

# Von der Wasserstoffherzeugung zum Endabnehmer: Aufbau einer Wasserstofftankstelle mit zusätzlichem Trailertransport

**Christina Weig, Katharina Zeiser (beide Institut für Systemische Energieberatung GmbH an der Hochschule Landshut); Prof. Dr. Petra Denk, Hochschule Landshut; Rolf Holzleitner, Bürgermeister Markt Reisbach**

*Grundlage für den vorliegenden Artikel sind die ersten Ergebnisse des Teilenergie nutzungsplans des Markts Reisbach mit Schwerpunkt „Wasserstoff“ [1]. Dieser ist vom Institut für Systemische Energieberatung an der Hochschule Landshut erarbeitet und vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie gefördert worden. Nach der Thematisierung der Wasserstoffherzeugung in der vorangegangenen Veröffentlichung ist es Ziel des vorliegenden Artikels, die Grundlagen, Herausforderungen und Erkenntnisse zur Verwertung des erzeugten grünen Wasserstoffs darzustellen.*

## **Definierte Szenarien für die Wasserstoffherzeugung**

Basis für die definierten Szenarien sind die im Markt vorliegenden erneuerbaren Energiepotenziale sowie die allgemeinen Erkenntnisse zur Dimensionierung des Elektrolyseurs [1]. Die weiteren Überlegungen zur Verwertung des grünen Wasserstoffs bauen daher auf den beiden in nachfolgender Abbildung dargestellten Szenarien auf. Zudem stellt Abbildung 1 das im Rahmen des Teilenergie nutzungsplans definierte Gesamtsystem der Wasserstoffherzeugung und -verwertung dar.

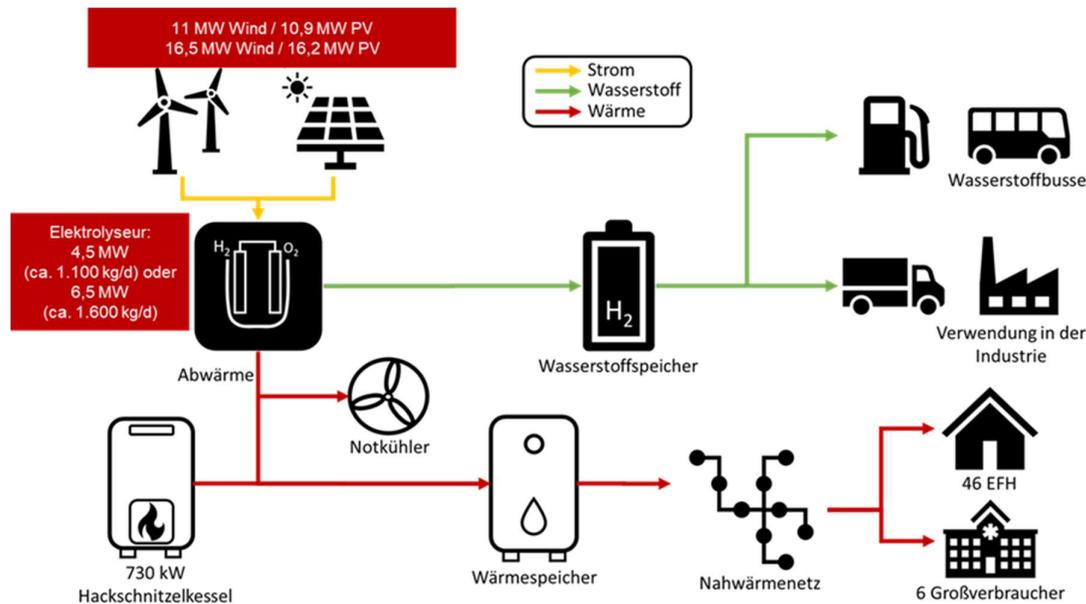


Abbildung 1: Gesamtsystem im Markt Reisbach

### Notwendige Komponenten zur Verwertung des Wasserstoffs

Um die Nutzfahrzeuge betanken zu können, hat sich in der Praxis ein Betankungsdruck in Höhe von 500 bar als Stand der Technik etabliert, um nach dem Tankvorgang 350 bar im Tank des Nutzfahrzeugs zu erreichen. Demzufolge ist für den angedachten Verwertungsweg eine Verdichtung mit einem Eingangsdruck von 30 bar und einem Ausgangsdruck von 500 bar notwendig. Nachfolgende Abbildung 2 zeigt dementsprechend die notwendigen Komponenten zur Umsetzung der beschriebenen Anforderungen. Wesentlich für die Verwertung des Wasserstoffs ist dabei ein Kompressor, der die erzeugte Menge Wasserstoff von 30 bar auf 500 bar verdichtet. Zwischen Kompressor und Elektrolyseur ist ein Niederdrucktank bei 30 bar notwendig. An den Kompressor schließt sich ein stationärer Hochdruckspeicher an, der dazu dient, genügend Wasserstoff für die täglich geplanten Betankungsvorgänge (Liefersicherheit) vorzuhalten. Die Zapfanlage für die Fahrzeuge und die Abfüllvorrichtung für die Trailer, in die der überschüssige Wasserstoff gespeist wird, vervollständigen das System.

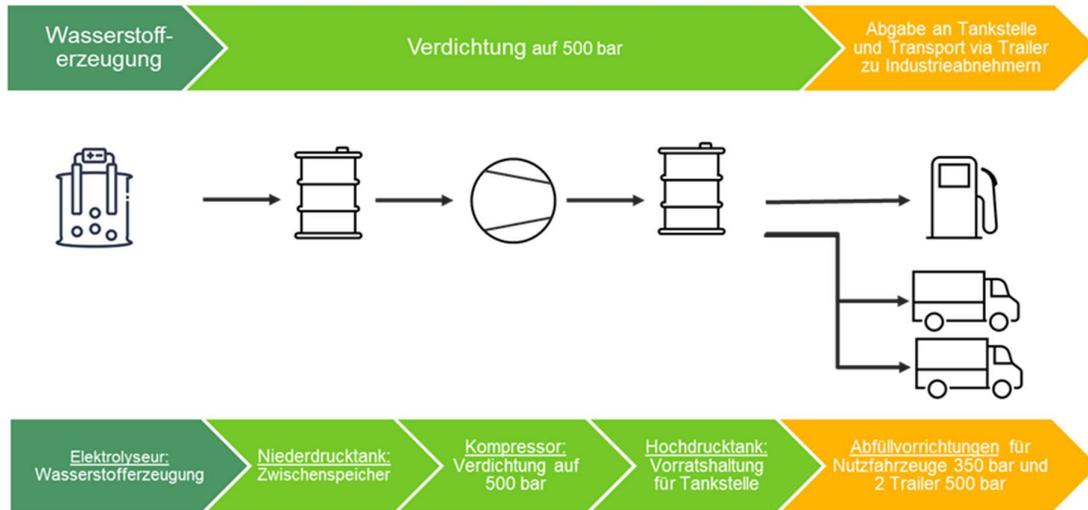


Abbildung 2: Notwendige Komponenten für die Verwertung des Wasserstoffs in einer Tankstelle sowie Transport via Trailer

### Grundlagen für die Dimensionierung des Verwertungssystems

Für die Dimensionierung der einzelnen Komponenten sind folgende Annahmen getroffen worden:

- Das in [1] ermittelte „optimale“ Wasserstofferzeugungsprofil (obige Szenarien) dient als Grundlage für die Auslegung.
- Der erzeugte Wasserstoff soll zu 100 % verwertet werden:
  - o Für die Betankung der Nutzfahrzeuge soll 100 % Liefersicherheit gewährleistet werden.
  - o Die Abnahme via Trailer erfolgt sowohl zeitlich als auch mengenmäßig vollkommen flexibel.

Um einen konkreten Verwertungsfall dimensionieren zu können, ist zunächst, nach Rücksprache mit verschiedenen Wasserstofftankstellenherstellern, ein Nachfragefall für die Abnahme des Wasserstoffs an der Tankstelle definiert worden. Dieser sieht vor, dass täglich zehn Nutzfahrzeuge in einem Takt von einer Stunde an Wochentagen betankt werden. Eine Tankfüllung wird mit 20 kg angenommen. Am Wochenende reduziert sich die Anzahl der betankten Fahrzeuge auf zwei Fahrzeuge an Samstagen und ein Fahrzeug an Sonntagen. Es ergibt sich daher ein Wasserstoffabsatz von max. 200 kg pro Tag. Dieser soll stets zur Verfügung gestellt werden können.

Nachfolgende Abbildung 3 zeigt die tägliche Wasserstoffproduktion des Elektrolyseurs auf Grundlage der angenommenen oben dargestellten Szenarien (siehe Abbildung 1) und damit auf Grundlage der angesetzten Wind- und PV-Erzeugungsprofile. Neben den Mittelwerten der Wasserstofferzeugung der Szenarien stellt die Abbildung auch den maximalen Tagesbedarf der Tankstelle (schwarze Linie) dar. Es wird ersichtlich, dass die täglich erzeugten Wasserstoffmengen stark schwanken und der Mittelwert der Wasserstofferzeugung deutlich über dem maximalen Tagesbedarf der Tankstelle liegt. Jedoch zeigt sich auch, dass es sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 2 vor allem in den Wintermonaten Zeiten gibt, in denen die produzierte Wasserstoffmenge unter den maximalen Tagesbedarf der Tankstelle fällt.

Um die definierten Bedingungen erfüllen zu können, ist es somit notwendig, durch die sinnvolle Dimensionierung der einzelnen Komponenten einerseits starke Schwankungen im Wasserstofferzeugungsprofil ausgleichen zu können, um den produzierten Wasserstoff durchgehend verwerten, und andererseits Zeiträume geringer oder keiner Wasserstoffproduktion für die Sicherstellung der Betankung der Nutzfahrzeuge überbrücken zu können.

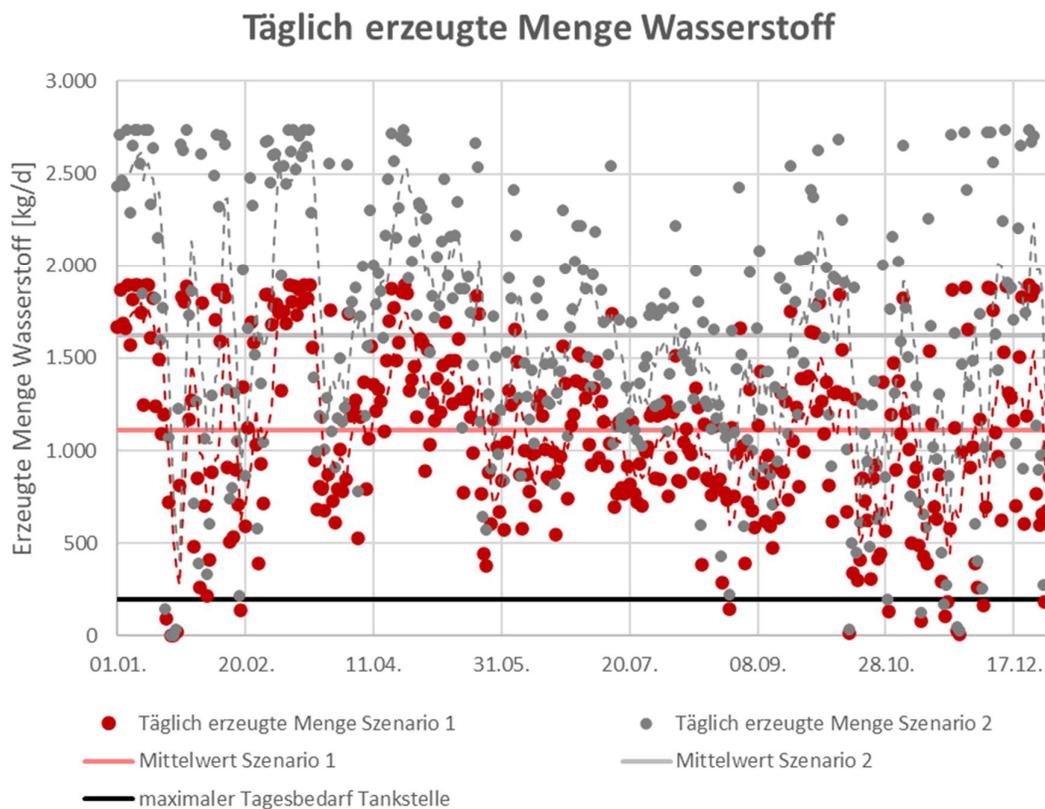


Abbildung 3: Wasserstofferzeugungprofil in beiden betrachteten Szenarien

## Dimensionierung der einzelnen Komponenten

Für die Dimensionierung der Komponenten spielt neben dem Wasserstofferzeugungsprofil die angenommene tägliche Ruhezeit des Kompressors von zwei Stunden eine wesentliche Rolle, da diese auch den Einsatz eines Niederdruckspeichers bedingt.

Der Kompressor wird derart dimensioniert, dass er die maximal anfallende Tagesmenge an produziertem Wasserstoff innerhalb der Tageslaufzeit von 22 Stunden komprimieren kann.

Die maximale Produktionsmenge  $m_{Tag,max}$  berechnet sich mit  $\dot{V}_E$  als dem Volumenstrom des Elektrolyseurs und  $t_{E,Tag}$  als dem Zeitintervall, in dem der Elektrolyseur täglich produziert, zu

$$m_{Tag,max} = \dot{V}_E \cdot t_{E,Tag} \quad (1)$$

Der notwendige Volumenstrom des Kompressors  $\dot{V}_K$  berechnet sich mit  $m_{Tag,max}$  als der Menge Wasserstoff, die maximal an einem Tag zu verdichten ist und  $t_{K,Tag}$  als dem Zeitintervall, in dem der Kompressor verdichten kann, zu

$$\dot{V}_K = \frac{m_{Tag,max}}{t_{K,Tag}} \quad (2)$$

Der Niederdrucktank muss in der Stillstandzeit des Kompressors die vom Elektrolyseur produzierte Menge Wasserstoff aufnehmen können. Das Fassungsvermögen des Niederdrucktanks  $m_{NDr}$  berechnet sich mit der Ruhezeit des Kompressors  $t_{K,Ruhe}$  zu

$$m_{NDr} = \dot{V}_E \cdot t_{K,Ruhe} \quad (3)$$

Des Weiteren muss ein stationärer Speicher dimensioniert werden, der in Zeiten zu geringer Wasserstoffproduktion die Nachfragemenge an der Tankstelle stets vorhält. Dieser stationäre Speicher soll dementsprechend dazu dienen, einerseits an Tagen mit hohen Wasserstofferzeugungsmengen diese zwischenspeichern und andererseits die Liefersicherheit an der Tankstelle an Tagen mit geringen Wasserstofferzeugungsmengen sicherzustellen. Für eine sinnvolle Dimensionierung ist daher zum einen die Kenntnis über den längsten Zeitraum ohne Wasserstoffproduktion und zum anderen die Vorgabe einer täglichen Nachfragemenge an der Tankstelle als Simulationseingabe notwendig. Die Ermittlung der Speichergröße erfolgte schließlich in einem iterativen Prozess bis zu dem Punkt, an dem eine Liefersicherheit an der Tankstelle nicht mehr gewährleistet werden konnte.

## Aufbau eines komplexen Simulationstools zur Füllstandsberechnung

Für die finale Dimensionierung der einzelnen Komponenten ist daher ein komplexes Simulationstool aufgebaut worden, welches einerseits die Wasserstoffproduktion und andererseits die Wasserstoffverwertung via Tankstelle (vorgegebene tägliche Nachfragemenge) und via Trailer zeitaufgelöst abbilden kann. Als Eingangsparameter in die Simulation dienen das definierte Nachfrageprofil sowie das errechnete Verdichtungsprofil des Kompressors, eine sinnvoll festgelegte Größe des stationären Speichers (Ausgangswert) und die angenommene Kapazität des Trailers sowie die Dauer der Abwesenheit des Trailers durch den Abtransport des Wasserstoffs (siehe Abbildung 4). Die Intelligenz der Simulation steckt in der adaptiven Berechnung, welche den optimalen Abholzeitpunkt für den Trailer findet. Diese berechnet anhand der prognostizierten Erzeugungs- und Nachfragemengen, wann der Trailer abgeholt werden soll. Dabei soll der Trailer bei Abholung möglichst voll beladen sein, um die Zahl der Transportfahrten zu reduzieren. Während der Abwesenheit des Trailers muss eine Speicherung des in dieser Zeit produzierten Wasserstoffs im stationären Speicher möglich sein. Das Simulationstool ermöglicht damit in Summe eine zeitaufgelöste Abbildung der Füllstände der einzelnen Komponenten und damit am Ende auch eine sinnvolle Dimensionierung dieser unter der Vorgabe der zu jedem Zeitpunkt vollständigen Verwertung des erzeugten grünen Wasserstoffs über die Tankstelle oder die Trailer.

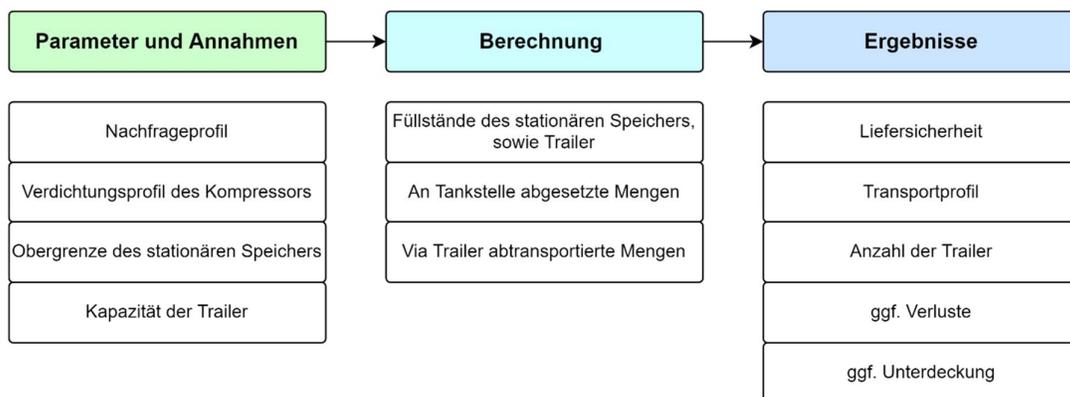


Abbildung 4: Datenverarbeitung der entwickelten Simulation

## Optimierung der Simulation

Mit Hilfe des Simulationstools ist es möglich, die einzelnen Komponenten – also auch die Traileranzahl - anzupassen. Es zeigt sich, dass unter den angesetzten Rahmenbedingungen (Liefersicherheit an der Tankstelle, zu jedem Zeitpunkt vollständige Verwertung des erzeugten grünen Wasserstoffs) der Einsatz nur eines Trailers nicht ausreichend ist, da hier nicht gewollte Wasserstoffverlust anfallen. Wird die Simulation mit zwei Trailern durchgeführt, die wechselnd befüllt und entleert werden, kann Wasserstoffverlust vermieden werden. Wie Abbildung 5 beispielhaft für eine Woche zeigt, steigt der Füllstand des stationären Tanks und sinkt je nach Bedarf der nächsten Tage ab, die auftretende Nachfrage kann jedoch jederzeit bedient werden. Die transportierte Menge ist dann wie erwartet nicht immer gleich groß, sondern schwankt.

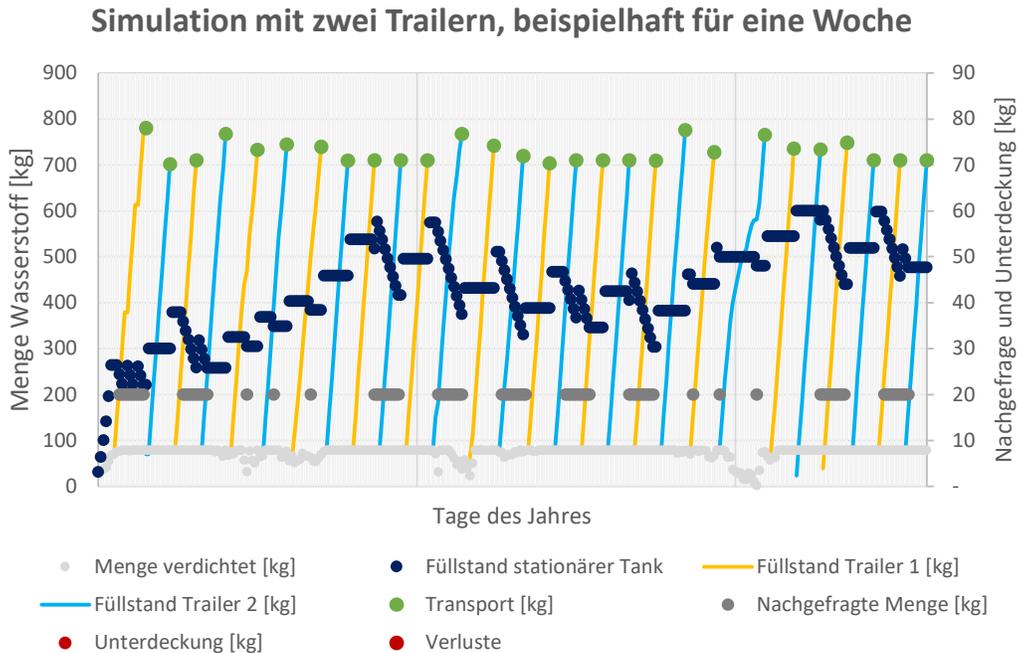


Abbildung 5: Simulation einer Woche mit zwei Trailern

## Ergebnisse

Auf Grundlage der exakten Dimensionierung der einzelnen Komponenten des Verwertungsweges ist es schließlich möglich, einerseits den Energiebedarf des Verwertungssystems zu berechnen und andererseits die Gestehungskosten der Verwertungswege zu ermitteln sowie die notwendige Gesamtfläche (siehe Abbildung 6) zur Realisierung des Gesamtsystems (siehe Abbildung 1) zu definieren. Auf dieser Grundlage

ergeben sich für die Verwertung des Wasserstoffs Gestehungskosten in Höhe von 3 bis 3,5 €/kg (netto) ohne Förderung in Jahr 1. In der Simulation ist keine Einschränkungen hinsichtlich der zeitlichen und mengenmäßigen Anforderung sowie der Liefersicherheit des Wasserstoffabsatzes via Trailer angenommen worden. Ist dies bei den tatsächlichen Kunden nicht der Fall, so kommen zusätzliche Kosten durch die dann ggf. notwendige Speicherung des Wasserstoffs hinzu.

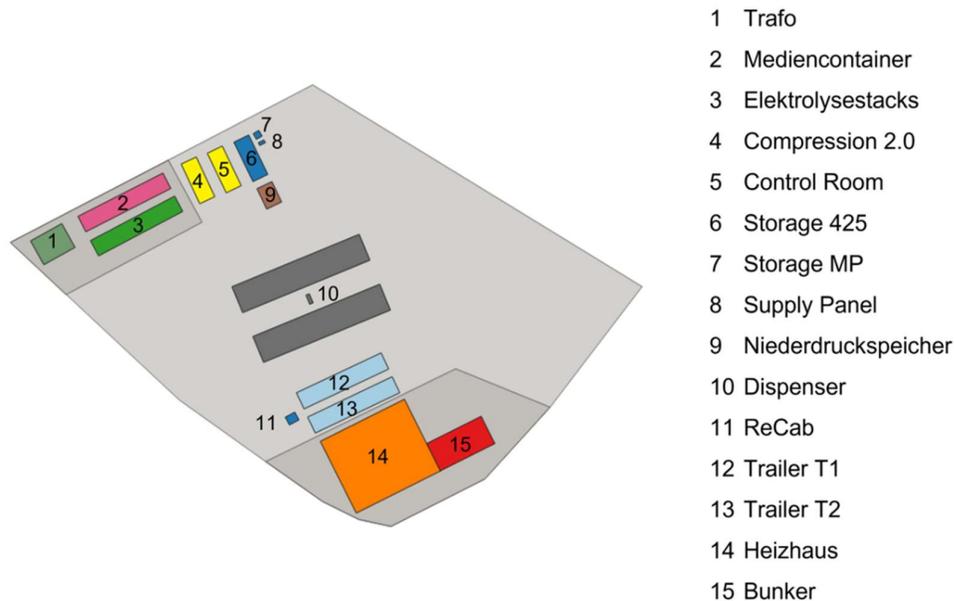


Abbildung 6: Platzbedarf und Anordnung des Gesamtsystems

### Gegebenheiten vor Ort für effizientes Gesamtsystem entscheidend

Im Rahmen der Erarbeitung des Teil-Energienutzungsplans hat sich gezeigt, dass einige Gegebenheiten vor Ort entscheidend sind, um die Realisierung eines Wasserstoffprojekts näher zu betrachten:

- Kenntnis über die Stromnetzauslastung vor Ort zur Klärung der Möglichkeiten für den erneuerbaren Strombezug
- Potenzialflächen erneuerbarer Energien bei Anspruch an eine durchgehende Wertschöpfungskette vor Ort, vorzugsweise aus einem Mix aus PV- und Wind-Strom
- Nähe zu potenziellen Wasserstoffabnehmern bzw. einer Erdgasleitung mit entsprechender Dimension zur Realisierung sinnvoller Wasserstoffabsatzmengen oder die Möglichkeit der Betankung von Nutzfahrzeugen bestenfalls vor Ort
- Sinnvolles Wasserstoffabnahmekonzept durch regional ansässige Industriebetriebe

- Möglichkeiten eines sinnvollen Standorts je nach angedachtem Verwertungsweg unter Berücksichtigung des Potenzials der Abwärmenutzung des Elektrolyseurs
- Klärung der Nutzung bestehender Infrastruktur (Wärmenetze, Erdgasnetze)

Insgesamt ist dementsprechend ein individuell angepasstes Gesamtkonzept je Kommune notwendig, wobei allgemeine Grundsätze beachtet [1] und vorab wesentliche Rahmenbedingungen geklärt werden sollten. Konkurrenzfähige Wasserstoffgestehungskosten [2] des Gesamtsystems können sich unter geeigneten Rahmenbedingungen und einem sinnvollen Gesamtkonzept vor Ort auch bei heimischer Produktion von grünem Wasserstoff ergeben. Zudem wird durch die Darstellung der gesamten Wertschöpfungskette zur Produktion von grünem Wasserstoff der Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland weiter forciert, fossile Energieträger in der Industrie sowie ggf. im Verkehr ersetzt und damit die regionale Wertschöpfung gestärkt. Zusätzlich zur aktuellen Wasserstoffstrategie der Bundesregierung ist daher im aktuellen Stadium auch die regionale Produktion von grünem Wasserstoff unterstützenswert.

#### Literatur

[1] Institut für Systemische Energieberatung an der Hochschule Landshut GmbH, Wasserstoffherzeugung in Bayern: Welche Rolle spielen ländliche Kommunen?, Sonne, Wind und Wärme, April/2023, [https://www.haw-landshut.de/fileadmin/Hochschule\\_Landshut\\_NEU/Ungeschuetzt/An-Institute/ISE/download/pdf/Ver%C3%B6ffentlichungen/Sonne\\_Wind\\_und\\_W%C3%A4rme.pdf](https://www.haw-landshut.de/fileadmin/Hochschule_Landshut_NEU/Ungeschuetzt/An-Institute/ISE/download/pdf/Ver%C3%B6ffentlichungen/Sonne_Wind_und_W%C3%A4rme.pdf)

[2] Institut für Systemische Energieberatung an der Hochschule Landshut GmbH, Wie konkurrenzfähig ist in ländlichen Regionen produzierter grüner Wasserstoff?, ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN 73. Jg 2023 Heft 5

#### Weitere Informationen:

Institut für Systemische Energieberatung GmbH  
an der Hochschule Landshut

Am Lurzenhof 1  
84036 Landshut  
Tel.: +49(0)871 – 506 274  
Fax-Nr.: +49(0)871 – 506 9274  
info@ise-landshut.de