

WASSERSTOFFERZEUGUNG UND -NUTZUNG IM QUARTIER

Diskussion möglicher Konzepte und erste Einschätzung der Umsetzbarkeit

Impulspapier im Auftrag des BUND im Rahmen des Kopernikus-Vorhabens »P2X«

WASSERSTOFFERZEUGUNG UND -NUTZUNG IM QUARTIER

Diskussion möglicher Konzepte und erste Einschätzung der Umsetzbarkeit

Dr. Anna-Lena Klingler
Jakob Häußermann

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Preprint

Datum: 20.12.2021

Inhalt

1	Wasserstofferzeugung und -nutzung im Quartier.....	4
2	Hintergrund	6
2.1	Wasserstoff-Technologien	6
2.2	Wasserstoffbedarf im Quartier	8
2.3	Wasserstoff in der Gesellschaft	10
3	Typologien zukünftiger Wasserstoff-Quartiere	13
3.1	Wasserstoffnutzendes Quartier: Wärme	13
3.2	Wasserstoffnutzendes Quartier: Strom + Wärme	15
3.3	Wasserstofferzeugendes Quartier.....	17
3.4	Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartier.....	18
4	Wasserstoff - zentral oder dezentral?.....	21
	Referenzen	23

Wasserstoffherzeugung und -nutzung im Quartier

Die Jahre 2016 bis 2020 waren die wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen. Insgesamt lagen acht der wärmsten zehn Jahre zwischen 2010 und 2020. Allein 2020 lag die Temperatur weltweit 1,25 °C über dem vorindustriellen Niveau. In Europa war 2020 durch die außergewöhnliche Hitzewelle mit mehr als 2,2 °C über dem vorindustriellen Zeitraum das mit Abstand wärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen [1]. Dieser Anstieg ist nicht zuletzt eine Warnung, dass das Ziel verfehlt werden könnte, die globale Erwärmung auf weniger als 2 °C, am besten auf 1,5 °C, gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu beschränken. An dieser Ausgangslage hat selbst die Verringerung der deutschen CO₂-Emissionen um 80 Millionen Tonnen im Pandemiejahr 2020 wenig geändert. Denn mit einer sich schrittweise erholenden Wirtschaft sind auch die CO₂-Emissionen wieder gestiegen. Jedoch können nur durch Erreichung der Pariser Klimaziele die Auswirkungen des Klimawandels in einem akzeptablen Rahmen gehalten werden.

Vor diesem Hintergrund wird durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (z. B. Wind- und Sonnenenergie) die Reduktion der CO₂-Emissionen angestrebt. Allerdings betreffen die Einsparungen bisher fast ausschließlich den Stromverbrauch. Strom macht gegenwärtig jedoch nur circa 20% unseres gesamten Endenergieverbrauchs aus [2]. Der Stromwende sollte daher eine umfassendere Energiewende folgen. In diesem Sinne müssen zusätzlich zur Reduktion des Energieverbrauchs weitere bisherige Energieträger, wie z. B. Mineralölprodukte in den Bereichen Verkehr, Industrie und Haushalte, durch CO₂-neutrale Energieträger ersetzt werden, um die CO₂-Emissionen weiter zu senken.

Hier bietet Wasserstoff, erzeugt durch Strom aus erneuerbare Energien («grüner Wasserstoff»), die Möglichkeit, diese Energieträger weiter zu ersetzen, die CO₂-Emissionen zu reduzieren und dadurch die Klimaziele zu erreichen. Wasserstoff hat zwei wesentliche Vorteile:

- Wasserstoff ermöglicht es, erneuerbare Energie zu speichern und nahezu verlustfrei vom Ort der Wasserstoffproduktion zum Ort der Wasserstoffnutzung zu transportieren.
- Wasserstoff kann flexibel in Wirtschaftsbereichen eingesetzt werden, die sich nicht oder nur schwer vollständig elektrifizieren lassen. Hierzu zählen beispielsweise die Kälte- und Wärmeversorgung, der Mobilitätsbereich und die Industrien, in denen Wasserstoff als Energieträger, Kraft- und Brennstoff oder als Rohstoff dienen kann.

Dabei besteht bei der Effizienz bei der Umwandlung von Energie in Wasserstoff aktuell jedoch noch Verbesserungspotential. Zudem liegt in der Herstellung von Wasserstoff eine weitere Herausforderung, insofern dem geschätzten Bedarf von grünem Wasserstoff in Deutschland in einer Höhe von bis zu 80 TWh bis 2030 aktuell nur sehr geringe Produktionskapazitäten gegenüberstehen [3]. Zwar sind strategische internationale Energiepartnerschaften angedacht, allerdings stehen auch in den potentiell wasserstoffexportierenden Ländern bisher noch nicht genügend große Mengen erneuerbaren Stroms zur Verfügung [4]. Es wird daher diskutiert, ob auch eine dezentrale Erzeugung von Wasserstoff, z.B. in Quartieren, einen Beitrag zur Deckung des Wasserstoffbedarfs leisten kann. Denn die dezentrale Erzeugung von grünem Wasserstoff ermöglicht eine bessere Integration von erneuerbaren Energien und durch eine gekoppelte Strom-Wärme-Nutzung kann die Effizienz der Wasserstoffherzeugung gesteigert werden [5].

Um die Möglichkeiten einer Wasserstoffherzeugung und -nutzung in Quartieren genauer zu beleuchten, ergeben sich daher für das vorliegende Impulspapier folgende Diskussionspunkte:

- *Welche Konzepte gibt es zur dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung in (Wohn-)Quartieren?*
- *Wie ist die dezentrale Wasserstoffherzeugung und -nutzung hinsichtlich ihrer zeitlichen Umsetzbarkeit, ihrem technischen sowie administrativen Schwierigkeitsgrad, möglicher Zielkonflikte, der ökonomischen sowie der zivilgesellschaftlichen Akzeptanz zu bewerten?*

Um die oben genannten Fragen zu adressieren, widmen wir uns zunächst den notwendigen Technologien für Wasserstoffherzeugung und -verbrauch, dem Wasserstoffbedarf in den Quartieren selbst und der Sicht der Gesellschaft auf den Energieträger Wasserstoff (Kapitel 2). Anschließend werden verschiedene Wasserstoff-Quartierskonzepte analysiert und bewertet (Kapitel 3).

2 Hintergrund

Unter Quartier wird hier ein kleinteiliges zusammenhängendes Siedlungsgebiet verstanden, das an übergreifende Energieinfrastrukturen oder Industriestandorte angrenzt und mit diesen vielfältige Austauschbeziehungen eingehen kann. Im Rahmen dieses Impulspapieres liegt der Fokus auf Wasserstoff in Wohnquartieren. Die folgenden Betrachtungen werden daher aus der Quartiersperspektive dargestellt.

2.1 Wasserstoff-Technologien

Erzeugung von grünem Wasserstoff

Zur Erzeugung von grünem Wasserstoff wird Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, um Wassermoleküle in einem Elektrolyseur in ihre Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Aufgrund der entstehenden Wirkungsgradverluste wird idealerweise ein hoher Anteil von überschüssigem Strom in der Wasser-Elektrolyse eingesetzt, dh. Strom, der nicht verbraucht werden könnte. Darüber hinaus wird auch der Betrieb bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien im Stromnetz diskutiert. Eine solche Betriebsweise wäre allerdings durch den Ausbau zusätzlicher erneuerbaren Energien abzusichern.

Bei der Elektrolyse von Wasser werden typischerweise Wirkungsgrade von 70 bis 80% erreicht. Wird ein Elektrolyseur hauptsächlich für die Verwendung von Stromüberschüssen genutzt, also mit einer reduzierten Anzahl an Volllaststunden, führt der Wechselsbetrieb bzw. ungünstiger Teillastbetrieb zu einer niedrigeren Energieeffizienz [6]. In einigen Systemen werden daher Batterien als Pufferspeicher integriert, um kurzzeitige Abweichungen in der erneuerbaren Erzeugung auszugleichen [7].

Die Effizienzverluste bei der Elektrolyse werden in Form von Wärme freigesetzt. Diese Abwärme kann beispielsweise in Nahwärmenetze eingespeist und für Raumwärme genutzt werden. Die Gesamteffizienz des Systems kann dadurch erhöht werden [8]. Entsprechend wird der Betrieb einer Elektrolyse-Anlage in der Nähe von (Wohn-)quartieren und korrespondierendem Wärmebedarf diskutiert.

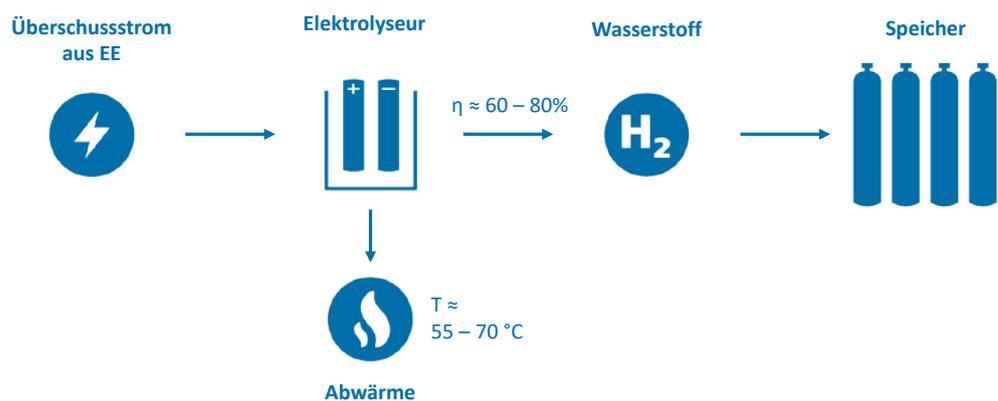


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Wasserstoffherzeugung und Speicherung.

Speicherung und Transport von Wasserstoff

Um Wasserstoff zu speichern gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten: gasförmig in Druckspeichern, flüssig oder in Adsorptionsspeichern. Bei der Druckspeicherung wird der

Wasserstoff je nach Anwendungsgebiet in Tanks mit bis zu 700 bar Druckniveau gepresst. Trotz des hohen Drucks wird eine vergleichsweise geringe volumetrische Energiedichte erzielt. Sollen große Mengen Energie transportiert werden, wird Wasserstoff vor der Speicherung verflüssigt. Flüssig wird Wasserstoff allerdings erst bei -253 °C . Die Speicherung erfolgt in sogenannten Kryotanks, dh. Tanks für flüssige, tiefkalte Gase. Diese benötigen sehr gute Isolationseigenschaften, wodurch die Verluste durch Erwärmung geringgehalten werden. Neben Druck- und Flüssiggasspeichern gibt es noch andere Methoden für die Speicherung von Wasserstoff. Beispielsweise nutzen sogenannte Metallhydridspeicher: bestimmte Metalllegierungen, die Wasserstoff adsorbieren und so speichern [9].

Die Speicherung von Wasserstoff ist mit energetischem Aufwand verbunden. So gehen beispielweise durch die Reinigung des Wasserstoffs und die Kompression für die anschließende Speicherung in Drucktanks etwa 10 bis 15% der Energie verloren [10]. Alternative Speicher wie Metallhydrid- oder Flüssigspeicher schneiden bei der Effizienz in der Regel noch schlechter ab.

Transportiert werden kann Wasserstoff grundsätzlich in Pipelines bzw. Gasleitungen oder als Massengut in Einzelvehikeln, wie z. B. Schiffen, Zügen oder Lkw. Auf Lkw und Zügen lässt sich Wasserstoff mit allen vorgestellten Speichertechnologien auch transportieren. Die Behälter fallen entsprechend groß aus. Aufgrund der geringen erreichbaren Transportvolumina wird der Straßentransport vor allem für kleinere Mengen und die Nahverteilung eingesetzt werden. Für den nationalen und regionalen Transport sowie die lokale Verteilung spielen Wasserstoffpipelines oder umgerüstetes Erdgasleitungen die zentrale Rolle [11].

Nutzung von Wasserstoff

Die stoffliche Nutzung von Wasserstoff, d.h. Wasserstoff als Rohstoff, spielt in Wohnquartieren bisher eine vernachlässigbare Rolle. Wasserstoff kann perspektivisch als Brennstoff zur Erzeugung thermischer Energie oder in einer Brennstoffzelle zur Erzeugung von Strom genutzt werden.

Um das momentan verwendete fossile Erdgas in Wohngebäuden zu ersetzen, ist Wasserstoff als Brennstoff für Heizsysteme in der Diskussion: Die in vielen Brennwertthermen installierten Gasbrenner können nach Herstellerangaben meist schon heute mit Wasserstoffanteilen von 10% bis 20% umgehen. Neue Geräte können mit einem Anteil von bis zu 30 Prozent betrieben werden, eine Umrüstung auf 100% Wasserstoff ist laut Herstellerangaben möglich [12]. Allerdings der Einsatz von Wasserstoff zur Erzeugung von Wärme kritisch gesehen, da hierfür hochwertige elektrische Energie unter Effizienzverlusten in niederwertige thermische Energie umgewandelt wird.

Die am häufigsten in Betracht gezogene Form der Nutzung ist daher die Rückverstromung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle. Hierbei wird die chemisch gebundene Energie des Wasserstoffs nicht über einen Verbrennungsprozess gewonnen, sondern durch eine elektrochemische Reaktion. Neben dem Strom entsteht bei der Reaktion auch Wärme, die wiederum zur Gebäudeheizung genutzt werden kann. Es wird zwischen Nieder- und Hochtemperaturbrennstoffzellen unterschieden. Niedertemperaturbrennstoffzellen arbeiten bei Temperaturen bis maximal 100 °C . Dass die Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau entsteht schränkt die Nutzungsmöglichkeiten ein; auch für die Nutzung in einem Fernwärmenetz kann die Temperatur zu niedrig sein [12]. Hochtemperaturbrennstoffzellen arbeiten bei wesentlich höheren Temperaturen von hunderten, teilweise sogar bei rund 1000 °C . Solche Brennstoffzellen haben für stationäre Anwendungen wichtige Vorteile: häufig höhere Wirkungsgrade, ein hohes Temperaturniveau der Abwärme und die relativ kostengünstige Konstruktion ohne teure Metalle wie Platin. Allerdings ist diese Brennstoffzellentechnologie weniger flexibel im Betrieb [14].

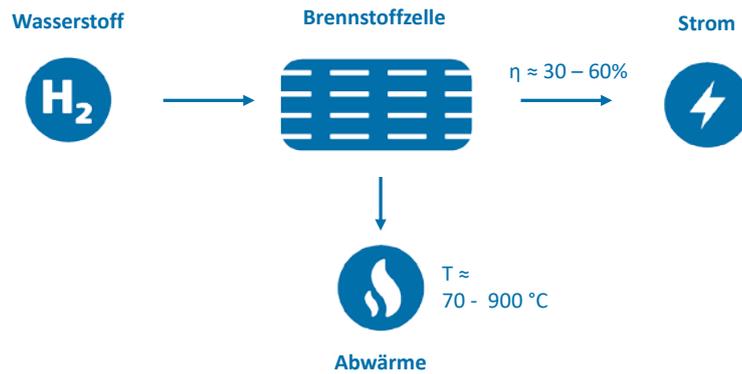


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Wasserstoffnutzung in einer Brennstoffzelle.

2.2 Wasserstoffbedarf im Quartier

Ein Wasserstoffbedarf in Wohnquartieren wird generell für die Versorgung der Bewohner mit Wärme, Strom und für die Mobilität gesehen.

Wasserstoff zur Wärmeerzeugung

Mit mehr als 70% wird der größte Teil des Energieverbrauchs privater Haushalte für Raumwärme genutzt. Dazu kommen weitere 14% des Energieverbrauchs für Warmwasserbereitung [15]. Allerdings sinkt der Energiebedarf für Raumwärme durch energetische Sanierungen und eine verbesserte Wärmeisolation neuer Wohngebäude seit einigen Jahren deutlich: seit 2008 reduzierte sich der spezifische Endenergieverbrauch (Energieverbrauch pro Wohnfläche) für Raumwärme um gut 10% [16]. Um die Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen, muss der Energieverbrauch des Gebäudesektors weiterhin stark zurück gehen. Allerdings führt der parallele Trend zu mehr Haushalten und größeren Wohnflächen tendenziell zu einem höheren Verbrauch. Zudem liegt die Sanierungsrate bei den Bestandsgebäuden weit hinter den Erwartungen zurück [17].

Um den Wärmebedarf in Wohngebäuden bzw. -quartieren zu decken wird Wasserstoff nur in einer untergeordneten Rolle gesehen [18]. Der Wärmebedarf fällt auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau an und für diesen Temperaturbereich stehen bereits heute zahlreiche Alternativen zur Wärmeerzeugung zur Verfügung. Die effizienteste dieser Alternativen ist die Wärmepumpe. Mit Leistungszahlen zwischen 2,5 und 5¹ sind sie alternativen Heizsystemen deutlich überlegen [19]. Allerdings stellen die aktuell auf dem Markt zur Verfügung stehenden Wärmepumpen Nutzwärme auf einem geringen Temperaturniveau zur Verfügung. Niedrige Vorlauftemperaturen sind in der Regel vor allem für Heizsysteme in Gebäuden mit einem relativ hohen Sanierungsgrad geeignet. Die angesprochene niedrige Sanierungsrate hemmt daher den Einsatz dieser Technologie. In den nächsten Jahren werden Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von bis zu 100 °C erwartet. Das genannte Hemmnis der notwendigen Sanierung könnte sich damit perspektivisch auflösen [20].

Zum aktuellen Zeitpunkt ist Erdgas der meistgenutzte Energieträger im Gebäudebereich. Die Anzahl der Erdgasanschlüsse steigt den letzten Jahren weiter an [21]. Dadurch könnte ein sogenannter Lock-in Effekt entstehen, da die hohen Anfangsinvestitionen für

¹ „Die Leistungszahl (auch COP = coefficient of performance) ist das Verhältnis von gewonnener Nutzwärme zur eingesetzten Antriebsenergie. Beispielsweise bedeutet eine Leistungszahl von 3, dass 3 kWh Nutzwärme aus 1 kWh Antriebsenergie und 2 kWh Umwelt- oder Abwärme gewonnen werden können. Die Leistungszahl einer Wärmepumpe wird in der Regel umso geringer, je größer der Temperaturunterschied zwischen Nutzwärme und kaltem Reservoir ist.“ [19]

einen Gasanschluss den baldigen Wechsel zu effizienteren oder klimafreundlicheren alternativen Heizsystemen hemmen.

Für die Haushalte mit einem vorhandenen Gasanschluss wird Wasserstoff als möglicher Energieträger für die Wärmeversorgung diskutiert. Wird das vorhandene Erdgasnetz auf Wasserstoff umgestellt, wird für die Haushalte allerdings ebenfalls eine Umstellung bestehender Gasthermen sowie der Hausleitungen notwendig.

Wasserstoff zur Stromerzeugung

Etwa 18% des Endenergiebedarfs von Haushalten wird durch Strom gedeckt. Durch die Elektrifizierung der Wärmeversorgung (z.B. Wärmepumpen) und der Mobilität wird hier eine deutliche Zunahme erwartet. So kann sich z.B. der Strombedarf eines Haushalts durch die Anschaffung eines Elektroautos verdoppeln oder sogar verdreifachen [22]. Durch sinkende Technologiekosten für Photovoltaik-Anlagen und zusätzliche staatliche Anreize wird ein immer größerer Anteil des Strombedarfs von privaten Haushalten selbst erzeugt und verbraucht. Dieser Eigenverbrauch von Strom beträgt in privaten Haushalten mittlerweile über 2 TWh mit weiterhin steigender Tendenz [23]. In einer wachsenden Anzahl sogenannter Mieterstromkonzepte wird der lokal erzeugte Strom von unterschiedlichen Parteien in Mehrfamilienhäusern oder Quartieren genutzt. Zusätzliche staatliche Maßnahmen wie z.B. eine Photovoltaik-Pflicht in manchen Bundesländern werden diese Entwicklung zukünftig weiter befördern.

Um den Anteil des lokal verbrauchten Stroms zu erhöhen, wird mehr als die Hälfte der installierten Photovoltaik-Anlagen zusammen mit einem stationären Batteriespeicher installiert. So kann überschüssiger Strom aus den sonnenreichen Mittagsstunden in den Abendstunden verbraucht werden. Neben der finanziellen Attraktivität solcher Eigenversorgungskonzepte und der Absicherung gegen steigende Strompreise geben Haushalte zur Motivation an, einen Beitrag zur Energiewende leisten zu wollen und ein allgemeines Interesse an der Technologie zu haben [24]. Vor diesem Hintergrund ist ein Interesse der Haushalte an Wasserstofftechnologien naheliegend. Mittels dezentraler Elektrolyse kann Wasserstoff aus überschüssigem Strom in den ertragreichen Sommermonaten erzeugt und in den Wintermonaten verbraucht werden. Aufgrund der hohen Technologiekosten¹ und der geringen Effizienz kann sich Wasserstoff zur Stromerzeugung in Quartieren derzeit allerdings nicht durchsetzen. Erste Anbieter auf dem Markt gibt es jedoch bereits [25].

Neben dem dargestellten Konzept zur Eigenversorgung von Quartieren mit Strom, wird auch insgesamt für Deutschland ein Bedarf an Wasserstoff zur Deckung der Stromversorgung bzw. zum Erhalt der Versorgungssicherheit erwartet. Eine Analyse und Bewertung dieses nationalen Wasserstoffbedarfs liegt allerdings außerhalb der vorliegenden Betrachtung.

Wasserstoff für die Mobilität

Der Energiebedarf für die Mobilität wird in den gängigen Bilanzierungen nicht den Haushalten bzw. Quartieren zugerechnet, sondern dem Verkehrssektor. Dennoch findet die Versorgung der Mobilitätsbedarfe lokal in den Quartieren statt (z.B. über Tankstellen) und ist seit der Verbreitung von Elektromobilität sogar in den einzelnen Haushalten verortet. Aufgrund der steigenden Reichweiten von batterieelektrischen Pkw, den immer kürzeren Ladezeiten durch Hochleistungs-Ladetechnik und der deutlich geringeren Effizienz gegenüber den Batterie-Fahrzeugen sind Wasserstoff-Pkw aus dem Fokus der Diskussion gerückt. Nach der Nationalen Wasserstoffstrategie [11] und der Fraunhofer-Ge-

¹ Brennstoffzellensysteme sind um etwa den Faktor 2 teurer als herkömmliche Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen [26]. Hinzu kommen die Kosten für Elektrolyseure und Speicher.

sellschaft [27] liegen die vielversprechendsten Einsatzgebiete für die direkte Wasserstoffnutzung in Kombination mit der Brennstoffzelle u.a. in folgenden Anwendungsbereichen: Lkw der mittleren und schweren Gewichtsklassen, Fernreisebusse und Langstreckenbusse im urbanen Umfeld. In reinen Wohnquartieren sind daher keine Wasserstoff-Tankstellen zu erwarten, sie können allerdings in Mischquartieren entstehen.

2.3 Wasserstoff in der Gesellschaft

Akzeptanz von Wasserstoff

Die Verabschiedung der nationalen Wasserstoffstrategie hat einen wichtigen Grundstein gelegt, um die Rolle von Wasserstoff als massentauglichen Energieträger in der Gesellschaft zu etablieren. Eine Studie des Fraunhofer IAO (CERRI) untersucht die Akzeptanz von grünem Wasserstoff in der allgemeinen Bevölkerung [28][29]. Insgesamt wurden 2.054 Bürger:innen befragt. Während Wasserstoff dabei der Mehrheit ein Begriff war (85%), kannte nur ein geringer Anteil der Befragten grünen Wasserstoff (21%). Insbesondere jüngere Personen und Menschen mit höherem Bildungsabschluss zeigten einen höheren Wissensstand. Trotz des evtl. fehlenden Wissens zu grünem Wasserstoff steht der Großteil der Befragten der Nutzung in der eigenen Gemeinde positiv gegenüber (86%). Fast die Hälfte (43%) der Befürwortenden ist sogar bereit, sich für lokale Nutzung von grünem Wasserstoff aktiv einzusetzen. Neben dem assoziierten Nachhaltigkeitsversprechen der Technologie ist hierfür vor allem das Vertrauen in Prozesse und Akteure, die für die Einführung und Nutzung verantwortlich sind, entscheidend. Die Ergebnisse zeigen, dass die Befürwortung und Akzeptanz davon abhängen, ob diesen zugetraut wird, die Kosten und Nutzen mit Blick auf Nachhaltigkeit und Gemeinwohl angemessen zu bewerten und vor dem Hintergrund des regionalen Selbstverständnisses über eine sinnvolle Nutzung der Technologie zu entscheiden. Hierbei ist insbesondere das Vertrauen in Akteure der lokalen Politik und Verwaltung und, je nach Anwendungskontext [30], in Unternehmen von Bedeutung. Hier zeigt sich allerdings, dass hohes Vertrauen in Wissenschaft zwar positiv auf die allgemeine Akzeptanz der Technologie wirken, Misstrauen gegenüber Unternehmen und insbesondere großen Konzernen jedoch die Akzeptanz von konkreten Anwendungen negativ beeinflussen kann [28][29]. Ein weiterer Grund für die hohe Befürwortung könnte die starke Auseinandersetzung mit dem Thema auf nationaler als auch europäischer Ebene sein. Zentrale politische Akteure, aber auch wichtige Stakeholder des Energiesystems unterstützen die Wasserstoffforschung. Sie sehen große Potenziale in der Herstellung, Speicherung und Anwendung. Auch wenn wichtige Akteure das große Potenzial von Wasserstoff erkennen, zeigt die Umfrage des Fraunhofer IAO auch, dass die allgemeine Bevölkerung wenig Wissen über die zukünftige Anwendung von grünem Wasserstoff aufweist. Ein Großteil der Befragten sieht ihn primär im Mobilitätsbereich (70%), nur jede:r zweite kann sich überhaupt weitere Einsatzmöglichkeiten vorstellen (z.B. Energieversorgung oder Industrie).

Eine bessere Aufklärung über die Herstellung und Verwendung von grünem Wasserstoff und eine offene Auseinandersetzung mit Kosten und Nutzen würde helfen das positive Bild in der Bevölkerung weiter zu verstärken und Befürwortung in aktive Unterstützung umzuwandeln. Bürger:innen sollten die Vor- und Nachteile verstehen und das Potenzial von Wasserstoff im Kontext der angestrebten Klimaziele einordnen können. Die Ausgangsbasis für Wasserstoff ist gut, es bedarf nun insbesondere den systematischen und frühzeitigen Einbezug der Bevölkerung und vielfältiger gesellschaftlicher Akteure, um ihn in der Gesellschaft als Energieträger nachhaltig akzeptiert zu verankern. Vielfältige Ansätze und Formate für mehr Partizipation aus anderen Bereichen der Energiewende und weiteren Infrastrukturvorhaben können hier als Beispiele dienen und sollten auf den Wasserstoff-Kontext von Anfang an übertragen werden [31].

Interesse an dezentraler Energieerzeugung

Die Transformation des Energiesystems im Zuge der Energiewende führt zu einer Dezentralisierung des Systems und ermöglicht damit auch ehemals passiven Energiever-

brauchern eine aktivere Rolle in der Energieversorgung. Zum Beispiel durch die Installation von Photovoltaikanlagen zur dezentralen Erzeugung und zum Eigenverbrauch von Strom. Diese Dezentralität wird von Fachexpert:innen kontrovers diskutiert: Einige Studien betonen wirtschaftliche Ineffizienzen von kleinskaligen Anlagen [32], während andere auf potenziell steigende Netzgebühren hinweisen [33].

Trotz der Kontroverse um dezentrale Anlagen zeigen Studien, dass nicht nur wirtschaftliche Faktoren eine Rolle bei der Investitionsentscheidung spielen [34]: Bei Haushalten löst insbesondere die Möglichkeit einen Beitrag zur Energiewende zu leisten und sich gegen steigende Strompreise abzusichern bekanntermaßen eine hohe Investitionsbereitschaft aus. Dies bezieht sich nicht allein auf Photovoltaik-Anlagen auf dem Dach, sondern auch auf zusätzliche Energiespeicher, die den potenziellen Nutzen weiter erhöhen – z.B. indem überschüssiger Strom für eine spätere Nutzung gespeichert und damit die selbst verbrauchte Strommenge erhöht wird [24]. Studien zeigen, dass derzeit mehr als 50% der Photovoltaik-Anlagen in Kombination mit einer Batterie installiert werden [24], obwohl sich die Stromspeicherung kaum rechnet [22]. Außerdem sind Batterien nicht in der Lage Strom langfristig zu speichern und werden in der Regel dazu verwendet die Haushalte in der Nacht, wenn die Sonne nicht scheint, mit selbst erzeugtem Strom zu versorgen. Die höchste Stromnachfrage besteht jedoch in den Wintermonaten, während der meiste Solarstrom im Sommer produziert wird. Um den im Sommer erzeugten Strom für eine spätere Nutzung im Winter zu speichern, werden andere Speichertechnologien benötigt.

Mit der Entwicklung und der damit zu erwartenden Kostensenkung von Wasserstofftechnologien könnten der Energieträger Wasserstoff in naher Zukunft eine Option für eine saisonale Speicherung von erneuerbarem Strom sein. Einige Unternehmen haben bereits die Markteinführung dieser technologischen Lösung angekündigt und propagieren die Möglichkeit zur Selbstversorgung mit Strom und Wärme über das ganze Jahr [25].

Mit der derzeit geringen Effizienz dieser Wasserstoffspeicher und ihre hohen Kosten ergibt sich noch kein wirtschaftlicher Nutzen. Allerdings investieren Haushalte bereits heute in Batteriespeicher, ohne dass es dafür eine solide wirtschaftliche Grundlage gibt. Daher stellt sich die Frage, ob Haushalte auch Wasserstofftechnologien als saisonale Speicher für ihren selbst erzeugten Strom einsetzen werden.

Interesse an Wasserstoff im Wohnquartier

Eine Studie des Fraunhofer IAO untersucht, ob die relativ hohe Akzeptanz für Wasserstoff und das Interesse an dezentraler Energieerzeugung in einem hohen Interesse an Wasserstoff in Wohnquartieren und Haushalten mündet [35]. In einer Befragung von 350 Haushalten konnte zunächst festgestellt werden, dass obwohl ein Großteil der Bevölkerung (etwa 66%) davon ausgeht, dass Wasserstoff zukünftig ein wichtiger Baustein im Energiesystem sein wird, das Wissen über dezentrale Wasserstoffsysteme eher gering ist. Von den Befragten gaben nur 6% an eine genaue Vorstellung zu haben und 39% eine ungefähre Vorstellung. Den Befragten wurde im Folgenden die Darstellung in Abbildung 3 gezeigt und die Funktionsweise erklärt. Daraufhin äußerte eine Mehrheit der Befragten eine Investitionsbereitschaft in ein solches Wasserstoffsystem.

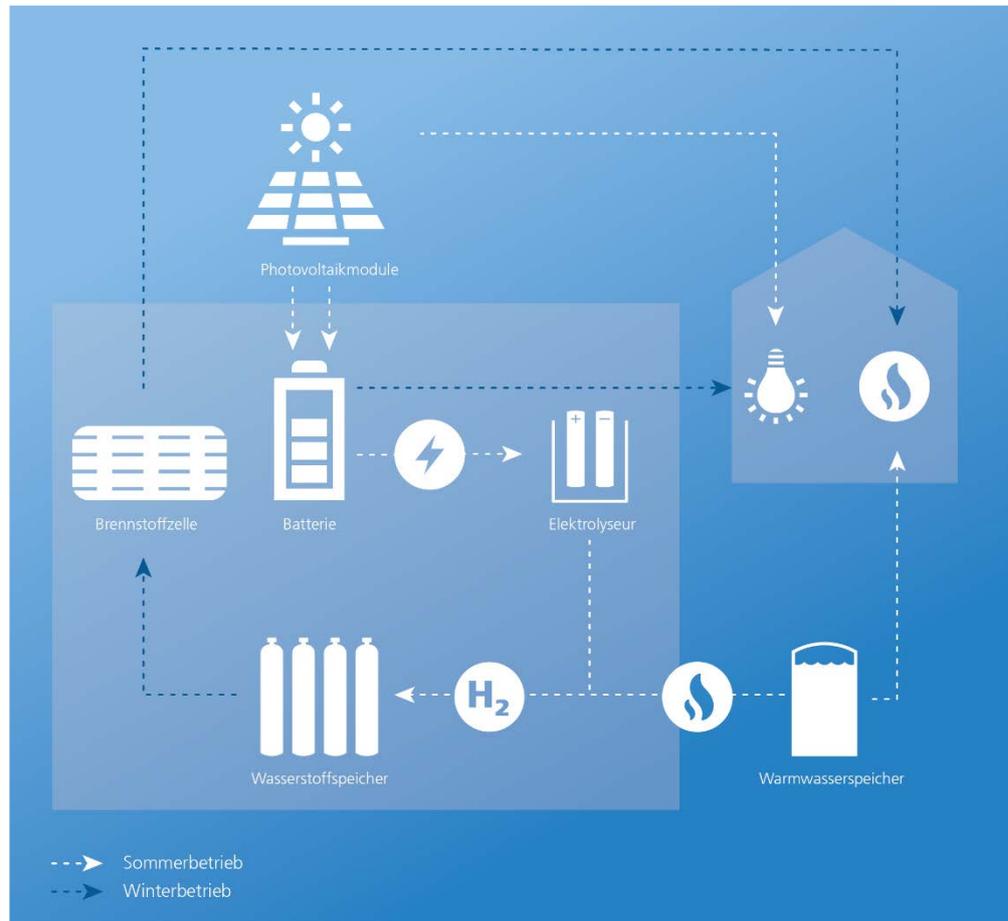


Abbildung 3: Schematische Darstellung eines Eigenversorgungssystems mit Wasserstoffherzeugung und -nutzung

Nach ihren Motiven befragt, gaben die Befragten an, dass sie Interesse an innovativen Produkten haben, mit der Investition den Wert ihres Hauses steigern und einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Diese Motivlage deckt sich mit der eines Investitionsinteresses in einen stationären Batteriespeicher.

Insgesamt wurde festgestellt, dass das Interesse an Wasserstofftechnologien in der Bevölkerung groß ist, insbesondere bei Hausbesitzer:innern, die bereits eine PV-Anlage zur dezentralen Stromerzeugung nutzen. Etwa 1 Million Haushalte der deutschen Bevölkerung wurden als Innovatoren identifiziert, eine Gruppe von Erstanwendern, die bereit sind, für die Technologie mehr zu zahlen als für herkömmliche Stromversorgungssysteme. Da das Wissen über die Technologie jedoch noch relativ begrenzt ist, kann die tatsächliche Zahlungsbereitschaft unterschiedlich ausfallen und ist noch zu ermitteln. Aufgrund der ähnlichen Motive für die Einführung von Wasserstoffsystemen und stationären Batteriespeichern besteht jedoch die Möglichkeit, dass – vergleichbar mit der Investition in Batteriespeicher – Haushalte in Wasserstoffsysteme investieren, auch wenn sie aus wirtschaftlicher oder systemtechnischer Sicht nicht effizient sind.

Basierend auf den Betrachtungen in den vorangegangenen Kapiteln lassen sich Wasserstoff-Quartiere in die folgenden vier Typen einteilen: Quartiere, die Wasserstoff zur Wärmeerzeugung nutzen (im Folgenden »Wasserstoffnutzendes Quartier: Wärme«); Quartiere, die Wasserstoff zur kombinierten Erzeugung von Strom und Wärme nutzen (»Wasserstoffnutzendes Quartier: Strom + Wärme«); Quartiere, in denen Wasserstoff erzeugt stattfindet (»Wasserstoff erzeugendes Quartier«) und schließlich Quartiere, in denen Wasserstoff nach der in Abbildung 3 dargestellten Systematik erzeugt und genutzt wird (»Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartiere«).

Im Folgenden wird jeder dieser Quartierstypen zunächst charakterisiert und anschließend hinsichtlich der Verfügbarkeit der notwendigen Technologien, möglicher technischer und administrativer Schwierigkeiten, der ökonomischen Rentabilität und der erwartbaren Akzeptanz der Quartiersbewohner:innen bewertet.

3.1 Wasserstoffnutzendes Quartier: Wärme

Das wasserstoffnutzende Quartier wird definiert als ein Quartier in dem Wasserstoff angeliefert und verbraucht wird. Eine dezentrale Erzeugung von Wasserstoff vor Ort findet nicht statt. Der typische Anwendungsfall für ein solches Quartier ist die Anlieferung von Wasserstoff über das Gasnetz und der Verbrauch in den Wohngebäuden zu Heizzwecken. In diesem Anwendungsfall können vorhandene Gasleitungen für den Transport von Wasserstoff umgerüstet und anschließend weiter genutzt werden. Auch eine anteilige Einspeisung von Wasserstoff ist während einer Übergangsperiode möglich. Die Bewohner:innen des Quartiers können ihre gewohnten Heizsysteme (nach einer Umrüstung) weiter nutzen und müssen sich nicht an neue Technologien oder Prozesse gewöhnen.

Technologieverfügbarkeit

Momentan auf dem Markt verfügbare Gasbrennwerttherme können in der Regel bereits mit 20-30% Wasserstoff-Anteil im Erdgas betrieben werden [36]. Um das reaktionsfreudige Gasmisch aus Wasserstoff und Sauerstoff nutzen zu können, müssen spezielle Brennerdüsen und Sicherheitseinrichtungen eingesetzt werden [37]. An Gastherme, die bis zu 100% Wasserstoff verbrennen können, wird gearbeitet und mit einer Markteinführung wird frühestens 2025 gerechnet [38]. Für die Nutzung von reinem Wasserstoff sind bisher nur Brennstoffzellen zur Erzeugung von Strom und Wärme auf dem Markt verfügbar (siehe Kapitel 3.2).

Erdgas ist, mit Anteilen von 49,3% der Wohngebäude bzw. 48,2% der Wohnungen, der am häufigsten genutzte Energieträger in Heizsystemen. Insgesamt sind mehr als drei Viertel der Wohngebäude in gasbohrten Gebieten (15% der Gebäude sind trotz Verfügbarkeit nicht an das Gasnetz angeschlossen) [39]. Entsprechend verfügt ein großer Anteil der Wohngebäude über einen Gasanschluss und entsprechende Gasinfrastruktur. Allerdings sind die Gasleitungen bisher nicht für den Transport von reinem Wasserstoff ausgelegt. Zurzeit laufen Pilotprojekte, in denen ein Wasserstoffanteil von bis zu 30% umgesetzt und untersucht wird [40]. Um höhere Wasserstoffanteile im Erdgasnetz zu ermöglichen, müssen verbaute Stahlrohre und Anschlussstellen modernisiert werden. Umstellungspläne für das deutsche Gasnetz bis zum Jahr 2050 befinden sich in der Entwicklung [41].

Technische und administrative Schwierigkeiten

Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keinen gültigen Rechtsrahmen für den Aufbau und den Betrieb von Wasserstoffnetzen. Es existieren lediglich Regelungen für die Einspeisung als

Zusatzgas in Erdgasnetze. Bisher sind bis unter 10% Beimischung möglich, wenn dies nicht zu Problemen bei den angeschlossenen Endkunden führt. Da insbesondere für Erdgastankstellen Beimischungen über 2% problematisch werden können, wird diese Grenze in der Praxis in der Regel nicht überschritten [42]. An einer entsprechenden Regulierung, die eine Investitionssicherheit für potentielle Betreiber schafft, wird gearbeitet. Wann mit einem Ergebnis gerechnet werden kann, ist derzeit noch unklar [43].

Darüber hinaus muss die Umstellung vorhandener Gasnetze von Erdgas auf Wasserstoff abgestimmt erfolgen. Die derzeit installierten Anlagen sind nicht auf hohe Anteile von Wasserstoff ausgelegt und müssen vor der Umstellung ausgetauscht werden.

Mögliche Zielkonflikte

In der wissenschaftlichen Diskussion spielt Wasserstoff für die Heizung von Wohngebäuden eine geringe Rolle. Zum einen aufgrund der hohen Effizienzverluste (siehe Kapitel 2.1) und zum anderen aufgrund der geringen Verfügbarkeit. Zum jetzigen Zeitpunkt stehen nur sehr geringe Mengen an grünem Wasserstoff aus erneuerbarem Strom zur Verfügung. Zwar werden Konzepte diskutiert, Wasserstoff in größeren Mengen aus Partnerstaaten mit hohem Potential an erneuerbaren Energien zu importieren, allerdings ist auch in den potentiellen Wasserstoff-Exportländern unklar, wann und in welchen Mengen grüner Wasserstoff erzeugt werden kann.

Während zur Raumwärmeerzeugung geeignete technologische Alternativen zum Wasserstoff zur Verfügung stehen, sind andere Sektoren für eine Dekarbonisierung auf Wasserstoff angewiesen. Ein Beispiel ist hierfür die Chemieindustrie, die Wasserstoff als Rohstoff benötigt. Wasserstoff zur Raumwärmeerzeugung würde hier in Konkurrenz treten.

Die Nutzung von Wasserstoff in Gasthermen hat darüber hinaus einen potentiell hemmenden Effekt auf umfassendere Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz: Durch die Verbrennung von Wasserstoff können die gewohnten Vorlaufemperaturen in den Heizsystemen erreicht werden und eine zusätzliche Gebäudedämmung ist rein technologisch betrachtet nicht mehr notwendig. Bei den erwartbar relativ hohen Kosten für Wasserstoff wird eine Gebäudedämmung aus wirtschaftlicher Sicht allerdings weiterhin sinnvoll sein. Hieraus entsteht zudem ein möglicher sozialer Konflikt: Wird vorhandene Infrastruktur weiter genutzt bzw. lediglich modernisiert kann das für die Hausbesitzenden bzw. Vermietenden relativ günstig sein. Für grünen Wasserstoff als Brennstoff wird aber von hohen Kosten ausgegangen [45], welche von den zur Miete lebenden Personen getragen werden müssen.

Ökonomische Rentabilität

Der Gaspreis für Haushalte liegt derzeit bei durchschnittlich 6,3 ct/kWh [44]. Dieser Preis entspricht dem von den Versorgern in Rechnung gestellten Preisen, d.h. Steuern und Umlagen sind darin enthalten. Im Vergleich: Bei grünem Wasserstoff wird von einem Preis von mindestens 28 ct/kWh für die Bereitstellung gerechnet [47]. Auf absehbare Zeit ist daher keine ökonomische Rentabilität abzusehen. Ein ökonomischer Vorteil kann sich allenfalls durch Sondereffekte ergeben, wie der oben erwähnten Verteilungsfrage zwischen Investition und laufenden Kosten bzw. Vermietenden und Mietenden.

Zu beachten ist außerdem der Sondereffekt der hohen Stromkosten in Deutschland: Da der Haushaltsstrompreis mit überdurchschnittlich hohen Abgaben und Umlagen belastet ist, erscheint eine ökonomische Rentabilität im Vergleich zur Stromdirektheizung möglich. Allerdings handelt es sich hier um einen Sondereffekt, der darauf beruht, dass der Strom, welcher zur Produktion von grünem Wasserstoff genutzt wird mit weniger Umlagen und Steuern belastet ist als der Haushaltsstrom. Durch die aktuelle Klimapolitik ist davon auszugehen, dass dieser Effekt zukünftig reduziert wird [46].

Akzeptanz

In der Bevölkerung wird eine Nutzung von Wasserstoff generell befürwortet (siehe Kapitel 2.3). Wenn im Idealfall bei der Nutzung von Wasserstoff zur Wärmeversorgung vorhandene Infrastruktur weiter genutzt werden soll und daher keine Veränderungen in den Prozessen der Quartiersbewohner:innen und Hausbesitzer:innen zu erwarten sind, kann von einer hohen Akzeptanz ausgegangen werden. Wird bei der Umstellung auf Wasserstoff die Installation neuer Heizsysteme notwendig, kann sich das negativ auf die Akzeptanz im Sinne einer aktiven Unterstützung durch eine Kaufentscheidung auswirken. Gleiches gilt für das Auftreten technischer Probleme oder hohen von Wasserstoff-Handelspreisen.

Untersuchungen zur Akzeptanz von Wasserstoff stellen allerdings hohes Unwissen in der Bevölkerung fest (siehe Kapitel 2.3). Zudem ist die Akzeptanz in vielen Fällen mit einem signifikanten Nachhaltigkeitsversprechen des Energieträgers verbunden. Gesellschaftliche Unterstützung ist daher nur zu erwarten sofern es sich um eine wirklich nachhaltige Alternative auf Basis von grünem Wasserstoff, mit ausreichender Beimischungsquote handelt. Aufgrund von erwartbar hohen Kosten für grünen Wasserstoff scheint die gesellschaftliche Akzeptanz im Bereich des Wasserstoffnutzenden Quartiers insgesamt unter gemischten Voraussetzungen zu stehen.

Tabelle 1: Bewertung des Wasserstoffnutzenden Quartiers: Wärme im Ampel-Schema.

Wasserstoffnutzendes Quartier: Wärme	Technologie- verfügbarkeit	Techn. + admini- strative Schwierigkeiten	Zielkonflikte	Ökonom. Ren- tabilität	Akzeptanz
--------------------------------------	-------------------------------	---	---------------	---------------------------	-----------

3.2 Wasserstoffnutzendes Quartier: Strom + Wärme

Ebenfalls möglich ist die Wasserstoffnutzung in einem Heizkraftwerk. Mit der Verwertung von Wasserstoff in Hochtemperatur-Brennstoffzellen können gleichzeitig Strom und Wärme erzeugt werden. Die erzeugte Wärme wird in vorhandene Nahwärmenetze eingespeist. In diesem Fall wird ebenfalls auf existierende Infrastruktur zurückgegriffen und die Bewohner:innen des Quartiers können vorhandene Systeme weiter nutzen.

Technologieverfügbarkeit

Blockheizkraftwerke zur Versorgung größerer Strom- und Wärmebedarfe werden seit den 80er Jahren erprobt und sind mittlerweile kommerziell verfügbar [47]. Die Kraftwerke basieren auf der Brennstoffzellentechnologie und sind in allen Leistungsklassen erhältlich, von der kleinen Hausanlage bis zum Kraftwerk im Megawatt-Bereich. Die Brennstoffzellen können zudem zunächst mit Erdgas betrieben und später auf den Betrieb mit Wasserstoff umgestellt werden [48].

Je nach eingesetzter Brennstoffzellentechnologie eignet sich die entstehende Abwärme der Kraftwerke für die Versorgung von Nah- oder sogar Fernwärmenetzen. Allerdings verfügen derzeit nur 6,6% der Wohngebäude bzw. 13,9% der Wohnungen in Deutschland über einen Anschluss an ein Wärmenetz [39]. Der Investitionsaufwand für den Ausbau des Wärmenetzes ist relativ hoch und auch bei sehr guter Wärmedämmung der Rohre treten über längere Strecken Wärmeverluste auf. Deshalb eignet sich Fernwärme generell vor allem für Gebiete mit dichter Bebauung [49].

Technische und administrative Schwierigkeiten

Stationäre Brennstoffzellen in großen Kraftwerken zur Erzeugung von Strom und Wärme gibt es derzeit kaum. Es ist daher mit vergleichbaren technischen und administrativen

Schwierigkeiten zu rechnen, wie sie beim Bau bzw. der Modernisierung von herkömmlichen Gaskraftwerken auftreten. Insbesondere eine Gasleitungsinfrastruktur zur Versorgung der Kraftwerke ist notwendig.

Mögliche Zielkonflikte

Wie in Kapitel 3.1 bereits genannt spielt Wasserstoff für die Heizung von Wohngebäuden in der Diskussion eine untergeordnete Rolle. Bezüglich der Erzeugung von Strom gibt es derzeit unterschiedliche Einschätzungen: Expert:innen gehen davon aus, dass Wasserstoffkraftwerke in begrenztem Umfang zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit notwendig werden. Entsprechend können zu kombinierten Strom-Wärmeerzeugung längerfristig interessante Einsatzbereiche entstehen [27]. Momentan besteht noch die oben bereits diskutierte Konkurrenz verschiedener Sektoren um den derzeit kaum verfügbaren grünen Wasserstoff. Mit einem Einsatz solcher Wasserstoffkraftwerke ist daher erst mittel- bis langfristig zu rechnen.

Ökonomische Rentabilität

Einer erfolgreichen Markteinführung von Brennstoffzellen-Kraftwerken stehen die aktuell hohen Investitionskosten sowie die hohen Kosten für Wasserstoff entgegen. Die Gestehungskosten für Strom, der aus mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen produziert wird, kostet nach Expert:innenschätzung etwa 282 €/MWh (je nach Kosten der Wasserstoffherzeugung). Zum Vergleich: Bei Stromerzeugung mit Steinkohle liegen die Kosten in Deutschland zwischen 60 und 100 €/MWh [50].

Welche Kosten für die Quartiersbewohnenden bei der Abwärmenutzung anfallen, lässt sich aus den Stromgestehungskosten allerdings nicht direkt ableiten. Hier orientieren sich die Wärmeversorger bei der Preisgestaltung in der Regel an den Kosten der Nutzbarmachung der ohnehin anfallenden Wärme.

Akzeptanz

Wie im eingangs beschriebenen Wasserstoff-Quartier zur Wärmeversorgung gilt auch hier: vor dem Hintergrund der hohen allgemeinen Befürwortung von Wasserstoff kann von einer hohen Akzeptanz auch für ein Strom und Wärme nutzendes Wasserstoff-Quartier ausgegangen werden. Diese Vermutung liegt insbesondere deswegen nahe, da vorhandene Infrastruktur genutzt und vorhandene Heizsysteme beibehalten werden können. Insofern es sich dabei um eine niedrigschwellige Umstellung auf einen nachhaltigen Energieträger handelt, kann hier von einer breiten gesellschaftlichen Akzeptanz dieses Quartiersmodells ausgegangen werden. Ähnliches gilt für die notwendige Umrüstung vorhandener Kraftwerke. Etwas schwieriger könnte sich die Lage im Falle von Kraftwerksneubauten und/oder notwendiger neu zu errichtender Infrastruktur darstellen. Hier spielen komplexe Kontext-Faktoren der regionalen und lokalen Umgebung eine Rolle, die die Akzeptanz der Technologie beeinflussen können.

Tabelle 2: Bewertung des Wasserstoffnutzenden Quartiers: Strom + Wärme im Ampel-Schema.

Wasserstoffnutzendes Quartier: Strom + Wärme	Technologieverfügbarkeit	Techn. + administrative Schwierigkeiten	Zielkonflikte	Ökonom. Rentabilität	Akzeptanz
--	--------------------------	---	---------------	----------------------	-----------

3.3 Wasserstofferzeugendes Quartier

Das wasserstofferzeugende Quartier wird definiert als ein Quartier in dem Strom »angeliefert« wird und in einem oder mehreren dezentralen Elektrolyseuren Wasserstoff erzeugt wird. Der erzeugte Wasserstoff wird nicht im Quartier selbst genutzt, sondern in vorhandene Gasleitungen eingespeist oder mittels Lkw abgeholt. In diesem Anwendungsfall kann die entstehende Abwärme, die auf einem relativ niedrigen Temperaturniveau von bis zu 70 °C anfällt, in Nahwärmenetzen zur Gebäudeheizung verwendet werden. Der Gesamtwirkungsgrad der Elektrolyse steigt somit.

Technologieverfügbarkeit

Die Wasserelektrolyse zur Erzeugung von Wasserstoff ist ein bekanntes Verfahren, das bisher allerdings in deutlich geringerem Maßstab verwendet wurde als es zukünftig für die Erzeugung großer Mengen grünen Wasserstoffs notwendig wird. Um die Anlagen zu skalieren und die Wirtschaftlichkeit der Technologie zu erhöhen, existieren über 20 Pilot- und Forschungsanlagen allein in Deutschland [51]. In einigen der Projekte wird die Versorgung nahegelegener Wohngebiete mit Wärme ebenfalls erprobt [52].

Der erzeugte Wasserstoff kann, sofern vorhanden, in bestehende Gasnetze eingespeist werden. Zumischquoten von bis zu zwei Prozent sind dabei unproblematisch (siehe Kapitel 3.1). Ist keine Gasinfrastruktur vorhanden, kann der erzeugte Wasserstoff gespeichert und z.B. über Lkw abtransportiert werden. Entsprechende Gasdruckspeicher sind kommerziell verfügbar. Allerdings lassen sich aufgrund der geringen volumetrischen Dichte von Wasserstoff so nur geringe Mengen transportieren. Speicher- bzw. Transportmöglichkeiten mit einer höheren Dichte erfordern zusätzliche Infrastruktur (siehe Kapitel 2.1).

Technische und administrative Schwierigkeiten

Wie eingangs schon dargelegt, ist die Erzeugung von grünem Wasserstoff insbesondere aus Stromüberschüssen sinnvoll bzw. aus zusätzliche geschaffenen erneuerbaren Energieanlagen. Diese Stromüberschüsse entstehen in Deutschland in größeren Mengen derzeit vor allem aufgrund von Netzengpässen. Beispielsweise kann Windstrom aus dem Norden von Deutschland aufgrund der Netzsituation in manchen Zeiten nicht in die Industrie- und Ballungsregionen transportiert werden. Auch perspektivisch wird mit Stromüberschüssen vor allem durch große Windstrommengen in den windreichen Wintermonaten gerechnet. Entsprechend gibt es Überlegungen vor Ort an den Windparks Wasserstoff zu erzeugen und beispielsweise in Kavernen zu speichern oder direkt abzutransportieren [53]. Allerdings liegen große Windparks mit dem entsprechenden Potential an Überschussstrom häufig abgelegen von Wohngebieten, welche die entstehende Abwärme nutzen könnten.

Zudem fällt Abwärme bei der Elektrolyse auf einem geringen Temperaturniveau an. Daher muss sich für den dargestellten Anwendungsfall das Wohnquartier in räumlicher Nähe zur Elektrolyse-Anlage befinden. Ebenfalls müssen entsprechende Wärmenetze vorhanden sein oder gebaut werden.

Die beschriebene Wasserstofferzeugung in Quartieren kann auch mit Netzstrom bei hohen Anteilen von erneuerbaren Energien betrieben werden. Kann die Elektrolyse räumlich unmittelbar im Quartier stattfinden, ist die Nutzung der Abwärme unmittelbar und verlustarm möglich [54].

Mögliche Zielkonflikte

Wasserstoffbedarf wird in verschiedenen Wirtschaftssektoren in großen Mengen erwarten. Pläne zur Erzeugung von grünem Wasserstoff sind daher wenig konfliktbehaftet. Auch die Nutzung von Abwärme wird in der Regel positiv bewertet.

Ein möglicher Konflikt entsteht bei der Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien: in der Regel beschränken sich die Zeiten mit einem Überangebot aus erneuerbaren Energien auf wenige Stunden des Tages bzw. wenige Tage im Jahr [55]. Soll eine

Elektrolyse-Anlage allerdings möglichst wirtschaftlich betrieben werden, so wird eine hohe Anzahl an Betriebsstunden angestrebt. Dafür wird die Elektrolyse-Anlage häufig in Kombination mit einem Batteriespeicher betrieben (siehe Kapitel 2). Um die Elektrolyse darüber hinaus in zusätzlichen Stunden zu betreiben, erhöht das den Strombedarf insgesamt, was zu einer höheren Auslastung fossiler Kraftwerke führen kann. Dieser Konflikt betrifft allerdings die hier fokussierte Abwärmenutzung nur indirekt.

Ökonomische Rentabilität

Die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht wirtschaftlich. Zu den hohen Erzeugungskosten kommen noch Kosten für Speicherung und Transport. Selbst bei der vergleichsweise günstigen Variante, dem Transport über Gasleitungen, gehen Expert:innen von Kosten zwischen 10 und 30 Euro/MWh aus [56]. Für die ökonomische Bewertung der Wasserstoffherzeugung in Quartiersnähe gilt es daher die Entfernung zu den Wasserstoffverbraucher:innen zu betrachten, beispielsweise zu nahegelegenen Industrieanlagen. Entsprechend kann die Elektrolyse in Quartiersnähe unter bestimmten Voraussetzungen auch ökonomisch sinnvoll sein.

Wie im Fall der Wasserstoff-Kraftwerke, lässt sich auch hier nicht von den Technologiekosten auf die Kosten der Abwärmenutzung für die Quartiersbewohner schließen. Insgesamt gilt: je größer die Quartiereinheit, desto besser kann die entstehende Abwärme genutzt werden und desto breiter können die notwendigen Infrastrukturkosten verteilt werden

Akzeptanz

Auch in diesem Fall gilt: Die gesellschaftliche Akzeptanz für Wasserstoff ist generell vorhanden und es kann sogar von einer hohen Offenheit der Technologie gegenüber ausgegangen werden (siehe Kapitel 2.3). Bei einer Nutzung vorhandener Infrastruktur und der Beibehaltung von vorhandenen Heizsystemen kann daher eine hohe Akzeptanz erwartet werden. Sollte im Falle des Wasserstoff-Eigenversorgungsquartiers jedoch weitere Infrastruktur- und Logistikmaßnahmen notwendig und beispielsweise für den Abtransport des erzeugten Wasserstoffs Lkw eingesetzt werden, kann sich dies auf die Akzeptanz der Technologie auswirken. Erste Beispiele zeigen, dass ein entsprechend erhöhte Verkehrsaufkommen in der Nähe von Wohnquartieren unter Umständen zu Akzeptanzproblemen bei Betroffenen und Anwohnenden führen kann. Dies weist darauf hin, dass die Akzeptanz von Wasserstoff nicht allein von Technologie-spezifischen Eigenschaften, sondern wesentlich auch von Kontext-Faktoren und der Art und Weise der Einführung und Nutzung abhängig ist [57].

Tabelle 3: Bewertung des Wasserstoffherzeugenden Quartiers im Ampel-Schema.

Wasserstoffherzeugendes Quartier	Technologie-verfügbarkeit	Techn. + administrative Schwierigkeiten	Zielkonflikte	Ökonom. Rentabilität	Akzeptanz
----------------------------------	---------------------------	---	---------------	----------------------	-----------

3.4 Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartier

Im Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartier wird Wasserstoff dezentral erzeugt und der erzeugte Wasserstoff wiederum vor Ort verbraucht. Bei der Erzeugung des Wasserstoffs können lokale Stromüberschüsse, in der Regel aus Photovoltaik-Anlagen, genutzt werden und der Eigenverbrauchsgrad steigt. Allerdings treten Stromüberschüsse in der Regel nur für wenige Stunden auf, beispielsweise in den Mittagsstunden der Sommermonate.

Damit höhere Betriebsstunden des Elektrolyseurs ermöglicht werden, wird die Anlage in Kombination mit einer stationären Batterie als Pufferspeicher installiert. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der Elektrolyse sicherzustellen muss dennoch in der Regel Strom aus dem Netz der öffentlichen Versorgung genutzt werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Anlage flexibel zu betreiben und Strom in günstigen Stunden, z.B. bei einem hohen Angebot an erneuerbaren Energien, zu betreiben. Bei der Nutzung von Wasserstoff in einer Brennstoffzelle wird Strom erzeugt und die Abwärme kann, gemeinsam mit der Abwärme der Elektrolyse, im Quartier zur Gebäudeheizung genutzt werden.

Technologieverfügbarkeit

Technologien für die dezentrale Erzeugung und Speicherung von Wasserstoff sind kommerziell auf dem Markt verfügbar. Allerdings erst seit kurzer Zeit und mit geringen verkauften Stückzahlen. Die Konzepte der Speicherung variieren je nach Hersteller: so ist die klassische Speicherung von Wasserstoff in Druckspeichern verfügbar [25] und ebenfalls eine Variante in der Wasserstoff zusammen mit CO₂ zu Methan umgewandelt wird [58]. Die Speicherung von Methan in Gebäuden und Quartieren ist in Gasheizsystemen schon lange Stand der Technik. Die Systeme zur Wasserstoff-Eigenversorgung sind in verschiedenen Größen verfügbar, von Kleinst-Systemen für Einfamilienhäuser bis zu Systemen für Quartieren.

Technische und administrative Schwierigkeiten

Da die Anlagen in diesem Anwendungsfall ohne externe Infrastruktur auskommen, ist der administrative Aufwand gering solange die baulichen Voraussetzungen gegeben sind. So muss für die Unterbringung der dezentralen Anlage ein ausreichend großer (Keller-)Raum zur Verfügung stehen und der Wasserstoff räumlich getrennt außerhalb der Häuser im öffentlichen Raum gespeichert werden.¹

Wie im wasserstofferzeugenden Quartier gilt auch in diesem Fall, dass die Nutzung der Abwärme potentiell dadurch eingeschränkt wird, dass vor allem Strom aus der lokalen Photovoltaik-Anlage genutzt wird. Diese fällt jedoch im Sommer an, wenn der Wärmebedarf gering ist.

Mögliche Zielkonflikte

Die Nutzung von Eigenversorgungskonzepten wird unabhängig von den eingesetzten Technologien kontrovers diskutiert. Wird Strom aus dem Netz der öffentlichen Versorgung bezogen, werden darauf Steuern, Abgaben und Umlagen gezahlt, z.B. Netznutzungsentgelte oder die EEG-Umlage zur Förderung der Erneuerbaren Energien. Die meisten dieser Positionen werden nicht pauschal, sondern auf jede bezogene kWh Strom berechnet. Je mehr verbraucht wird, desto mehr Abgaben und Umlagen werden daher gezahlt. Das hat unter anderem den Vorteil, dass Verbrauchsreduktionen wie beispielsweise Energieeffizienzmaßnahmen angereizt werden. Zudem tragen diejenigen, die einen hohen Stromverbrauch haben, stärker zum Ausbau und Erhalt der benötigten Infrastruktur bei. Verbraucher:innen mit Eigenversorgungssystemen entziehen sich dieser Systematik in gewisser Weise: einen Teil des verbrauchten Stroms erzeugen sie selbst und zahlen auf diese Strommengen keine oder reduzierte Abgaben und Umlagen. Dennoch sind sie in den meisten Fällen nicht vollständig autark, sondern nutzen die öffentliche Infrastruktur weiterhin. Kritiker:innen sprechen daher von einem Entsolidarisierungseffekt. Befürworter:innen argumentieren hingegen das Eigenversorger:innen zum Ausbau der erneuerbaren Energien beitragen und zudem durch installierte Speicher zur Stabilisierung des Energiesystems beitragen [59].

¹ Der Hersteller HPS gibt einen Flächenbedarf ab 1,5 m² für die Elektrolyse-Anlage eines Einzelhaushalts an, der Wasserstoff wird in Flaschenbündeln gelagert [23]. Die Wasserstofftanks können auch unterirdisch installiert werden.

Ein weitere Kritikpunkt an kleinskaligen Anlagen ist die geringere ökonomische Effizienz im Vergleich zu großen, zentralen Anlagen. Auch dieser Punkt wird jedoch kontrovers diskutiert, da dezentrale Anlagen häufiger mit privatem Geld und damit günstiger finanziert werden können [59].

Ökonomische Rentabilität

Ökonomisch schneidet das Konzept der Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartiere im Vergleich zur traditionellen Versorgung mit Strom und Wärme aus dem Netz der öffentlichen Versorgung schlecht ab. Die Anlagen werden bisher nicht in großen Stückzahlen produziert und installiert und sind entsprechend teuer. Den hohen Investitionen stehen vergleichsweise geringe Nutzungsdauern gegenüber: soll die Elektrolyse nur aus eigenem erzeugtem Strom betrieben werden, laufen die Anlagen je nach Größe vor allem in den Sommermonaten[60].

Akzeptanz

Der Autarkiegedanke ist für viele Menschen ansprechend. Die Frage nach dem Interesse in eine, wie hier dargestellte, Wasserstoff-Eigenerzeugungsanlage zu investieren, beantwortet etwa die Hälfte der Befragten mit ja oder eher ja. Das Interesse war bei Hausbesitzer:innen am höchsten. Nach potentiellen Hemmnissen gefragt, geben die meisten Befragten die potentiell hohen Kosten an, gefolgt von der Sorge vor technischen Schwierigkeiten und hohem Wartungsaufwand [35]. Neben der individuellen Autarkie als Haushalt, zeigen Forschungsergebnisse zudem, dass auch einer regionalen Unabhängigkeit bspw. der eigenen Gemeinde, Region oder Kommune ein hoher Stellenwert beigemessen wird [28]. Vor dem Hintergrund der dargestellten ökonomischen Rentabilität ist jedoch davon auszugehen, dass es sich hier kurz- bis mittelfristig um ein Nischenkonzept handelt. Innerhalb dieser Nische ist allerdings von einer sehr hohen Akzeptanz auszugehen.

In der Erhebung gaben die Befragten zudem an, lieber eine eigene Anlage besitzen zu wollen als sich an einer gemeinschaftlich genutzten Anlage zu beteiligen [28]. Diese Präferenz ist ein Hemmis für entsprechende Konzepte auf Quartiersebene.

Tabelle 4: Bewertung des Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartiers im Ampel-Schema.

Wasserstoff-Eigenversorgungs-Quartier	Technologie-verfügbarkeit	Techn. + administrative Schwierigkeiten	Zielkonflikte	Ökonom. Rentabilität	Akzeptanz
---------------------------------------	---------------------------	---	---------------	----------------------	-----------

4

Wasserstoff - zentral oder dezentral?

Wasserstoff - zentral oder dezentral?

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zum aktuellen Zeitpunkt vor allem die fehlenden Erzeugungskapazitäten erneuerbarer Energien, die fehlende Wasserstoff-Infrastruktur als auch die ökonomische Rentabilität einen Markt für Wasserstoffanwendungen in Quartieren verhindern. Allerdings treffen diese Hindernisse auch auf eine Wasserstoffwirtschaft in Deutschland insgesamt zu. Um eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen, kann daher die dezentrale Erzeugung von Wasserstoff trotz fehlender ökonomischer Rentabilität sinnvoll sein.

Von den betrachteten Anwendungsfällen ist die Erzeugung von Wasserstoff im Quartier oder in Quartiersnähe die plausibelste Option. Wenn die Rahmenbedingungen vor Ort stimmen, d.h. die räumliche Nähe zu erneuerbarer Stromerzeugung sowie vorhandene Gas- und Wärmenetze gegeben sind oder neue Wasserstoffnetze in der Nähe entstehen, können diese Quartiere kurz- bis mittelfristig zum Aufbau der Wasserstoffwirtschaft einen sinnvollen Beitrag leisten. Wenn grüner Wasserstoff in ausreichenden Mengen zur Verfügung steht, kann sich perspektivisch auch ein ökonomisch stimmiges Modell für die gekoppelte Erzeugung von Strom und Wärme aus Wasserstoff ergeben.

Zudem ist zu sagen, dass verschiedene Effekte, wie die hohe Belastung von Strom durch Abgaben und Umlagen, die Bewertung der zukünftigen ökonomischen Entwicklung erschweren, die sich bei einer möglichen Anpassung der Umlagen ergeben könnte. Auch für Quartiersbewohner:innen ist es daher schwer eine Investitionsentscheidung zu treffen. So begründen beispielsweise Bewohner:innen ihr Investitionsinteresse in Eigenversorgungssysteme mit der Absicherung gegen steigende Strompreise. Um in der Diskussion verschiedene Technologien kein verzerrtes Bild zu liefern, ist die Betrachtung der physikalischen Gegebenheiten sinnvoll.

Tabelle 5 bietet einen Überblick über die Einschätzung der verschiedenen Wasserstoff-Quartiere. Dabei handelt es sich um eine erste indikative Bewertung, eine umfassende Analyse ist im Rahmen dieses Impulspapiers nicht möglich.

Tabelle 5: Zusammenfassung der Bewertungen der Wasserstoff-Quartiere im Ampel-Schema.

	Technologie- verfügbarkeit	Techn. + admini- strative Schwierigkeiten	Zielkonflikte	Ökonom. Ren- tabilität	Akzeptanz
Wasserstoffnutzendes Quartier: Wärme	Orange	Orange	Rot	Rot	Gelb
Wasserstoffnutzendes Quartier: Strom + Wärme	Grün	Gelb	Orange	Orange	Grün
Wasserstofferzeugendes Quartier	Gelb	Orange	Grün	Orange	Gelb
Wasserstoff-Eigenversor- gungs-Quartier	Grün	Gelb	Rot	Rot	Grün

Insgesamt ist die Akzeptanz der Bevölkerung ein wichtiger Faktor, dessen genaue Entwicklung allerdings schwer abzuschätzen ist und im Einzelfall stark von konkreten Kontextfaktoren beeinflusst werden kann. Um die aktuell allgemein hohe Akzeptanz zu erhalten und zu fördern, ist eine frühzeitige Einbindung der Menschen wichtig. Dezentrale Wasserstoff-Konzepte wie die hier diskutierten Quartiere können zur Auseinandersetzung mit dem Thema beitragen und unterstützen die Informationsverbreitung in der Bevölkerung. Ob und in welchem Maße durch Beteiligung die Akzeptanz von Wasserstoff gefördert werden kann, sollte zukünftig genauer untersucht werden.

Darüber hinaus wird häufig diskutiert, dass die Einbindung und Beteiligung der Bevölkerung die Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung stärken kann. Es stellt sich die Frage, ob die hier dargestellten Wasserstoff-Quartierskonzepte positive Auswirkungen auf den Ausbau erneuerbarer Energien haben könnten. In zukünftigen Studien sollte dieser mögliche Effekt genauer untersucht werden.

Abschließend lässt sich ergänzen, dass die Umsetzung von Wasserstoffquartieren, neben den diskutierten technologischen Herausforderungen und Hemmnissen, auch von einer vorausschauenden (Wärme-)Netzplanung der Kommune abhängt.

Referenzen

- [1] Copernicus Climate Change Service (2021). 2020 warmest year on record for Europe. Online verfügbar unter: <https://climate.copernicus.eu/2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded> [zuletzt geprüft 01.03.2021].
- [2] Statista (2021). Energieverbrauch – Anteil der Energieträger in Deutschland 2019. Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197172/umfrage/anteil-verschiedenerenergietraeger-am-endenergieverbrauch-in-deutschland/> [zuletzt geprüft 26.11.2021]
- [3] Wietschel, M.; Zheng, L.; Arens, M.; Hebling, C.; Ranzmeyer, O.; Schaadt, A.; Hank, C.; Sternberg, A.; Herkel, S.; Kost, C.; Ragwitz, M.; Herrmann, U.; Pfluger, B. (2021): Meta-studie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien. Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats. Karlsruhe, Freiburg, Cottbus: Fraunhofer ISI, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IEG (Hrsg.)
- [4] Fraunhofer ISI (2020). Chancen und Herausforderungen beim Import von grünem Wasserstoff und Syntheseprodukten. Policy Brief 03 | 2020.
- [5] IWR (2021). Wasserstoff-ready. EU genehmigt Novelle des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes 2020. Online verfügbar unter: <https://www.iwr.de/ticker/wasserstoff-ready-eu-genehmigt-novelle-des-kraft-waerme-kopplungsgesetzes-2020-artikel3317> [zuletzt geprüft 26.11.2021]
- [6] RP-Energielexikon (2021). Elektrolyse. Online verfügbar unter: <https://www.energielexikon.info/elektrolyse.html> [zuletzt geprüft 20.11.2021]
- [7] Energie:Bau (2020). Der Elektrolyseur, der Wasserstoff und die Nutzung. Online verfügbar unter: <https://www.energie-bau.at/heizen-kuehlen/3335-der-elektrolyseur-der-wasserstoff-und-dessen-nutzung> [zuletzt geprüft 26.11.2021]
- [8] Solarserver (2021). Rotterdam: Regionale Wärme aus grünem Wasserstoff. Online verfügbar unter: <https://www.solarserver.de/2021/02/15/rotterdam-regionale-waerme-aus-gruenem-wasserstoff/> [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [9] TÜV Süd (2021). Speicherung von Wasserstoff. Online verfügbar unter: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoff-brennstoffzellen-info/wasserstoff/speicherung-von-wasserstoff> [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [10] Golem.de (2019). Heiße Steine sind effizienter als Brennstoffzellen. Online verfügbar unter: <https://www.golem.de/news/energiespeicher-heisse-steine-sind-effizienter-als-brennstoffzellen-1906-142012.html> [zuletzt geprüft am 25.11.2021]
- [11] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020). Die Nationale Wasserstoffstrategie. Stand Juni 2020.
- [12] Viessmann (2021). Wegweiser – Zukunftstechnologie: Wasserstoff. Online verfügbar unter: https://www.viessmann.de/content/dam/vi-brands/DE/Wohngebaeude/Wasserstoff/zukunftstechnologie-heizen-mit-wasserstoff.pdf/_jcr_content/renditions/original.media_file.download_attachment.file/zukunftstechnologie-heizen-mit-wasserstoff.pdf [zuletzt geprüft am 26.11.2021]

- [13] RP-Energielexikon (2021). Brennstoffzelle. Online verfügbar unter: <https://www.energielexikon.info/brennstoffzelle.html> [zuletzt geprüft 20.11.2021]
- [14] Lösch et al. (2020). Bewertung der Hochtemperaturelektrolyse zur Herstellung von grünem Wasserstoff für die Anwendung in der Grundstoffindustrie. Online verfügbar unter: https://irees.de/wp-content/uploads/2020/11/IREES_Bewertung-der-Hochtemperaturelektrolyse.pdf [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [15] Destatis (2018). Energieverbrauch privater Haushalte für Wohnen 2017 erneut gestiegen. Online verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2018/10/PD18_378_85.html [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [16] Umweltbundesamt (2020). Energieverbrauch privater Haushalte. Online verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#mehr-haushalte-grossere-wohnflachen-energieverbrauch-pro-wohnflache-sinkt> [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [17] Deutsche Energieagentur (2019). Dena-Gebäudereport: Wärmewende kommt seit 2010 nicht voran. Online verfügbar unter: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/2019/dena-gebaeudereport-waermewende-kommt-seit-2010-nicht-voran/> [zuletzt geprüft am 26.11.2021]
- [18] BMWi Schlaglichter (2021). Wie kann das Energiesystem der Zukunft aussehen? Die BMWi-Langfristszenarien bilden eine wissenschaftliche Grundlage für die Ableitung einer Gesamtstrategie zur Energiewende. März 2021.
- [19] RP-Energielexikon (2021). Wärmepumpe. Online verfügbar unter: <https://www.energielexikon.info/waermepumpe.html> [zuletzt geprüft 20.11.2021]
- [20] Klöpfer, R. (2021). Wie schaffen wir im Gebäudesektor 65% CO₂-Minderung bis 2030? – Vortrag Smart-Grids Kongress 2021 in Fellbach. Online verfügbar unter: [https://www.coreventus.de/wp-content/uploads/2021/12/002-Wie-schaffen-wir-65-Prozent-CO₂-Minderung-im-Geb%C3%A4udesektor-bis-2030_Ralf-Kl%C3%B6pfer-MVV-Energie-AG.pdf](https://www.coreventus.de/wp-content/uploads/2021/12/002-Wie-schaffen-wir-65-Prozent-CO2-Minderung-im-Geb%C3%A4udesektor-bis-2030_Ralf-Kl%C3%B6pfer-MVV-Energie-AG.pdf) [zuletzt geprüft am 20.12.2021]
- [21] Zukunft Gas (2021). Erdgas in Deutschland – Zahlen und Fakten für das Jahr 2020. Februar 2021.
- [22] Klingler, A.-L. (2018). The effect of electric vehicles and heat pumps on the market potential of PV + battery systems. *Energy*, Vol. 161, pp. 1064 – 1073. Oktober 2018.
- [23] Ebert, M. und Schiffler, A. (2019). Mittelfristprognose zur deutschlandweiten Stromabgabe an Letztverbraucher 2020 bis 2024 – Endbericht. Leipziger Institut für Energie im Auftrag der Amprion GmbH.
- [24] Figgner, J. et al. (2018). Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0 – Jahresbericht 2018. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen.
- [25] HPS. HPS System – Picea. Online verfügbar unter: <https://www.homepowersolutions.de/en/product> [zuletzt geprüft 7.4.2021].
- [26] Blum, L. (2017), Technologiebericht 2.2a Dezentrale Kraftwerke (Brennstoffzellen) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Forschungszentrum Jülich, Dezember 2017. Online verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7049/file/7049_Dezentrale_Kraftwerke.pdf [zuletzt geprüft am 20.12.2021].

- [27] Hebling, C. et al. (2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe und Freiburg, Oktober 2019. Online verfügbar unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/2019-10_Fraunhofer_Wasserstoff-Roadmap_fuer_Deutschland.pdf [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [28] Tagalidou et al. (2021). PLATON – Digitale Plattformen für den Leitmarkt Wasserstoff: Empirische Studienergebnisse. Online verfügbar unter: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-633588.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [29] Häußermann, J. (2020). Grüner Wasserstoff: Wie steht es um die Akzeptanz in Deutschland? Blogbeitrag. August 2020. Online verfügbar unter: <https://blog.iao.fraunhofer.de/gruener-wasserstoff-wie-steht-es-um-die-akzeptanz-in-deutschland/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [30] Philip Emmerich, Anna-Gesina Hülemeier, David Jendryczko, Manuel Johann Baumann, Marcel Weil, Dorothee Baur (2020): Public acceptance of emerging energy technologies in context of the German energy transition. Energy Policy, Volume 142, 1115162 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111516>
- [31] Häußermann, J. (2020). Grüner Wasserstoff: Wie gelingt prospektives Akzeptanzmanagement? Blogbeitrag. September 2020. Online verfügbar unter: <https://blog.iao.fraunhofer.de/gruener-wasserstoff-wie-gelingt-prospektives-akzeptanzmanagement/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [32] Munoz, L. et al. (2014). The power of grid parity: A discursive approach. Technological Forecasting & Social Change, Vol. 87, 2014, pp. 179-190.
- [33] Bode S. und Gorscurth H. (2013). Grid Parity von Photovoltaik-Anlagen: Ein vollständiger Vergleich unter Berücksichtigung aller Steuern und Umlagen auf den Strombezug von privaten Haushalten. Diskussionspapier. Arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik, Hamburg, 2013.
- [34] Oberst, C. und Madlener, R. (2014). Prosumer Preferences Regarding the Adoption of Micro-Generation Technologies. FCN Working Paper No. 22/2014, Institute for Future Energy Consumer Needs and Behaviour, RWTH Aachen.
- [35] Klingler, A.-L. et al. (2021). Energy rebels? How households' preferences for decentralized hydrogen systems misalign with energy system requirements. IRES conference, 16 – 18. März 2021.
- [36] Burmeister et al. (2021). Erste Ergebnisse des DVGW-Leitprojektes »Roadmap Gas 2050« - Teil 2: Untersuchungsergebnisse zur H₂-Verträglichkeit von Gasanwendungen. Forschung & Entwicklung 5 | 2021. Online verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/2105burmeister.pdf> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [37] Rosenkranz A. (2021). Möglichkeiten zum Heizen mit Wasserstoff. April 2021. Online verfügbar unter: <https://heizung.de/brennstoffzellenheizung/wissen/moeglichkeiten-zum-heizen-mit-wasserstoff/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [38] Viessmann (2021). Zukunftstechnologie: Heizen mit Wasserstoff – Wegweiser. 02 | 2021. Online verfügbar unter: <https://www.viessmann.de/de/wohngebaeude/klimaneutral-heizen-mit-wasserstoff.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]

- [39] BDEW (2019). Wie heizt Deutschland? – BDEW-Studie zum Heizungsmarkt. Oktober 2019. Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Pub_20191031_Wie-heizt-Deutschland-2019.pdf [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [40] Grüner, H. (2020). Die Wasserstoff-Insel. Stadt + werk 5 | 6 2020. Online verfügbar unter: https://assets.ctfassets.net/xytfb1vrn7of/3J9u-quZpQtHEEluP9D9eD9/7d262e1c4e2f30fb1eb0eb05af4407bd/Fachartikel_Die_Wasserstoff-Insel.pdf [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [41] Graf, F. et al. (2020). Die Rolle von Gas bei der Energiewende – Vorstellung des DVGW-Leitprojekts »Roadmap Gas 2050«. Energie | wasser-praxis 11 | 2020. Online verfügbar unter: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/2011graf.pdf> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [42] Bundesnetzagentur (2020). Regulierung von Wasserstoffnetzen. Eine Bestandsaufnahme der Bundesnetzagentur. Juli 2020. Online verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/NetzentwicklungUndSmartGrid/Wasserstoff/Wasserstoffpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [43] BDEW (2021). Regelungen zu Wasserstoffnetzen – Gesetz zur Umsetzung unionsrechtlicher Vorgaben und zur Regelung reiner Wasserstoffnetze im Energiewirtschaftsrecht. Stellungnahme. März 2021. Online verfügbar unter: https://www.bdew.de/media/documents/Stn_20210303_Regelungen_zu_Wasserstoffnetzen.pdf [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [44] Bundeswirtschaftsministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Der Gaspreis. Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gaspreise-bestandteile.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [45] Prognos (2020). Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger – Endbericht zum Projekt »Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe«. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Mai 2020.
- [46] Kübler, K. (2020). Zu den Wirkungen des Klimaschutzprogramms 2030 – Eine picoökonomische Analyse. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 70. Jg. 2020 Heft 3.
- [47] Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch. Stationäre Brennstoffzellen – Grundlagen, Einsatzmöglichkeiten, Stand der Technik, Perspektiven. Online verfügbar unter: https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/blockheizkraftwerke/2000/broschueren/05_09_00_ASUE-Brennstoffzellen.pdf [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [48] Gradwohl, U. (2019). Neues Blockheizkraftwerk mit Brennstoffzellen. SWR. November 2019. Online verfügbar unter: <https://www.swr.de/wissen/brennstoffzellenheizkraftwerk-100.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [49] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021). Was ist eigentlich Fernwärme? Energiewende direkt. März 2021. Online verfügbar unter: <https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2021/03/Meldung/direkt-erklaert.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]

- [50] Börse-Online (2021). Das nächste große Wasserstoff-Ding: Kraftwerke mit Brennstoffzellen. Februar 2021. Online verfügbar unter: <https://www.boerse-online.de/nachrichten/aktien/das-nachste-grosse-wasserstoff-ding-kraftwerke-mit-brennstoffzellen-1028897453> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [51] Schmid, A. (2018). Pilotprojekt: Deutschlands größte Power-to-Gas-Anlage. Edison Media. Dezember 2018. Online verfügbar unter: <https://edison.media/erleben/pilotprojekt-deutschlands-groesste-power-to-gas-anlage/23751416.html> [29.11.2021]
- [52] Heißmann, N. und Schneider, M. (2020). Wind of Change. Stern. 7.5.2020. Online verfügbar über EnergieDienst: <https://www.energiesdienst.de/kraftwerke/wasserstoff/power-to-gas/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [53] Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung. Grüner Wasserstoff – Klimaschutz für Wirtschaftswachstum nutzen. Online verfügbar unter: <https://www.mw.niedersachsen.de/startseite/themen/wirtschaft/gruner-wasserstoff-181911.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [54] Fuchs, M. (2020). Klimaneutrales Quartier mit Wasserstoff. pv magazin, 17. April 2020. Online verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2020/04/17/klimaneutrales-quartier-mit-wasserstoff/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [55] Klein, C. und Gailfus, M. (2021). Negative Strompreise – Fakten und Statistiken. BHKW-Infozentrum, 8. November 2021. Online verfügbar unter: <https://www.bhkw-infozentrum.de/wirtschaftlichkeit-bhkw-kwk/negative-strompreise-fakten-und-statistiken.html> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [56] Teuffer, M. (2021). Wasserstofftransport wird Kernthema für Markthochlauf. Ener|gate messenger, 12. April 2021. Online verfügbar unter: <https://www.energate-messenger.de/news/211255/wasserstofftransport-wird-kernthema-fuer-markthochlauf> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [57] Häußermann, J., Kirsch, T., Maier, M., Kaiser, S. und Schraudner, M.: Social acceptance of green hydrogen in Germany: building trust through responsible innovation. [Under Review]
- [58] Exytron. Klimafreundliches Wohnen in Augsburg. Online verfügbar unter: <https://exytron.online/klimafreundliches-wohnen-in-augsburg/> [zuletzt geprüft am 29.11.2021]
- [59] Winkler et al. (2016). Zukunftswerkstatt Erneuerbare Energien – Eigenversorgung mit Strom – Analyse der Wirkungen und Szenarien für die zukünftige Entwicklung (Endbericht). Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. November 2016.
- [60] Hollmuller et al. (2000). Evaluation of a 5 kWp photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland. International Journal of Hydrogen Energy 25 (2000), pp. 97 – 109.