die verbleibende Zeit im Teillastbetrieb bzw. während ausgedehnter Trockenphasen auch nicht im Betrieb sein. Somit sollten in den meisten Jahren insgesamt Volllaststunden von weit über 4380 h/a mit dem Elektrolyseur erzielt werden können.

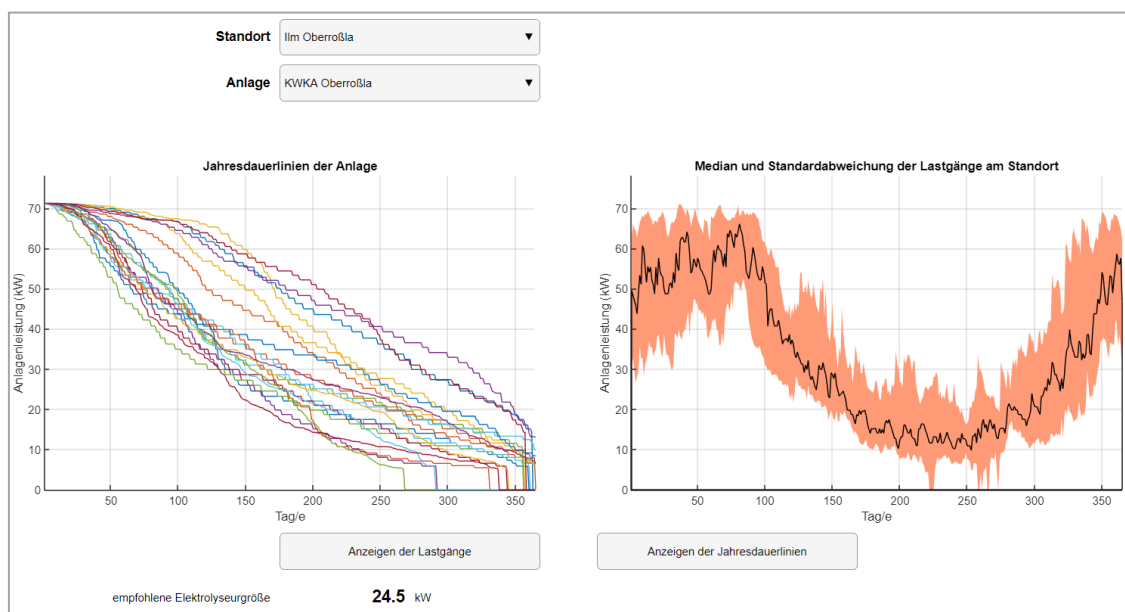


Abbildung 3: Screenshot des Dimensionierungswerkzeugs zum Analyseergebnis der mehrjährigen Lastdaten einer Kleinwasserkraftanlage mit Empfehlung zur Elektrolyseurgröße

4. ELEKTROLYSEURAUSSWAHL UND -AUSWERTUNG DURCH DAS DIMENSIONIERUNGSWERKZEUG

In dem Dimensionierungswerkzeug ist eine Datenbank mit verschiedenen Elektrolyseuren enthalten. Diese Elektrolyseure sind dabei mit Kennzahlen zum Minimallast-, Teillast- und Volllastbetrieb in der Komponenten-Datenbank hinterlegt und können bei Bedarf durch den Nutzer um weitere Elektrolyseure ergänzt werden. Aus dieser Datenbank wird auf Basis der oben genannten Empfehlung zur Elektrolyseurgröße der Elektrolyseur automatisch ausgewählt, der dieser Empfehlung am dichtesten kommt. In diesem Beispiel wurde, auf Basis der vorhandenen Datenlage, ein Elektrolyseur mit einer elektrischen Anschlussleistung mit Peripherie von 32 kW ausgewählt, dessen Stackleistung 24 kW

entspricht. Dies hat zur Folge, dass die zu erwartenden Volllaststunden sinken, nicht aber, dass der Elektrolyseur absolut ungeeignet wäre. Auf Basis des so ausgewählten Elektrolyseurs erfolgt nun im Dimensionierungswerkzeug eine Auswertung zum Elektrolyseurbetrieb im Zusammenspiel mit der gewählten Erneuerbaren-Energien-Anlage bzw. bei mehreren Anlagen der Anlagenkonfiguration mit Angaben zu Betriebszustand, Jahresauslastung und Wasserstofferzeugung. Der Betriebszustand unterteilt sich hierbei in:

- Volllastbetrieb: Die Erneuerbare-Energien-Anlage erzeugt mehr Energie, als der Elektrolyseur unter Volllast benötigt.
- Teillastbetrieb: Die Erneuerbare-Energien-Anlage erzeugt genügend Energie, um einen Betrieb des Elektrolyseurs zu ermöglichen, aber nicht genug, um den Elektrolyseur unter Volllast zu betreiben.
- den Betriebsmodus „aus“: Die Erneuerbare-Energien-Anlage erzeugt nicht genügend Leistung, um den Elektrolyseur unter Minimallast zu betreiben.

Die Auslastung des Elektrolyseurs wird dabei, wie in Abbildung 4 gezeigt wird, pro Jahr angegeben, wobei die Jahre denen des eingelesenen Lastganges der Erneuerbaren-Energien-Anlage entsprechen. Die Jahresauslastung stellt hierbei die im jeweiligen Jahr erzielbaren Volllaststunden des Elektrolyseurs dar. Für das Beispiel der Kleinwasserkraftanlage in Oberroßla kann mit dem 32 kW Elektrolyseur je nach Jahr eine Auslastung von zwischen 55 % und 95 % erreicht werden, bzw. von 4818 bis 8322 Volllaststunden (vgl. Abbildung 4). Mit dem gewählten Elektrolyseur kann damit täglich unter Volllast eine Wasserstoffmenge von etwa 10 kg erzeugt werden, was am gewählten Standort Oberroßla einer Jahresmenge von ca. 2.000 bis 3.500 kg H₂ entspricht.

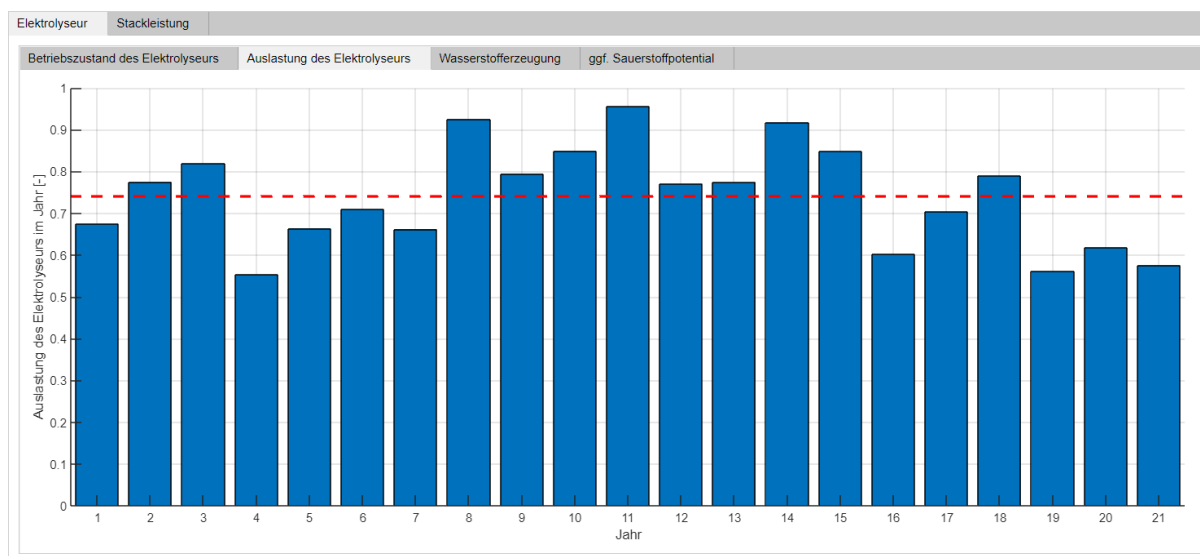


Abbildung 4: Screenshot der Ausgabe des Dimensionierungswerkzeugs zur Auslastung des automatisch ausgewählten Elektrolyseurs an einer Kleinwasserkraftanlage

5. EINGABE VON WASSERSTOFFABNEHMERN

Nachdem die Erneuerbare-Energien-Anlage(n) ausgewertet und durch das Dimensionierungswerkzeug ein Elektrolyseur ausgewählt und analysiert wurde, erfolgt die Eingabe der Wasserstoffabnehmer durch den Nutzer. Der oder die Wasserstoffabnehmer werden dabei durch den Nutzer Abnahmestandorten zugeordnet, die über OpenStreetMaps [13] in einen räumlichen Bezug (GPS-Koordinaten) zu den zuvor schon räumlich definierten Erneuerbaren-Energien-Anlagen gesetzt werden (siehe Abschnitt 3). Dies dient zur automatisierten Routenermittlung zwischen der bzw. den Erneuerbaren-Energien-Anlage(n) als Standort des Elektrolyseurs und dem bzw. den Abnahmestandort(en). Die Routenermittlung

berücksichtigt hierbei die Distanz sowie auch die Zeit, die für die Überbrückung zwischen den Standorten benötigt wird. Nachdem die Abnahmestandorte definiert wurden, werden die erwarteten H₂-Verbrauchsprofile am Abnahmestandort durch den Nutzer eingegeben.

Da die Wasserstoffabnahme für Fahrzeuge in der Regel nicht bekannt sein dürfte, erfolgt die Ermittlung der Verbräuche in diesem Fall mit Hilfe der in Abbildung 5 dargestellten Eingabemaske, die es erlaubt, auf Basis von Bestandsfahrzeugen und deren Anzahl, den voraussichtlichen H₂-Bedarf von alternativen H₂-Brennstoffzellenfahrzeuglösungen zu ermitteln. Sofern also z.B. ein konventionelles Fahrzeug ersetzt werden soll, kann beispielweise im Falle eines Gabelstaplers der bekannte tägliche Diesel- oder Propangasbedarf bzw. der elektrische Energiebedarf für ein Batteriefahrzeug angegeben werden. Hierbei wird der entsprechende Treibstoffbedarf in Abhängigkeit des typischen Wirkungsgrads des Fahrzeugtyps in einen elektrischen Energiebedarf umgerechnet und mit dem Wirkungsgrad einer in einem entsprechenden H₂-Fahrzeug verbauten Brennstoffzelle in einen Wasserstoffbedarf umgerechnet. Sofern nur die geplante Arbeitszeit bekannt ist, kann diese alternativ angegeben werden, in welchem Fall der Wasserstoffbedarf entsprechend aus Herstellerangaben des H₂-Fahrzeugs ermittelt wird. Für die Berechnungen steht hierbei eine Datenbank an verschiedenen H₂-Fahrzeug- und Modelltypen für z.B. Gabelstapler oder Hubwagen zur Verfügung, die bei Bedarf durch den Nutzer ergänzt werden können. Darüber hinaus muss der Nutzer Angaben dazu machen, an welchen Wochentagen eine Fahrzeugnutzung stattfindet (vgl. Abbildung 5). Die Nutzereingabe kann beliebig oft wiederholt werden, so dass einem Abnahmestandort verschiedene Fahrzeugprofile zugeordnet werden können. Aus den eingegebenen Fahrzeugprofilen bzw. den Angaben zu den H₂-Abnahmemengen von Industrienutzern kann in der Folge der gesamte Wasserstoffbedarf eines Abnahmestandortes ermittelt und mit der bereits errechneten Wasserstoffherzeugung korreliert werden.

The screenshot shows a web-based input form for determining hydrogen consumption for vehicles. It includes dropdown menus for 'Fahrzeugtyp' (Gabelstapler), 'Modell' (Gabelstapler-Gegenge...), and 'Fahrzeug wird an folgenden Standort betankt:' (Apolda). A text input field for 'Anzahl der Fahrzeuge' is set to 1. A section titled 'Wasserstoffbedarfermittlung über:' contains four radio button options: 'bekannter Dieselverbrauch' (0 liter/d je Fahrzeug), 'bekannten Propanbedarf' (0 Normliter/d je Fahrzeug), 'bekannte Arbeitszeit' (6 h/d je Fahrzeug, selected), and 'bekannter elektrischer Bedarf' (0 kWh/d je Fahrzeug). Below this, a row of checkboxes indicates the days of the week for consumption: Montag, Dienstag, Mittwoch, Donnerstag, Freitag, Samstag, and Sonntag, all of which are checked. A button labeled 'Abnehmer übernehmen' is at the bottom.

Abbildung 5: Screenshot des Eingabefensters für die H₂-Verbrauchsermittlung für Fahrzeuge

6. SPEICHERDIMENSIONIERUNG DURCH DAS DIMENSIONIERUNGSWERKZEUG

Zur Dimensionierung der Wasserstoffspeicher werden die für jedes Jahr einzeln aufsummierten Jahrgänge für die Wasserstoffherzeugung und den Wasserstoffverbrauch miteinander verrechnet (Erzeugung + Speicherstand - Verbrauch in dem vorher festgelegten Zeitraster (siehe Abschnitt 3)), sodass eine potentielle Speicherverlaufskurve generiert wird. Die Differenz zwischen dem niedrigsten und dem maximalen Wert der potentiellen Speicherverlaufskurve gibt dann die maximale Speichergröße an, die benötigt würde, wenn der gesamte erzeugte Wasserstoff gespeichert werden soll. Der niedrigste

Wert repräsentiert hierbei entweder einen vollständig entleerten Speicher oder aber einen negativen Wert für Fälle in denen der Verbrauch nicht gedeckt werden kann und der Speicher bereits vollständig entleert ist. Eine Auslegung auf diese maximale Speichergröße ist jedoch im Regelfall nicht erforderlich, da die Wasserstoffversorgung der Abnehmer in den meisten Jahren mit einem kleineren Speicher bereits sichergestellt werden kann. Eine kleinere Speichergröße wirkt dabei allerdings limitierend auf das H₂-Erzeugungspotential, da die H₂-Produktion des Elektrolyseurs heruntergeregelt wird, wenn der Speicher bereits vollständig gefüllt ist. Auf der anderen Seite können so Versorgungsengpässe entstehen, also Zeiten, in denen eine H₂-Nachfrage besteht, aber weder die gespeicherte H₂-Menge noch die H₂-Produktion, sofern zu diesem Zeitpunkt vorhanden, die Nachfrage decken kann.

Die Speicherkapazität sollte grundsätzlich so gewählt werden, dass es nicht zu Versorgungsengpässen kommt bzw. wenn dem so ist, dann nur in einem vorher definierten „hinnehmbaren Ausmaß“. Für das Dimensionierungswerkzeug wurde dieses „hinnehmbare Ausmaß“ so definiert, dass für 2/3 der betrachteten Jahre eine 100%-ige Versorgung mit Wasserstoff sichergestellt sein soll.

Für die Ermittlung der H₂-Speichergröße wird im Dimensionierungswerkzeug zunächst ausgehend vom Betriebszustand des Elektrolyseurs die Dauer der „Aus“-Phasen im Jahresverlauf analysiert. Betrachtet werden hierbei neben den Stillstandszeiten auch die zeitlichen Abstände dieser Phasen untereinander. Hierauf folgend wird mit Simulationsrechnungen iterativ die geringstmögliche Speicherkapazität für jedes einzelne Jahr ermittelt, mit der eine 100%-ige Versorgung der H₂-Abnahme erfolgen kann. Ein wichtiger Punkt bei der Speicherauslegung ist hierbei der Betrieb des Elektrolyseurs zwischen mehreren Versorgungslücken. Anschließend werden die so ermittelten Speichergrößen pro Jahr der Größe nach sortiert und die Speichergröße, welche in mindestens 2/3 der Jahre eine Versorgung sicherstellen kann, als empfohlene Speichergröße für die weiteren Berechnungen ausgewählt.

Die H₂-Versorgung ist mit der gewählten Methode für die Speicherdimensionierung in den meisten Jahren grundsätzlich sichergestellt. Dennoch kann es mit dieser Dimensionierungsmethode aufgrund von saisonalen Schwankungen im Erneuerbare-Energien-Dargebot in einzelnen Jahren zu Versorgungsengpässen kommen. Eine Versorgungssicherheit ist somit in Extremjahren nicht gesichert, sodass der Nutzer für die tatsächliche Umsetzung die Zusatzkosten für mehr Speicherkapazität und die vorhandenen Platzkapazitäten hiergegen abwägen muss. Um dem Rechnung zu tragen, lässt sich daher die vom Dimensionierungswerkzeug vorgeschlagene Dimensionierung im Nachgang vom Nutzer bearbeiten und ändern.

Für das oben eingeführte Fallbeispiel Oberroßla wurde eine wöchentliche Wasserstoffabnahme von etwa 17 kg an der Tankstelle für einen H₂-Gabelstapler bei einem lokalen Industrieabnehmer in Apolda ermittelt. Abbildung 6 zeigt den aus der Analyse mit dem gegebenen Elektrolyseur resultierenden Speicherfüllstand des Wasserstoffspeichers an der Kleinwasserkraftanlage, der entsprechend der oben beschriebenen Methode dimensioniert wurde und eine nutzbare Speicherkapazität von 28 kg Wasserstoff aufweist, was der 1,6-fachen Menge der wöchentlichen Wasserstoffabnahme entspricht. Anhand der Füllstandsdaten in Abbildung 6 wird deutlich, dass der Verbrauch im Regelfall unterhalb der durchschnittlichen Wasserstoffherzeugung liegt. Ein grüner/gelber Wert bedeutet hierbei, dass der Speicher gefüllt bzw. in Teilen gefüllt und eine Wasserstoffentnahme möglich ist. Ist die Skala rötlich, leert sich der Speicher. Ist der Wert tiefrot, ist der Speicher leer. In diesem Fall kann keine Versorgung stattfinden, und es kommt zu Versorgungsengpässen. Je breiter der tiefrote Bereich ist, desto länger dauert der Versorgungsengpass an. Abbildung 6 zeigt, dass die Versorgung in den meisten untersuchten Jahren grundsätzlich sichergestellt ist. Dennoch kann es aufgrund der in Abschnitt 3 bereits erwähnten saisonalen Schwankungen im Wasserkraftdargebot in einzelnen Jahren zu Versorgungslücken kommen, die im ungünstigen Jahr sogar in Summe 98 Tage betragen.

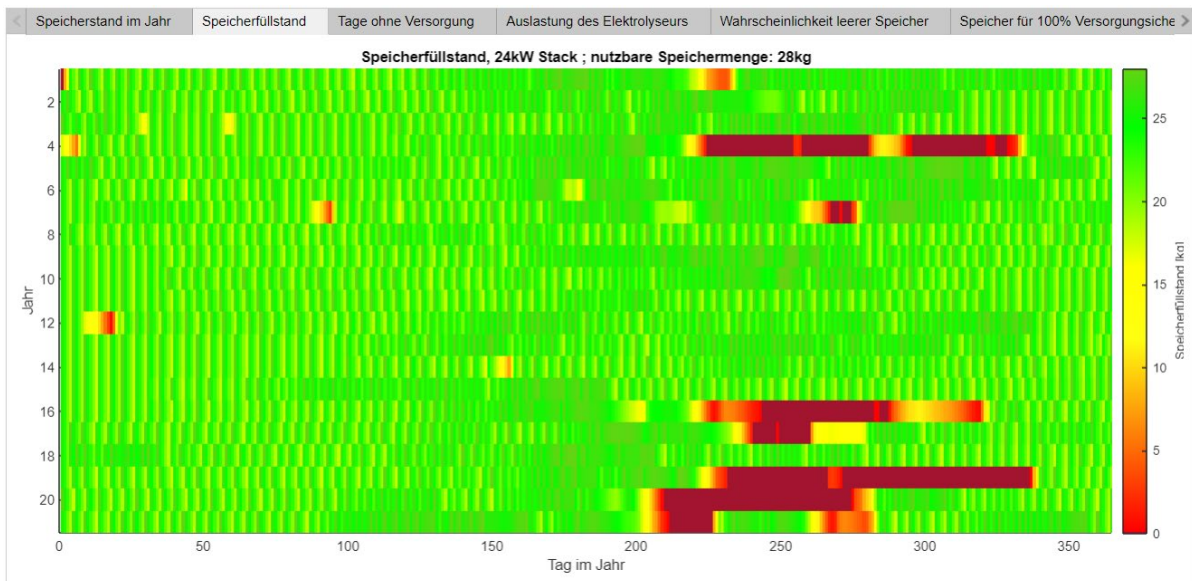


Abbildung 6: Screenshot der Ausgabe des Dimensionierungswerkzeugs zum Verlauf des Speicherfüllstandes eines automatisch dimensionierten Wasserstoffspeichers

Würde bei dem oben beschriebenen Verbrauchsverhalten mit einer Abnahmemenge von 17 kg H₂ die Woche zu jeder Zeit eine sichere H₂-Versorgung mit einem Elektrolyseur an der Kleinwasserkraftanlage Oberroßla angestrebt, würde ein Wasserstoffspeicher mit 267 kg nutzbarer Speicherkapazität benötigt. Dies entspricht einer Bevorratung von etwa 15 Wochen, was den fast 15 Wochen am Stück im Jahr 19 geschuldet ist, in denen der Elektrolyseur mangels des zu geringen Wasserdargebots für die Kleinwasserkraftanlage nicht laufen kann. Eine Dimensionierung des Speichers auf diese 267 kg ist in allerdings nicht sinnvoll. Wie in Abbildung 7 gezeigt wird, betrifft die Unterversorgung nämlich in den 21 betrachteten Jahren im Wesentlichen 4 Extremjahre. Sofern der Nutzer die Dimensionierung also nicht händisch überschreibt, setzt das Tool die für dieses Fallbeispiel ermittelten 28 kg als benötigte Speicherkapazität an.

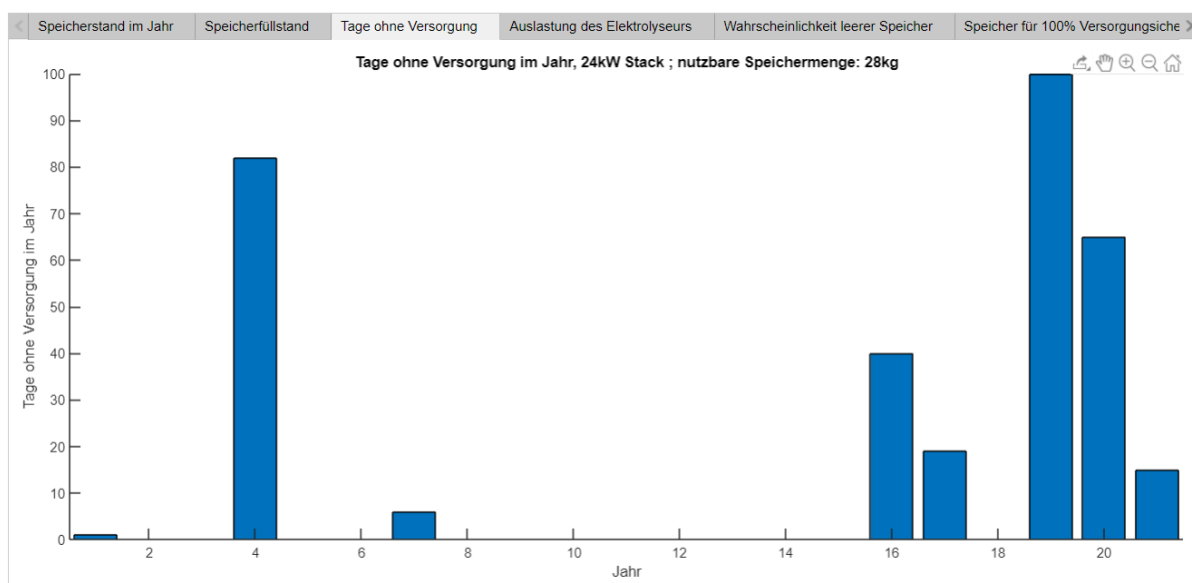


Abbildung 7: Screenshot der Ausgabe des Dimensionierungswerkzeugs zu den Tagen ohne H₂-Versorgung bei der Verwendung eines automatisch dimensionierten Wasserstoffspeichers

7. FAZIT UND AUSBLICK

In den hier gemachten Ausführungen wurde gezeigt, dass es mit dem sich in der Entwicklung befindlichen Dimensionierungswerkzeug mit Hilfe von wenigen Eingaben möglich ist, zu ersten Aussagen für eine grundlegende Systemdimensionierung von Wasserstoffinfrastruktursystemen an regionalen Erneuerbaren-Energien-Anlagen zu kommen. Dies kann dazu beitragen, schneller als bisher die technische Machbarkeit von angestrebten H₂-Versorgungslösungen zu ermitteln und zu bewerten. In der weiteren Entwicklung soll das Dimensionierungswerkzeug dahingehend ergänzt werden, dass anhand der dimensionierten Systemkomponenten und hinterlegten Datenbankeinträgen für die CAPEX und OPEX Kosten der einzelnen Komponenten die H₂-Gestehungskosten für dezentrale Wasserstofferzeugungs- und Verbrauchsinfrastrukturen berechnet werden können, um erste überschlägige Aussagen zu deren Wirtschaftlichkeit zu treffen.

8. DANKSAGUNG

Das dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Teilvorhaben des Verbundvorhabens „h2well-compact Kompaktes Wasserstoffversorgungssystem für dezentrale Mobilitätsanwendungen“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderprogramms „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ unter dem Förderkennzeichen 03WIR1804A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die geförderten Forschungspartner im Verbundvorhaben h2well-compact sind: Bauhaus-Universität Weimar, Energieversorgung Apolda GmbH, Fraunhofer IKTS Hermsdorf, Höschel & Baumann Elektro GmbH, Imaginata e.V., IMG Electronic & Power Systems GmbH, Kyros Hydrogen Solutions GmbH, MAXIMATOR GmbH, Rießner-Gase GmbH.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E Amores, J Rodríguez, C Carreras. Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (25) (2014) 13063-13078.
- [2] M Deymi-Dashtebayaz, M Farzaneh-Gord, N Nooralipoor, H Niazmand, The complete modelling of the filling process of hydrogen onboard vehicle cylinders. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 33 (2) (2016) 391-399.
- [3] Ø Ulleberg, R Hancke, Techno-economic calculations of small-scale hydrogen supply systems for zero emission transport in Norway. *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2) (2020) 1201-1211.
- [4] NA Kelly, TL Gibson, DB Ouwerkerk, A solar-powered, high-efficiency hydrogen fueling system using high-pressure electrolysis of water: Design and initial results. *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (11) (2008) 2747-2764.
- [5] F Shahnian, R Majumder, A Ghosh, G Ledwich, F Zare, Operation and control of a hybrid microgrid containing unbalanced and nonlinear loads. *Electric Power Systems Research* 80 (8) (2010) 954-965.
- [6] A Mansour-Saatloo, M Agabalaye-Rahvar, MA Mirzaei, B Mohammadi-Ivatloo, M Abapour, K Zare, Robust scheduling of hydrogen based smart micro energy hub with integrated demand response. *Journal of Cleaner Production* 267 (2020).
- [7] F Grüger, O Hoch, J Hartmann, M Robinius, D Stolten, Optimized electrolyzer operation: Employing forecasts of wind energy availability, hydrogen demand, and electricity prices. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (9) (2019) 4387-4397.

- [8] FK Arabul, AY Arabul, CF Kumru, AR Boynuegri, Providing energy management of a fuel cell–battery–wind turbine–solar panel hybrid off grid smart home system. *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (43) (2017) 26906-26913.
- [9] D Steward, M Penev, G Saur, W Becker, J Zuboy, Fuel Cell Power Model Version 2: Startup Guide, System Designs, and Case Studies Modeling Electricity, Heat, and Hydrogen Generation from Fuel Cell-Based Distributed Energy Systems. Technical Report NREL/TP- 5600-57457, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, June 2013.
- [10] JG García Clúa, RJ Mantz, H De Battista, Hybrid control of a photovoltaic-hydrogen energy system. *International Journal of Hydrogen Energy* 33 (13) (2008) 3455-3459.
- [11] R Fang, Y Liang, Control strategy of electrolyzer in a wind-hydrogen system considering the constraints of switching times. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (46) (2019) 25104-25111.
- [12] MF Jentsch, S Büttner. Dezentrale Umsetzung der Energie- und Verkehrswende mit Wasserstoffsystemen auf Kläranlagen. *gwf Gas + Energie* 160 (6) (2019) 28-39.
- [13] OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org>