

## Endbericht

### Potenziale des Effizienzhaus Plus-Gebäudestandards in Kombination mit Wasserstoff-Technologien (ID 247)

Aktenzeichen: SWD – 10.08.17.7-21.26

für das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung (BBR)

Autoren: Technische Universität Dresden  
Institut für Energietechnik  
Prof. Dr.-Ing. Clemens Felsmann; Professur für Gebäudeenergietechnik und  
Wärmeversorgung  
Tel. +49 (0) 351 463 37685 / E-Mail: [clemens.felsmann@tu-dresden.de](mailto:clemens.felsmann@tu-dresden.de)  
Prof. Dr.rer.nat. et Ing.habil Christoph Haberstroh; Bitzer-Professur für  
Kälte-, Kryo und Kompressorentechnik  
Tel. +49 (0) 351 463 33406 / E-Mail: [christoph.haberstroh@tu-dresden.de](mailto:christoph.haberstroh@tu-dresden.de)  
01062 Dresden

Dr.-Ing. Ulrich Bünger, M.Sc.  
Meyerbeerstr. 28  
81247 München  
Tel. +49 (0) 89 812 59 09 / E-Mail: [Ulrich.Buenger@posteo.de](mailto:Ulrich.Buenger@posteo.de)

Datum: 27.07.2022

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den Autoren.

**Abkürzungsverzeichnis**

AEL	Alkalische Wasserelektrolyse
BEV	Battery electric vehicle (= Batterieelektrisches Fahrzeug)
BEV-Laden	Wiederaufladen eines batterieelektrischen Fahrzeugs
BEV-Ladestation	Einrichtung zum Wiederaufladen eines batterieelektrischen Fahrzeugs
BHKW	Block-Heiz-Kraft-Werk
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (heute BMWK – Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz)
BW	Baden-Württemberg (Landeskennung)
BWP	Bürgerwindpark
BY	Bayern (Landeskennung)
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Carbon Capture and Storage (= Abtrennung von CO <sub>2</sub> und Verbringung in geeignete Endlagerstätten)
CE	Conformité Européenne (= Europäische Konformität)
CH	Schweiz (Länderkennung)
CH <sub>3</sub> OH	Chemische Formel für Methanol
CH <sub>4</sub>	Chemische Formel für Methangas
CO <sub>2</sub>	Chemische Formel für Kohlenstoffdioxid
DE	Deutschland (Länderkennung)
DHH	Doppelhaushälfte
DSO	Distributed System Operator (= Gasverteilnetzbetreiber)
EE-Strom	Strom erzeugt aus Erneuerbarer Energie
EFH	Einfamilienhaus
el-WP	Elektrisch angetriebene Wärmepumpe
Ely	Elektrolyseur (Abkürzung)
EU	European Union (= Europäische Gemeinschaft)
EU-27 sacht	Die nach dem Brexit um Großbritannien verringerte Anzahl Mitgliedsländer der Europäischen Gemein-
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (= Brennstoffzellenelektrisches Fahrzeug)
Gasmotor-BHKW	Gasmotorbetriebenes Blockheizkraftwerk
Gas-WP	Gasbetriebene Wärmepumpe
GEG	Gebäude Energie Gesetz
h	Stunde
H <sub>2</sub>	Chemische Formel für Wasserstoff
H <sub>2</sub> -ready	Wasserstoffbetriebstauglich
H <sub>i</sub> bzw. H <sub>u</sub>	(unterer) Heizwert
HB	Hansestadt Bremen (Landeskennung)
H-Gas	Erdgas hohen Methangehaltes
iKWK	Innovative Kraft-Wärme-Kopplung
IPCEI	Important Projects of Common European Interest (= Wichtige Vorhaben von gemeinsamem europäischen Interesse)
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
kg	Kilogramm (Gewichtseinheit)
KiTa	Kindertagesstätte
km	Kilometer (Entfernungseinheit)
kW	Kilowatt (Leistungseinheit)
kW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrisch (Leistungseinheit)

KW <sub>th</sub>	Kilowatt thermisch (Leistungseinheit)
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
l	Liter (Volumeneinheit)
L-Gas	Erdgas niederen Methangehaltes
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas (= Tiefkalt verflüssigtes Methangas, hier aus synthetisch hergestelltem Methan)
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carrier (= flüssiges organisches Wasserstoffträgermedium)
m	Meter (Längeneinheit)
m <sup>3</sup>	Kubikmeter (Volumeneinheit)
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell (= Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle, Hochtemperatur-Brennstoffzelle)
MFH	Mehrfamilienhaus
MNG	Membran-Ausdehnungsgefäß
MPa	Megapascal (Druckeinheit)
MW	Megawatt (Leistungseinheit)
NH <sub>3</sub>	Chemische Formel für Ammoniak
NI	Niedersachsen (Landeskennung)
NL	Niederlande (Länderkennung)
NO <sub>x</sub>	Chemische Formel für Stickstoffoxid (= Stickoxid)
NRW	Nordrhein-Westfalen (Landeskennung)
NT	Niedertemperatur
NWS	Nationale Deutsche Wasserstoffstrategie
O <sub>2</sub>	Chemische Formel für Sauerstoff
PEMBZ	Proton Exchange Membrane (= Protonenaustauschmembran)-Brennstoffzelle
PEMEL	Proton Exchange Membrane (= Protonenaustauschmembran)-Elektrolyseur, auch PEM-Elektrolyse
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell (= PEM-Brennstoffzelle)
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas (= Konzept zur Umwandlung von Strom in Methan- oder Wasserstoffgas)
PtGtP	Power-to-Gas-to-Power (= Umwandlung von Strom zu Gas und Rückumwandlung in Strom)
PtL	Power-to-Liquids (= Konzept zur Umwandlung von Strom in flüssige Energieträger (Methanol, LNG, ...))
PtH <sub>2</sub>	Power-to-Hydrogen (= Strom zu Wasserstoff)
PtP	Power-to-Power (= eigentlich PtGtP oder Power-to-Gas-to-Power; Konzept zur Wiederverstromung aus mit Strom erzeugtem Wasserstoff)
PtX	Power-to-X (= Überbegriff für alle PtG-, PtL- und weitere Konzepte aus Strom)
Pu	Pumpe
PV	Photovoltaik
RH	Reihenhaus
R&I Schema	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschemas
RL	Rücklauf
RLP	Rheinland-Pfalz (Landeskennung)
RW	Raumwärme
RW-Speicher	Raumwärmespeicherbehälter
SDB	Sicherheitsdruckbegrenzer
SE	Schweden (Länderkennung)
SET	Smart Energy Technology (= intelligente Energietechnologie), Produktname von Exytron
SH	Schleswig-Holstein (Landeskennung)
SHK	Sanitär – Heizung – Klima-Handwerk
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell (= Feststoffelektrolyt-Brennstoffzelle)

---

STW	Sicherheitstemperaturwächter
t	Tonne (Gewichtseinheit)
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level (= Technischer Entwicklungsstand auf einer vereinbarten Skala von 1...9)
TSO	Transmission System Operator (= Fernleitungsgasnetzbetreiber)
TWE	Trinkwassererwärmung
TWh	Terawattstunden (Energieeinheit)
TWh <sub>H2</sub>	Terawattstunden Wasserstoff
UK	Großbritannien (Länderkennung)
VL	Vorlauf
Vlh	Volllaststunden
WEA	Windenergieanlage
Wfl	Wohnfläche
WP	Wärmepumpe
WRG	Wärmerückgewinnung (Abwärmenutzung)
WÜ	Wärmeübertrager
WW-Speicher	Warmwasserspeicherbehälter
WW-Speicher	Warmwasserspeicherbehälter

## Glossar

Dieser Bericht enthält eine Zahl relevanter Begriffe, die für ein allgemeines Verständnis im Zusammenhang mit einer Nutzung von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung im privaten oder gewerblichen Bereich grundlegend sind. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

### Wasserstoff

Wasserstoff (chemische Formel  $H_2$ ) ist ein geruchsloses Gas und besteht aus Wasserstoff-Molekülen mit je zwei Wasserstoffatomen und kommt auf der Erde nahezu ausschließlich in gebundener Form vor. Mit Luftsauerstoff (chemische Formel  $O_2$ ) verbrennt es zu Wasser entweder ähnlich wie Methan in Brennern oder bei niedriger Temperatur kontrolliert und unter Abgabe von Strom in **Brennstoffzellen**. In Erfüllung eines **vollständigen Kreislaufs** kann aus dem Produktwasser (chemische Formel  $H_2O$ ) mit Hilfe der **Wasserelektrolyse** und unter Verwendung erneuerbar hergestellten Stroms wieder sog. „**grüner**“ **Wasserstoff** hergestellt werden. Daneben ist auch „**grauer**“ **Wasserstoff** bekannt, der heute noch kostengünstig hauptsächlich aus fossilem Erdgas mit Hilfe der sog. **Dampfreformierung** hergestellt wird sowie „**türkiser**“ **Wasserstoff**, der mit Hilfe der Pyrolyse von Erdgas bei hohen Temperaturen und festem Kohlenstoff als Nebenprodukt entsteht. Um die Klimagasemissionen des eingesetzten Erdgases nachhaltig zu verringern, kann das bei der Dampfreformierung entstehende Kohlendioxid ( $CO_2$ ) auch abgetrennt und unterirdisch (z.B. unter dem Boden der Nordsee in alten Erdgaslagerstätten) endgelagert werden (CCS - Kohlendioxidabtrennung und -speicherung). Der so produzierte Wasserstoff wird als „**blauer**“ **Wasserstoff** bezeichnet. „**Grüner**“ **Wasserstoff** entsteht auch als Produkt der Vergasung fester Biomasse bzw. Fermentierung von Biogas.

Da die Speicherung von Wasserstoff zur Erzielung einer hohen räumlichen Energiedichte entweder unter hohem Druck verdichtet oder bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt kryoverflüssigt werden muss, werden parallel auch Verfahren entwickelt, Wasserstoff hauptsächlich in flüssiger Form einfacher transportierbar und speicherbar zu machen. Die so entstehenden Energieträger wie Ammoniak ( $NH_3$ ), Methanol ( $CH_3OH$ ) oder flüssige organische Wasserstoffträgerflüssigkeiten (LOHC) werden in diesem Zusammenhang auch als **Wasserstoff-Derivate** bezeichnet, von denen sich jedes durch spezifische Vor- und Nachteile im Umgang oder der Toxizität auszeichnet.

Wasserstoff wird heute per Rohrleitung (z.B. in einem modifizierten Erdgasnetz), in Lkw- oder Bahntrailer als Druckgas oder tiefkalte Kryoflüssigkeit transportiert. Entsprechend wird Wasserstoff stationär in zylindrischen Druck- oder Flüssigtanks, in **Gasflaschenbündeln** oder in unterirdischen Gaslagerstätten gespeichert. Das Umfüllen von Wasserstoff erfolgt mit angepassten Verfahren (z.B. **Trailerbefüllung** bzw. -entnahme).

Entgegen der allgemeinen Einsicht, dass grüner Wasserstoff grundsätzlich nur aus heutiger Strommarktsicht aus preisgünstigem **Überschussstrom** hergestellt werden kann, d.h. EE-Strom, der nicht im Stromnetz abtransportiert werden kann, beginnt sich die Expertensicht durchzusetzen, dass bei einem breiten grünen Wasserstoffeinsatz über alle Energiesektoren hinweg, auch **dediziert hergestellter EE-Strom** zum Einsatz kommen muss. Andernfalls müssten die Elektrolyseure nur zu geringen Jahresvolllaststunden (Jahres-Vlh) betrieben werden, was einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb verhindern würde.

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	11
1.1	Aufgabenstellung	11
1.2	Methodik	11
1.3	Ergebnis	12
2	Beschreibung des Gebäudestandards „Effizienzhaus Plus“	14
2.1	Technische Anforderungen	14
2.2	Erfahrungen und Projekte	14
2.2.1	Projektübersicht	14
2.2.2	Energiebilanzen	16
2.2.3	Potenzialabschätzung für Wasserstoffnutzung	18
3	Aktueller Stand: Verwendung von Wasserstoff im Gebäudebereich	29
3.1	Zielsetzung	29
3.2	Grundsätzliche Strategien und Nutzungsmodelle - Übersicht über den Einsatz von Wasserstoff für die Gebäudebeheizung	30
3.2.1	England	32
3.2.2	Dänemark	32
3.2.3	Niederlande	32
3.2.4	Deutschland	34
3.2.5	Zusammenfassung der Länderstrategien	36
3.2.6	Projekte	38
3.3	Gutachten und Szenarienanalyse	51
3.4	Die Akteure	56
3.4.1	Gasversorger	56
3.4.2	Anlagenentwickler	58
3.4.3	Wohnungswirtschaft	67
3.4.4	Kompetenzzentren Wasserstoff in der Wärmeversorgung	69
3.5	Technik	72
3.5.1	Grundlagen	72
3.5.2	Elektrolyseure	74
3.5.3	Wasserstoff-Verdichter	75
3.5.4	Wasserstoff-Speicherung	76
3.5.5	Wasserstoff-Heizgeräte	77
3.5.6	Wasserstoff-Brennstoffzellen	77
3.6	Wirtschaftlichkeit	78

---

4	Beschreibung von Planungs-, Genehmigungs- und Umsetzungserfahrungen	80
4.1	Relevanz des bestehenden Regelwerks	80
4.2	Bedarf zur Regelwerksanpassung	81
5	Vorschlag zur Umrüstung des Bundesmodellvorhabens	83
5.1	Das Bundesmodellvorhaben	83
5.2	Vorschlag zur Umrüstung	85
6	Zusammenfassung und Ausblick	88
7	Literaturverzeichnis	90

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Übersicht zu Modellvorhaben; Quelle: (BMI, 2018) .....	15
Abbildung 2: Typisches, stark vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude; Einspeisung elektrischer Überschüsse in das Stromverteilnetz .....	16
Abbildung 3: Typischer Verlauf für die kumulierte Energiebilanz eines Effizienzhaus Plus hier am Beispiel des Mehrfamilien-Modellvorhabens „La VidaVerde“ Berlin; links mit bilanziellem Endenergieüberschuss; recht mit bilanzieller Unterdeckung (Rexroth, S. et.al., 2017) .....	17
Abbildung 4: Eigennutzung und Deckung des Photovoltaikstroms für die erste Messperiode in den Ein- und Zweifamilienhäusern (Quelle (BMI, 2018)).....	17
Abbildung 5: Eigennutzung und Deckung des Photovoltaikstroms für die erste Messperiode in den Mehrfamilienhäusern (Quelle (BMI, 2018)).....	18
Abbildung 6: Zeitverlauf von Ertrag aus Photovoltaik und Elektroenergieverbrauch im Vergleich (Datengrundlage: Effizienzhaus Plus in Weifa) .....	18
Abbildung 7: Zeitverlauf von kumuliertem Elektroenergieverbrauch und Ertrag aus Photovoltaik in 2019 und 2020 für das zur Potenzialabschätzung beispielhaft analysierte Schulgebäude .....	19
Abbildung 8: Vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude mit lokaler Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energie und H <sub>2</sub> -Einspeisung in das Gasnetz; Abwärmeeinspeisung optional; (keine konkrete Nachbildung des betrachteten Beispielgebäudes) .....	20
Abbildung 9: Beispielhafter Zeitlicher Verlauf von elektrischer Überschussproduktion und damit realisierter Wasserstoffproduktion im Sommer (links) und im Herbst/Winter (rechts); keine Mindestleistung der Elektrolyse berücksichtigt.....	21
Abbildung 10: kumulierter PV-Überschuss (Ordinate links) und kumulierte Wasserstoffproduktion (Ordinate rechts) des Beispielgebäudes; negative PV-Überschüsse entsprechen einem Elektroenergiebezug aus dem Stromnetz .....	21
Abbildung 11: Bilanzierung der Abwärme aus der Elektrolyse im Beispielgebäude Grundschule Giebelstadt (Q <sub>ab</sub> ist die Abwärme aus der Elektrolyse).....	22
Abbildung 12: Vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude mit lokaler Wasserstoffproduktion und H <sub>2</sub> -Nutzung lokal aber ohne Gasnetzeinspeisung.....	23
Abbildung 13: Wasserstoffbilanz (Produktion, Verbrauch und Speicherinhalt) über eine Zweijahresperiode für das Beispielgebäude; Anwendungsfall a) Einsatz eines Gaskessels.....	24
Abbildung 14: Wasserstoffbilanz (Produktion, Verbrauch und Speicherinhalt) über eine Zweijahresperiode für das Beispielgebäude; Anwendungsfall b) Einsatz einer Brennstoffzelle .....	26
Abbildung 15: Elektroenergieverbrauch der Wärmepumpen im beispielhaft betrachteten Effizienzhaus Plus-Ausgangszustand (blaue Säulen) und mit Wasserstofferzeugung, -speicherung und -verbrennung im Gaskessel vor Ort (orangefarbene Säulen) bzw. mit Wasserstoffnutzung in einer stromgeführten Brennstoffzelle (graue Säulen) für 2019 und 2020.....	27
Abbildung 16: Elektroenergiebezug im beispielhaft betrachteten Effizienzhaus Plus-Ausgangszustand (blaue Säulen) und mit Wasserstofferzeugung, -speicherung und -verbrennung im Gaskessel vor Ort (orangefarbene Säulen) bzw. Nutzung in einer stromgeführten Brennstoffzelle (graue Säulen) für 2019 und 2020.....	28
Abbildung 17: Dimensionen einer künftig CO <sub>2</sub> -freien und nutzerfreundlichen Gebäudeenergieversorgung in Deutschland.....	30

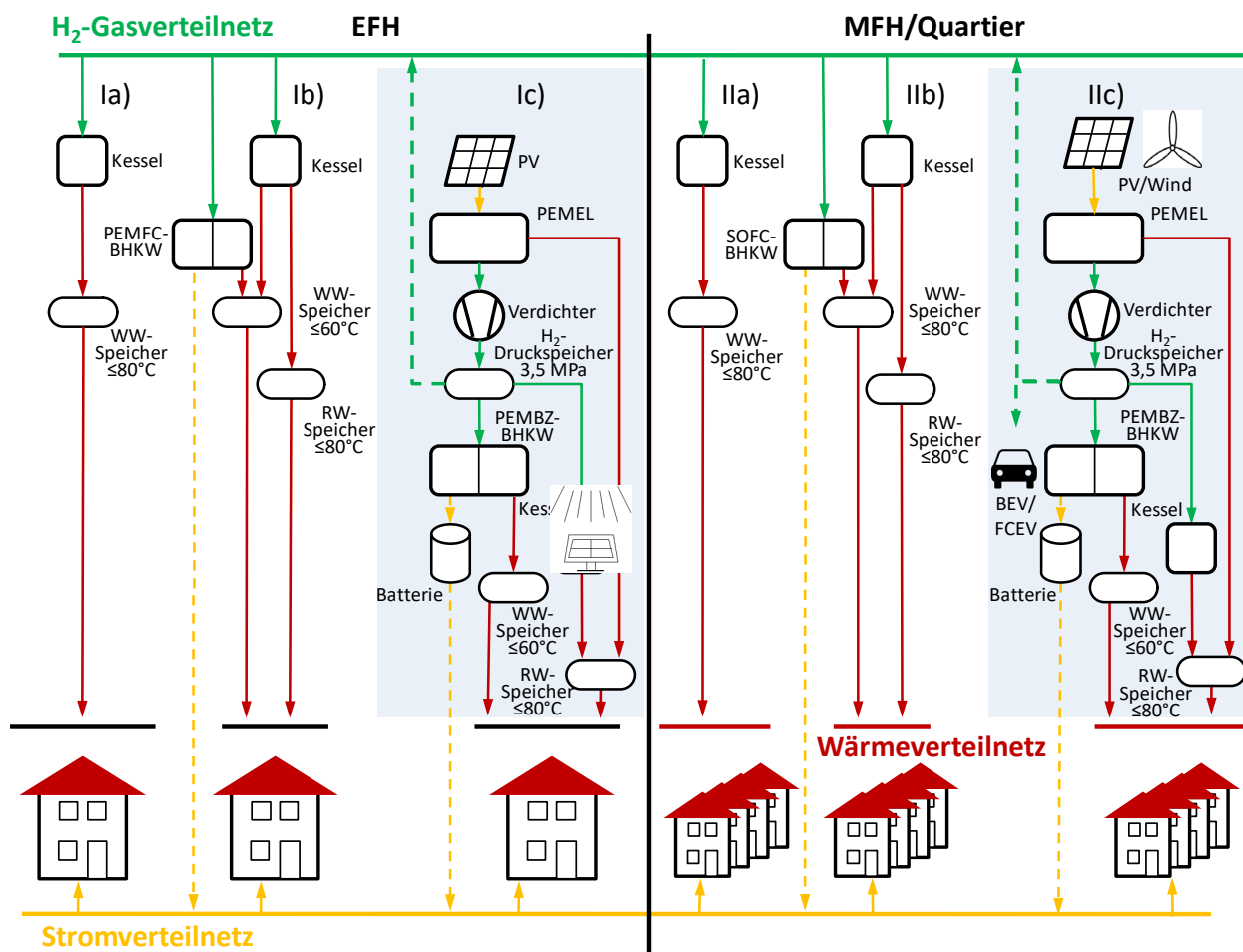


Abbildung 18: Konzeptvergleich gasnetzgebundener bzw. gasnetzunabhängiger Wasserstoff-Versorgungsfälle von EFH und MFH (die hellblau schattierten Optionen heben Lösungen für Effizienzhaus Plus-Gebäude hervor; weitere Darstellungen zu konkreten Effizienzhaus Plus-Optionen finden sich in Kapitel 2.2).....31

Abbildung 19: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial im sektoralen Vergleich [ (WVStahl, 2020) auf Basis Fraunhofer Umsicht].....36

Abbildung 20: Orte mit prototypischen Privat- oder Gewerbeobjekten mit Einsatz von Wasserstoff in der Wärmeversorgung in Europa und in Deutschland.....43

Abbildung 21: Übersicht über das SmartQuart-Projekt, Teilprojekt Kaisersesch (Quelle: Viessmann).....48

Abbildung 22: Übersicht über wasserstoffspezifische Komponenten zur Gebäudeenergieversorgung ohne Anlagensteuerung .....58

Abbildung 23: Das H<sub>2</sub>-Habitat H<sub>2</sub>-Airport von BEN-Tec (Quelle BEN-Tec, 2022).....62

Abbildung 24: Anlagenschema der EXYTRON-Technik zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung in Quartieren .....64

Abbildung 25: Prozesskette von der Primärenergiebereitstellung bis zum Wasserstoffumsatz zur Wärme- und Stromgestehung.....73

Abbildung 26: Elektrolysewirkungsgrad in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseurleistung (die Daten beruhen auf Spezifikationen der Elektrolyseurhersteller Proton Onsite (Proton H-Series H2, H4, H6, C-Series (C10, C20, C30), M-Series (M100, M200, M400), Cummins/Hydrogenics (HySTAT 10 (alk.), Hylyzer 4000, Stack) sowie Hoeller (Prometheus S, M und L, jeweils Entwicklungsziele)).....75

Abbildung 27: Vorhersage der Kostenentwicklung für die Produktion von Wasserstoff in Deutschland (Quelle: (Deutscher Bundestag, 2020) auf Basis (Bukold, 2020)).....79

Abbildung 28: 2-stufiger Umsetzungsplan für die Umstellung einzelner Gebäude bzw. flächendeckend der Gasnetzinfrasturktur von Erdgas auf wasserstoffhaltige methanreiche Gase oder Wasserstoff (Steiner & Schrader, 2021) .....	82
Abbildung 29: Konzept der haustechnischen Anlagen im Effizienzhaus Plus Modellvorhaben Berlin; Quelle: Fraunhofer IPB entnommen aus (BBSR, 2016) .....	84
Abbildung 30: linkes Diagramm: Kumulierte Endenergie aus dem Gebäude-Monitoring im Effizienzhaus Plus Modellvorhaben Berlin (BBSR, 2016); rechtes Diagramm: Kumulierte Erträge aus Photovoltaik 2018-2020 (IKzB) .....	84
Abbildung 31: Sauerstoffgasflasche, z.B. 20 kg oder 50 kg (Quelle <a href="http://www.hausundwerkstatt24.de">www.hausundwerkstatt24.de</a> ) .....	85
Abbildung 31: Systemische Struktur des geplanten Reallabors "H2-Airport" .....	88

#### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über relevante Projekte mit Einsatz von Wasserstoff zur Gebäudewärmeversorgung in Europa und Deutschland ( <b>P</b> – Wasserstoff Produktion; <b>I</b> – Wasserstoff-Infrastruktur; <b>N</b> – Wasserstoff-Nutzung) .....	39
Tabelle 2: Steckbrief für das BEN-Tec Power/Ground Cube-Konzept zur Wärmeversorgung von MFH oder Siedlungen .....	62
Tabelle 3: Steckbrief für das Wärme-Anlagenkonzept der Firma EXYTRON (projektspezifisch auf Basis von Standardkomponenten) .....	65
Tabelle 4: Steckbrief des Stromautarkiesystems für EFH und MFH der Firma homepowersolutions (Modulares Produkt picea) ( <a href="https://www.homepowersolutions.de/wp-content/uploads/2021/10/2021-datenblatt-picea.pdf">https://www.homepowersolutions.de/wp-content/uploads/2021/10/2021-datenblatt-picea.pdf</a> ) .....	66
Tabelle 5: Übersicht über deutsche Institutionen/Einrichtungen mit Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellenfokus .....	69

# 1 Kurzdarstellung

## 1.1 Aufgabenstellung

Die zum Erreichen klimapolitischer Zielstellungen dem Wasserstoff zugeordneten Rollen sind, wenn man den verschiedenen bereits vorliegenden Szenarien Glauben schenken darf, höchst vielfältig. Auch zu einer möglichen Anwendung im Gebäudebereich mit der Motivation der Minderung von treibhausrelevanten CO<sub>2</sub>-Emissionen bestehen verschiedene Überlegungen, wobei die Beimischung in vorhandene Gasinfrastrukturen und die Verbrennung in Heizkesseln noch die am einfachsten umzusetzende Variante darstellt. Andere Studien schließen die direkte Anwendung von Wasserstoff im Gebäudebereich dagegen vollständig aus. Möglicherweise ergeben sich aber mit Blick auf aktuelle Demonstrationsprojekte bei der liegenschaftsübergreifenden Betrachtung von Quartieren und der Einbeziehung der Effizienzhaus Plus-Gebäude andere neuartige Optionen zur Wasserstoffanwendung.

Der vom Bundesbauministerium 2011 definierte Gebäudestandard Effizienzhaus Plus ist eine Maßnahme zur Dekarbonisierung des Gebäudebereiches. Sein Grundsatz „Energieeffizienz an erster Stelle“ wurde inzwischen in der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates als unabdingbare Voraussetzung für alle Dekarbonisierungsszenarien bewertet und aufgegriffen. Sein Ansatz wird auch in der Fortschreibung der europäischen Gebäuderichtlinie mit dem Null-Emissionsgebäude (im Gebäudebetrieb) aufgegriffen und ist ab 2030 ohne Beachtung des Nutzerstroms für alle Neubauten verpflichtender Standard.

Der Effizienzhaus Plus Standard erfordert in der Jahresbilanz mehr über erneuerbare Energien zu gewinnen, als Energie für den Gebäudebetrieb und den Nutzerstrom benötigen wird. Die am häufigsten eingesetzte Technologie ist die Photovoltaik. Bisher werden Elektroenergieerzeugung und Bedarf der Gebäude bzw. des Quartiers mit Hilfe von Batteriespeichern und dem Anschluss an das öffentliche Stromnetz ausgeglichen, was oftmals bedeutet, dass temporäre Leistungsüberschüsse in das Stromnetz eingespeist werden. Ein alternativer Weg wäre dagegen, die regenerativ erzeugte Elektroenergie in dann sogenannten „grünen“ Wasserstoff umzuwandeln und der weiteren Nutzung verfügbar zu machen. Auf diese Weise wird außerdem das energiepolitische Ziel des Ausbaus der dezentralen und lokal eigenerzeugten Energie unterstützt.

Ziel der Untersuchung ist, ob und unter welchen Voraussetzungen der Einsatz von grünem Wasserstoff insbesondere bei der Umsetzung des Effizienzhaus Plus-Standards technisch möglich sowie ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist. Hemmnisse und regulatorische Lücken in der Anwendung von Wasserstofftechnologien in Effizienz Plus-Gebäuden sollen aufgezeigt werden, wobei auf eventuelle Besonderheiten von Einfamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern sowie Quartieren im Neubau und im Bestand Rücksicht zu nehmen ist. Neben der Nutzung von regenerativen Überschussenergien zur Wasserstoffherzeugung sind auch Abwärmenutzungskonzepte aus der Wasserstoffproduktion zu betrachten, um eine möglichst hohe Gesamteffizienz zu erzielen. Ein weiterer Aspekt ist die sektorenübergreifende Verfügbarmachung von überschüssigem Wasserstoff für andere Anwendungen wie z.B. für die Mobilität mittels lokaler Tankstellen, Trailerabfüllung, zur Verfügungstellung für Nachbargebäude oder Einspeisung in das lokale Gasverteilnetz.

## 1.2 Methodik

Das Forschungsprojekt unterteilt sich in die folgenden fünf Teilaufgaben:

1. Zunächst wird der Gebäudestandard „Effizienzhaus Plus“ beschrieben. Dabei werden mögliche Potenziale für einen zügigen Wasserstoff-Markthochlauf und die Etablierung von Wasserstoff-

Wertschöpfungsketten analysiert. Dazu werden vor allem die relevanten Erfahrungen aus den bekannten Effizienzhaus Plus Modellvorhaben gesichtet (<https://www.zukunftbau.de/projekte/modellvorhaben/modellvorhaben-effizienzhaus-plus>) und die für die lokale Produktion von Wasserstoff verfügbaren energetischen Potenziale sowohl bilanziell als auch im zeitlichen Auftreten bewertet.

2. Es werden bestehende Gutachten, Studien, Forschungsarbeiten und Szenarien zur Rolle des Wasserstoffs in einem zukünftigen Energiesystem recherchiert, gesichtet und mit Blick auf Relevanz für den Gebäudestandard Effizienzhaus Plus geprüft. Da die aktuelle Diskussion zum Thema durchaus kontrovers ist, sollen die unterschiedlichen Meinungen einander transparent gegenübergestellt und diskutiert werden. Bei dieser Diskussion wird immer wieder der Fokus auf das Effizienzhaus Plus gelegt, d.h. die Bereitstellung von Wasserstoff aus temporär auftretenden bilanziellen Energieüberschüssen sowie die Verwendung dieser Energieüberschüsse zur Herstellung von Wasserstoff und mit Blick auf die Nutzung vor Ort (Gebäude und Quartier).
3. Im Rahmen eines dritten Studienteils werden Planungs-, Genehmigungs- und Umsetzungserfahrungen aus Wasserstoff-Projekten im Gebäudebereich dargestellt. Hierbei handelt es sich vor allem um Erfahrungen aus dem Einsatz mit brennstoffzellen- oder kesselgestützten Wärmeerzeugungsaggregaten (z. B. das Callux-Projekt: „Praxistest für Brennstoffzellen im Eigenheim“ 2008-2016). Die Erfahrungen stehen in einem breiten internationalen Kontext und müssen daher im Licht der gewachsenen systemtechnischen Einsichten aber auch der in den letzten Jahren stark veränderten Systemperspektiven einer CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung bis 2045 analysiert werden. Des Weiteren werden geplante Pilot- oder Demonstrationszwecke genannt und in Bezug auf ihre Ambition und Umsetzungsziele analysiert. Berücksichtigung finden hier sowohl länger zurückliegende Projekte als auch aktuelle Erfahrungen von Herstellern und Anbietern von Systemlösungen. Wesentliche Informationen, Tipps, Anregungen und Informationen zur Förderung von Wasserstoff im Gebäudebereich sowohl zur Herstellung als auch zur Nutzung im Wärmemarkt werden dargestellt und die Übertragbarkeit der Optionen auf das Effizienzhaus Plus auf Basis sich abzeichnender Technologie- und Infrastrukturtrends erörtert.
4. Das bekannte Bundesmodellvorhaben „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“ in Berlin kann bei entsprechender Anwendung von Wasserstofftechnologien als Multiplikator dienen. Das Projektkonsortium wird auf Grundlage der bis hierher erarbeiteten und zusammengetragenen Erkenntnisse einen Vorschlag zur Umrüstung bzw. Erweiterung des Bundesmodellvorhabens um Wasserstoff-Komponenten vorlegen.
5. (optional) Auch die allgemeinen Planungsempfehlungen für den Effizienzhaus Plus Standard werden um das Thema „Wasserstoff“ erweitert. So weit bis hierhin möglich, werden neue Erkenntnisse in bauangewandte, innovative Handlungsempfehlungen formuliert, die Nachahmern bei einer erfolgreichen Projektumsetzung Hilfestellung bieten können.

### 1.3 Ergebnis

Wasserstoff kann lokal auf verschiedene Arten in den Gebäudesektor integriert werden: zur ausschließlichen Wärmeversorgung (Verbrennung), in Wärme- und Stromanwendungen (Rückverstromung in dezentraler KWK) oder stofflich (Einspeisung in das Gasnetz). Einer Nutzung von Wasserstoff im privaten oder gewerblichen Wärmesektor stehen dabei aus heutiger Sicht weder aus technischer noch regulatorischer Perspektive grundsätzliche Hindernisse im Weg. Durch ihre aktuelle „H<sub>2</sub>-ready“ Strategie kommerzialisieren europäische Akteure auf Gasverteilnetzebene zur Zeit alle erforderlichen Technologien zur H<sub>2</sub>-Infrastruktur (Wasserelektrolyseure, Verdichter, Druckspeicher, Rohrleitungen und Armaturen) und H<sub>2</sub>-Nutzung (H<sub>2</sub>-Brenner, Brennstoffzellen-(Klein-)BHKW) für eine direkte Nutzung von Wasserstoff (Zumischung bis 100% Betrieb) oder seines Derivates Methangas (Methanisierung und Führen von CO<sub>2</sub> im geschlossenen Kreislauf; für Details siehe Verfahren der Fa. Exytron in Kap. 3.4.2). Diese Technologien werden für mehrere Leistungsklassen vom Einfamilien- bis zum Mehrfamilienhaus oder für ganze Quartiere

entwickelt. Damit stehen auch alle Technologien für die Nutzung im Effizienzhaus Plus immer kostengünstiger zur Verfügung.

In der aktuellen Diskussion stehen sich jedoch zwei Lager in ihrer Einschätzung der Bedeutung von Wasserstoff im Wärmesektor einander gegenüber. Die H<sub>2</sub>-Befürworter (Gasnetzbetreiber, Geräteindustrie) verstehen dabei den Einsatz von H<sub>2</sub> insbesondere als einen kostengünstigen (niedrige Umrüstkosten auf H<sub>2</sub>-Brenner) schnellen Pfad zur CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion. Sie sehen in der Nutzung von Wasserstoff eine mittel- und langfristig wirksame Möglichkeit, die Stromverteilinfrastruktur durch eine öffentlichkeitskompatible und kostengünstige Nutzung des vorhandenen Gasverteilnetzes zu entlasten. Dies wäre insbesondere auch in Hinblick auf den aufwändig umzurüstenden Gebäudebestand auf eine strombasierte Beheizung mit Hilfe von elektrischen Wärmepumpen, den zunehmend durch fluktuierenden erneuerbaren Strom und ein zukünftig auch noch stärker durch Wärmepumpen dominiertes Energiesystem vorteilhaft. Die H<sub>2</sub>-Gegner sehen im vergleichsweise ineffizienten mittleren Gesamtwirkungsgrad (insbesondere im Vergleich zu elektrisch betriebenen Wärmepumpen) einen unerwünscht hohen Versorgungsdruck auf die knappe Ressource erneuerbarer Strom. Zudem befürchten sie gleichzeitig die Zementierung eines niedrigen Wärmedämmstandards im gesamten Wohnungssektor durch die Vermeidung kostengünstiger Heizungssysteme (Flächenheizungen) bzw. zu geringer Anstrengungen bei den Wärmedämmmaßnahmen.

Für einen Einsatz im Effizienzhaus Plus steht Wasserstoff insbesondere als saisonales EnergiespeichermEDIUM offen und ergänzt die Kurzfristspeicherung von Strom in Batterien, insbesondere wenn alle Energieströme (Strom und Wärme aus Elektrolyse und Brenner/Brennstoffzelle) genutzt werden. Wasserstoff-Technologien können damit helfen, den Eigenverbrauchsanteil aus PV zu erhöhen und Stromnetzbelastungen durch fluktuierende Einspeisung zu begrenzen. Aber auch die Option einer Einspeisung ins Gasverteilnetz bereits in geringen Anteilen ist denkbar, soweit die betroffenen Gasversorger eine dann erforderliche Betriebsweise technisch (Messen von Gasreinheit, Einhalten von Brennwert und Gasqualität/Gasbeschaffenheit) oder betrieblich (energetische Abrechnung, Sicherheit) ermöglichen. Die Wirtschaftlichkeit der Verwendung von Wasserstoff im Wärmesektor bzw. lokal im Gebäudesektor ist jedoch aus heutiger Sicht schwer zu beurteilen und muss erst nachgewiesen werden; heute kann sie nur durch entsprechende Förderprogramme sichergestellt werden. Bei steigenden Energiepreisen kann sich das ändern. Mittel- und langfristig könnte sich durch die Vermeidung des Stromverteilnetzausbaus zum Anschluss neuer elektrischer Wärmepumpen in großem Stil, insbesondere im Gleichklang mit Ladestellen für Batteriefahrzeuge, Wasserstoff als eine kostengünstige Wärmeversorgungsoption oder als Beitrag zur Flexibilität im Stromnetz (Rückverstromung!) herausstellen. Wichtigstes Argument dabei ist die bereits heute verfügbare und in vielen Regionen dichte öffentliche Gasverteilnetzinfrastruktur.

Zusammengefasst verstehen wir daher Wasserstoff als eine technisch und systemisch umsetzbare und essenziell sinnvolle Bereicherung zur künftigen Wärmebedarfsdeckung im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich, die ihre Wirtschaftlichkeit jedoch noch unter Beweis stellen muss. Eine besonders hohe energetische (Ressourcen) und wirtschaftliche Nutzung verspricht der H<sub>2</sub>-Einsatz in Effizienzhaus Plus-Quartieren, die Wasserstoff synergetisch auch zur Sektorenkopplung einsetzen, also z.B. auch Wasserstoff für die Mobilität liefern.

## 2 Beschreibung des Gebäudestandards „Effizienzhaus Plus“

### 2.1 Technische Anforderungen

Das Effizienzhaus Plus ist ein aus Forschungsprojekten zu Plusenergiehäusern seit 2007 entwickelter gebäudetechnischer Standard, der es ermöglicht, dass Gebäude in der Jahresbilanz mehr Energie bereitstellen als sie für die Gebäudenutzung selbst benötigen.

Das Effizienzhaus Plus erfüllt alle im Gebäudeenergiegesetz GEG formulierten Anforderungen, d.h. unter anderem die Einhaltung des Mindestwärmeschutzes, die Beachtung des sommerlichen Wärmeschutzes und die Nutzung erneuerbarer Energien. Darüber hinaus gelten aber auch noch die beiden folgenden Forderungen (BMI, 2018):

- $\Sigma Q_p < 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (negativer Jahres-Primärenergiebedarf bzw. -verbrauch) **und**
- $\Sigma Q_e < 0 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (negativer Jahres-Endenergiebedarf bzw. -verbrauch, d.h. die im Bilanzzeitraum am Gebäude bereitgestellte Endenergie muss größer sein als der Endenergiebezug; es ergibt sich also ein Netto-Endenergieüberschuss)

Für die vom Gebäude bereitgestellte Endenergie wird synonym beispielsweise auch die Bezeichnung „Endenergieproduktion“ verwendet. Die ebenfalls gebräuchliche Bezeichnung „Endenergielieferung“ ist in diesem Zusammenhang missverständlich, da ohne Kontext Verwechslungen mit dem Endenergiebezug auftreten können.

Bilanzgrenze (auch im Hinblick auf die Anrechenbarkeit der Erträge aus den Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien) ist das Grundstück, auf dem das Haus errichtet wird. Befinden sich mehrere Gebäude auf einem Grundstück, müssen die „on-site“ generierten Energieerträge aus erneuerbaren Energiequellen nutzflächenanteilig den einzelnen Gebäuden zugeordnet werden. Üblicherweise handelt es sich bei den eingesetzten Technologien um Photovoltaik zur Erzeugung elektrischer Energie.

Es hat sich aus den Erfahrungen verschiedener Modellprojekte gezeigt (siehe Kapitel 2.2) dass sich die technischen Anforderungen leichter realisieren lassen, wenn Gebäude energetisch optimiert geplant und betrieben werden. Außerdem sollte der Energiebedarf der Haushalts- bzw. Nutzungsprozesse so weit wie möglich gesenkt werden. Daher sind Wärmeverluste des Gebäudes durch Gebäudehüllenoptimierung (z. B. gute Wärmedämmung, keine Wärmebrücken, Luftdichtheit) zu minimieren. Es wird außerdem empfohlen, eine 10- bis 20-prozentige Überdimensionierung der Photovoltaikanlagen zum Ausgleich einer nicht optimalen Gebäudeperformance vorzunehmen, um sicher ein „Plus“ zu generieren.

### 2.2 Erfahrungen und Projekte

#### 2.2.1 Projektübersicht

Der Effizienzhaus Plus-Standard wurde ausgehend von einem 2011 errichteten Pilotvorhaben des Bundes in Berlin durch weitere Modellvorhaben in den Bereichen Ein- und Zweifamilienhaus, Mehrfamilienhaus und Bildungsbauten konsequent weiterentwickelt und durch praktische Erfahrungen untersetzt. Der Bund hat bislang folgende 44 Modellvorhaben durch eine finanzielle Förderung unterstützt:



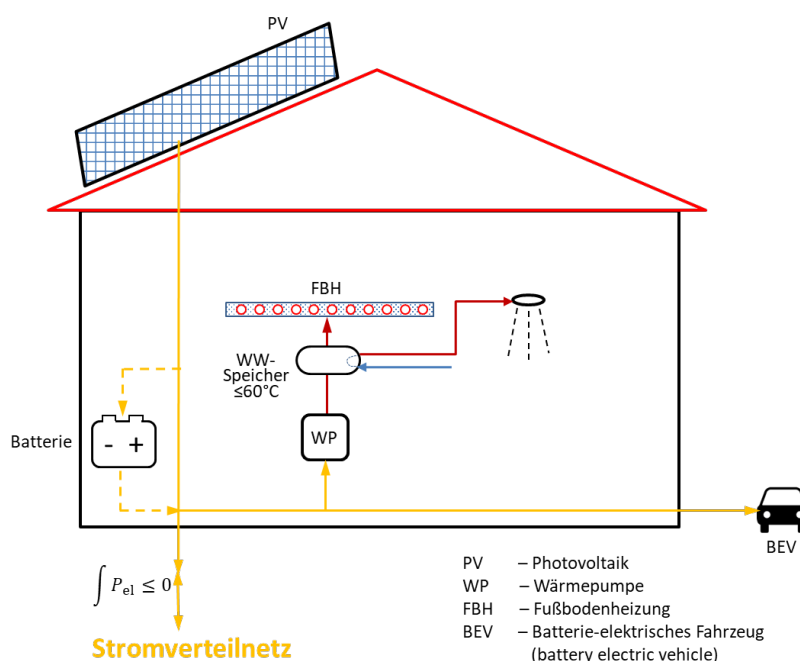


Abbildung 2: Typisches, stark vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude; Einspeisung elektrischer Überschüsse in das Stromverteilnetz

Die aus der solaren Einstrahlung generierte elektrische Energie deckt nicht nur den Energiebedarf sämtlicher Haushaltsverbraucher und ggf. die Elektromobilität, sondern auch die Wärmebedarfe aus Raumheizung und Trinkwassererwärmung ab. Reicht die von den PV-Anlagen momentan erzeugte elektrische Energie nicht zur Bedarfsdeckung aus, wird im betroffenen Zeitraum Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen; Überschüsse werden hingegen eingespeist oder der Hausbatterie bzw. den E-Mobilen zur Verfügung gestellt. Der Bezug weiterer Energieträger für eventuell vorhandene Reserveheizsysteme (Heizkessel, Fernwärme o.ä.) ist durch die PV-Überschüsse zu kompensieren. Der Einsatz von Solarthermieanlagen in Effizienzhaus Plus-Gebäuden ist sehr selten. Dies könnte damit zusammenhängen, dass sich die Einspeisung von solarthermischen Überschüssen in Wärmenetze insgesamt aufwendiger gestaltet als die Einspeisung von elektrischen Überschüssen aus Photovoltaik.

## 2.2.2 Energiebilanzen

Effizienzhaus Plus-Gebäude müssen im Jahresverlauf eine negative Endenergiebilanz aufweisen. Beginn und Ende des Bilanzzeitraumes können frei gewählt werden, solange der Bilanzzeitraum 12 Monate umfasst. Üblicherweise werden Endenergiebezug und Endenergieproduktion kumuliert über den Bilanzzeitraum aufgetragen, siehe Abbildung 3. Übersteigt am Ende des Jahres die Energieproduktion den Energiebezug, so liegt ein Endenergieüberschuss vor und die Forderung nach einem bilanziell negativen Endenergieverbrauch ist erfüllt. Je nach Nutzung des Gebäudes und saisonal veränderlichem Angebot erneuerbarer Energiequellen unterscheiden sich die Bilanzen in den verschiedenen Bilanzzeiträumen z.T. deutlich. Unter ungünstigen Bedingungen kann es daher sein, dass die Anforderungen an das Effizienzhaus Plus nicht immer erfüllt sind, siehe auch hier Abbildung 3, wo in der Messperiode 2 (rechte Grafik) zu erkennen ist, dass die sogenannte Energieproduktion geringer ausfällt, als der Energiebezug. Umso wichtiger sind eine sorgfältige Planung der Gebäude sowie ein kontinuierliches Monitoring, um durch optimierte Betriebsführung auf geänderte Randbedingungen reagieren zu können.

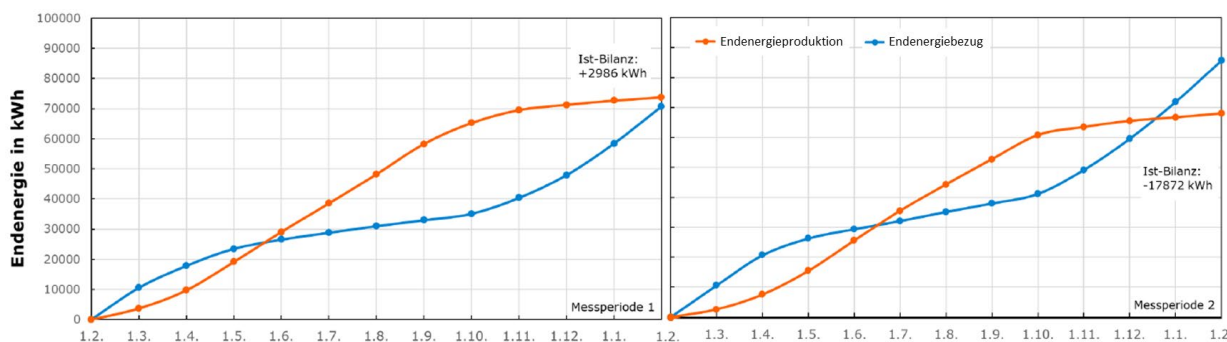


Abbildung 3: Typischer Verlauf für die kumulierte Energiebilanz eines Effizienzhaus Plus hier am Beispiel des Mehrfamilien-Modellvorhabens „La VidaVerde“ Berlin; links mit bilanziellem Endenergieüberschuss; recht mit bilanzieller Unterdeckung (Rexroth, S. et.al., 2017)

Bei der Bilanzierung der Endenergie ist zu beachten, dass eine von den Energieträgern unabhängige und damit ausschließlich energetische (also auf den Heizwert bezogene) Bilanzierung erfolgt; die Art der bilanzierten Energieträger ist aus der Bilanz nicht mehr zu erkennen. Auch ist zu bedenken, dass eine negative Energiebilanz (d.h. Produktion energetischer Überschüsse durch das Effizienzhaus Plus-Gebäude) keine Autarkie bedeutet, da die Überschüsse (z. B. durch Photovoltaik) nur saisonal auftreten, dann aber nicht vollständig selbst genutzt werden müssen und in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden können. Insofern wechseln sich Über- und Unterdeckung der Energiebedarfe ab und können nur z. T. durch den Einsatz thermischer Speicher und Batterien ausgeglichen werden.

Abbildung 4 (Ein- und Zweifamilienhäuser) und Abbildung 5 (Mehrfamilienhäuser) zeigen im Überblick die Eigenverbrauchsanteile (Eigennutzungsgrad) und die Deckungsgrade der PV-generierten Elektroenergie im Ergebnis des Gebäude-Monitorings in den Modellvorhaben. Die Zahlen lassen erkennen, dass insbesondere der Eigennutzungsgrad der Photovoltaik (im Mittel 34% für Gebäude mit und im Mittel nur 21% für Gebäude ohne Batteriespeicher) Raum für die lokale Wasserstoffproduktion lässt.

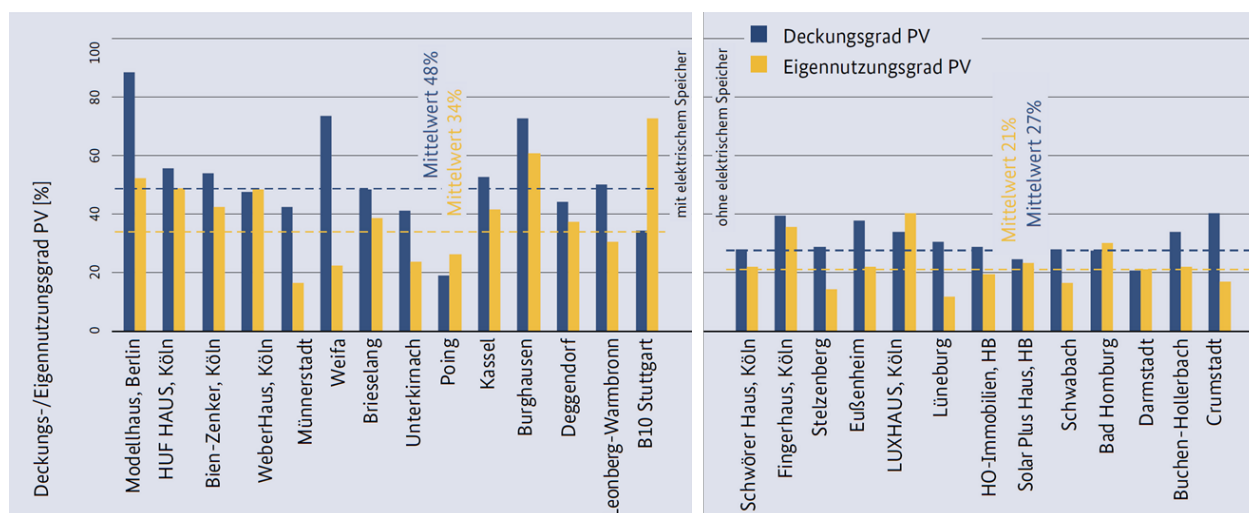


Abbildung 4: Eigennutzung und Deckung des Photovoltaikstroms für die erste Messperiode in den Ein- und Zweifamilienhäusern (Quelle (BMI, 2018))

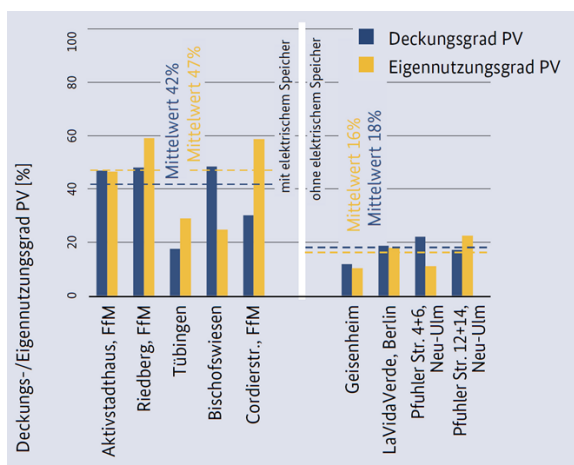


Abbildung 5: Eigennutzung und Deckung des Photovoltaikstroms für die erste Messperiode in den Mehrfamilienhäusern (Quelle (BMI, 2018))

Soll Wasserstoff aus Überschusserträgen aus Photovoltaik generiert werden, so ist eine Technologie einzusetzen, die mit z.T. stark volatilen Elektroenergieangeboten umgehen kann. In Abbildung 6 sind beispielhaft zwei Tagesgänge für die elektrische Leistung aus PV und dem Leistungsbedarf der Verbraucher im Haus dargestellt. Die tageszeitlichen Schwankungen beider Kurven sind gut zu erkennen.

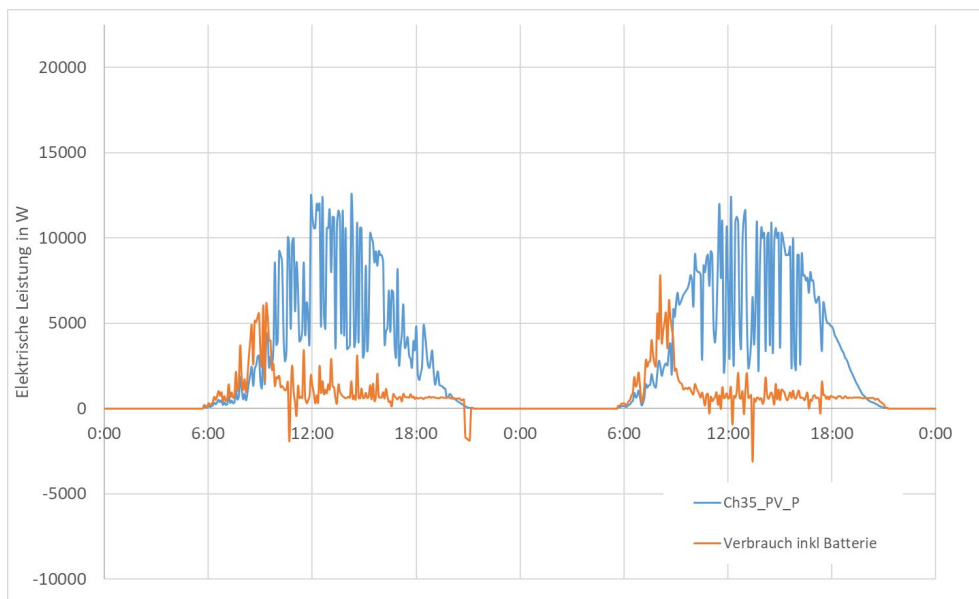


Abbildung 6: Zeitverlauf von Ertrag aus Photovoltaik und Elektroenergieverbrauch im Vergleich (Datengrundlage: Effizienzhaus Plus in Weifa)

### 2.2.3 Potenzialabschätzung für Wasserstoffnutzung

Es soll im Folgenden an einem Beispiel das Potenzial und die Wirkung der Wasserstoffnutzung im Effizienzhaus Plus-Gebäude illustriert werden. Als Beispiel wird ein Schulgebäude herangezogen. Damit im Zusammenhang stehend sind zwei Besonderheiten des gewählten Gebäudes zu beachten:

1. Die für die Installation von Photovoltaik verfügbare Dachfläche ist sehr auskömmlich. Die im Jahresverlauf bilanzierten Überschüsse an elektrischer Energie sind daher relativ groß, siehe Abbildung 7. Der Elektroenergieverbrauch beträgt hier nur etwa die Hälfte des PV-Jahresertrages, so dass Überschüsse vorteilhaft im Quartiersbezug zu bilanzieren wären.
2. Der Wärmebedarf im Sommer ist gering und damit auch die Möglichkeiten der Abwärmenutzung mit dem Ziel, den Einsatz der Wärmepumpen und sonstiger Wärmeerzeuger zu ersetzen. Die in der Schule betriebenen sonstigen Wärmeerzeuger müssen in den Betrachtungen hier auch nicht weiter berücksichtigt werden, da diese sowohl für das Ziel der Abschätzungen als auch für Effizienzhaus Plus-Gebäude im Allgemeinen ohne Relevanz sind.

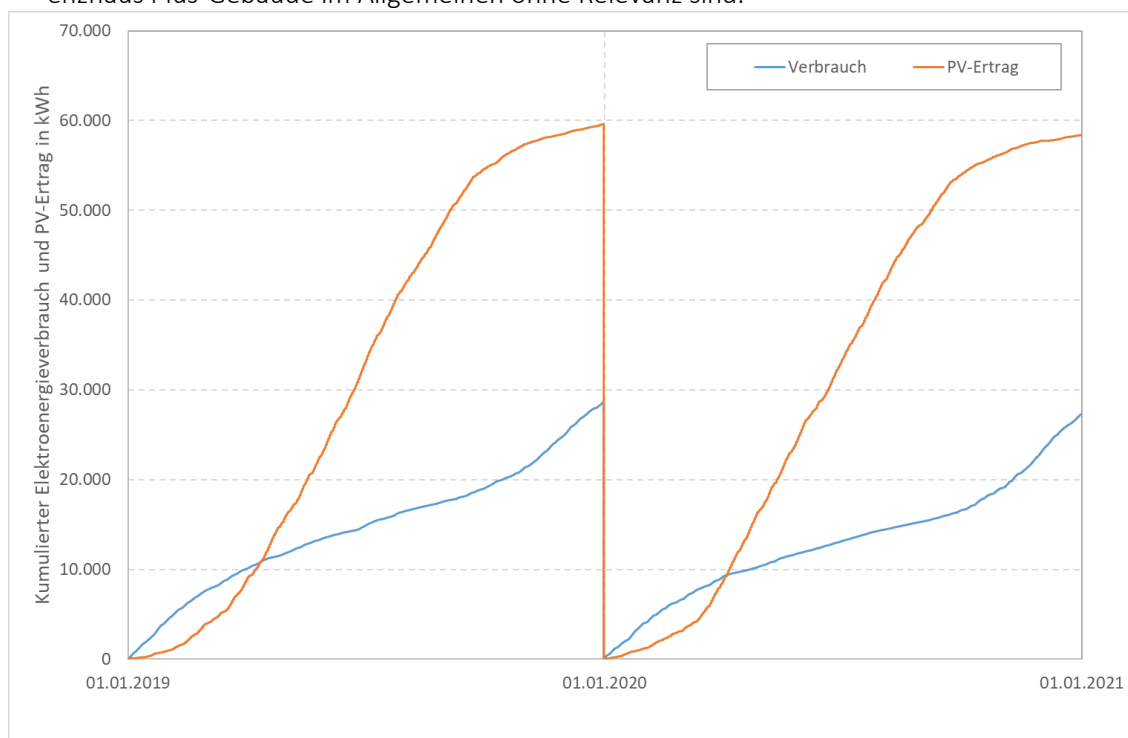


Abbildung 7: Zeitverlauf von kumuliertem Elektroenergieverbrauch und Ertrag aus Photovoltaik in 2019 und 2020 für das zur Potenzialabschätzung beispielhaft analysierte Schulgebäude

### Lokale Wasserstoffproduktion am Gebäude und Einspeisung in das Gasnetz

In einem ersten Schritt soll die Produktion von „grünem“ Wasserstoff aus den überschüssigen PV-Erträgen berechnet werden, sodass auf eine Einspeisung von Elektroenergie in das Stromnetz verzichtet werden kann. (Welche Auswirkungen dies auf die Bilanzierung des Effizienzhauses hat, soll zu einem späteren Punkt diskutiert werden, siehe hierzu These 3 als Handlungsempfehlung in Kapitel 6). Stattdessen wird der lokal produzierte Wasserstoff in die vorhandene Gas-Infrastruktur, die dann die Funktion der saisonalen Energiespeicherung übernimmt, eingespeist. Es kann sich hierbei um die Beimischung in das Erdgasnetz oder in ein separates reines Wasserstoffnetz (z. B. im Quartier) handeln. Die aus der Elektrolyse anfallende Niedertemperatur-Abwärme (< 70°C) kann wahlweise im Gebäude genutzt oder auch hier einem Wärmenetz zur Verfügung gestellt werden (Passfähigkeit der Temperaturen vorausgesetzt). Abbildung 8 zeigt das vereinfachte Anlagenschema. Vorteilhaft an dieser Lösung ist der Verzicht auf eine kostenintensive Errichtung eines dezentralen Wasserstoffspeichers sowie zusätzliche wasserstoffverbrauchende Endgeräte zur Rückverstromung und/oder Verbrennung des Wasserstoffs. Auch die Einbindung eines speziel-

len Wasserstoff-Verdichters nach der Elektrolyse ist entbehrlich, wenn der vom Elektrolyseur bereitgestellte Wasserstoff bereits ein für die Einspeisung in das Gasverteilnetz auskömmliches Druckniveau (je nach Betriebsdruck im Gasverteilnetz muss dieser nur wenige bar betragen) verfügt.

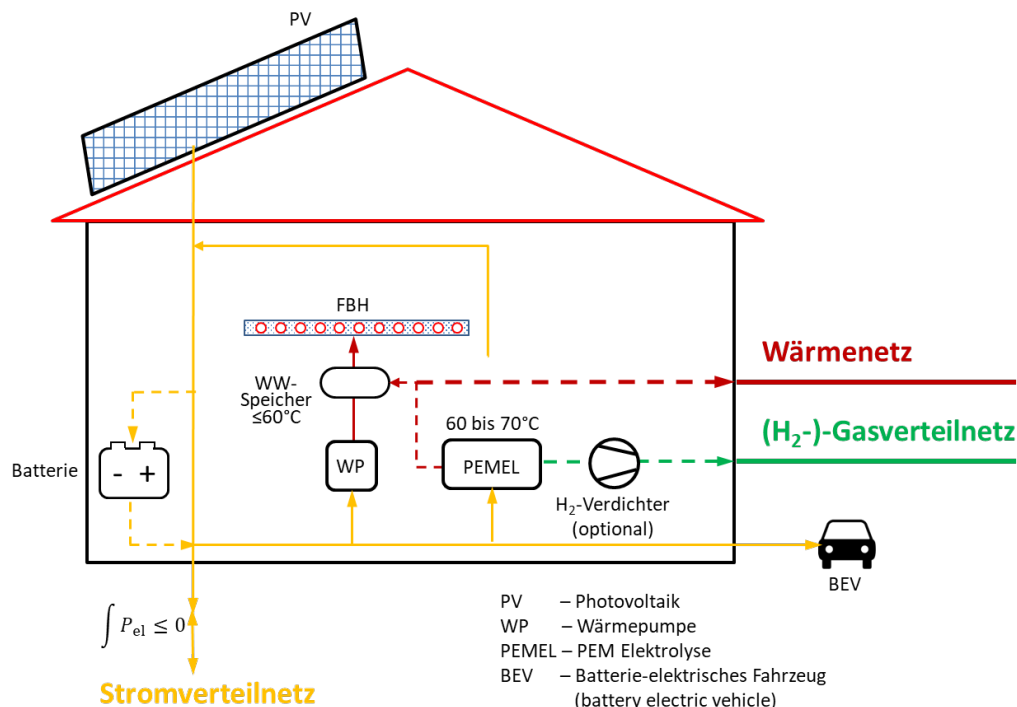


Abbildung 8: Vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude mit lokaler Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energie und H<sub>2</sub>-Einspeisung in das Gasnetz; Abwärmeeinspeisung optional; (keine konkrete Nachbildung des betrachteten Beispielgebäudes)

Folgende Annahmen gelten<sup>1</sup>:

Mittlerer elektrischer Energieaufwand für die PEM-Elektrolyse (zur gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme aus Wasserstoff und Luftsauerstoff):

$$e_{\text{PEM,el}} = 190 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{H}_2}} = 4,74 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3_{\text{H}_2}}$$

Bei einem Heizwert des Wasserstoffs von  $120 \text{ MJ/kg} = 33,3 \text{ kWh/kg}$  ( $H_u$ ) entspricht dies einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,63.

Anteil der nutzbaren Abwärme aus der Elektrolyse im Verhältnis zum Energieaufwand: 32%

Die beiden folgenden Diagramme zeigen exemplarisch für eine jeweils achttägige Sommer- und Winterperiode den zeitlichen Verlauf des elektrischen Überschusses (negative Werte bedeuten, dass Strombezug aus dem vorgelagerten Verteilnetz erforderlich ist, um die Gebäudebedarfe und die nutzungsbedingten Bedarfe zu decken) sowie die damit mögliche Wasserstoffproduktionsrate. Es ist zu erkennen, dass im gewählten Beispiel im jährlichen Mittel etwa 1 t Wasserstoff produziert und in das Gasnetz eingespeist werden kann.

<sup>1</sup> Für weiterführende Aussagen zur energetischen Effizienz der PEM-Elektrolyse siehe (Tjarks, 2017)

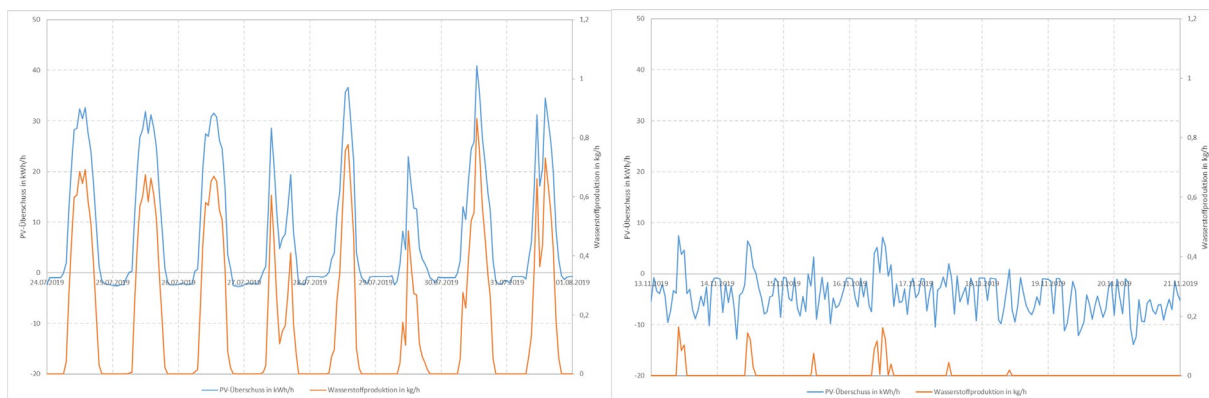


Abbildung 9: Beispielhafter Zeitlicher Verlauf von elektrischer Überschussproduktion und damit realisierter Wasserstoffproduktion im Sommer (links) und im Herbst/Winter (rechts); keine Mindestleistung der Elektrolyse berücksichtigt

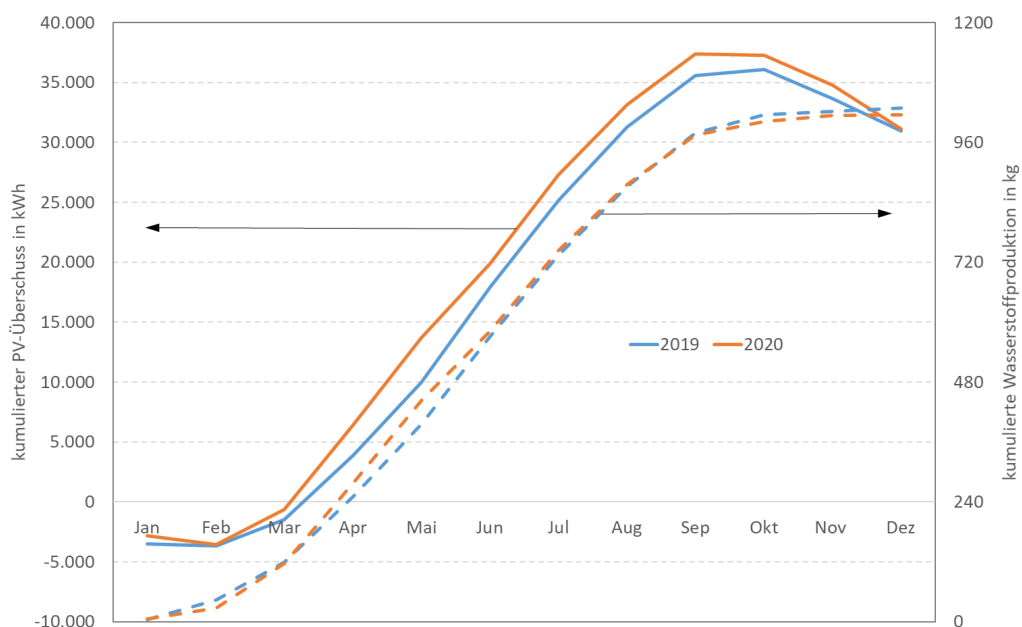


Abbildung 10: kumulierter PV-Überschuss (Ordinate links) und kumulierte Wasserstoffproduktion (Ordinate rechts) des Beispielgebäudes; negative PV-Überschüsse entsprechen einem Elektroenergiebezug aus dem Stromnetz

Ein Teil der für die elektrolytische Produktion von Wasserstoff aufgewendeten elektrischen Energie wird in thermische Energie umgewandelt und kann in Form von Abwärme einer weiteren Nutzung zugeführt werden. Im Beispiel wurde angenommen, dass der nutzbare Abwärmeanteil 32% der eingesetzten Elektroenergie beträgt. Diese Abwärme kann in die Wärmeversorgung des Effizienzhaus Plus – Gebäudes integriert werden und so den Betrieb der Wärmepumpen oder anderer ergänzender Wärmeerzeuger zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung substituieren. Insbesondere die Entlastung der Wärmepumpe durch Abwärmenutzung führt zu weiteren Überschüssen aus den Photovoltaik-Erträgen.

Der effektiven Abwärmenutzung entgegen steht allerdings das antizyklische Auftreten von Abwärmeangebot und Wärmebedarf. Deutlich wird dies an dem hier gewählten Beispielgebäude: zum einen sind nutzungsbedingt in der Schule nur geringe Wärmebedarfe im Sommer zu bilanzieren (wobei hier zum Zweck

der besseren Illustration nur der Wärmebedarf der im Gebäude installierten Wärmepumpen, nicht aber der Zusatzheizungen (die in die Betrachtungen einbezogen worden ist), andererseits resultieren aus den enormen Ertragsüberschüssen auch große Abwärmemengen. Dies führt dazu, dass eine nennenswerte Abwärmenutzung nur in den Wintermonaten möglich ist, wenn geringes Abwärmeaufkommen und hohe Wärmebedarfe zeitlich zusammenfallen. Für das Beispielgebäude sind nutzbare und nicht genutzte Abwärme aus der Darstellung in Abbildung 11 ersichtlich. Der jahresmittlere Anteil der für die Wärmeversorgung genutzten Abwärme  $Q_{ab}$  beträgt hier nur zwischen 10 % (2020) und 20 % (2019). Die nicht genutzte Abwärme muss dann über Rückkühleinrichtungen an die Umgebung abgeführt werden. Die optionale Nutzung im Quartier erfordert die Einspeisung in ein lokales Wärmenetz.

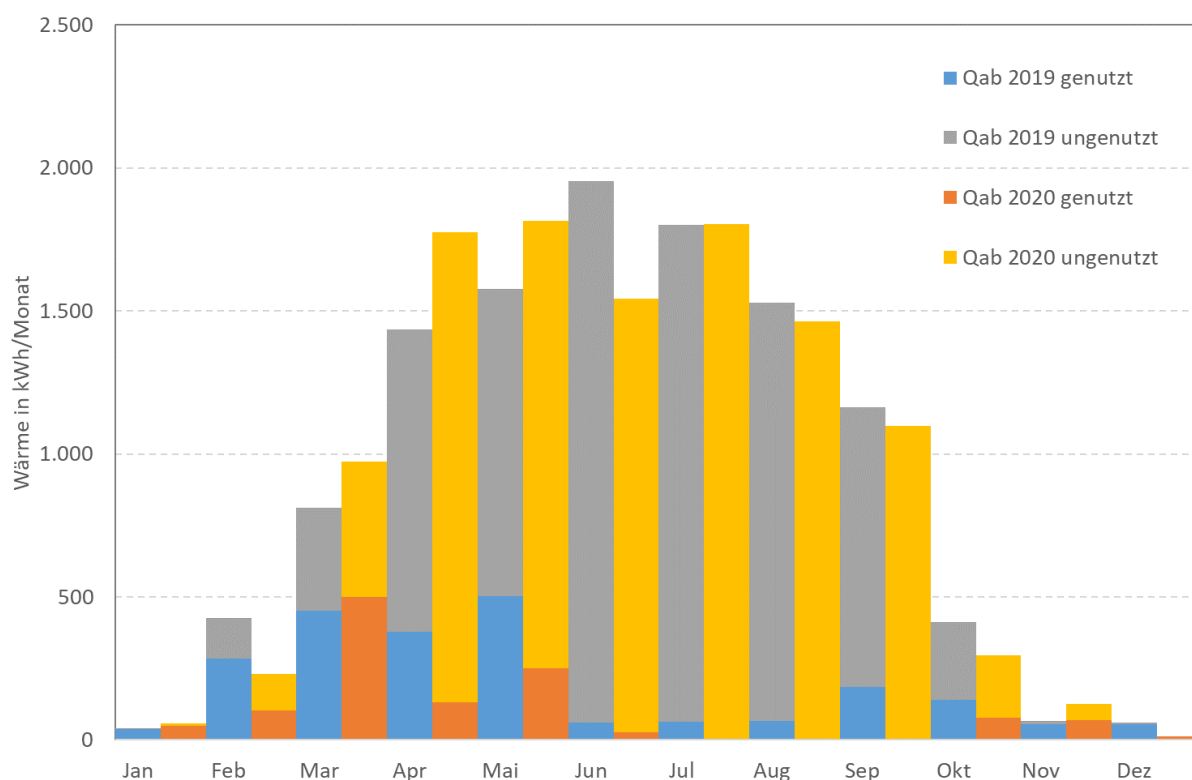


Abbildung 11: Bilanzierung der Abwärme aus der Elektrolyse im Beispielgebäude Grundschule Giebelstadt ( $Q_{ab}$  ist die Abwärme aus der Elektrolyse)

#### Lokale Wasserstoffproduktion am Gebäude ohne Einspeisung in das Gasnetz (Wasserstoffnutzung lokal)

Nicht alle Effizienzhaus Plus-Gebäude haben Zugang zum Gasverteilnetz. Für diese ist alternativ zur beschriebenen Einspeisung des vor Ort aus den Überschüssen produzierten Wasserstoffs in das Gasnetz die Nutzung des Wasserstoffs lokal möglich. Dies erfordert aber die Installation entsprechender Anlagenkomponenten wie einerseits eines lokalen Wasserstoffspeichers (typischerweise Niederdruck-Gasspeicher mit ca. 30-35 bar) sowie andererseits Anlagen zur Nutzung des Wasserstoffs. Der lokal produzierte Wasserstoff kann in Koppelprozessen rückverstromt oder zur Gewinnung thermischer Energie verbrannt werden. Für eine raumsparende Speicherung des Wasserstoffs in einem Druckspeicher ist entweder ein Druckelektrolyseur vorzusehen oder eine separate Verdichtung nach der Elektrolyse erforderlich. Das vereinfachte Schema eines solchen Konzeptes ist aus Abbildung 12 ersichtlich. Wichtige Komponenten aus Sicht

der Wasserstoffanwendung sind der PEM-Elektrolyseur (PEMEL), zur Produktion von Wasserstoff aus elektrischen Energieüberschüssen, der nachgeschaltete Gas-Verdichter zur Komprimierung des Wasserstoff-Gases und der Wasserstofftank, in dem der gasförmige Wasserstoff unter einem höheren Druck (3,5 MPa = 35 bar) gespeichert wird. Der Wasserstoff wird bei Bedarf genutzt, indem er entweder in einem Heizkessel verbrannt wird, um Wärme zu produzieren oder es erfolgt eine Rückverstromung in einer Brennstoffzelle (BZ). Sämtliche bei den verschiedenen Umwandlungsprozessen entstehende Wärme aus der Elektrolyse und der Brennstoffzelle werden dem Gebäude zugeführt und mindern so den Betrieb und den Elektroenergiebedarf der Wärmepumpe.

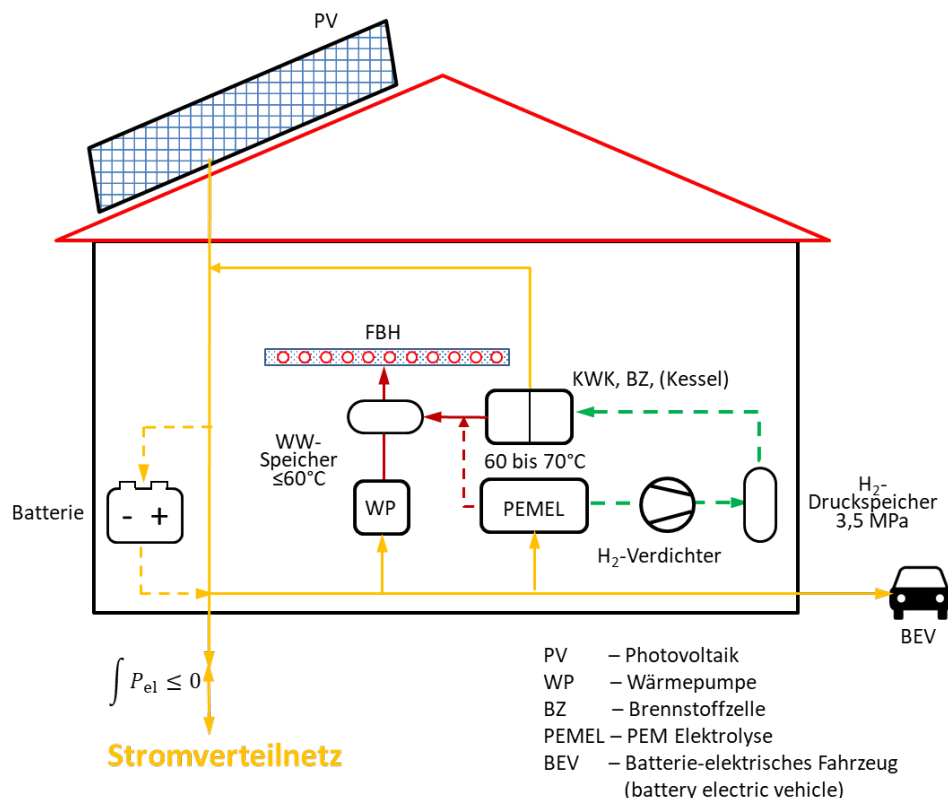


Abbildung 12: Vereinfachtes Energieversorgungskonzept für Effizienzhaus Plus-Gebäude mit lokaler Wasserstoffproduktion und H<sub>2</sub>-Nutzung lokal aber ohne Gasnetzeinspeisung

Ziel der Potenzialabschätzung ist es, den Wasserstoff-Speicherbedarf zu ermitteln sowie Aussagen zur systemischen Wirkung der Wasserstoffnutzung vor Ort abzuleiten. Die Nutzung des Wasserstoffs wird auf zweierlei Art betrachtet:

- Verbrennung des produzierten und gespeicherten Wasserstoffs in einem Gaskessel ausschließlich zum Zweck der Wärmeerzeugung
- Rückverstromung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle mit Nutzung der Abwärme

Folgende Annahmen gelten:

Mittlerer elektrischer Energieaufwand für die PEM-Elektrolyse inkl. Verdichtung:  $e_{\text{PEM,el}} = 200 \text{ MJ/kg}_{\text{H}_2}$   
 Bei einem Heizwert des Wasserstoffs von  $120 \text{ MJ/kg} = 33,3 \text{ kWh/kg}$  entspricht dies einem elektrischen Wirkungsgrad von 0,60.

Anteil der nutzbaren Abwärme aus der Elektrolyse im Verhältnis zum Energieaufwand: 25%

Nutzungsgrad des Kessels: 92 %

Nutzungsgrade der Brennstoffzelle (Strom/Wärme): 60%/30%

*Hinweis:* Die Abwärme aus der Wasserstoffproduktion kann zeitgleich genutzt werden, um den Betrieb der Wärmepumpe zu entlasten. Dies wiederum würde dazu führen, dass die Ertragsüberschüsse aus Photovoltaik größer werden. Solche Effekte wurden zwar abgeschätzt, aus Gründen der Einfachheit aber hier nicht berücksichtigt.

Für die beiden Jahre 2019 und 2020, für die Messdaten aus dem zur Abschätzung genutzten Schulgebäude zur Verfügung stehen, ergeben sich die in der folgenden Abbildung 13 dargestellten zeitlichen Verläufe von Wasserstoffproduktion und -verbrauch sowie von der im Wasserstoffspeicher vorgehaltenen Masse.

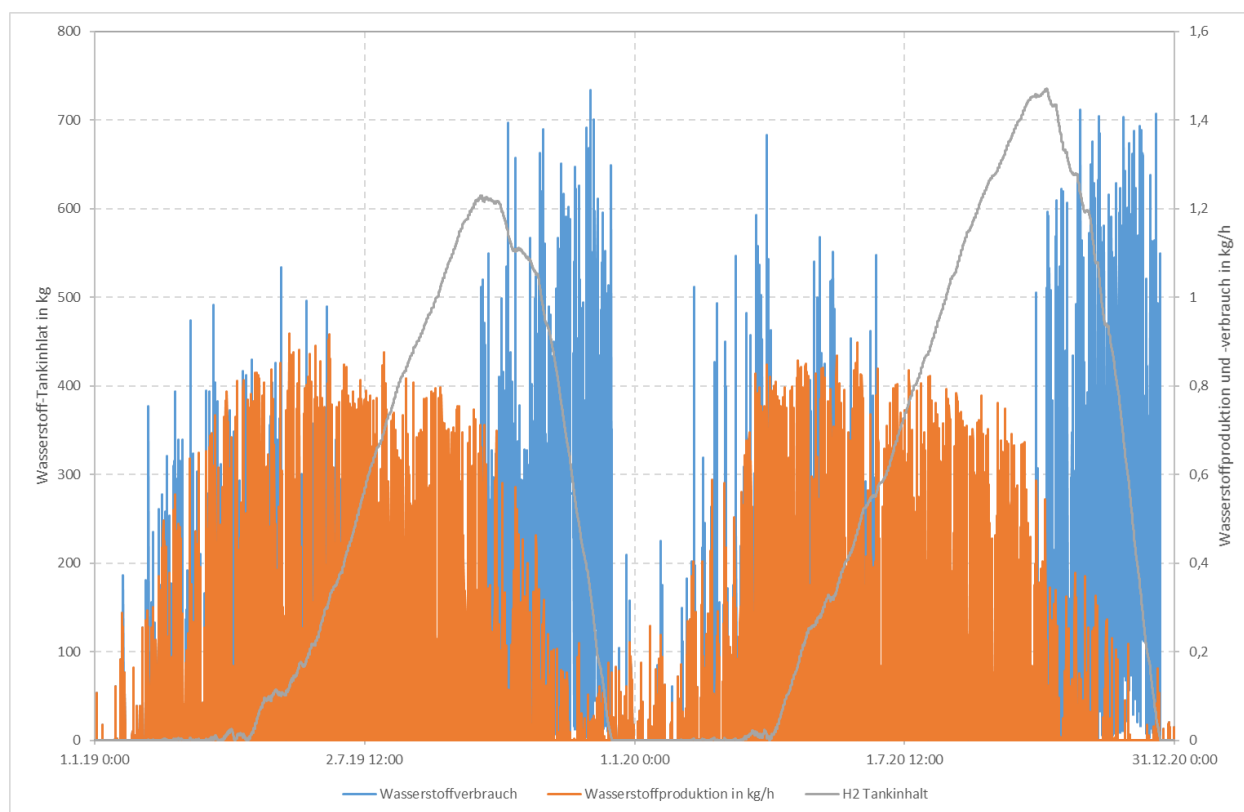


Abbildung 13: Wasserstoffbilanz (Produktion, Verbrauch und Speicherinhalt) über eine Zweijahresperiode für das Beispielgebäude; Anwendungsfall a) Einsatz eines Gaskessels

Zu erkennen sind die zeitlichen Verläufe von:

- Der aus dem Stromüberschüssen zu jedem Zeitpunkt produzierten Menge Wasserstoff (orange-farbene Linien); es wird im Sommer deutlich mehr Wasserstoff produziert als im Winter.

- Der von dem Kessel benötigte und verbrauchte Wasserstoff (blaue Linien); es wird vor allem aufgrund der steigenden Wärmebedarfe im Winter mehr Wasserstoff benötigt als im Sommer.
- Wird im Sommer mehr Wasserstoff produziert als benötigt, muss das Gas gespeichert werden. Die graue aufsteigende Linie zeigt den kumulierten Ladezustand des Wasserstofftanks an. Wird im Winter mehr Wasserstoff benötigt als produziert, wird Gas dem Wasserstoffspeicher entnommen; die graue Linie fällt. Zu Beginn des folgenden Jahres ist der Speicher vollständig entladen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich an der linken Y-Achse erkennen, dass der Wasserstoffspeicher hier nur 600 bis 700 kg der aus den Überschüssen insgesamt produzierten Wasserstoffmenge aufnehmen muss. Im Vergleich zu der zuvor ermittelten produzierten Menge von ca. 1t Wasserstoff (siehe rechte Achse von Abbildung 10) kann der Speicher auf etwa 60 bis 70% der Produktionskapazität ausgelegt werden, da sich Produktion und Verbrauch nicht nur saisonal, sondern auch in der Tagesfolge abwechseln. Tatsächlich erhöht sich aber die produzierte Menge in Abhängigkeit von der konkreten Betriebsführung noch, wie zuvor bereits erwähnt wurde. Der saisonal wirkende Wasserstoffspeicher füllt sich über die Sommerperiode, da in dieser Zeit enorme Überschüsse aus den PV-Erträgen und nur geringe Wärmebedarfe bestehen. Eine vollständige saisonale Speicherung ist aber nicht möglich, da, wie zu sehen ist, der Wasserstoffspeicher bereits zum Jahresende wieder vollständig entladen ist. Immerhin lässt sich aber in der zweiten Jahreshälfte der Einsatz von Wärmepumpen zur Wärmebedarfsdeckung nahezu vollständig durch die Verbrennung des gespeicherten Wasserstoffs ersetzen (es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die daraus resultierende Entlastung der elektrischen Energiebilanz des Gebäudes hier nicht weiter berücksichtigt worden ist, insbesondere auch im Hinblick auf die damit freiwerdenden zusätzlichen Wasserstoffproduktionskapazitäten).

Wird anstelle des Wasserstoff-Heizkessels eine Brennstoffzelle genutzt, um den gespeicherten Wasserstoff zu verstromen (und die entstehende Abwärme in die Wärmeversorgung des Gebäudes einzubinden) ergeben sich andere Betriebszustände, wie aus der folgenden Abbildung 14 ersichtlich ist. Es sind im Diagramm im Übrigen die gleichen Größen wie in Abbildung 13 dargestellt, daher erübrigt sich eine weiterführende Erläuterung; der einzige Unterschied resultiert aus der Verwendung einer Brennstoffzelle anstelle eines Gas-Kessels. Den Darstellungen zugrunde liegt die vereinfachende Annahme, dass die Brennstoffzelle ausschließlich stromgeführt betrieben wird. Dies bedeutet, dass die Brennstoffzelle den verfügbaren Wasserstoff immer dann für die Stromerzeugung nutzt, wenn Elektroenergiebedarf im Gebäude besteht, also die PV-Anlagen vor Ort keine Bedarfsdeckung erreichen. Dies ist auch im Sommer der Fall. In der Folge besteht im Vergleich zur vorher betrachteten Variante mit der Wasserstoffverbrennung im Kessel (ausschließlich wärmegeführter Betrieb) ein über das Jahr kontinuierlicher Wasserstoffbedarf. Damit verringert sich einerseits der Speicherbedarf, andererseits erfolgt die Entladung des Wasserstoffspeichers langsamer; der Speicherinhalt ist erst im Frühjahr des Folgejahres aufgebraucht.

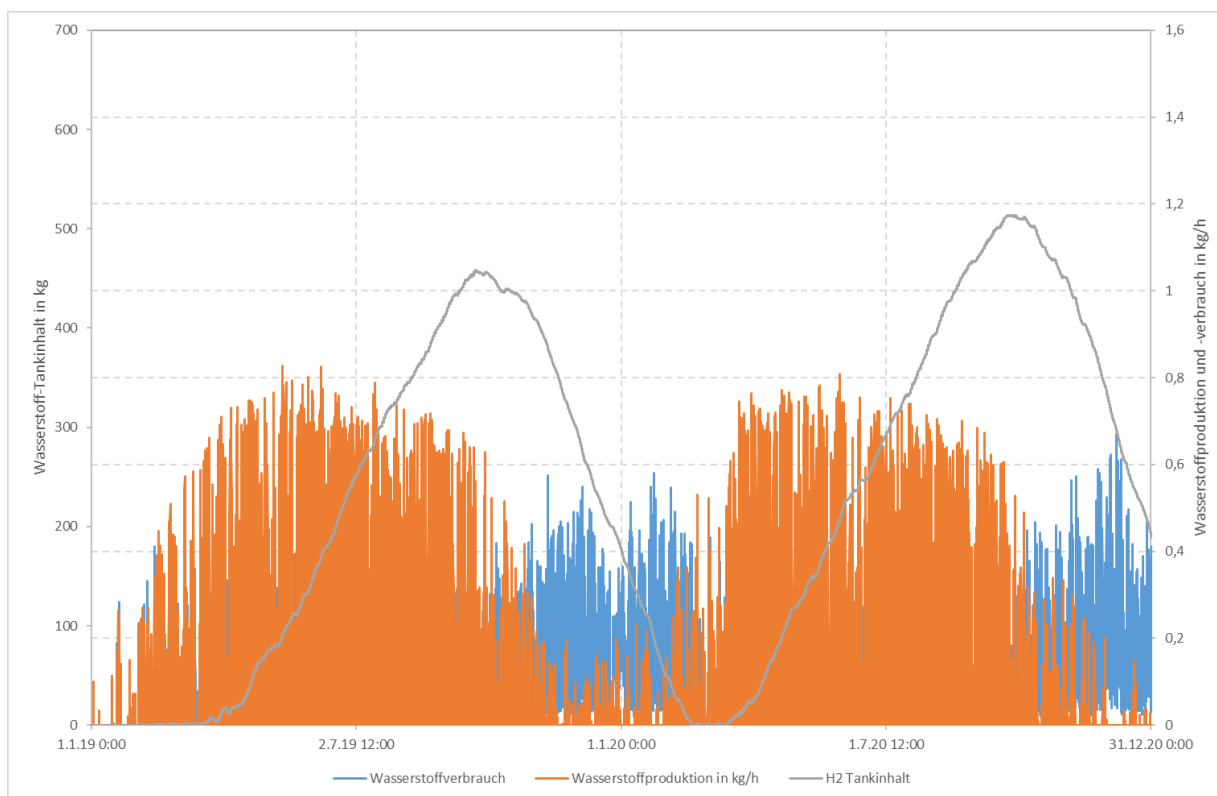


Abbildung 14: Wasserstoffbilanz (Produktion, Verbrauch und Speicherinhalt) über eine Zweijahresperiode für das Beispielgebäude; Anwendungsfall b) Einsatz einer Brennstoffzelle

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich auf die Möglichkeit hingewiesen, den Wasserstoff gezielter und womöglich netzdienlich einzusetzen und nicht wie hier als primäre Quelle für die Wärmeerzeugung oder in einem ausschließlich stromgeführten Betrieb. Diese strategische Betriebsweise würde die hier dargestellten Effekte womöglich auf das gesamte Jahr, zumindest aber auf einen längeren Zeitraum strecken, hätte aber im Umkehrschluss auch wieder Auswirkungen auf die effektiv notwendige Speichergröße. Die Wahl einer geeigneten Betriebsführung ist eine technische und wirtschaftliche Optimierungsaufgabe, die für jeden Anwendungsfall unter Beachtung nutzungsspezifischer Besonderheiten und Interessenslagen der Akteure zu lösen ist. Um die enormen Auswirkungen unterschiedlicher Betriebsweisen auf die Gesamtbilanz des Gebäudes zu veranschaulichen, lohnt ein Blick auf die Diagramme in Abbildung 15. Dargestellt sind die monatlichen Elektroenergiebedarfe der im Gebäude installierten Wärmepumpen jeweils für das Jahr 2019 (links) und 2020 (rechts). Verglichen werden der Ausgangszustand (also Effizienzhaus Plus ohne jegliche Wasserstoffnutzung) mit Wasserstoffproduktion, -speicherung und -nutzung wahlweise wärmegeführt in einem Heizkessel oder stromgeführt mittels Brennstoffzelle. Der Fall der Wasserstoffproduktion und dessen Einspeisung in ein Gasnetz entspricht im Wesentlichen dem Ausgangszustand, da eine sinnvolle Abwärmenutzung aufgrund der saisonalen Verschiebung von Wasserstoffproduktion und Wärmebedarf nicht möglich ist. Zu erkennen ist, dass die Wärmeerzeugung aus lokal gespeichertem Wasserstoff den Elektroenergiebedarf der Wärmepumpen deutlich reduzieren kann, wohingegen die Rückverstromung über die Brennstoffzelle bei stromgeführter Betriebsweise den für die Wärmeversorgung notwendigen Energiebedarf der Wärmepumpen nur minimal zu reduzieren hilft. Die sichtbaren Unterschiede resultieren allein aus der Abwärme der Brennstoffzelle, die jedoch nur zu etwa 2/3 effektiv genutzt werden kann. Etwa ein Drittel der Abwärme muss hier wegen des stromgeführten Betriebs der Brennstoffzelle anderweitig abgeführt werden und wird daher in der Bilanz nicht weiter berücksichtigt. Der Einsatz

eines entsprechend dimensionierten Wärmespeichers ist demnach angeraten. Auf ein optimiertes Wärmespeichermanagement wurde hier zunächst verzichtet, um die nachteilige Wirkung der verminderten Abwärmenutzung sichtbar zu halten.

Aussagen auf den Autarkiegrad des Gebäudes lassen sich aus diesen Darstellungen im Übrigen nicht ohne Weiteres ableiten.

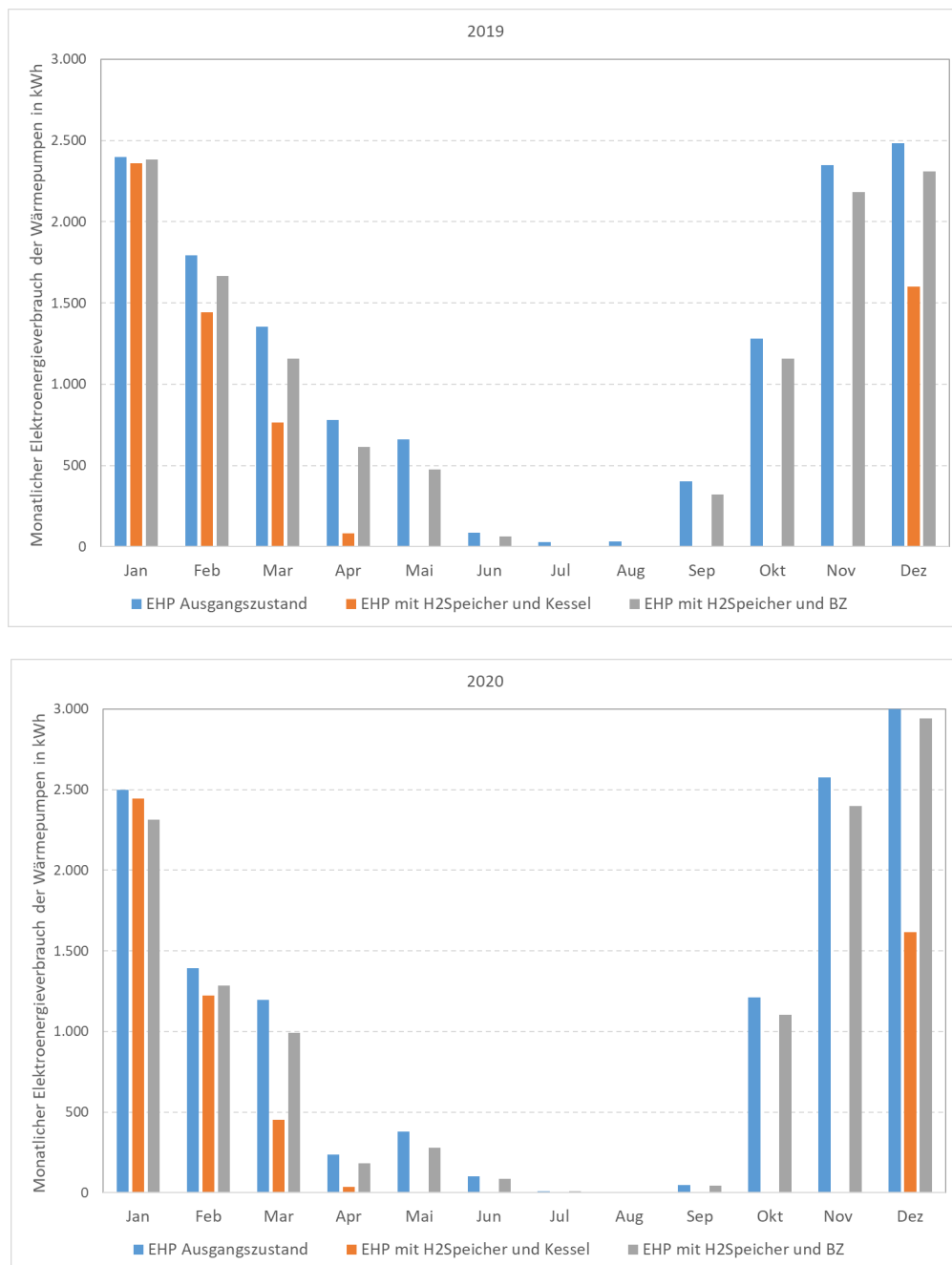


Abbildung 15: Elektroenergieverbrauch der Wärmepumpen im beispielhaft betrachteten Effizienzhaus Plus-Ausgangszustand (blaue Säulen) und mit Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -verbrennung im Gaskessel vor Ort (orangefarbene Säulen) bzw. mit Wasserstoffnutzung in einer stromgeführten Brennstoffzelle (graue Säulen) für 2019 und 2020

Entscheidend bleibt die Frage, ob es mit Einsatz der Wasserstofftechnologie gelingt, den Autarkiegrad des Gebäudes sowie Deckungsgrad und Eigenverbrauchsanteile der PV-Anlage zu verbessern. Einfach lässt sich die Frage nach dem Eigenverbrauchsanteil beantworten. Da sämtliche Überschüsse an elektrischer Energie als Differenz aus PV-Ertrag und Eigenverbrauch nicht mehr eingespeist, sondern in die lokale Wasserstoffproduktion investiert werden, beträgt der Eigenverbrauch des Gebäudes 100% des PV-Ertrags. Allerdings führt der Eigenverbrauch der Überschüsse (siehe hierzu Abbildung 7) nicht zu einer entsprechenden Minderung des Elektroenergiebezugs aus dem öffentlichen Netz. Autarkiegrad und Deckungsgrad steigen daher weniger, als der hohe Eigenverbrauch vermuten lässt. Ursache sind die enormen Umwandlungsverluste im Wasserstoffpfad. Die energetischen Umwandlungsverluste (d.h. ohne Beachtung der Energieform) betragen sowohl in der Variante „H<sub>2</sub>-Speicher und Kessel“ als auch im Fall „H<sub>2</sub>-Speicher und stromgeführte Brennstoffzelle“ etwa 45%. Vorteil im Fall der Brennstoffzelle ist die Möglichkeit der Rückverstromung des gespeicherten Wasserstoffs, so dass sich die elektrische Nettobilanz des Gebäudes je nach Lastverlauf geringfügig vorteilhafter als die Verbrennung des Wasserstoffs zur ausschließlichen Wärmeerzeugung darstellt. Für das hier betrachtete Beispielgebäude ergeben sich somit die in Abbildung 16 visualisierten Netto-Elektroenergiebezüge.

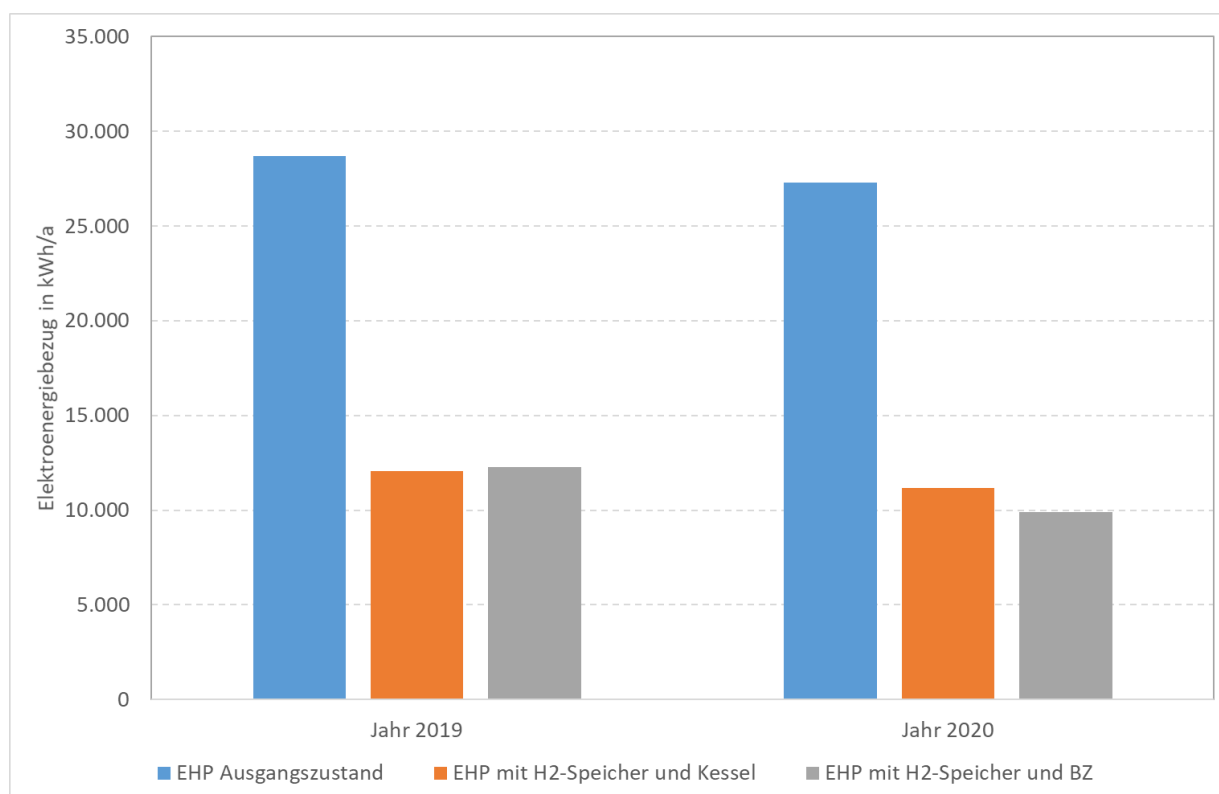


Abbildung 16: Elektroenergiebezug im beispielhaft betrachteten Effizienzhaus Plus-Ausgangszustand (blaue Säulen) und mit Wasserstoffherzeugung, -speicherung und -verbrennung im Gaskessel vor Ort (orangefarbene Säulen) bzw. Nutzung in einer stromgeführten Brennstoffzelle (graue Säulen) für 2019 und 2020

Es bleibt zu konstatieren, dass durch Anwendung der Wasserstofftechnologien die im Ausgangszustand eingespeisten PV-Überschüsse zu etwa der Hälfte der elektrischen Bilanz entzogen und am Ende der thermischen Bilanzierung bzw. nicht nutzbaren Verlusten zuzuordnen sind. Für das Gebäude selbst ergibt sich zwar eine Halbierung des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs, die fehlenden Einspeisungen der Überschüsse müssen jedoch an anderer Stelle durch zusätzliche, i. d. R. (d.h. kurzfristig) durch fossile Stromerzeugungskapazitäten ausgeglichen werden. Die mit Hilfe der Wasserstofftechnologie erreichte

lokale Optimierung der Energiebilanz am Gebäude führt also zu notwendigen Kompensationsmaßnahmen im Energiesystem. Diese liegen aber außerhalb des Bilanzraums von Effizienzhaus Plus-Gebäuden und sind damit nicht unmittelbar ersichtlich. So wird noch einmal deutlich, dass neben der Effizienzhaus Plus-Bilanzierung eine gesamtsystemische Betrachtung erforderlich ist, um über volkswirtschaftlichen Sinn oder Unsinn einer kleinskaligen und dezentralen Anwendung von Wasserstofftechnologien im Effizienzhaus Plus zu entscheiden.

Abschließend sei noch darauf verwiesen, dass in dem hier gewählten Beispiel einige Vereinfachungen, insbesondere die Wärmespeicherung betreffend, vorgenommen wurden, die Nutzungsgrade der Elektrolyse eher optimistisch abgeschätzt worden sind und das Gebäude selbst mit einer verhältnismäßig großen PV-Anlage und damit sehr großen Überschüssen aus PV-Erträgen ausgestattet ist.

## 3 Aktueller Stand: Verwendung von Wasserstoff im Gebäudebereich

### 3.1 Zielsetzung

Anliegen der vorliegenden Studie ist es, die Anwendung von Wasserstofftechnologien in Effizienzhaus Plus-Gebäuden zu untersuchen. Es ist daher keine Analyse für das gesamte Feld der Anwendung von Wasserstoff im Sektor der Gebäudeversorgung zu Wohn- und gewerblichen Zwecken zu erwarten. Im Folgenden werden aktuelle Diskussionen um das Thema mit Blick auf das Effizienzhaus Plus reflektiert. Ausgangspunkt der Darstellungen ist die Zielsetzung der nationalen deutschen Wasserstoffstrategie (BMW, 2020), die auch den Gebäudewärmesektor als mögliche Verwendung für erneuerbar erzeugten bzw. als „grün“ bezeichneten Wasserstoff benennt. Wörtlich heißt es dort: *„Auch langfristig wird nach Ausschöpfen der Effizienz- und Elektrifizierungspotenziale bei der Prozesswärmeerstellung oder im Gebäudebereich ein Bedarf an gasförmigen Energieträgern bestehen bleiben. CO<sub>2</sub>-freier Wasserstoff und seine Folgeprodukte können auf der Zeitachse auf verschiedene Weise einen Beitrag zur Dekarbonisierung des Wärmemarkts leisten.“* Nicht unbedingt ausgelöst aber doch intensiviert durch diese Formulierung hat sich eine intensive Grundsatzdebatte um die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Wasserstoff im Gebäudewärmesektor entwickelt. Dabei spielt der Systemgedanke einer Vernetzung von Energieverbrauchssektoren (Umwandlung, Industrie, Mobilität, Hausenergie, weitere) als auch der leitungsgebundenen Energieinfrastrukturen (Strom Gas und Wärme) über Power-to-X (PtX)-Konzepte eine zentrale Rolle. Die Eckpfeiler dieser nicht ausschließlich deutschen Diskussion werden in Kap. 3.2.4 näher beleuchtet.

Weiteres Ziel dieses Kapitels ist es, aufzuzeigen, in welchen Nutzungszusammenhängen der Einsatz von Wasserstoff bisher diskutiert wird, um darauf aufbauend die Unterschiede aufzuzeigen bzw. auch mögliche Begründungen für einen Wasserstoffeinsatz im Effizienzhaus Plus aufzuzeigen. Es erschien uns sinnvoll, dieses anhand einzelner Länderstrategien zu tun, um anschaulich die Unterschiede zur deutschen Motivation in Kap. 3.2.1 bis 3.2.4 aufzuzeigen. Diese Betrachtung wird in Kap. 3.2.6 durch eine Vorstellung bereits umgesetzter oder in Planung befindlicher Projekte ergänzt, und, wo bereits möglich, erste Anwendererfahrungen referiert.

In Kap. 3.3 werden unterschiedliche aktuelle Gutachten, in denen Stellung zum Wasserstoffeinsatz in der Gebäudewärmeversorgung in Deutschland bezogen wird, mit ihren Hauptargumenten vorgestellt. Darauf folgt eine Präsentation verschiedener Akteure im Wasserstoffbereich, um die Interessenslage der Protagonisten für einen breiteren Wasserstoffeinsatz kennenzulernen. Abschließend werden in Kap. 3.6 zunächst die Schlüsselkomponenten dezentraler wasserstoffbasierter Wärme- bzw. Stromerzeugungssysteme vorgestellt, mögliche Betriebsweisen benannt und auf Aussagen zur Wirtschaftlichkeit eines Wasserstoffeinsatzes in der Gebäudewärmeversorgung kurz- bis langfristig eingegangen.

### 3.2 Grundsätzliche Strategien und Nutzungsmodelle - Übersicht über den Einsatz von Wasserstoff für die Gebäudebeheizung

Die Anforderungen und energiewirtschaftlichen aber auch nutzerspezifischen Randbedingungen an die künftige CO<sub>2</sub>-freie Raumtemperierung (Wärme- und Kälteversorgung) in Deutschland sind durch mehrere miteinander in Beziehung stehende Dimensionen geprägt, die in Abbildung 17 dargestellt sind.



Abbildung 17: Dimensionen einer künftig CO<sub>2</sub>-freien und nutzerfreundlichen Gebäudeenergieversorgung in Deutschland

Um die im Rahmen dieser Studie untersuchten Einsatzfälle von Wasserstoff für die Wärmeversorgung von „Effizienzhaus Plus-Gebäuden“ zu untersuchen, sind verschiedene Varianten einer gasnetzgebundenen bzw. gasnetzautarken Wasserstoffversorgung in Abbildung 18 einander gegenübergestellt. Dabei wurde für diese Studie vorausgesetzt, dass jeglicher in diesem Zusammenhang einzusetzende Wasserstoff wegen der spätestens ab 2040 geforderten strikten Klimaneutralität grün sein sollte, d.h. aus erneuerbaren Energie hergestellt wurde<sup>2</sup>. Diese Abbildung ist daher nicht als Gesamtschaubild aller Heizungsalternativen zu verstehen sondern als Übersicht über mögliche Verwendungsoptionen von Wasserstoff zur Wärmebereitstellung, mit oder ohne Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) oder Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK). Für jeweils einzelne Einfamilienhäuser (EFH = links) und eine Gruppe von Mehrfamilienhäuser (MFH = rechts), die den Quartieren gleichgesetzt werden, sind drei Versorgungsfälle dargestellt, von denen der jeweils rechte (= hellblau unterlegt) den in dieser Studie für das Effizienzhaus Plus näher betrachtet darstellt. Eine (mögliche) Schnittstelle mit einem mit 100% Wasserstoff betriebenen Gasverteilnetz ist durch die grün dargestellte Leitung (am oberen Rand der Grafik) vorgesehen, der Stromnetzanschluss ist entsprechend unten in der Grafik in Gelb dargestellt. Beim Effizienzhaus Plus wird immer davon ausgegangen, dass eine Anbindung an das Stromnetz besteht, während die Anbindung an das Gasnetz optional

<sup>2</sup> Da molekularer Wasserstoff hochreaktiv ist, kommt er in der freien Natur nahezu ausschließlich in Molekülen gebunden vor und zwar hauptsächlich in Form von Wasser, dessen globales Vorkommen ca. 1,386 Milliarden Kubikmeter beträgt. Massenspezifisch macht er lediglich 0,12% der Erdmasse aus, dennoch ist er das häufigste auf der Erde vorkommende Element (<http://www.wbzu.de/seminare/infopool/infopool-wasserstoff>).

ist. Für die Wärmeversorgung von Mehrfamilienhäusern (MFH) ist darüber hinaus mit Ausnahme der linken Option jeweils ein Anschluss an ein lokales Wärmenetz vorgesehen (in Rot).

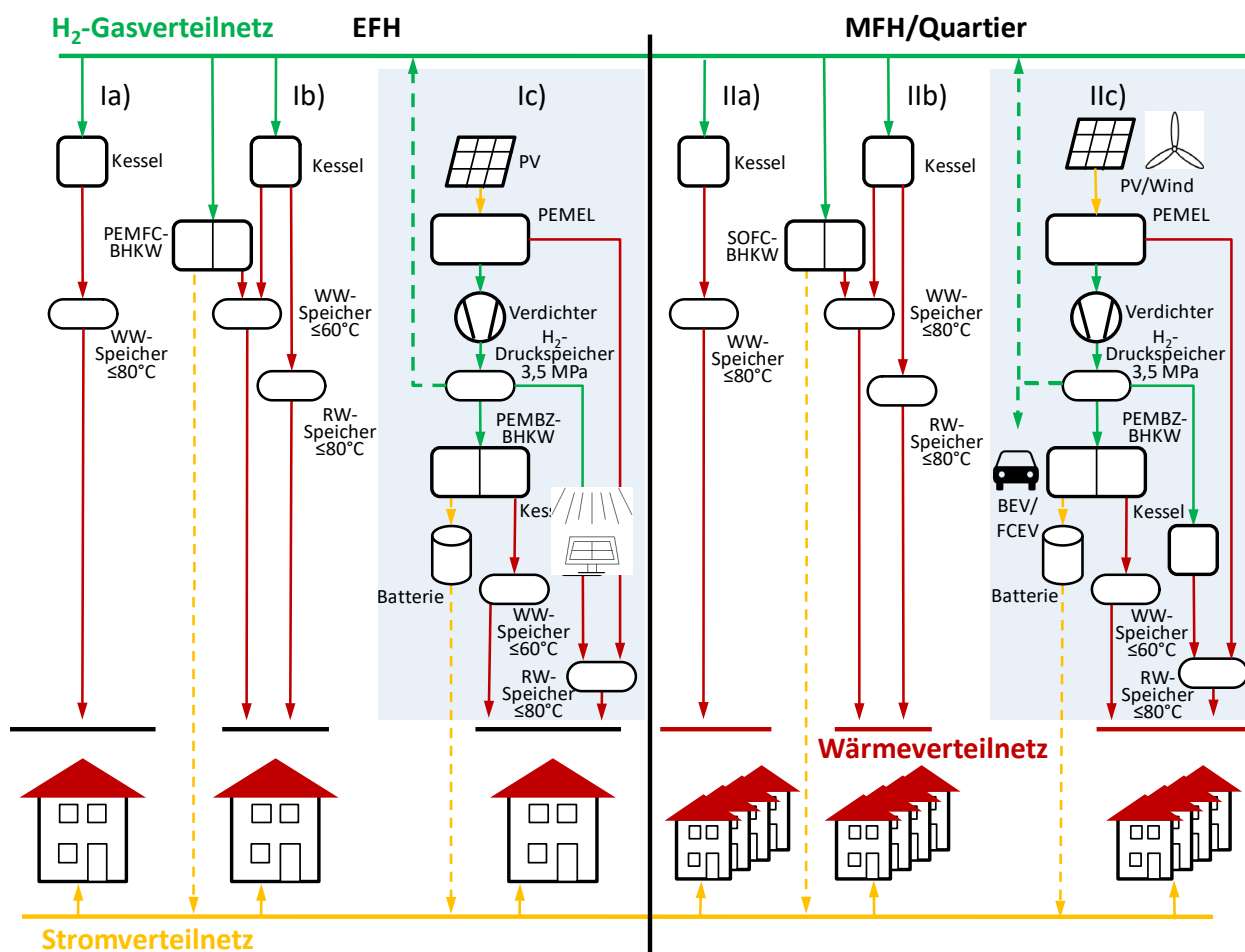


Abbildung 18: Konzeptvergleich gasnetzgebundener bzw. gasnetzunabhängiger Wasserstoff-Versorgungsfälle von EFH und MFH (die hellblau schattierten Optionen heben Lösungen für Effizienzhaus Plus-Gebäude hervor; weitere Darstellungen zu konkreten Effizienzhaus Plus-Optionen finden sich in Kapitel 2.2)

Ähnlich wie bei der Stromnetzkopplung muss auch die Anbindung an das Gasnetz eindeutig geregelt sein. So muss bei Anbindung dezentraler Wasserstoffproduktionsanlagen im Effizienzhaus Plus an das Gasnetz die Qualität des dezentral produzierten Wasserstoffs zur Gasnetzeinspeisung den Vorgaben des Gasnetzbetreibers genügen, was z.B. mit kleinen Reinigungsanlagen erzielt werden kann. Diese Option erklärt sich insbesondere aus der Tatsache der Vermeidung der teuren Wasserstoff-Speicherung vor Ort; ein mit 100% Wasserstoff betriebener Gasnetzteil kann aus Sicht des Effizienzhaus Plus auch als unendlich großer „virtueller Gasspeicher“, d.h. mit anderen Worten als „Wasserstoff-Cloud“ mit dezentraler Wasserstoff-Einspeisung und -Entnahme verstanden werden.

Entsprechend der in Abbildung 18 dargestellten Varianten (Variante I: EFH, Variante II: MFH; Variante a): Gasheizkessel, Variante b) BHKW, Variante c) dezentrale H<sub>2</sub>-Produktion) werden zunächst vier Länderstrategien vorgestellt, die deren unterschiedliche Motivationen aufzeigen und damit die Bandbreite der Optionen eine potenziellen Wasserstoffeinsatzes im Gebäudewärmesektor aufspannen. In dieser Diskussion sind die H<sub>2</sub>-Zumischkonzepte nicht berücksichtigt.

### 3.2.1 England

In der als „Modell England“ bezeichneten Option erfolgt die vollständige Gebäudewärmeversorgung mit Hilfe von wasserstoffbefeuerten Kesseln aus dem Gasnetz, entspricht dabei also im Wesentlichen dem Fall Ia) in Abbildung 18. Ein Warmwasserspeicher dient dabei effizienzsteigernd zur Verstetigung des Heizungsbetriebs. Dieser Ansatz, der zunächst vom Gasversorger der Stadt Leeds vorgeschlagen wurde, begründet sich durch die in England stark ausgeprägte traditionelle Verwendung von Erdgas zur Gebäudewärmeversorgung, wobei die bestehende Anlagentechnik mit nur geringfügigen Modifikationen und verhältnismäßig geringen Kosten auf einen Wasserstoffbetrieb umgestellt werden soll.

Da die englische Gasindustrie kurz- und mittelfristig auf einer gasbasierten Wärmeversorgung besteht, die auf Basis von blauem Wasserstoff (Wasserstoff aus Erdgasdampfrefomern und damit Entsorgung des entstehenden CO<sub>2</sub> in alten Öl- und Gasfeldern unter der Nordsee) bewerkstelligt werden soll, stellt sich die Frage des Effizienzverlustes gegenüber dem Einsatz elektrisch betriebener Wärmepumpen nicht. Vielmehr steht die Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Entfernung des Kohlenstoffs aus dem bereitgestellten Erdgas und Endlagerung via CCS im politischen Vordergrund. Die Entwicklung dieses Ansatzes ist weit fortgeschritten und basiert auf umfangreichen technisch-wirtschaftlichen Untersuchungen (Dan Sadler et. al., 2016), sodass sich außer Leeds inzwischen auch weitere Städte und Regionen entschlossen haben, dem Beispiel von Leeds zu folgen<sup>3</sup>.

### 3.2.2 Dänemark

Die dänische Energiepolitik hat sich frühzeitig auf einen Entwicklungspfad hin zur vollständig regenerativen Versorgung aller Verbrauchssektoren, also auch dem Gebäudesektor verständigt. Wesentliche Bestandteile davon sind neben der Verwendung erneuerbaren Stroms aus Sonne (PV) und Wind auch die Nutzung von Biomasse aus unterschiedlichen Quellen (Energistyrelsen, 2014). Dazu gehört auch der Einsatz von Biogas bzw. Biomethan für die Gebäudewärmeversorgung, für die langfristig der Einsatz von Erdgas substituiert werden soll. Damit geht auch eine strukturelle Veränderung des Gasnetzes einher, die (a) bei der Wärmeversorgung von EFH den „letzten Meter“ Gasverteilnetz durch eine entsprechende Nahwärmeversorgung ablösen soll und (b) die zusätzlich erzeugte Biomethanmengen aufnehmen und verteilen soll<sup>4</sup>. Dieses Modell entspricht daher insbesondere den Fällen IIa) und IIb). In 2014 war jedoch Wasserstoff noch kein Bestandteil der Strategien; dessen Nutzung wird erst in der aktualisierten dänischen Wasserstoff- und PtX-Strategie konkreter vorgeschlagen. Neben den grenzüberschreitenden Transportoptionen wird in der neuen Strategie auch die Verteilung von reinem oder zugemischtem bzw. zu CH<sub>4</sub> synthetisiertem Wasserstoff vorgeschlagen (Brint, 2020).

### 3.2.3 Niederlande<sup>5</sup>

Die Wärmeversorgung privater Haushalte und Gewerbe wurde bis vor Kurzem ähnlich wie in England ebenfalls stark durch die Gasversorgung insbesondere aus eigenen niederländischen Gasquellen dominiert. Erdgas spielte daher in den Niederlanden generell eine besondere Rolle; in 2018 wurden 90% der

<sup>3</sup> Siehe auch <https://h21.green/projects/> (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>4</sup> Dieses als „reversed flow“ (als „Umkehr der Strömungsrichtung“ zu übersetzen) bezeichnete Konzept soll Biomethanmengen, sicher im Gasnetz aufnehmen, also auch außerhalb der Heizsaison, d.h. der Phase niedriger Gasnachfrage. Die besondere Anforderung in diesen Zeiten besteht in der begrenzten Speicherfähigkeit des Gasnetzes aufgrund geringer Druckdifferenz, sodass sich auch der heute übliche Gasfluss vom Transportnetz in das Gasverteilnetz umkehren kann (→ „reversed flow“), was zeitweise eine technik- und kostenintensive Verdichtung vom niedrigeren Druck des Gasverteilnetzes auf den höheren Druck des Gastransportnetzes erfordert.

<sup>5</sup> Wesentliche Teile der in diesem Kapitel zusammengestellten Informationen basieren auf einem Gespräch vom 11.10.2021 mit Frank van Alphen vom Gasverteilnetzbetreiber Stedin.

Haushalte mit Gas beheizt, Erdgas hatte einen Anteil von 42% an der Primärenergieversorgung und 34% des Endenergiebedarfes wurden durch Erdgas gedeckt (IEA, 2020). Die öffentliche Diskussion um die Zukunft einer gasbasierten Energieversorgung in den Niederlanden begann etwa 2016, da der Erdgasbedarf im privaten und gewerblichen Bereich in den Jahren zuvor sichtbar zurückgegangen war. Er befindet sich heute weiterhin in einem leichten Abwärtstrend. Auch aus dem größten niederländischen Gasfeld Slochteren darf wegen geologischer Herausforderungen ab 2029 offiziell kein Erdgas mehr gefördert werden, was in der Praxis aber ggfs. bereits ab 2026 der Fall sein könnte. Grundsätzlich jedoch wurde die Diskussion um die Bedeutung von Wasserstoff zur langfristigen Substitution von Erdgas bereits seit 2009 geführt. Die niederländische Verordnung, nach der jeder Haushalt an das öffentliche Gasnetz angeschlossen sein musste, wurde erst in Folge der Einsicht sich verknappender Gasressourcen und der Entwicklungen im Slochteren-Feld dann in 2018 abgeschafft.

Diese Versorgungssituation erklärt, dass die niederländische Regierung stark darum bemüht ist, die Investitionen, die in eine dichte Erdgastransport-, verteil- und -speicherinfrastruktur geflossen sind, so lange wie möglich zu amortisieren, im Falle der für die begrenzte Lebensdauer der fossilen Energieexploration ausgelegten Infrastruktur auch über deren Amortisationszeit hinaus. Tatsächlich wird offiziell von dem „second life“ der Gasinfrastruktur mit Wasserstoff gesprochen. Die Energietransport- und -verteilunternehmen haben daher eine Arbeitsgruppe gebildet, auch um sich über die künftige Hausenergieversorgung abzustimmen, ein Prozess, der ab 2018 durch Systemanalysen unterstützt wurde<sup>6</sup>. Auch die künftige Rolle von Biomethan spielte dabei eine Rolle. Die gemeinsame Einsicht war, dass einerseits zwar der erneuerbare Stromanteil im Wärmesektor zunehmen wird, aber eine gasbasierte Wärmeversorgung auf Basis erneuerbar hergestellter Gase weiterhin eine Rolle spielen wird.

Zu diesem Zweck wurden elf konkrete Pilotprojekte beschlossen, in denen die Anwendung von Gas in den Sektoren Industrie, Stromumwandlung, Mobilität und Gebäudeversorgung unter Beteiligung von Schlüsselpartnern der Industrie vereinbart wurde<sup>7</sup>. Ein Leuchtturmprojekt ist „The Green Village“ der Universität Delft als „Living Laboratory“ (Project 1 Uithoorn<sup>8</sup>), das die Umstellung von 14 Häusern auf 100% Wasserstoff zum Inhalt hat. Zu diesen Projekten gehören auch derzeit acht Quartiersenergieprojekte auf Basis von grünem Wasserstoff, in denen der sichere Einsatz auf Basis unterschiedlicher Technologien getestet und demonstriert werden soll. Zu diesen Technologien zählen auf Anwendungsseite Wasserstoff-Brenner, Hybrid-Wärmepumpen sowie Blockheizkraftwerke. Da vor allen Dingen Brennstoffzellen-BHKW eine hohe Wasserstoffreinheit erfordern, hat dieses Thema jedoch kurzfristig einen geringeren Fokus für dezentrale Anwendungen, da die Festsetzung entsprechende Reinheitsanforderungen regulatorisch noch aussteht. Jedoch können zentrale H<sub>2</sub>-Produktionseinheiten einfacher mit entsprechenden Reinigungsanlagen ausgerüstet werden, sodass diese dort auch kurzfristig eingesetzt werden können. Auf Infrastrukturseite wird der Einsatz von Elektrolyseuren, von Wasserstoffnetzen (Rohrleitungen), von Speichern und PtX-Einrichtungen (Sektorenkopplung mit der Mobilität) getestet.

Die Vision der niederländischen Politik ist ein Zusammenwachsen der Gasinfrastrukturen über die Sektoren hinweg und in enger Verzahnung mit der Einführung erneuerbaren Stroms, ohne heute bereits vorhersagen zu können, welche Anteile der Wärmeversorgung über welche Energieträger langfristig geleistet werden. Angedacht ist eine synchrone Entwicklung der Gasnetze „von oben“ (Gastransportnetz - TSO) zur Erfüllung der Wasserstoffbedarfe für die Industrie (als Teil des „European Hydrogen Backbone“<sup>9</sup> und mit

<sup>6</sup> Siehe <https://www.netbeheernederland.nl/hydrogen>

<sup>7</sup> Siehe <https://www.netbeheernederland.nl/hydrogen>

<sup>8</sup> Siehe <https://www.bdrthermeagroup.com/en/stories/hydrogen-homes-go-live-in-uithoorn>

<sup>9</sup> In zwei aufeinanderfolgenden Studien (A. Wang, K. van der Leun, D. Peters, M. Busema, 2020) (J. Jens, A. Wang, K. van der Leun, D. Peters, M. Busema, 2021) hat das Beratungsunternehmen Guidehouse für eine Zahl von zunächst

perspektivischer Grün-H<sub>2</sub>-Produktion aus Windenergie) als auch der Netzentwicklung „von unten“ (DSO) mit Fokus auf PV-Strom, sodass beide Netze in kontinuierlichem Diskurs miteinander zusammenwachsen können. Das Thema Wasserstoff-Speicherung ist derzeit eher im Fokus der Transportgasnetzbetreiber, da sie eine hohe Kontinuität in der Gasbereitstellung sicherstellen müssen. Davon können später auch die Gasverteilnetze profitieren. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Gasnetzentwicklung mehr Zeit in Anspruch nehmen wird (ca. 10 Jahre), sodass, um keine Zeit in der Umstellung zu verlieren, erste robuste Umstellmaßnahmen einzelner Haushalte oder Quartiere (z.B. H<sub>2</sub>-Kessel oder Nahwärmeinseln) dezentral geplant sind. Aber auch dezentral ist an die Nutzung der Line-Pipe-Technologie gedacht<sup>10</sup>, die die Druckdifferenzen im Gasverteilnetz zumindest teilweise zur Wasserstoff-Kurzfristspeicherung nutzt.

Statt einer Diskussion um „Gas gegen Strom“ geht es in den Niederlanden derzeit viel mehr um eine alternative bzw. konzertierte Einführung der Konzepte „Energieeinsparung und elektrische Wärmepumpen“ versus „Gasheizkessel oder BHKW“ versus „Nahwärmeversorgung“. Neben der Einsicht eines prinzipiellen Bemühens um Energieeinsparung durch Wärmedämmung oder angepasstes Verbraucherverhalten beinhaltet die Strategieentwicklung dabei auch eine künftige Nutzung bestehenden öffentlichen Eigentums (Gasinfrastruktur). Dabei soll zum einen eine Polarisierung der öffentlichen Meinung vermieden werden, zum anderen sollen aber auch wirtschaftliche Aspekte Eingang finden. Allerdings ist heute noch nicht klar, wie weit das Gasnetz auch in Zukunft noch einzelne Haushalte versorgen soll, d.h. wie viele Gebäude noch direkt mit Wasserstoff versorgt bzw. welche Häuser oder Quartiere dann alternativ „auf dem letzten Meter“ mit Wärme versorgt werden. Dabei spielt auch eine Rolle, wie industrielle Abwärme künftig in diesen Konzepten sinnvoll genutzt werden kann. Mit dem einfachen Begriff, der in Deutschland durch die Gasindustrie geprägt wurde, hat die niederländische Politik gemeinsam mit der betroffenen Industrie in jedem Fall vor, „H<sub>2</sub>-ready“ zu werden.

### 3.2.4 Deutschland<sup>11</sup>

Das Interesse an Wasserstoff für die private, gewerbliche und industrielle Wärmebereitstellung ist aktuell eher ambivalent und wird durch verschiedene Akteure unterschiedlich bewertet. Die Gaswirtschaft betont die besondere Bedeutung des Gasnetzes für die Wärmebereitstellung heute und hebt damit den vornehmlich wirtschaftlichen, zeitlichen aber auch langfristig systemischen Nutzen des Fortbestandes des bestehenden Gasnetzes mit grünem Gas und insbesondere Wasserstoff hervor. Auf der anderen Seite argumentieren die H<sub>2</sub>-Antagonisten mit den entlang der H<sub>2</sub>-Wertschöpfungskette im Vergleich zum direkten Stromeinsatz in elektrischen Wärmepumpen entstehenden Effizienzverlusten und damit dem zusätzlichen Bedarf an Erneuerbaren Energien. Letztere bauen dabei auf eine möglichst hohe Deckung des Wärmebedarfes mit heimischen erneuerbaren Energien und verweisen wegen der dann entstehenden Knappheit insbesondere auf die dann höhere Motivation zum primären Politikziel der Energieeinsparung.

Aus Sicht der Erdgaswirtschaft bietet das deutsche Gasnetz einen schnellen und kostengünstigen Übergang von der heute fossil basierten Wärmeversorgung auf eine Umstellung mit grünen Gasen an, insbesondere im Gebäudebestand. Für diese wird von 30 mittelständischen Gasverteilnetzunternehmen, die

---

11 und im zweiten Bericht dann von bereits 23 europäischen Transportgasnetzbetreibern eine Analyse der möglichen und sinnvollen Umstellung des bestehenden Erdgasnetzes auf einen reinen Wasserstoffbetrieb erstellt. Die europäische Gasindustrie ging in der ersten Studie zunächst von einem Wasserstoffgasnetz von 6.800 km (2030) bzw. 23.000 km (2040) aus und in der zweiten Studie dann bereits von 11.600 km (2030) bzw. 39.700 km (2050).

<sup>10</sup> Die Verbindungsleitung vom Windpark, der Stad aan't Haringvliet mit Wasserstoff versorgen soll, ist für ein Druckniveau von 3 MPa ausgelegt und wird vom zuständigen Gastransportnetzbetreiber (TSO) betrieben.

<sup>11</sup> Wesentliche Teile der in diesem Kapitel zusammengestellten Informationen basieren auf einem Gespräch vom 19.10.2021 mit Frank Gröschl vom Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW).

ungefähr 50% des deutschen Gasverteilnetzabsatzes repräsentieren, eine dreigliedrige Strategie vorge schlagen (DVGW, 2020):

- Nutzung von meist dezentral eingespeistem **Biomethan** durch Zumischung zu Erdgas in unbe grenzten Zumischraten oder dessen reine Nutzung z.B. in Teilnetzen.
- **Zumischung von Wasserstoff** in steigenden Raten von heute bereits geregelten 10 Volumenpro zent (entspricht allerdings nur ca. 3,3 Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Minderungs-Prozentpunkte) auf später 20 bis 30 Volumenprozent (entsprechend 7 bis 10 CO<sub>2</sub>-Minderungs-Prozentpunkte). Höhere Zu mischraten kommen quasi der dritten Option nahe.
- Umstellung begrenzter und aus Versorgungssinseln herauswachsender **100% Wasserstoffteilnetze**, die mit lokal produziertem Wasserstoff beaufschlagt oder mit importiertem Wasserstoff aus dem überlagerten Gastransportnetz versorgt werden, wobei die H<sub>2</sub>-Quellen sich ebenfalls unter Be rücksichtigung verschiedenster Kriterien noch in Diskussion befinden.

In enger Abstimmung von Gastransport- und Gasverteilnetzbetreibern hat die deutsche Gasindustrie zu sätzlich ein Konzept erarbeitet, das eine sukzessive Erschließung der Fläche für 100% grünen Wasserstoff vom Nordwesten Deutschlands in den Südosten ermöglichen soll. Danach können sich immer mehr Ver teilnetze bis 2045 mit Wasserstoff aus dem übergeordneten Transportnetz versorgen bzw. auch dezentral zurückspeisen. Das übergeordnete Transportnetz ist dabei Teil eines durch 23 europäischen Gastrans portgasnetzbetreiber definierten European Hydrogen Backbone“, der in 2040 ein Netz von fast 40.000 km Länge über ganz Europa auf 100% Wasserstoff umgestellt sehen will. Neben den in Kap. 3.2.6 vorgestell ten Einzelprojekten verfolgen vor allem die Gasverteilnetzbetreiber eine wachsende Anzahl von H<sub>2</sub>-Pilot projekten der einen oder anderen Ausprägung. Auch die technischen Organe der Gasindustrie bereiten sich mit der Bestandsaufnahme, Untersuchung und Ertüchtigung gasführender Anlagen und Geräte für Infrastruktur und Endverbrauch derzeit intensiv darauf vor, das Gasverteilnetz „H<sub>2</sub> ready“ zu machen.

Aus Sicht der Wärmeversorgung als Teil des gesamten Energiesystems sind dabei unterschiedliche Di mensionen von Relevanz:

- **Zeitlich:** die Disparität von (a) fluktuierender Energieerzeugung versus zeitlich abweichender Nachfrage, die sich mit einem zunehmenden Anteil erneuerbaren Stroms verschärft und (b) star ken tageszeitlichen und saisonalen Nachfragevariationen.
- **Räumlich:** die regionalen Wärmeversorgungs- und -infrastrukturunterschiede und Netzbelastun gen von Strom- und Gasnetz mit eher dezentraler Versorgung im ländlichen Bereich und besser ausgebauter Strominfrastruktur im städtischen oder Stadtrandbereich.
- **Einführungsszenarien:** die Robustheit und Schnelligkeit einer Umstellung auf eine CO<sub>2</sub>-freie Wär meversorgung auch im Hinblick auf freiwerdende Kapazitäten im Gasnetz gegenüber einem ten denziell immer stärker ausgelasteten Stromtransport- und -verteilnetz.
- **Öffentliche Akzeptanz:** die finanzielle bzw. komfortbezogene Bereitschaft der Wärmenutzer ge genüber unterschiedlichen Heizungssystemen sowie die weiteren Ausbauerfordernisse von Strom- und Gasnetz.

Im Rahmen einer aktuellen Analyse wurden auch die sektoralen Wirkungen des Einsatzes von Wasserstoff auf die potenzielle CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion analysiert (WVStahl, 2020) (siehe

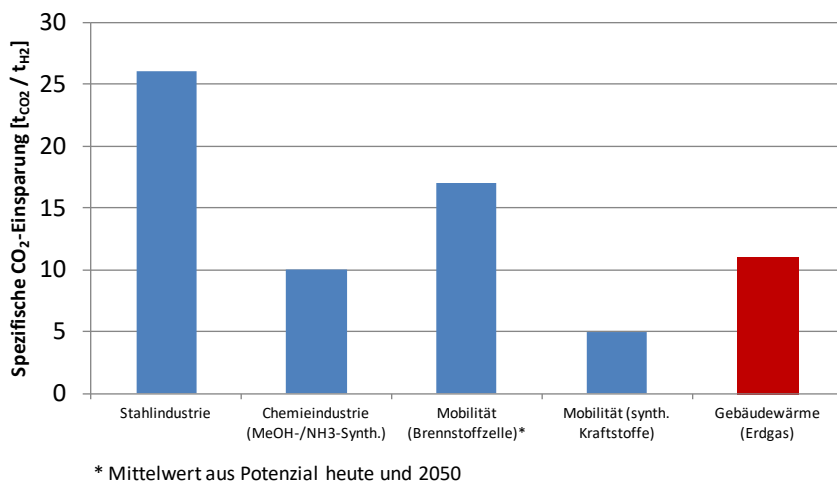


Abbildung 19). Danach spart der H<sub>2</sub>-Einsatz ca. 11 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Wasserstoff ein, während der H<sub>2</sub>-Einsatz in der Stahlindustrie bei 26 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Tonne Wasserstoff liegt. Grund dafür ist, dass Wasserstoff im Wärmesektor vor allen Dingen das bereits relativ CO<sub>2</sub>-arme Erdgas verdrängt, in der Stahlindustrie jedoch Kohle. Es wäre aber wohl falsch daraus zu folgern, dass Deutschland im Gebäudesektor die Hände in den Schoß legen kann. Bereits kurzfristig könnten durch eine bereits heute vom Regelwerk erlaubte Zumischrate von 10 Volumenprozent Wasserstoff in das deutsche Gasverteilnetz 12-13 TWh der von der Nationalen Deutschen Wasserstoffstrategie (NWS) für 2030 insgesamt postulierten H<sub>2</sub>-Nachfrage von sektorenübergreifend insgesamt 14 TWh abgedeckt werden.

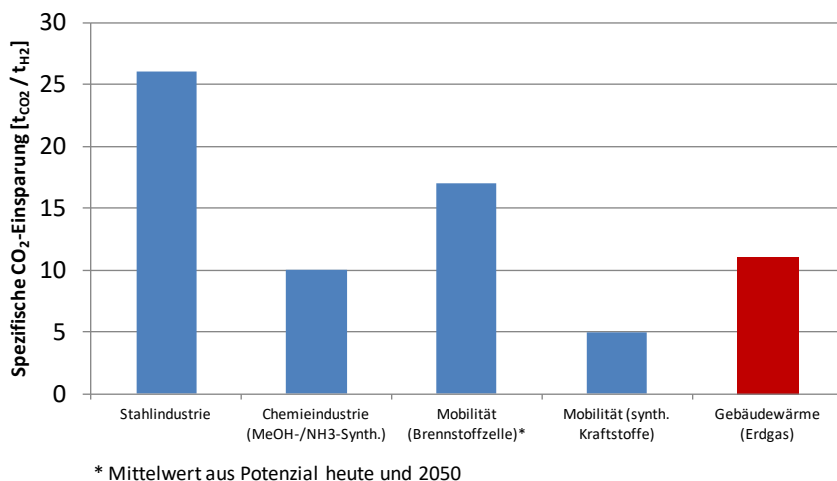


Abbildung 19: CO<sub>2</sub>-Reduktionspotenzial im sektoralen Vergleich [ (WVStahl, 2020) auf Basis Fraunhofer Umsicht]

### 3.2.5 Zusammenfassung der Länderstrategien

Entsprechend den Unterschieden der Länderstrategien unterscheiden sich auch die Konzepte bzw. die Relevanz der einzelnen Technologien für eine Entwicklung von künftigen wasserstoffbasierten Optionen für die Gebäudewärmebereitstellung. Dazu zählen für die Anwendung im heute typischerweise gasversorgten Wohngebäudebestand mit hoher Heizungsvorlauftemperatur zur EFH-Versorgung (die genannten Optionen beziehen sich auf Abbildung 18):

- Kessel für die monovalente Wärmeerzeugung aus Wasserstoff (Option Ia)) (Viessmann, 2020), insbesondere im Wohnungsbestand, in dem alte Heizkörper mit geringen Oberflächen für den Einsatz bei höheren Temperaturen nicht ausgetauscht werden können oder kein Platz für die Aufstellung einer Brennstoffzelle vorhanden ist,
- Klein-BHKW auf Brennstoffzellenbasis zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung in Gebäuden, in denen eine Aufstellung von elektrisch betriebenen Wärmepumpen z.B. aus Platzgründen (Aufstellung Luft/Wasser-Wärmetauscher in Gebäudenähe, sowie Flächenbedarf für die Niedertemperatur-Heizflächen) nicht möglich ist.

Für die Wärmeversorgung von MFH oder Quartieren im Altbaubestand kommen dann vor allen Dingen auch Nahwärmeversorgungskonzepte wie z.B. in Option IIb) veranschaulicht in Frage, Option IIa) jedoch nur in Fällen, in denen ein SOFC- oder PEM-Brennstoffzellen-BHKW nicht aufgestellt werden kann.

Brennstoffzellen-BHKW auf Erdgasbasis werden heute bereits wegen der vermiedenen hohen Strombezugskosten stromgeführt betrieben<sup>12</sup>. Im Gegensatz zum Einsatz in EFH, wo wegen der geringen Stromgrundlast die Aggregate trotz geringer Leistungen von 0,5 bis 1 kW<sub>el</sub> intermittierend betrieben werden, was sich mit Niedertemperatur-Brennstoffzellen technisch darstellen lässt, werden für die MFH-/Quartiersanwendung konzipierte Brennstoffzellen mit Hilfe von SOFC auf einen Hochtemperaturbetrieb ausgelegt und können bei einer im Mittel höheren Stromgrundlast dann weitgehend kontinuierlich betrieben werden<sup>13</sup>. Bosch wirbt für sein SOFC-System bei einem elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60% mit einem hohen Gesamtwirkungsgrad (Strom und Wärme) von 85%.

Zur Umstellung der privaten und gewerblichen Wärmeversorgung auf CO<sub>2</sub>-freie Energieträger ist kurzfristig der eher technische und ökologisch relevante Aspekt der höheren Wärmebereitstellungseffizienz im Vergleich einzelner Versorgungsfälle relevant, soweit sich der jeweilige Nutzer die teure Anlagentechnik leisten will. Mittel- und langfristig jedoch werden die systemischen Aspekte (Stromnetzauslastung, Lastausgleich, saisonaler Energiespeicherbedarf, Sektorenkopplung) aus Sicht der Gesamtenergieversorgung an Bedeutung gewinnen. Als mögliche Wärmeversorgungsfälle, die im Gegensatz zur Nutzung elektrisch betriebener Wärmepumpen zu einer Entlastung des Stromnetzes beitragen, stehen daher die Optionen Ic) und IIc) in Abbildung 18 zur Verfügung. Diese Systeme bieten sich auch für einen sektorengesetzten dezentralen Betrieb an, d.h., dass der vor Ort durch Elektrolyse hergestellte Wasserstoff auch in anderen Sektoren wie z.B. der Mobilität (Betankung von Brennstoffzellenfahrzeugen, Unterstützung als lokaler Speicher zur Ladung von Batteriefahrzeugen<sup>14</sup>) eingesetzt werden kann. Grundsätzlich ist darüber hinaus auch eine dezentrale Einspeisung grünen Wasserstoffs aus (saisonal) überschüssigem EE-Strom in das Gasverteilnetz denkbar. Die beiden letztgenannten Verwendungen sind in Abbildung 18 gestrichelt eingezeichnet.

Die in dieser Studie im Fokus stehenden Optionen Ic) und IIc) sind aus Energiesystemperspektive die eigentlich mittel- und langfristig relevanten integrierten Konzepte, was sich auch in den derzeit in Vorbereitung befindlichen Demonstrationsprojekten in Deutschland z.B. in Kaisersesch<sup>15</sup>, Gütersloh<sup>16</sup> oder Esslingen (Neue Weststadt, 2021) zeigt. Aber auch beispielsweise in den Niederlanden oder in UK hat man das systemische Potenzial eines potenziellen Gasnetzbeitrags zur Wärmeversorgung und damit auch die Be-

<sup>12</sup> z.B. erdgasbetriebenes PEMBZ-BHKW „Vitovalor“ von Viessmann mit 0,75 kW elektrischer Leistung (Viessmann, 2021)

<sup>13</sup> Bosch bietet ein 10 kW<sub>el</sub> SOFC-Brennstoffzellen-KWK-Aggregat mit Lastmodulierbarkeit von 30 ... 100% an, das mit Erdgas, Mischungen oder auch reinem Wasserstoff betrieben werden kann (Bosch, 2021).

<sup>14</sup> Siehe z.B. <https://h2energy.ch/kvyreen/>

<sup>15</sup> <https://h2bz-rlp.de/> (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>16</sup> <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/wasserstoff-h2-revier-1.5217340> (letzter Aufruf 27.09.2021)

deutung als Teil eines Technologiestraußes aus strom-, gas- und nahwärmebasierten Wärmebereitstellungstechnologien erkannt. Diese beiden letztgenannten Optionen sind auch die, die in einem Effizienzhaus Plus eingesetzt werden können, d.h. einen lokalen über den Energiebedarf des relevanten Objektes im Jahresmittel hinausgehenden Strom- oder Gasüberschuss produzieren.

### 3.2.6 Projekte

Es werden erste Erfahrungen aus dem Einsatz mit brennstoffzellen- oder kesselgestützten Wärmeerzeugungsaggregaten auf Basis von Wasserstoff referiert. Erste umfangreiche Erfahrungen mit kleinen erdgasbetriebenen Brennstoffzellensystemen, in denen der Wasserstoff direkt an der Brennstoffzelle aus Erdgas produziert wird, liegen aus Japan vor<sup>17</sup>, aber auch in Europa wurden mit Fokus auf Großbritannien und Dänemark sowie den Niederlanden erste Betriebserfahrungen berichtet. Diese sollen im Licht der oben gesammelten systemtechnischen Einsichten aber auch der in den letzten Jahren stark veränderten Systemperspektiven einer CO<sub>2</sub>-freien Wärmeversorgung bis 2045 analysiert werden. Des Weiteren werden geplante Pilot- oder Demonstrationszwecke genannt und in Bezug auf ihre Ambition und Umsetzungsziele analysiert.

Tabelle 1 zeigt einen Überblick über geplante Projekte, in denen die Gebäudebeheizung in Ein- (EFH) oder Mehrfamilienhäusern (MFH) und Quartieren durch Wasserstoff versorgt werden bzw. versorgt werden soll. Für jedes der fünf Projekte aus dem europäischen Ausland und für die acht deutschen Projekte sind der Ort, die Projektkurzbezeichnung, eine kurze Beschreibung der Inhalte mit Wasserstoff-Produktion (P), Wasserstoff-Infrastruktur (I) und Wasserstoffnutzung (N), der Grad der Versorgungsautarkie (im Hinblick auf eine Übertragbarkeit auf das Effizienzhaus Plus), der Projektentwicklungsstand sowie verantwortliche Akteure aufgeführt. Quartiere werden dadurch unterschieden, dass eine geschlossene Gruppierung von EFH oder MFH mit Wärme/Kälte und Strom versorgt wird, entweder durch eine Wärmezentrale je Haus oder für das gesamte Quartier und auch durch Straßen durchzogen sein kann. In Abbildung 20 sind die Orte auf einer Zentraleuropakarte eingetragen. Die Projekte mit Bezug zum Effizienzhaus Plus sind gesondert gekennzeichnet (○).

Die Liste der vorgestellten Anlagen- und Betriebskonzepte erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Insbesondere wurden einzelne prototypische Wasserstoff-Wärmeversorgungskonzepte ausgeblendet, die vereinzelt in den letzten 40 Jahren in ganz Europa umgesetzt wurden, wie z.B. die energieautarken Häuser von Olof Tegström in Harnösand in Schweden (1986; eine Windenergieanlage versorgte dabei auch einen katalytischen Brenner zum Kochen sowie einen Mittelklasse-Pkw mit Wasserstoff-Verbrennungsmotor), vom Architekten Markus Friedli in Zollbrück in der Schweiz (1991; eine von einer PV-Anlage gespeiste Elektrolyse erzeugte Wasserstoff zur Hausenergievollversorgung inklusive eines kleinen Pkw) sowie das vollständig energieautarke Solarhaus des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg (1992). Sowohl die Objekte von Olof Tegström und Markus Friedli adressierten dabei die Sektorenkopplung, da beide ihre Pkw mit vor Ort produziertem grünem Wasserstoff betrieben.

---

<sup>17</sup> Siehe z.B. <https://greenage.ag/newsreader/ene-farm-in-japan.html> (zuletzt aufgerufen am 18.05.2022).

Tabelle 1: Übersicht über relevante Projekte mit Einsatz von Wasserstoff zur Gebäudewärmeversorgung in Europa und Deutschland (P– Wasserstoff Produktion; I– Wasserstoff-Infrastruktur; N– Wasserstoff-Nutzung)

Nr.	Ort / Land	Bezeichnung	Umfang	Autarkie	Stand	Verantwortlich
1	Leeds (UK)	H21 – Leeds City Gate <sup>18</sup>	<b>P:</b> H <sub>2</sub> aus Erdgas mit CCS (Nordsee) <b>I:</b> Gasnetz <b>N:</b> Haushaltswärme	Keine	Nach umfassenden Analysen erste 100% H <sub>2</sub> -Tests in Phasen 2 und 3 in Spadeadam und South Bank/ Middlesbrough begonnen	Northern Gas Networks mit DNV, Cadent, SGN, Wales&West Utilities, HSE, National Grid und Leeds Beckett University
2	Stad aan 't Haringvliet (NL)	HYGRO <sup>19</sup>	<b>P:</b> Grüner H <sub>2</sub> aus Elektrolyse mit EE-Strom <b>I:</b> Gasverteilnetz <b>N:</b> H <sub>2</sub> -Kessel	Quartier	Umstellung erster Häuser bis 2025	Stadt Goeree-Overflakkee, Wind-/H <sub>2</sub> -Projektentwickler HYGRO
3	Hoogeveen (NL)	Proefproject (4 Phasen) <sup>20</sup>	<b>P:</b> Dezentrale Elektrolyse mit Wind-/PV <b>I:</b> Trailer (kurzfristig), Gasleitung (langfristig) <b>N:</b> Umgerüstete H <sub>2</sub> -Brenner für Raumwärme & WW, Strom <sup>21</sup>	Quartier mit 100 neuen und 430 bestehenden Wohngebäuden	Laufzeit 2020-22; Phase 1: Nijstad Oost (100 Gebäude); Phase 2: Erflanden (1.100 Gebäude); Phase 3: Ten Arlo Plant (Grün-H <sub>2</sub> -Produktion); erste 10-20 Anlagen bis 2022	Stadt Hoogeveen mit Konsortium aus 22 Industrie- und Hochschulpartnern <sup>22</sup>
4	Vårgårda bei Göteborg (SE)		<b>P:</b> Strom- und Wärmebezug aus Aufdach-PV, Wasserelektrolyse <b>I:</b> Batterie für Lastspitzen, H <sub>2</sub> -Druckspeichertank (30 MPa) für Grundlast, saisonal <b>N:</b> 6 Wohnblöcke mit 172 Wohnungen, vollständig energieautark	Quartier	Erster Wohnblock (30 Wohnungen) ausgerüstet	Better Energy (DK) & Nilsson Energy (SE)

<sup>18</sup> (Dan Sadler et. al., 2016)<sup>19</sup> <https://hy-gro.net/nl/projecten>; <https://www.kiwa.com/4a4da5/globalassets/netherlands/kiwa-technology/downloads/publicatie-ombouw-waterstof-stad-aan-t-haringvliet.pdf> (letzter Aufruf 27.09.2021)<sup>20</sup> (Hoogeveen, 2020); <https://prod5.assets-cdn.io/event/3757/assets/8431189773-628285d69f.pdf> (letzter Aufruf 27.09.2021)<sup>21</sup> P. de Laat: Overview of Hydrogen Projects in the Netherlands. Erstellt für TKI Nieuw Gas, Sommer, 2020, <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/TKI%20Gas/Overview%20Hydrogen%20projects%20in%20the%20Netherlands%20oversie%2021%20augustus%202020.pdf> (Letzter Aufruf am 1.02.2022).<sup>22</sup> Arcadis Nederland, BAM Infra Energie Water, Bekaert Combustion Technology, Cogas, DHV Nederland, DNV-GL Netherlands, Enexis Netbeheer, GasTerra, Gasunie, Green Planet Pesse, Hanze University of Applied Sciences Groningen/ENTRANCE, Institute of Physical Safety (IFV), JP-Energy Systems, Liander, N-TRA/RENDO, NAM, Nedstack, New Energy Coalition, Province of Drenthe, Royal Haskoning, Stork Netherlands, Visser & Smit Hanab and Municipality of Hoogeveen.

Nr.	Ort / Land	Bezeichnung	Umfang	Autarkie	Stand	Verantwortlich
5	Brütten (CH)	Energieautarkes MFH Brütten (9 Wohnungen)	<b>P:</b> Aufdach- und Fassaden-PV, Elektrolyse <b>I:</b> H <sub>2</sub> -Kurz- und Saisonal-speicher, Batterie <b>N:</b> BZ-BHKW und El-WP für Wärme und Strom, vollständig energieautark (Energiekosten 10% höher); BEV-Laden <sup>23</sup>	MFH	In Nutzung seit Juni 2016	Umweltarena Spreitenbach
6	Gütersloh (NRW)	H <sub>2</sub> -Revier Avenwedde	<b>P:</b> Grün-H <sub>2</sub> aus Elektrolyse mit Biogas-/Wind- (3 kleine benachbarte WEA)/ Aufdach-PV-Strom <b>I:</b> H <sub>2</sub> -Speicherung, Gas-Wärmenetz? <b>N:</b> 120 WE (12 Blöcke, 7 EFH, KiTa, Bürogebäude) Tankstelle <sup>24</sup>	Quartier	Genehmigung noch ungewiss, erstes Bürogebäude ab 2021	Tassikas Immobilien GmbH&Co.KG / Gütersloh, Ingenieurbüro BEN-Tec / Rheine, Uni Münster
7	Esslingen (BW)	Neue Weststadt	<b>P:</b> Onsite-Elektrolyse aus EE-Strom <b>I:</b> Gasmotor-BHKW + Abwärme Ely in Nahwärmenetz; H <sub>2</sub> -Pufferspeicher; Export via Trailerabfüllung (Mobilität) <b>N:</b> Wohnblöcke, Hochschule, Busse, H <sub>2</sub> hat Speicherfunktion, effizient durch Abwärmennutzung <sup>25</sup>	Quartier	Projekteinweihung 22. Juni 2021, Projekt in Umsetzung	Stadt Esslingen am Neckar, Steinbeis Innovationszentrum EGS (SIZ-EGS), mit 13 weiteren Partnern
8	Oldenburg (NI)	ENaQ – Energetisches Nachbarschaftsquartier <sup>26</sup>	<b>P:</b> Ursprüngliche Planung: Elektrolyse (30 kW <sub>el</sub> ) <b>I:</b> Mikrobakterielle Methanisierung <b>N:</b> Wärme/Strom mit BZ für „Technikinsel“ in Siedlung mit 7 MFH (5 kW <sub>el</sub> ), Pkw-Nachbefüllung (mobiler H <sub>2</sub> -Tankstelle)	Quartier	Wasserstoff-Anlagenteile können entgegen anfänglicher Planung wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit und Änderung bei Schlüsselpartnern bisher nicht umgesetzt werden	DLR (Inst. f. Vernetzte Energiesysteme), Microb Energy (heute Viessmann, Anleg, EWE und andere

<sup>23</sup> <https://www.gq-magazin.de/auto-technik/article/das-erste-energieautarke-wohnhaus-ist-ein-schweizer> (letzter Aufruf 06.10.2021)

<sup>24</sup> <https://www.sueddeutsche.de/kolumne/wasserstoff-h2-revier-1.5217340> (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>25</sup> [https://neue-weststadt.de/wp-content/uploads/2021/07/P2G2P\\_Broschuere\\_A5\\_ANSICHT\\_RZ.pdf](https://neue-weststadt.de/wp-content/uploads/2021/07/P2G2P_Broschuere_A5_ANSICHT_RZ.pdf) (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>26</sup> <https://www.enag-fliegerhorst.de/> (letzter Aufruf 27.09.2021)

Nr.	Ort / Land	Bezeichnung	Umfang	Autarkie	Stand	Verantwortlich
9	Kaisersesch (RLP)	SmartQuart als Containerlösung <sup>27</sup>	<b>P:</b> Wind, PV, Elektrolyseur <b>I:</b> H <sub>2</sub> - microgrid, LOHC-Überschusspeicher, Batteriespeicher <b>N:</b> 5 H <sub>2</sub> -Kessel (a`7 kW <sub>th</sub> ), 5 H <sub>2</sub> -BZ-BHKW (0,75 kW <sub>el</sub> ), H <sub>2</sub> Mobilität (H <sub>2</sub> -Tankstelle)	Gewerbliches Einzelgebäude (Rathaus), Sektorenkopplung	Projekt in Planung, Inbetriebnahme der 100% H <sub>2</sub> -Geräte in 2023	E.ON SE, OFB, gridX, RWTH, Viessmann, hydrogenious, RWE Power, H <sub>2</sub> Mobility, Stadt Kaisersesch, (Stadt Essen, Stadt Bedburg)
10	Heide/ Holstein (SH)	Quarree100, EFH, DHH, MFH verschiedener Baujahre Gewerbebetriebe, Neubaugebiet <sup>28</sup>	<b>P:</b> Dezentrale Elektrolyse mit EE-Strom <b>I:</b> Gasleitung, Nahwärmenetz <b>N:</b> Nahwärme, Strom, Gewerbe	Quartier	In Vorbereitung	Region Heide mit 21 Partnern <sup>29</sup>
11	Bochum-Weitmar (NRW)	Energiezentrale der Zukunft (EZZ) <sup>30</sup>	<b>P:</b> Elektrolyse (zu 25% Strom aus eigener Aufdach-PV) <b>I:</b> H <sub>2</sub> -, Batterie- und Nahwärmespeicher <b>N:</b> Wärme/Strom aus BZ (36 kW <sub>el</sub> ) und El-WP (Geothermie) für Bestandsgebäude (1959/76), gedämmt nach KfW 100, BEV-Ladestation	Quartier (teilautark: 60%)	Richtfest am 10.12.2020, Öffentliche Inbetriebnahme am 23.04.2021	Vonovia, ProtonMotor (BZ), Ampeers Energy, wiss. begleitet durch Open District Hub (ODH) <sup>31</sup>
12	Zusmarshausen (BY)		<b>P:</b> Aufdach- und Fassaden-PV, Elektrolyse <b>I:</b> Saisonale H <sub>2</sub> -Druckspeicherung: 600 kWh, Batterie: 25 kWh <b>N:</b> BZ-BHKW für Wärme/Kälte & Strom, vollständig energieautarkes Passivhaus, Investition: 70.000 Euro <sup>32</sup>	EFH	In Nutzung seit 2019	Hörmann Solartechnik, H <sub>2</sub> -System Home Power Solutions (hps)

<sup>27</sup> <https://smartquart.energy/about/kaisersesch/> (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>28</sup> [https://quarree100.de/media/2021\\_newsletter\\_12\\_sonderausgabe\\_ab3.pdf](https://quarree100.de/media/2021_newsletter_12_sonderausgabe_ab3.pdf) (letzter Aufruf 27.09.2021)

<sup>29</sup> Advanced Energy Systems Institute (AES) Bremen, Areva H2Gen, artec Forschungszentrum Nachhaltigkeit, Conso-linno Energy GmbH, EEGmbH, emma technologies GmbH, entelios, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES) an der OTH Regensburg, Fachhochschule Westküste (FHW), Stadt Heide, Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM), IKEM, IPP ESN, Jacobs University Bremen (JUB), Steinbeis Innovationszentrum energieplus (SIZ), Stadtwerke Heide (SWH), Tachycon, Universität Duisburg-Essen (EWL), Zentrum für Umweltforschung und nachhaltige Technologien (UFT), Vater, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW).

<sup>30</sup> <https://presse.vonovia.de/de-de/aktuelles/201012-richtfest-fuer-bochumer-energiezentrale-der-zukunft> (letzter Aufruf 08.10.2021)

<sup>31</sup> <https://www.vonovia.de/de-de/nachhaltigkeit/klima-und-umweltschutz/innovationen> (letzter Aufruf 08.10.2021)

<sup>32</sup> [www.hoermannsolar.de](http://www.hoermannsolar.de) (letzter Aufruf 06.10.2021)

Nr.	Ort / Land	Bezeichnung	Umfang	Autarkie	Stand	Verantwortlich
13	Augsburg (BY)	SET Gebäude, PtG-Anlage mit Methanisierung als teilautarke Wärmeversorgung für 70 Wohnungen im Bestandswohnungsbau (1974, 5.400 m <sup>2</sup> WFL.) <sup>33</sup>	<p><b>P:</b> Aufdach-PV-Anlage 150 kW<sub>p</sub>, (max. 62,5 kW<sub>e</sub>), alkalische Elektrolyse (10 m<sup>3</sup>/h), Kathalytische Methanisierung (2,5 Nm<sup>3</sup>/h)</p> <p><b>I:</b> Erdgedeckte CH<sub>4</sub>-, O<sub>2</sub>- und CO<sub>2</sub>-Druckspeicher, CO<sub>2</sub>-Rückführung im Kreislauf</p> <p><b>N:</b> BHKW, 2 CH<sub>4</sub>-Brennwertthermen im O<sub>2</sub>-Betrieb</p>	Quartier	In Betrieb seit 2018	Stadtwerke Augsburg swa (Contractor), Wohnbaugruppe Augsburg WBG (Eigentümer & Vermieter)
14	Haren (NI)		<p><b>P:</b> H<sub>2</sub> aus nahem Bürgerwindpark (BW) Fehndorf-Lindloh</p> <p><b>I:</b> H<sub>2</sub> im Gasnetz</p> <p><b>N:</b> H<sub>2</sub>-Nutzung sektorübergreifend mit Fokus auf Mobilität</p>		In Planung	
15	Bremen (HB)	BUNTE WOLKE Umnutzung ehemaliger Industriestandort „Bremen-Grohn“	<p><b>P:</b> H<sub>2</sub> via Pyrolyse aus Erdgas und aus Elektrolyse mit EE-Strom und Netzstrom als Backup</p> <p><b>I:</b> H<sub>2</sub>-Speicher vor Ort mit lokalem H<sub>2</sub>-Leitungsnetz</p> <p><b>N:</b> Stationäre BZ mit Warmwasserverteilung, H<sub>2</sub>-Tankstelle</p>	Gewerkepark	In Planung	Mosel Grundstücks-holding GmbH & Co KG

<sup>33</sup> <https://www.powertogas.info/projektkarte/exytron-klimafreundliches-wohnen-augsburg/> (letzter Aufruf 08.11.2021)

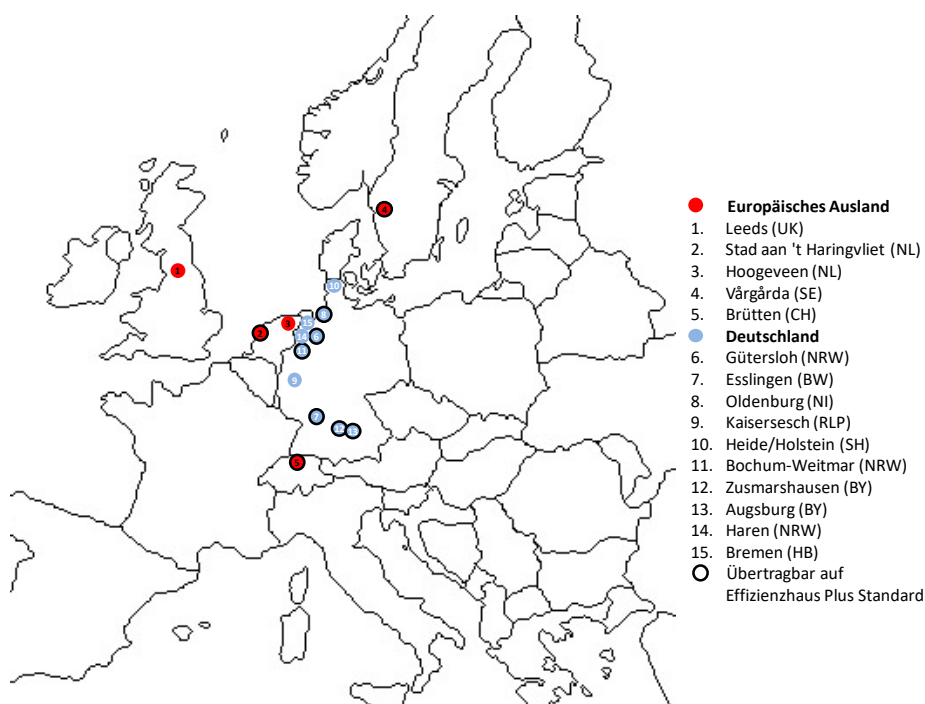


Abbildung 20: Orte mit prototypischen Privat- oder Gewerbeobjekten mit Einsatz von Wasserstoff in der Wärmeversorgung in Europa und in Deutschland

## 1. Leeds – Projekt H21 Leeds City Gate (UK)

Im H21-Projekt stehen (a) die Dominanz der Gasversorgung zur Wärmebereitstellung privater Haushalte sowie (b) die Traditionsverhaftung der englischen Privatkunden im Vordergrund. Diese Gründe haben einige englische Gasverteilnetzbetreiber, initiiert und angeführt durch die Northern Gas Networks, zur Entscheidung bewegt, die Struktur, die Anlagen und Geräte sowie die Betreibermodelle des bestehenden Erdgasnetzes einiger mittlenglischer Städte (Leeds, Bradford, Wakefield, Huddersfield, Hull, Liverpool, Manchester, Teesside, Tyneside und York, die ca. 12,5% der englischen Bevölkerung repräsentieren) auch für das geplante Wasserstoffgasnetz nahezu unverändert zu übernehmen. Bei gleichbleibend hohem Wärmebedarf würde der Preis für eine Versorgung mit grünem Wasserstoff deutlich steigen, weswegen man in der Einführungsphase auf blauen Wasserstoff aus Erdgas mit CCS in der Nordsee setzt.

**Fazit:** Das H21-Projektmodell ist also auf das Thema Effizienzhaus Plus im doppelten Sinn nicht übertragbar: (a) es ist vollständig leitungsgebunden mit zentraler Wasserstoffproduktion und (b) basiert nicht auf einer grünen Wasserstoffversorgung.

## 2. Stad aan 't Haringvliet (NL)

Auch das Projekt in Stad aan't Haringvliet, einem Dorf in Südholland, bezieht Wasserstoff aus einem Gasnetz. In diesem Fall handelt es sich um ein lokales Netz, das mit lokal erzeugtem Wind-Wasserstoff (aus ca. 10 km Entfernung) versorgt wird und daraus grünen Wasserstoff liefert. Die Begründung für das Interesse an einer Wasserstoffnutzung findet sich in der starken und tradierten Orientierung der niederländischen Wärmebereitstellung für Privathaushalte aus dem Erdgasnetz, das bisher durch kostengünstiges heimisches Erdgas gedeckt wurde. Initiatoren sind ein niederländischer Verteilgasnetzbetreiber und der Kesselhersteller Kiwa, die im engen Austausch mit dem Wind-H<sub>2</sub>-Projektentwickler Hygro stehen.

Die Anlagentechnik sieht die Installation von einfachen Wasserstoffkesseln vor, Brennstoffzellenaggregate für die Kraft-Wärme-Kopplung sind also nicht vorgesehen. Wichtigste Begründung für das Projekt ist die Erfordernis einer kostengünstigen Energiespeicherung in Form von Molekülen statt Elektronen. Die Wirtschaftlichkeit der Wärmebereitstellung ergibt sich aus dem hohen Wärmedämmstandard der Gebäude. Die Projektentwickler haben errechnet, dass eine auf Wasserstoff basierende Wärmeversorgung sogar kostengünstiger ist als die mit Strom und Wärmepumpen, wenn die Ertüchtigung des Stromverteilnetzes mitberücksichtigt wird.

Von besonderem Interesse ist, dass das Projekt in seinen Ursprüngen (2017) durch lokale Bürger angestoßen wurde, die nach einer sozialverträglichen Wärmeversorgung ihrer Haushalte suchten, d.h. nach einer möglichst kostengünstigen Lösung. Ihr Interesse war es, Alternativlösungen für aufwändige Wärmedämmmaßnahmen im Gebäudebestand zu entwickeln. Diese können wegen des heute niedrigen Baustandards in den Niederlanden 40.000 bis 50.000 € für ein EFH betragen. Bei einer europaweiten Erneuerungsrate im Gebäudebereich von ca. 1,5% pro Jahr bieten sich Wasserstoffheizungen als die schnellste kostengünstige Option mit niedrigerem Wirkungsgrad aber hoher öffentlicher Akzeptanz an. Allerdings sind nachhaltige Wärmedämmmaßnahmen im starken Interesse der derzeitigen Regierung, woraus sich eine kontroverse Diskussion entwickelt hat, die sich derzeit im Stillhaltemodus befindet. Dabei stehen die Argumente „niedrigste Kosten“, „höchster Wirkungsgrad“ und „soziale Relevanz“ einander gegenüber.

In einer insgesamt 1.600 Häuser umfassenden Studie, die über die Stadtgrenze hinausging, wurden Konzepte analysiert, welche künftigen Wärmeversorgungsoptionen für den küstennahen Ort relevant sein könnten. Es zeigte sich, dass davon ca. 650 Häuser Teil des Projektes werden könnten. Es stellte sich heraus, dass sich die Maßnahmen und Konzepte aus der Wirtschaftlichkeitsperspektive unterscheiden können, sodass sich – auch in Abhängigkeit von Verbraucherverhalten und -wünschen – in der Regel verschiedene Konzepte umsetzen lassen. Wichtige Aspekte der Entscheidungsfindung sind die CO<sub>2</sub>-Reduktionswirkung und die Schnelligkeit der Umsetzung. Als alternative Konzepte wurden elektrische Wärmepumpen, die Nahwärmeversorgung oder die Nutzung von Biogas bzw. von wasserstoffbasierten Heizungssystemen betrachtet. Insgesamt wurde dabei ein Anteil von 25 bis 30% H<sub>2</sub>-basierter Systeme für umsetzungswürdig gehalten. Um den von der H<sub>2</sub>-Siedlung betroffenen Bürgern mehr Entscheidungstransparenz an die Hand zu geben (kein Bürger kann zur Wahl der ein oder anderen Maßnahme gezwungen werden), wurde ein Simulationsmodell für jedes Einzelgebäude entwickelt, das einen Vergleich der Optionen elektrische Wärmepumpe, H<sub>2</sub>-Heizsystem oder Hybridsystem (nicht jedoch eine Nahwärmeversorgung) für das jeweilige spezifische Nutzerprofil ermöglicht. Dieses Tool wurde vor dem Hintergrund der widerstrebenden Interessen mehrfach kritisch gewürdigt und steht in Kürze zur allgemeinen Nutzung zur Verfügung. Der lokale Gasversorger wird dazu jeden einzelnen Haushalt persönlich beratend aufsuchen.

Im Rahmen der Projektvorbereitungen wurden auch Sicherheitskonzepte für den Umgang mit Wasserstoff im privaten Bereich entwickelt. So wurde Ende Oktober ein Verfahren durch DNV genehmigt, das über eine Druckhaltemessung zu Stillstandzeiten (alle 24 h) Wasserstoff-Leckagen in der Verrohrung oder Instrumentierung rechtzeitig aufdecken kann. Auch wurde vor Kurzem ein Verfahren zur mechanischen Ertüchtigung von Rohrleitungen durch Einziehen von Polyethylen-Rohren (Wandstärke 8 mm) in metallische Hüllrohre genehmigt.

**Fazit:** Im Hinblick auf die Versorgung eines ganzen Wohnquartiers bzw. Gewerbegebiets mit lokal grün hergestelltem Wasserstoff zur Wärme- und Strombereitstellung ist das Projekt samt einzelner Technologien auf das Thema Effizienzhaus Plus übertragbar. Von besonderem Interesse war dabei das Bürgerinteresse als Initiator für das H<sub>2</sub>-Konzept. Allerdings scheint es dem Versorgungsgebiet an der eindeutigen Investitionsbereitschaft für nachhaltige Energieeinsparmaßnahmen zu fehlen, das den Besitzern bzw. Erbauern von Effizienzhaus Plus Häusern eigen ist.

### 3. Hoogeveen (NL)

Das Demonstrationsprojekt in der Region Drenthe befindet sich seit 2020 in Vorbereitung. Es wird von der niederländischen Gasindustrie gemeinsam mit niederländischen Gasgeräteherstellern für die Gemeinde Hoogeveen durchgeführt und hat insgesamt 22 Projektpartner. Im Ortsteil Erflanden soll eine Bestandssiedlung mit 427 Wohnungen (4,4 Mio. Euro Projektförderung) auf Wasserstoffbrenner umgerüstet und in Nijstad-Oost eine Neubausiedlung mit aus dem Gasverteilnetz versorgten Wasserstoff-Heizgeräten versorgt werden. Der Umbauprozess für Erflanden soll in 2022 endgültig beschlossen werden. Für die Bewohner besteht die Zusage, dass in den nächsten 15 Jahren Wasserstoff nicht mehr kosten soll als Erdgas.

**Fazit:** Eine Übertragbarkeit der Projekteinsichten auf das Effizienzhaus Plus ist wegen des starken Gasnetzfokus der geplanten Maßnahmen eher nicht gegeben. Der Zweck des Hoogeveen-Projektes ist es zu untersuchen, inwieweit sich eine heute mit Erdgas versorgte Siedlung (Bestands- und neu errichtete Gebäude) auf eine Wärmeversorgung mit dezentralen und zentralen Wasserstoff-Kesseln, die bisher mit Erdgas betrieben wurden (Bestand) umstellen lassen.

### 4. Vårgårda (SE)

Die in einer Kleinstadt in Westschweden realisierte grüne Wasserstoffversorgung in einer energieautarken renovierten Altbausiedlung demonstriert die Umsetzbarkeit einer saisonalen autarken Wärme- und Stromversorgung mit Hilfe von Elektrolyse- und Brennstoffzellenaggregaten. Die Grundannahme auf Basis von ersten Analysen war, dass ein ausschließlich strombasiertes Energieversorgungskonzept weniger wirtschaftlich sein würde. Insbesondere mit einer entsprechend dimensionierten Kombination von saisonalem Wasserstoff-Pufferspeicher (30 bar) und Batteriespeicher lassen sich lokale Lastspitzen abfahren (Batterie) sowie Energie wirtschaftlich saisonal speichern. Die Siedlung besteht aus einer Anzahl alter MFH-Siedlungshäuser, deren Wert aufgrund des weit unzulänglichen Energiestandards stark gesunken war und die u.a. wertsteigernd auf einen neuen Standard hin renoviert werden sollten.

**Fazit:** Mit dem Ziel der völligen Energieautarkie übererfüllt die seit 2019 in Nutzung befindliche MFH-Siedlung in Vårgårda die Anforderungen des Effizienzhaus Plus-Standards. Grundsätzlich belegen die erzielten Wärme-/Stromversorgungskosten, dass dieses Ziel auch für nur geringe Zusatzkosten in einem renovierten Altbaubestand in Schweden zu erreichen ist. Eine Überprüfung der Übertragbarkeit aller Annahmen und betrieblichen Rahmenbedingungen des schwedischen Projektes auf deutsche Verhältnisse wäre daher ein sinnvoller Schritt. Der Einsatz der gezeigten Anlage dürfte sich insbesondere auf Regionen ohne vorhandenes Gas- oder Wärmenetz sowie auf ländliche Regionen mit schwachem Stromverteilnetz übertragen lassen.

### 5. Brütten (CH)

In 2019 hat die Umwelt Arena Schweiz in Brütten nahe Zürich ein autark betriebenes Mehrfamilienhaus für neun Familien mit Power-to-Gas-Anlage ohne jegliche Anschlüsse an die Energieversorgung errichtet. Die Energie stammt aus einer PV-Anlage, die auf dem Dach und an der Fassade montiert ist. Der Batteriespeicher ist in der Lage, Strom für zwei bis drei Tage, also kurzzeitig zu speichern. Für die saisonale Energiespeicherung wurde eine wasserstoffbasierte Power-to-Gas-Anlage vorgesehen. Außerdem wurde eine elektrische Wärmepumpe zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung installiert.

Der PEM-Druckelektrolyseur (30 bar) von Proton Onsite hat eine Leistung von 14,5 kW<sub>el</sub>, mit einer Wasserstoff-Produktionskapazität von 2 Nm<sup>3</sup>/h und liefert einen Wärmestrom von 8 kW<sub>th</sub> thermisch bei 35°C. Der in einem Erdbunker unterirdisch aufgestellte Wasserstoffspeicher besteht aus zwei 48 m<sup>3</sup> (Länge 9,2 m, Durchmesser 2,7 m und Gewicht 17 t) bzw. 72 m<sup>3</sup> (Länge 13,5 m, Durchmesser 2,7 m, Gewicht 24 t)

großen Wasserstoff-Druckbehältern aus Stahl für einen Betriebsdruck von maximal 30 bar. Die von Proton Motor gelieferte PEM-Brennstoffzelle hat eine Dauerleistung von 6,2 kW<sub>el</sub> elektrisch und 5,5 kW<sub>th</sub> thermisch bei 60°C Betriebstemperatur bei einem Wasserstoff-Eintrittsdruck von 2 bar. Messungen ergaben, dass trotz des prinzipiell möglichen hohen Gesamtnutzungsgrades von 90% mit Abwärmeintegration ohne die Wärmenutzung lediglich ein Gesamtwirkungsgrad Power-to-Gas-to-Power, also inklusive dem rückverstromten Wasserstoff, nur 18-19% beträgt. Der Langzeitspeicher ist so ausgelegt, dass er das nicht von der PV aufgebrachte Stromdefizit von 25 Tagen im Winter decken kann.

**Fazit:** Die energieautarke Auslegung des Brüttener Mehrfamilienhauses übererfüllt sogar die Anforderungen des Effizienzhauses Plus, das noch immer den Anschluss an das Stromnetz vorsieht, um entweder Strom zu beziehen oder überschüssigen dezentral hergestellten Strom an das Stromnetz abgeben zu können. Insofern würde die hier demonstrierte Auslegung sogar den Anforderungen für Gebäude in Insellage genügen.

## 6. H<sub>2</sub>-Revier Avenwedde in Gütersloh (NRW)

Im geplanten Revierprojekt geht es um die Nutzung von erneuerbaren Energien (Aufdach-PV, 3 benachbarte Windräder, Biogasnutzung) und grünem Wasserstoff (Elektrolyse und Biogas-Reformierung) zur Wärmebereitstellung für eine neu zu errichtende privat- und gewerbegenutzte Siedlung (120 Wohnungen, Kindertagesstätte, Büro- und Geschäftshaus) in Gütersloh Avenwedde. Die Energiespeicherkomponente besteht aus einem Wasserstoff-Niederdruckspeicher (30 bar) für maximal 360 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>, die Gebäudebeheizung soll mit Hilfe einzelner Brennstoffzellen-BHKW mit je 5 kW<sub>el</sub> elektrisch erfolgen, vier für die Kindertagesstätte und je eine für jeweils einen der 10 Wohnblocks (mit je 12 Parteien). Die technisch-wirtschaftliche Innovation des Konzeptes besteht in folgenden Aspekten:

- Installation siedlungszentraler Biogasreformer und Elektrolyseure zur Wasserstoffproduktion sowie gebäudenah bodenintegriert aufgestellter Brennstoffzellen-BHKW mit 2-Tage-H<sub>2</sub>-Speicherung. Optimierter Betrieb mit tages- und jahreszeitlicher Mischung aus PV-, Wind- und Biogasenergiebereitstellung sowie Biogasbezug aus einer 3 km entfernten Anlage mit Bilanzierung über das Gasnetz erfolgt.
- Verbindung des günstigsten technischen Konzeptes (Zentrale und dezentrale Aufstellung der Komponenten Elektrolyseur, Speicher, Methangasreformer, Brennstoffzelle, Spitzenlastbrenner z.T. in sog. „Ground Cubes“ (Produktname) als unterirdische Heizungsräume) mit den wirtschaftlichsten Betriebsbedingungen (maximale Fördermittelverwendung),
- Optimale Berücksichtigung des aktuellen Regel- und Förderwerkes durch Installation außerhalb der Gebäude bei gleichzeitiger Erfüllung der Energievorschriften (EnEV, KfW) sowie maximal möglicher (und wirtschaftlicher) Eigenstromversorgungsanteil.

**Fazit:** Wenn die Siedlung mit einer wasserstoffbasierten Wärme- und Stromversorgung so umgesetzt werden sollte, ist das Konzept bzw. die meisten Komponenten auf eine Anwendung auf den Effizienzhaus Plus-Standard übertragbar.

## 7. Esslingen (BW)

Die in Deutschland am weitesten gediehene und in ihrem Umfang auch bedeutendste Siedlung, in der Wasserstoff eingesetzt wird, findet sich in Esslingen. Das Projekt wurde von der Green Hydrogen Esslingen entwickelt. Der Großteil des verfügbaren regenerativen Stroms und des Biogases wird dabei direkt genutzt. Wasserstoff, hocheffizient in einer Wasserelektrolyse mit Wärmeauskopplung erzeugt, kommt dabei folgendermaßen zur Verwendung: „So wird überschüssiger Ökostrom in „grünen Wasserstoff“ um-

*gewandelt und für die Nutzung im Stadtviertel, in der Mobilität und der Industrie aufbereitet.*“ Das bedeutet, dass die Bedeutung von Wasserstoff in der hocheffizienten Bereitstellung von Regenerativenergie durch Speicherung zeitlich überschüssigen Regenerativstroms liegt, sowie auch im sektorenübergreifenden Einsatz im lokal ansässigen Gewerbe und der Mobilität (Tankstelle) Verwendung findet. Über eine entsprechende Trailerbefüllstation bzw. den Anschluss an das öffentliche Gasverteilnetz kann dieser grüne Wasserstoff auch rein oder zugemischt (Gasnetz) anderen Zwecken wie z.B. der Mobilität und der stofflichen Nutzung durch die Industrie nutzbar gemacht werden, soweit es die lokalen Überschüsse aus regenerativ erzeugter Elektrizität und aus der Biogasnutzung zulassen.

**Fazit:** Der Einsatz von Wasserstoff zur gekoppelten Erzeugung von Wärme, Kälte und Strom im Haushalts- und Gewerbebereich sowie sektorübergreifend für die Mobilität bzw. stoffliche Industrienutzung im Esslinger Quartier lässt sich in einzelnen Elementen auf eine Anwendung auf den Effizienzhaus Plus Standard übertragen.

## 8. Oldenburg (NI)

Das ENaQ-Projekt (Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg) wurde als Siedlungsenergiekonzept zur Planung, Umsetzung und zum Austesten und unter Berücksichtigung neuer Energie-, Digitalisierungs- und Sozialaspekte erfolgreich zur Förderung als Reallabor beantragt. Die Projektleitung obliegt dem OFFIS e.V. unter Beteiligung einer Zahl von Energie-, Hardwareentwicklungs- sowie Partnerinstitutionen wie z.B. der DLR (Institut für vernetzte Energiesysteme in Oldenburg). Das Projekt wird im Rahmen der Förderinitiative Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi, jetzt BMWK) und des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit rund 18 Mio. Euro gefördert. Es war zunächst geplant, dass Wasserstoff, mikrobakteriell methanisiert, zur Wärme- und Stromversorgung sowie zur Fahrzeugbetankung zum Einsatz kommen sollte. Dazu sollte ein Elektrolyseur (14 kW<sub>el</sub>) sowie eine Brennstoffzelle (5 kW<sub>el</sub>) zur Notstromversorgung verwendet werden, die ggf. durch einfache H<sub>2</sub>-Brenner zur Wärmebereitstellung ergänzt werden sollten.

Im Laufe der Projektvorbereitungen ergaben sich jedoch organisatorische Veränderungen bei den beteiligten Partnern und Nachrechnungen ergaben eine für die Beteiligten nicht akzeptable Wirtschaftlichkeit der Methanisierung und Wasserstoffversorgung. Die Verteuerung begründete sich auch durch die Anforderungen für einen sicheren Betrieb des geplanten H<sub>2</sub>-Arealnetzes. Als Folge brachen relevante Einsatzfälle für den Wasserstoff weg und die Partner einigten sich, dass die Wasserstoffversorgung nicht mehr ein integraler Bestandteil des Energieversorgungskonzeptes des Quartiers sein sollte.

**Fazit:** Auch mit dem jetzigen Stand der Umsetzung des mit Wasserstoff geplanten Energieversorgungskonzeptes, das zu einem kleinen Teil eine Wohnsiedlung im Bestand versorgen soll, sind die Planungs- und Nutzungserfahrungen für den Effizienzhaus Plus-Standard durchaus von Interesse. Als erster wichtiger Meilenstein wurden in 2021 die ersten Baugenehmigungen erteilt und das Energiekonzept in seinen Grundzügen bestätigt. Die sog. „Technikinsel“ wird in 2022 in Betrieb genommen. Ihr Ziel ist es als innovative Technikanlagen „unter freiem Himmel“ wichtige technische Einrichtungen inkl. der dezentralen Mobilitätsversorgung für das Quartier Helleheide zu demonstrieren. Die Technikinsel soll das Energiekonzept des Wohngebietes transparent und erlebbar machen und soll Interesse am Klimaschutz auf Quartiers-ebene wecken.

## 9. Kaisersesch (RLP)

Das SmartQuart-Projekt in Kaisersesch ist Teil des ersten deutschen Reallabors mit Essen (NRW) und Bebdurg als weiteren Städtepartnern. In dem Projekt soll die gesamte Breite der Sektorenkopplung von Gebäudewärme hin zu Gewerbe und Mobilität demonstriert werden. Viessmann als einer der maßgeblichen

Projektbeteiligten sieht die Ausrüstung des Rathauses Kaisersesch dabei als Chance, eigene 100% H<sub>2</sub>-ready Geräte weiterzuentwickeln und zur Marktreife hin zu erproben. Dazu sollen sowohl 100% H<sub>2</sub>-Brennwertgeräte (35 kW<sub>th</sub>) als auch 5 kW<sub>el</sub> Brennstoffzellen-BHKW in einer Kaskade zum Einsatz kommen. Außerdem wird das Unternehmen H<sub>2</sub>-Mobility eine H<sub>2</sub>-Tankstelle im Viertel errichten, die vom gleichen abgetrennten Erdgasverteiler-Teilnetz versorgt wird. Dieses Teilnetz dient auch als H<sub>2</sub>-Speicher, wobei ein Teil des Wasserstoffs in Form vom Wasserstoffderivat LOHC gespeichert werden soll. Die dafür erforderliche Anlagentechnik (katalytische H<sub>2</sub>-Anlagerung und Abtrennung) sind dazu zu installieren (siehe Abbildung 21).

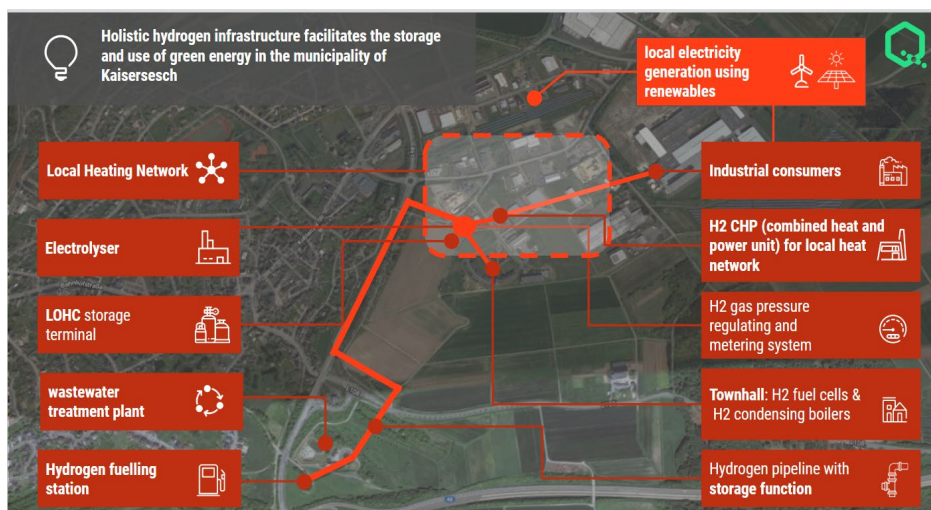


Abbildung 21: Übersicht über das SmartQuart-Projekt, Teilprojekt Kaisersesch (Quelle: Viessmann)

Das Projekt dient dem Nachweis der Lösung folgender Herausforderungen durch den Einsatz von grünem Wasserstoff (siehe auch Kap. 3.4.2):

- Kostengünstiger Beitrag zur Bedienung der deutschen Winterheizspitzenlast durch die perspektivische Speicherbarkeit von Wasserstoff im bestehenden Gasnetz, die in Deutschland um ca. einen Faktor 3 über der typischen Sommerspitzenlast liegt (damit könnte künftig das Stromnetz in der Aufgabe, je ca. 12-45 kW<sub>el</sub> Spitzenlast für den Betrieb von z.B. 5 Millionen elektrischen Wärmepumpen zusätzlich zu übernehmen, entlastet werden),
- Speicherfähigkeit des Stromnetzes ist ca. 6.000-mal geringer als die des Gasnetzes,
- Die Wärmebereitstellungskosten mit Hilfe von 5 Millionen elektrischer Wärmepumpen würden in 2030 jährlich ca. 11 Mrd. Euro höhere Kosten als über das Gasnetz verursachen und
- Senkung der anfänglichen Zusatzinvestitionen für die Umstellung auf CO<sub>2</sub>-freies Heizen auf ca. 200 Euro pro Haushalt.

Derzeit befindet sich das Projekt in seiner ersten Phase. Parallel dazu wird die erforderliche Gerätetechnik bei Viessmann entwickelt und soll ab 2023 im Reallabor Kaisersesch betrieben werden.

**Fazit:** Das SmartQuart-Projekt ist ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungs- und Vermarktungsstrategie der Fa. Viessmann für H<sub>2</sub>-Geräte, die mit 100 Volumenprozent Wasserstoff betrieben werden können. Auf Basis dieses Projektes sollen auch erste umfassende praktische Erfahrungen für die Kompatibilität der Geräte mit dem derzeit entstehenden Regelwerk für deren Betrieb gesammelt werden, auch eine Voraussetzung für einen späteren Einsatz im Effizienzhaus Plus. So ist damit zu rechnen, dass der Feldtest in Kaisersesch von 2023 bis 2024 dazu beiträgt, dass (a) bis 2025 marktreife H<sub>2</sub>-Geräte für reinen H<sub>2</sub>-Betrieb

eingesetzt werden können und (b) die Erfahrungen mit diesen ersten Geräten mit zunächst noch niedrigen Heizleistungen als Basis für die spätere Entwicklung auch von Geräten mit höherer Heizleistung für Gewerbe und die Siedlungsenergieversorgung genutzt werden.

## 10. Heide/Holstein (SH)

Im sogenannten Quarre100 in Heide (Rüsdorfer Kamp) sollen in einem Reallaborprojekt die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im gemischt privaten und gewerblichen Siedlungsbereich aufgezeigt werden. Motivation ist es an einem Ort mit kostengünstigem Wasserstoff (mit lokalem durch Windenergie onshore betriebenem Großelektrolyseur auf dem Gelände der Raffinerie Hemmingstedt) und einer geplanten frühen Wasserstoffinfrastruktur (H<sub>2</sub>-Verbindungsrohrleitung von ca. 4,5 km zwischen der Raffinerie und der Stadt Heide) sowie lokaler H<sub>2</sub>-Großspeicherpotenziale (Salzkaverne auf dem Raffineriegelände) vielfältige Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff zu demonstrieren. Neben der Wärme-, Kälte- und Stromerzeugung soll der Wasserstoff in der Raffinerie und lokalen Gewerbebetrieben sowohl stofflich genutzt als auch an einer nahen H<sub>2</sub>-Tankstelle für die Mobilität eingesetzt werden. Die Planung des Quarre100-Projektes und Einbettung in das norddeutsche Reallabor verspricht eine Wirtschaftlichkeit durch Fördermittel (BMBF und BMWi) sowie durch die Nutzung von wirtschaftlichen Synergien aus gemeinsamen Infrastrukturen mit einer entsprechenden Anlagenskalierung.

**Fazit:** Aufgrund der vielfältigen Projektverknüpfungen ist zum derzeitigen frühen Projektplanungszeitpunkt schlecht absehbar, inwieweit sich die Erkenntnisse aus der späteren Realisierung auf den Effizienzhaus Plus-Standard übertragen lassen.

## 11. Bochum-Weitmar (NRW)

Als Teil ihrer Strategie zum Einsatz von Wasserstoff im Siedlungswärmebereich setzt die bundesweit agierende Wohnbaugesellschaft Vonovia im Projekt Energiezentrale der Zukunft (EZZ) in Bochum-Weitmar für eine Bestandswohneinheit mit 81 Wohnungen in der Energiezentrale auch ein wasserstoffbasiertes Energieversorgungssystem ein. Neben einem Elektrolyseur wurde auch eine stationäre Brennstoffzelle mit 36 kW<sub>el</sub> Leistung vorgesehen, die Wärme und Strom zentral für die Siedlung bereitstellt und zusammen mit einer zu 25% von der hauseigenen PV-Dachanlage betriebenen elektrischen Wärmepumpe ca. 60% des Siedlungsenergiebedarfes abdeckt.

Über das konkrete Siedlungsprojekt hinaus befasst sich die Vonovia gemeinsam mit den Partnern E.ON, Evonik, RWE, thyssenkrupp und begleitet durch das Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, das RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung und die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, damit, die grüne Transformation an Rhein und Ruhr durch die Einführung der Wasserstofftechnologie im Bereich der Wärmeversorgung in NRW auch breiter zu unterstützen<sup>34</sup>. Dazu soll in einem gemeinsamen Projekt ein „sektorenübergreifender Zukunftsplan“ für eine Wasserstoffmodellregion in NRW entwickelt werden, mit dem Ziel der sektoralen Vernetzung des Gebäudeenergiesektors.

**Fazit:** Selbst, wenn die Vonovia-Siedlung in Bochum keine Überschussenergie liefert und damit nicht dem Effizienzhaus Plus-Standard entspricht, werden doch gleiche technische Komponenten eingesetzt, die auch im Effizienzhaus Plus eingesetzt werden könnten. Damit sind die dort gesammelten Erfahrungen auch für den Zweck dieser Studie von Relevanz.

---

<sup>34</sup> <https://www.dgap.de/dgap/News/corporate/vonovia-das-ruhrgebiet-als-pionierregion-der-wasserstoffwirtschaft-news-mit-zusatzmaterial/?newsID=1473722> (letzter Aufruf 08.10.2021).

## 12. Zusmarshausen (BY)

Sinn dieses Projektes ist die Demonstration der Machbarkeit einer vollständigen Energieautarkie auch im Einfamilienhaus-Segment durch die saisonale Energiespeicherung in einem Wasserstoff-Pufferspeicher (2 Flaschenbündel mit zusammen 600 kWh) in einem EFH im Passivhausstandard. Das realisierte Projekt wird vom ausführenden Handwerker des Elektroinstallationsgewerbes selbst bewohnt, die Wasserstoffanlage wurde allerdings von dem Berliner Unternehmen hps (Produktname picea) installiert, die Anlagenintegration in die komplexe Hausenergieversorgung (je 4 bis 4,5 km Leistungs- und Datenkabel) erfolgte durch den bewohnenden Handwerker. Das Gebäude ist komplett vom Stromnetz getrennt, selbst ein kleines batterieelektrisches Fahrzeug wird im Sommer von der heimischen PV-Anlage versorgt. Die Wasserstoffanlage wird durch einen großen Batteriespeicher mit 25 kWh als Backup und zur Abdeckung von Spitzenlasten unterstützt. Da die Wasserstoffanlage mit Elektrolyseur, H<sub>2</sub>-Pufferspeicher und Brennstoffzelle allerdings alleine 70.000 Euro Investitionskosten erfordert, dürfte eine Wirtschaftlichkeit für ein mittleres deutsches Einfamilienhaus eher nicht gegeben sein, obwohl sie die Kundenanforderungen an völlige Energieautarkie in einem Passivhaus vollständig erfüllt. Die Beschaffung und der Betrieb der Anlage erfordern daher einen zusätzlichen energiespezifischen Idealismus des Anlagenutzers.

**Fazit:** Das technische Konzept des EFH-Projektes Zusmarshausen kann die Spezifikation des Effizienzhaus Plus voll bzw. sogar übererfüllen. Aus Wirtschaftlichkeitsperspektive dürfte der Markt für wasserstoffbasierte Energiespeichersysteme in diesem Sektor wegen der Beschränkung auf „überzeugte Hausbesitzer“ eher beschränkt sein. Auf Grund des von der H<sub>2</sub>-vor-Ort-Initiative der deutschen Gasverteilnetzbetreiber skizzierten eher späten Anschlusses des deutschen Südostens an ein übergeordnetes hundertprozentiges H<sub>2</sub>-Transportnetz (DVGW, 2020), könnten sich aber gerade im Süden und Südosten Deutschlands interessierte Endnutzer identifizieren lassen.

## 13. Augsburg

Die Augsburger Siedlung ist das erste (=Pilot)Projekt der Exytron-Technologie. Diese basiert auf einem Patent zur katalytischen Methanisierung (siehe Kap. 3.4.2) und sieht einen Gesamtsystemwirkungsgrad von 90% mit der Nutzung von methanisierendem Wasserstoff (mit CO<sub>2</sub> im Kreislauf) vor. Dieser hohe Wirkungsgrad kann dadurch erzielt werden, indem der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff wie auch das bei der Verbrennung entstehende CO<sub>2</sub> gezielt verdichtet und zwischengespeichert werden. Durch die Verbrennung eines CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub>-Gemisches wird Stickstoff im Abgas vermieden, wodurch die beschriebene hohe Effizienz erreicht wird. Die Wirtschaftlichkeit des Konzeptes ist auch ein Ergebnis der vor der Maßnahmenumsetzung erfolgten energetischen Gesamtanierung der MFH-Anlage auf den KfW 100 Standard in 2017. Die Siedlung ist nicht völlig energieautark und es werden je nach Bedarf (ungenügende PV-Kapazität) Strom und Erdgas aus dem Netz beigemischt.

**Fazit:** Die Demonstrationsanlage erreicht Passivhaus Plus Standard. Das vorgeschlagene Konzept lässt sich von Mehrfamilienhäusern auf Quartiere oder ganze Stadtteile übertragen („Energiefabrik“). Je nach Auslegung (REG-Überschuss) ist eine Stromnetzanbindung möglich und zum Lastausgleich auch sinnvoll, jedoch nicht erforderlich. Ziel der Exytron aus Wirtschaftlichkeitsaspekten (Skalierung) ist die Realisierung von Quartieren oder ganzen Stadtteilen.

## 14. Haren (NI)

Im Münsterland ist eine ambitionierte und regionsübergreifende regionale Wasserstoffinitiative geplant. Diese beinhaltet im Rahmen des europäisch geförderten Projektes SEREH (Smart Energy Region Emmen (NL) und Stadt Haren an der Ems (DE) auch ein gesamtheitliches Energiekonzept, in dem grenzüberschrei-

tend die Versorgung bzw. Verknüpfung unterschiedlicher Energiesektoren mit Hilfe von Power-to-X gelingen soll. Auch wenn der regionale Fokus zunächst beim Mobilitätssektor liegen soll, sollen später auch Haushalte an die entstehende Infrastruktur angebunden werden.

### 15. Bremen (HB)

Das in Bremen-Grohn geplante Sanierungs- und Umnutzungsprojekt BUNTE WOLKE sieht die Integration von Wasserstoff als lokalem Energieträger und Speichermedium in einer bestehenden Gewerbeansiedlung vor. Neben einer Produktion aus Erdgas via Pyrolyse (mit festem Kohlenstoff als Nebenprodukt) soll Wasserstoff auch via Elektrolyse (mit Sauerstoff als Nebenprodukt) zur objektbezogenen Strom-, Wärme- und Kälteenergiebereitstellung verwendet werden. Der Wasserstoff soll unter Druck gespeichert, in Brennstoffzellen verwendet werden und an einer Tankstelle auch der Mobilität zur Verfügung stehen.

## 3.3 Gutachten und Szenarienanalyse

Mögliche Erwartungen an die Nutzung und zukünftige Rolle des Wasserstoffs in einem integrierten Energiesystem sind mittlerweile in einer Vielzahl von Studien, Gutachten und Szenarien beschrieben worden. Die folgende Zusammenstellung fasst die verschiedenen Aussagen zusammen und stellt sie vergleichend gegenüber<sup>35</sup>. Dabei sollte beachtet werden, dass die zu den einzelnen Studien stichpunktartig aufgelisteten Punkte die wesentlichen Aussagen der jeweiligen Studien lediglich stark verkürzt wiedergeben. Eine Wertung der Aussagen folgt hier nicht. Ein besonderes Augenmerk in dieser Metastudie wurde auf den Gebäudesektor gelegt.

Prognos; Öko-Institut et.al. (im Auftrag von Agora): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von minus 65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals; 11/2020

- Die Wärme in den Gebäuden wird bevorzugt mittels Wärmepumpenheizsystemen oder Fernwärme bereitgestellt; Aufgrund klimapolitischer Zwänge und gesetzlicher Vorgaben ist der Einsatz von fossilen Brennstoffen wie Heizöl oder Erdgas eher eine Ausnahme und wird vermutlich in privaten Haushalten spätestens 2050 auslaufen; Es wird weiterhin angenommen, dass ab 2025 keine neuen Gaskessel mehr in den Markt gebracht werden;
- Wasserstoff übernimmt ca. 25% der Fernwärmebereitstellung in 2050
- Hauptszenario Klimaneutralität 2050 (in der Studie von den Autoren mit „KN2050“ bezeichnet) mit THG-Emissionsminderung Deutschlands von -65% bis zum Jahr 2030: „Strombasierte Energieträger wie erneuerbar erzeugter Wasserstoff oder synthetisches Gas werden im Hauptszenario KN2050 nicht im Gebäudesektor eingesetzt. Dies ist auf die hohen Kosten für diese Energieträger zurückzuführen. Emissionsfreie Wärme kann kostengünstiger über elektrisch betriebene Wärmepumpen, Wärmenetze oder Biomasse bereitgestellt werden.“

---

<sup>35</sup> Gegenüber dem Zeitpunkt der Erstellung der hier ausgewerteten Gutachten und Analysen wurden energie- und klimapolitische Zielstellen angepasst. So wurde beispielsweise das Klimaziel Klimaneutralität auf 2045 vorgezogen. Die tabellarischen Zusammenfassungen spiegeln also lediglich die Rahmenbedingungen zum Zeitpunkt der Erstellung wider.

Gerhardt, N. et. al (Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE): „Studie zum Einsatz von H<sub>2</sub> im zukünftigen Energiesystem mit dem besonderen Fokus auf die Gebäudewärmeversorgung“; Studie im Auftrag des IZW e.V. Informationszentrum Wärmepumpen und Kältetechnik (N. Gebhardt et. al, 2020)

- Wird Erdgas in der dezentralen Gebäudebeheizung das Erdgas (Gaskessel) durch Wasserstoff lediglich substituiert, erhöht dies den gesamten sonstigen H<sub>2</sub>-Bedarf deutlich um schätzungsweise plus 20 bis 50%. Die so erhöhte Nachfrage führt zu höheren Beschaffungskosten, da aufgrund beschränkter Erzeugungskapazitäten und begrenzter erneuerbarer Strommengen Wasserstoff nicht in ausreichendem Maße emissionsfrei (grün) bereitgestellt werden kann. In der Folge wäre der Import von grünem Wasserstoff notwendig.
- Bereitstellung von -Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau zur dezentralen Gebäudebeheizung mit Hilfe von elektrischen Wärmepumpen erfordert wesentlich weniger Elektroenergie aus erneuerbaren Quellen (minus 500 bis 600%) als die Erzeugung und Verbrennung von H<sub>2</sub>; außerdem sinkt die Importnachfrage nach H<sub>2</sub>.
- Im Sinne eines Effizienzrankings (bezogen auf die notwendigen Stromerzeugungskapazitäten) ist der Einsatz von H<sub>2</sub> zur dezentralen Gebäudebeheizung (Verbrennung) die schlechteste Einsatzoption im Vergleich z.B. zur stofflichen Nutzung in der Industrie.
- Wasserstoff hat im Vergleich zu Erdgas (Methan) einen geringeren Brennwert. Wird also H<sub>2</sub> in bestehende Gasnetze eingespeist, um Erdgas zu ersetzen, müssen größere Gasvolumen transportiert werden. Es ist demnach auch nicht zulässig, aus den Volumenanteilen der Beimischung von Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze auf entsprechend gleichwertige Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zu schlussfolgern. Die Einspeisung von Wasserstoff in die Gasnetze hat eine geringere emissionsmindernde Wirkung als es die Volumenanteile vermuten lassen (20% Volumenanteil führt nicht zu 20% Emissionsminderung).

BMWi: Die Nationale Wasserstoffstrategie (BMWi, 2020)

- Gasförmige Energieträger werden im Gebäudebereich trotz vielfältiger Effizienz- und Elektrifizierungsbemühungen auch langfristig eingesetzt.
- Im Gebäudebereich in Wohn- und Nichtwohngebäuden wird im Anreizprogramm Energieeffizienz (APEE) seit 2016 die Anschaffung hocheffizienter Brennstoffzellenheizgeräte gefördert. Diese Förderung soll fortgesetzt und bei Bedarf auch verstärkt werden.

BMWi: Dialog Klimaneutrale Wärme. Zielbild, Bausteine und Weichenstellungen 2030/2050 (BMWi, 2021)

- Zusammenfassung der Erkenntnisse aus Nationaler Wasserstoffstrategie und erster Bilanz des Gasdialogs 2030: Wasserstoff und synthetische Brennstoffe spielen in einem klimaneutralen Energiesystem eine wichtige Rolle. Wasserstoff ist ein Energiespeicher, der angebotsorientiert und flexibel erneuerbare Energien speichern und einen Beitrag zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage leisten kann. Wasserstoff ist neben elektrischen Wärmepumpen und Elektromobilität ein wesentliches Element der Sektorenkopplung. In den Bereichen, in denen Strom aus erneuerbaren Energien nicht direkt eingesetzt werden kann, können klimaneutraler Wasserstoff und seine durch nachgelagerte Weiterbearbeitung und Umwandlung z. B. Methanisierung entstehenden Folgeprodukte ( ) neue Dekarbonisierungspfade eröffnen.
- Langfristig wird es Anwendungen geben, die nicht vollständig elektrifiziert werden können oder für die trotz aller Energieeinsparungen und Effizienzbestrebungen keine Alternativen verfügbar

sind. Hier sind CO<sub>2</sub>-freie bzw. -neutrale Energieträger („grüne Moleküle“) ein fester Bestandteil der Energiewende. Dies betrifft insbesondere die Industrie (Direktreduktion von Eisenerz, Grundstoffindustrie, Prozessdampf), den Luft- und Schiffsverkehr, ggf. den Schwerlastverkehr, weil hier die Lücke zur Wirtschaftlichkeit aus heutiger Sicht am geringsten ist.

- Bei der Produktion von Prozesswärme in der Industrie können Wasserstoff und synthetische Brennstoffe eine wichtige Rolle übernehmen. Eine zentrale Rolle spielen Wasserstoff und andere synthetische Brennstoffe bei der Dekarbonisierung von Prozessen der Stahl-, Zement-, Chemie-, Kalk-, Ziegel- und Kupferindustrie.
- Wasserstoff-betriebene KWK-Anlagen könnten eine Rolle in Wärmenetzen spielen. Im Bereich der dezentralen Wärmeversorgung sehen viele der untersuchten Szenarien dagegen keinen oder nur einen relativ geringen Beitrag von Wasserstoff, Power-to-Gas und Power-to-Liquids für die Deckung des Wärmebedarfs in Gebäuden. PtG setzt sich in diesen Szenarien nicht aus wirtschaftlichen Gründen durch, sondern weil Restriktionen bei der Gebäudesanierung vorausgesetzt werden. Gesamtwirtschaftlich werden hier jährliche Zusatzkosten von acht bis zwölf Mrd. Euro geschätzt, wenn statt ambitionierter Sanierung die Klimaschutzlücke durch Power-to-Gas gedeckt wird.

Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit (SPD, B90/Grüne, FDP, 2021)

Geplante Vorhaben sind:

- Gründung einer Europäischen Union für grünen Wasserstoff; schnelle Umsetzung des IPCEI Wasserstoff und finanzielle Förderung von Investitionen in den Aufbau einer Wasserstoffnetzinfrastruktur mit dem Ziel, bis 2030 Leitmarkt für Wasserstofftechnologien zu werden, einschließlich ambitioniertes Update der nationalen Wasserstoffstrategie in 2022.
- Neben dem Ausbau der Infrastruktur sollen die Ziele des Aufbaus von Elektrolyseleistung deutlich erhöht (rund 10 Gigawatt im Jahr 2030), europäische und internationale Klima- und Energiepartnerschaften (auch Importpartnerschaften) für klimaneutralen Wasserstoff und seine Derivate auf Augenhöhe etabliert und Quoten für grünen Wasserstoff in der öffentlichen Beschaffung eingeführt werden, um Leitmärkte zu schaffen. In Deutschland soll die Produktion von grünem Wasserstoff gefördert werden. Im Interesse eines zügigen Markthochlaufs gehören dazu zukunftsfähige Technologien auch dann, wenn die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff noch nicht ausreichend sichergestellt ist.
- Der Einsatz von Wasserstoff ist nicht auf bestimmte Anwendungsfelder begrenzt. Grüner Wasserstoff sollte vorrangig in den Wirtschaftssektoren genutzt werden, in denen es nicht möglich ist, Verfahren und Prozesse durch eine direkte Elektrifizierung auf Treibhausgasneutralität umzustellen.
- Die Wasserstoffregulatorik soll technologieoffen ausgestaltet werden.
- Beim Import von Wasserstoff sollen klimapolitischen Auswirkungen beachtet und faire Wettbewerbsbedingungen für unsere Wirtschaft sichergestellt werden.
- Eine einheitliche Zertifizierung von Wasserstoff und seinen Folgeprodukten sollte gestärkt werden.

PtJ: Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff; 08/2021

- H<sub>2</sub> kann fossile Brennstoffe substituieren.
- Der technische Entwicklungsstand für den stationären Einsatz von H<sub>2</sub> in Haushalten kann anhand der sogenannten TRL (Technology Readiness Level) bewertet werden. Demnach gilt: H<sub>2</sub>-Feuerungsanlagen, H<sub>2</sub>-BHKW und H<sub>2</sub>-Speicher sind den TRL (Technology Readiness Level) 6-8 zuzuordnen, d. h. es gibt Demonstrationsanlagen und die Technologie wird für die Anwendung in Energiesystemen weiterentwickelt.); bei stationären H<sub>2</sub>- Brennstoffzellen sind je nach Hersteller stark unterschiedliche technologische Reifegrade erreicht: von der Vorentwicklung bis zur systemischen Anwendung
- Es besteht weiterer Forschungsbedarf zu Brennern; Brennstoffzellen- und KWK-Systeme sowie den Umgang mit wechselnder Brennstoffbeschaffenheit (Regelung/Steuerung). Die Forschungen sollten durch Feldtests begleitet werden. Außerdem sind die zugehörigen Bewertungskriterien weiterzuentwickeln!

#### Nationaler Wasserstoffrat: Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021 – 2025; 07/2021

- Einsatz von klimaneutralen Gasen ist eine der möglichen Dekarbonisierungsoptionen für den Gebäudesektor.
- Technologische Vorfestlegungen für Dekarbonisierungspfade des Gebäudesektors, z. B. durch die Forderung nach dem Einsatz von Wärmepumpen und der damit einhergehenden Elektrifizierung der Gebäudewärmeversorgung sollten vermieden werden. Fernwärme oder der Einsatz dekarbonisierter gasförmiger Energieträger sind weiterhin sinnvolle Optionen
- Fördersystematik sollte angepasst werden (z. B. für H<sub>2</sub>-ready-Gasgeräte) zur Vermeidung von Lock-In-Effekten.
- Diskriminierungsfreier Zugang zu H<sub>2</sub>-Infrastruktur (flexibles Entry-Exit-Modell).

#### Gatzen, Chr., Lenz, A.-K. (frontier economics): Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Wärmesektors; Studie für den DVGW (Gatzen & Lenz, 2021)

- Gasförmige Brennstoffe (Wasserstoff, synthetisches Methan, Biomethan) sind auch in Zukunft erforderlich, da trotz energetischer Gebäudesanierungen (Effizienzsteigerung) eine vollständige Elektrifizierung der Wärmeversorgung mittels elektrischer Wärmepumpen insbesondere für größere Bestandsgebäude als unwahrscheinlich angesehen wird.
- Gasförmige Brennstoffe ermöglichen die Speicherung und infrastrukturell vorteilhafte Abdeckung von Spitzenlasten (keine Vorhaltung großer Stromspitzenlastsicherheiten).
- H<sub>2</sub> (grün) kann einheimisch nicht in dem benötigten Umfang produziert oder importiert werden. Mit Blick auf mögliche Importabhängigkeiten ist die Beschaffung des Wasserstoffs zu organisieren und abzusichern.
- Einspeisung von H<sub>2</sub> in bestehende Gasnetze erfordert nur geringe Systemintegrationskosten mit sofortiger emissionsmindernder Wirkung; Lokale H<sub>2</sub>-Produktion zur dezentralen Wärmeversorgung ist demgegenüber keine relevante Option (anders als in Industrie und Schienenverkehr).
- Unter ungünstigen Rahmenbedingungen (Wintertag) H<sub>2</sub>-Verbrennung im Kessel effizienter als Wärmepumpe (unter Beachtung der Vorkette inkl. Speicherung).

Bothe, D., Janssen, M. (frontier economics): Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt; Kurzstudie für Viessmann Climate Solutions (Bothe & Janssen, 2021)

- Einsatz von Wasserstoff als Baustein (wegen Heterogenität des Wärmemarktes) der Dekarbonisierung des Wärmemarktes befeuert auch den generellen Hochlauf des Wasserstoff-Marktes.
- Wasserstoff als speicherbarer Energieträger im saisonalen Wärmemarkt sinnvoll.
- Bestehendes Gasnetz versorgt Endkunden mit (grünem) Wasserstoff; auf diese Weise lassen sich erneuerbare Energien auch in Bestandsgebäuden besser nutzen.
- Haushaltsgasverbraucher müssen „H<sub>2</sub> ready“ gemacht werden.

EHI (Association of the European Heating Industry): EHI position paper on the use of green gases for heating; 02/2021

- Bedarf an dekarbonisierten gasförmigen Brennstoffen für die Wärmebereitstellung auch in 2050 noch signifikant trotz aller Elektrifizierungsbemühungen.
- Bis 2029 Einführung der H<sub>2</sub>-ready Wärmeerzeuger (Kessel, KWK, BZ und Gas-WP).
- Die bestehenden regulatorischen Festlegungen zur Umweltverträglichkeit (Ökodesign) sowie zur Energieeffizienzkennzeichnung (Energy Labelling) von Heizgeräten sind anpassen, um die Eignung der Heizgeräte für den Einsatz mit Gasen aus Erneuerbaren Energien herausstellen zu können („hydrogen-ready appliance“).
- Technologiemix für die Wärmeversorgung zulassen.

DVGW: H<sub>2</sub> vor Ort - Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen; 11/2020

- CO<sub>2</sub>-Minderungen im Gebäudebestand mit geringen Kosten umsetzbar z.B. durch Beimischungen klimaneutraler Gase (wie etwa Biomethan und lokal erzeugter H<sub>2</sub>).
- abschnittsweise Umstellung der Gasverteilnetze auf Wasserstoff oder andere klimaneutralen Gase führt zu vollständiger Dekarbonisierung.
- Endnutzer/Gebäudeeigentümer werden entlastet (keine aufwändigen Investitionen im Gebäudebereich erforderlich).

Fraunhofer IEE: The limitations of hydrogen blending the European gas grid (J. Bard, N. Gerhardt, 2022); im Auftrag der European Climate Foundation (ECF; <https://europeanclimate.org/>)

- Das flächendeckende Zumischen von Wasserstoff in bestehende Erdgasnetze ist technisch zwar kurzfristig möglich, führt aber aufgrund begrenzter Zumischungsraten nur zu geringen Emissionsvermeidungseffekten (Volumenanteil 20%; Emissionsvermeidung <7%).
- Die Umstellung des gesamten Erdgasnetzes auf einen Wasserstoffanteil von 100% dauert auch aufgrund der begrenzten Erzeugungskapazitäten bis nach 2040 und damit zu lange. Auf diese Weise wird die klimapolitisch notwendige Abkehr vom Energieträger Erdgas in der Fläche nicht motiviert; stattdessen werden gegenwärtig Investitionen in eine noch lange klimaschädlich wirkende Infrastruktur getätigt.
- Wasserstoff sollte statt in der Fläche gezielt dort eingesetzt werden, wo eine Substitution von Gasen durch Elektroenergie nicht möglich ist.

Si (SHK-Fachmagazin): Zukunft Wasserstoffheizung – Lösungen für die Energiewende; 05, 06 und 07-08/2021

- Energieträger Gas mit langer Perspektive (auch nach 2050).
- Vorhandene Infrastrukturen können weiterverwendet werden, Privathaushalte lassen sich mit geringen Investitionen auf den Betrieb mit H<sub>2</sub> umstellen.
- Es wird die Beimischung von Wasserstoff in bestehende Erdgasinfrastrukturen erprobt, um Erfahrungen auch in Hinblick auf höhere Wasserstoffanteile >20% zu gewinnen. Es könnte lokal auch reine Wasserstoffnetze geben.
- Gasverbrauchende Geräte mit automatischer Erkennung der Gasqualitätsschwankungen ausstatten und Geräteeinstellungen ohne Effizienzverlust vornehmen (optimale Verbrennungsqualität); derartige Verbrennungsregelsysteme sind am Markt verfügbar, z. B. IoniDetect (Fa. Vaillant).
- Entwicklung sicherer Brennersysteme notwendig: Flammengeschwindigkeit; Flammenüberwachung (Ionisationstrom gering).

Rongé, J., Francois, I.: Use of hydrogen in buildings. (Rongé & Francois, 2021)

- Gasförmige Energieträger werden weiterhin für die Gebäudeheizung eingesetzt werden: Substitution fossiler Gase ist notwendig insbesondere als kostengünstige Option in Bestandsgebäuden.
- Wärmepumpen sind primärenergetisch am effizientesten, jedoch begrenzen H<sub>2</sub>-befeuerte Kessel den Elektroenergiebedarf.
- Nutzung von H<sub>2</sub> zur dezentralen Wärmeversorgung ersetzt nicht die Effizienzbemühungen am Gebäude.
- Die lokale dezentrale H<sub>2</sub>-Produktion an Gebäuden führt zu geringen Primärenergiebedarfen; hauseigene Elektrolyse und autarke Lösungen sind unwirtschaftlich, d.h. Netzanbindung sinnvoll.
- Lokale Wasserstoffspeicherung ist keine kostengünstige Alternative gegenüber der Anbindung an ein H<sub>2</sub>-kompatibles Gasnetz (Annahme: Das Gasverteilnetz existiert bereits).

## 3.4 Die Akteure

Wichtige Akteure, die bei der Entwicklung und Vorbereitung eines Einsatzes von Wasserstoff in der Gebäudewärmeversorgung privat oder gewerblich eine Rolle spielen, finden sich sowohl im Bereich der Gasversorger (Transport- und Gasverteilnetz), als auch bei den Anlagenherstellern oder Systemintegratoren, den Vertretern der Wohnungswirtschaft und vereinzelt im installierenden Heizungs- und Sanitärhandwerk. Die Akteursgruppen mit ihren Entwicklungsinteressen bzw. Motivationen werden im Folgenden anhand konkreter Konzepte kurz vorgestellt.

### 3.4.1 Gasversorger

Als Bestandteil ihrer CO<sub>2</sub>-Reduktionsstrategien haben sich die deutschen Gastransportnetzgesellschaften OGE und ONTRAS in den letzten Jahren im Konzert mit 21 weiteren europäischen Partnerunternehmen aktiv für eine Umstellung des bestehenden Gasnetzes von Erdgas auf Wasserstoff und Biogas eingesetzt

(J. Jens, A. Wang, K. van der Leun, D. Peters, M. Busema, 2021) (EHB, 2022). Für sie spielt jedoch die private und gewerbliche Wärmeversorgung mit Wasserstoff eine – im Vergleich zu den Gasverteilunternehmen – geringere Rolle, da das Gastransportnetz ja auch alle anderen Energiesektoren mit Gas versorgt. Im Vergleich zu anderen Studien geht die Gastransportindustrie selber von einem Wasserstoffeinsatz in der EU27 plus Großbritannien (UK) in 2050 von nur noch 150 TWh<sub>H2</sub>/a aus, während andere Studien wie die des FCH-JU und der Europäischen Kommission eher 429 TWh<sub>H2</sub>/Jahr (EC, 2021) bzw. 660 TWh<sub>H2</sub>/Jahr (EU, 2019) annehmen. Im Technologiemix für den Wärmebereich kommt dabei der Gas-/Strom-Hybridwärmepumpe eine besondere Rolle zu, in 2050 jedoch mit nur einem geringen Gasanteil von ca. 20%, insbesondere zur Abdeckung von Spitzenlasten.

Die Gasverteilunternehmen haben einen viel fokussierteren Blick auf die künftige Struktur der Wärmebereitstellung in Privathaushalten und im Gewerbe, da diese ihren heutigen Hauptkundenstamm bilden. Es ist daher verständlich, wenn die Gasverteilunternehmen und damit auch viele kommunale Energieversorger auf Basis eines gut ausgebauten bestehenden Gasverteilnetzes an einer auch künftig wichtigen Rolle der Gasversorgung im Wärmebereich interessiert sind. Neben den Wasserstoff-Aktivitäten einzelner Verteilnetzbetreiber wie Westnetz<sup>36</sup> haben die Interessenverbände der Gasverteilnetzbetreiber BDEW („Roadmap Gas“ (BDEW, 2020a) und „Stellungnahme zur Marktkonsultation der Bundesnetzagentur zur Regulierung von Wasserstoffnetzen“ (BDEW, 2020b)), DVGW („H<sub>2</sub> vor Ort“ (DVGW, 2020)) und der Verband Kommunaler Unternehmen VKU („Positionspapier Strategie zur Transformation der Gasverteilnetze“ (VKU, 2021)) jeweils aktuelle Positionsberichte zum Thema veröffentlicht.

Ein für die Verbreitung von Effizienzhaus Plus-Gebäuden mit dezentraler Wasserstoffherzeugung herausragender Aspekt ist die einer möglichen Anbindung an das Gasverteilnetz. Diese macht natürlich nur dann Sinn, wenn das entsprechende Objekt einfach vom Verteilnetz aus erschließbar ist<sup>37</sup> und die Gasbeschaffenheit der dezentralen Wasserstoffproduktionsanlage (Elektrolyse) mit dem Gasnetz kompatibel ist, sich der dezentral produzierte Wasserstoff also den Gasnetzqualitätsanforderungen entsprechend einspeisen lässt. Grundsätzlich hat die Gaswirtschaft ihr Interesse an einer dezentralen Einspeisung aus erneuerbarem Strom hergestelltem Wasserstoff („H<sub>2</sub> vor Ort“ (DVGW, 2020)) erklärt. Sie beruft sich dabei unter anderem auf eine detaillierte Analyse der Power-to-Gas-Anlagen- und Anlagenleistungspotenziale, die gerade im kleinen Leistungsbereich (MFH, Quartier) eine Vielzahl an möglichen Anlagenstandorten, regional strukturiert nach Versorgungsaufgaben (Kombination aus Aufkommen erneuerbarer Energie sowie Strom- und Gasnetzlast) identifiziert. Die erzeugten Power-to-Hydrogen (PtH<sub>2</sub>)-Leistungen und die Anzahl der zu installierenden Anlagen teilen sich nach Anlagengrößen bis 500 kW (Klasse 10...50 kW: insgesamt 27 MW in insgesamt 1.260 Anlagen; Klasse 50...100 kW: insgesamt 16 MW in insgesamt ca. 420 Anlagen; Klasse: 101...500 kW: insgesamt 106 MW in insgesamt ca. 415 Anlagen) auf (Bezugsjahr 2030) [(DVGW, 2019)]

---

<sup>36</sup> Die Westnetz AG engagiert sich gemeinsam mit ihrem Mutterkonzern E.ON in verschiedenen Wasserstoff-Projekten: z.B. Beteiligung am SmartQuart Reallabor mit einer Wasserstoffanwendung in Kaiserseich; Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur mit vorhandenem Erdgas-Asset; Energieautarke Betriebsstätte durch Sonnenstrom und grünen Wasserstoff; hydro-e-hub – Wasserstoff und Strom für die Mobilität, neue Leistungsflexibilität für Verteilnetze; mobile dezentrale Odorierung von Erdgas mit H<sub>2</sub>-Anteilen; Wasserstoffdetailstudie für Düren und Wasserstoffinformationszentrum im Kreis Düren (siehe auch: [aus-ideen-ensteht-zukunft-innovationsbericht-2021.pdf](#)).

<sup>37</sup> Nach (VKU, 2017) (VKU, 2021) sind in Deutschland heute 33% der Haushalte (oder 12,5 Millionen Haushalte und 25 Millionen BürgerInnen) direkt durch das Erdgasnetz erschlossen und unter Berücksichtigung des Fernwärmenetzes ca. 50% (14 Millionen Haushalte, 42 Millionen Bürgerinnen und Bürger).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Deutschland, im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern wie z.B. Großbritannien, eine hohe Variantenvielfalt von Ansätzen zur Transformation des Gasverteilnetzes in Richtung CO<sub>2</sub>-Neutralität und damit Flexibilität für die einzelnen ca. 700 nachgelagerten Gasverteilnetzbetreiber vorgeschlagen wird. Diese Ansätze reichen von der H<sub>2</sub>-Beimischung in variablen (aber im täglichen Betrieb konstanten) Zumischraten (typisch 5-30 Volumenprozent) über die Nutzung von Biomethan bis hin zu einer vollständigen Umstellung auf Wasserstoffbetrieb. Letztere stellt aus Sicht der Gasnetzbetreiber auch die langfristig tragfähigste Option dar (DVGW, 2020).

### 3.4.2 Anlagenentwickler

Der Baukasten wasserstoffspezifischer Komponenten, die im Bereich der Gebäudebeheizung und Energieversorgung eine Rolle spielen könnten, ist in Abbildung 22 zusammengefasst dargestellt.

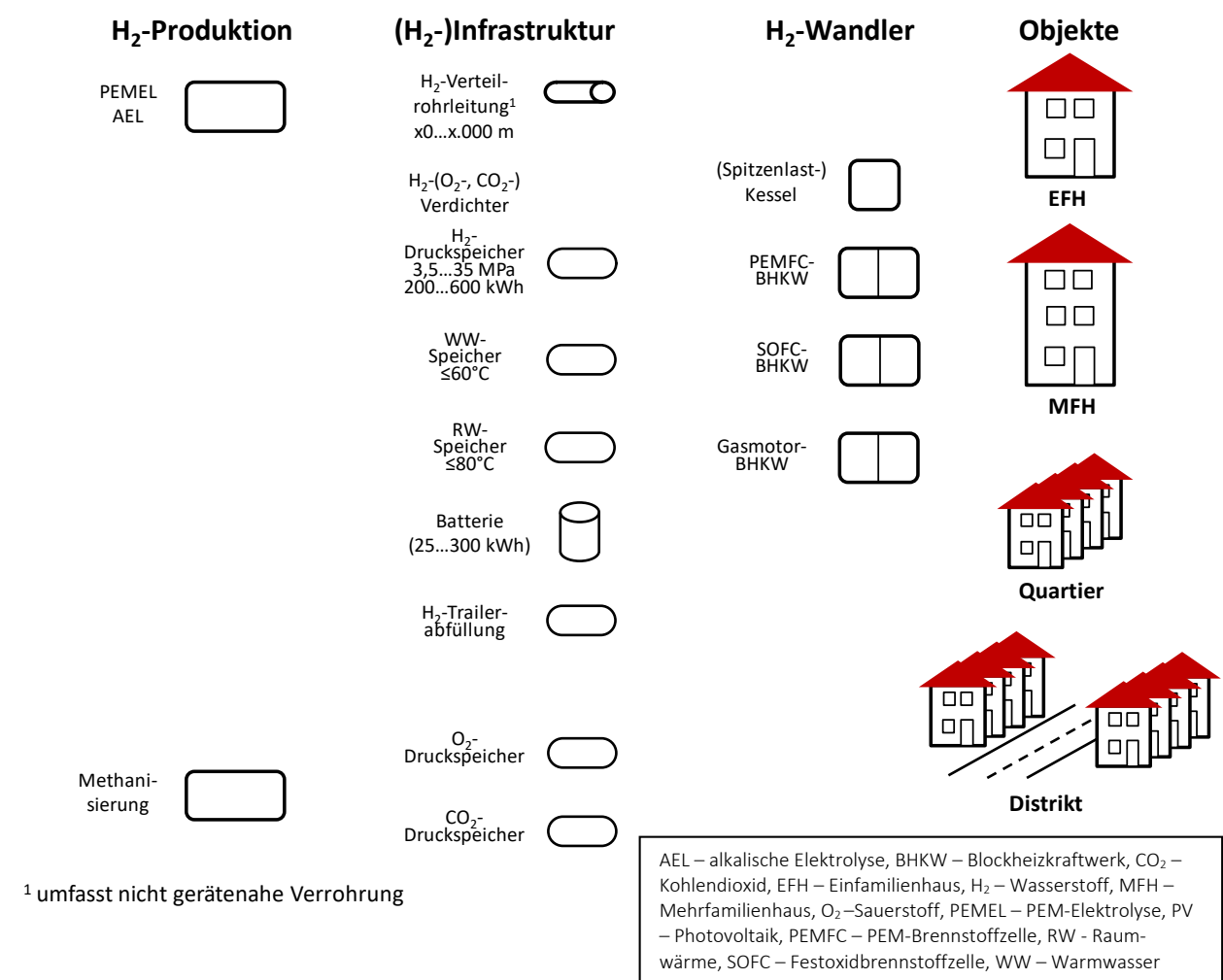


Abbildung 22: Übersicht über wasserstoffspezifische Komponenten zur Gebäudeenergieversorgung ohne Anlagensteuerung

### Viessmann

Die Firma Viessmann Climate Solutions SE bezeichnet ihre Entwicklungsaktivitäten an Wärmeerzeugern sowie Brennstoffzellen für den Wasserstoffeinsatz als hochinnovativ und kompromisslos. Dabei bereitet sie sich auf das gesamte vom DVGW in (DVGW, 2020) angekündigte Verwendungsspektrum von der H<sub>2</sub>-

Zumischung kleiner Mengen, über die variabel zunehmende Zumischung als auch insbesondere den reinen 100% Wasserstoffbetrieb vor. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass Viessmann gleichzeitig auch das gesamte Spektrum von Heizenergiegeräten für den privaten und gewerblichen Einsatz in einem breiten Leistungs- und Typspektrum anbietet. Dazu zählen z.B. auch elektrische Wärmepumpen und ein eigenentwickeltes Batteriespeichersystem. Viessmann ist überzeugt, dass es neben einer Zunahme des Einsatzes von Direktstrom im Gebäudewärmebereich auch weiterhin der Nutzung von Energiegasen und insbesondere grünem Wasserstoff bedarf. Viessmann versteht sich dabei als ein typischer Branchenvertreter der heute eher privatwirtschaftlich aufgestellten deutschen Heizgerätehersteller.

Im Labor hat Viessmann bereits zu einhundert Prozent wasserstoffbetriebene Brennwertgeräte und Brennstoffzellen getestet. Als Ergebnis versteht sie die Technik als technisch-wirtschaftlich umsetzbar und plant diese im ersten Reallaborprojekt Kaisersesch im realen Einsatz ab 2023 zu testen (siehe Kap. 3.2.6). Obwohl bereits vorher H<sub>2</sub>-ready-Geräte<sup>38</sup> für Zumischraten bis 20 Volumenprozent H<sub>2</sub> und 30 Volumenprozent (2023) zum selben Preis wie reine Erdgas-Brennwertgeräte verfügbar sein werden (Markenname Vitodens), wird Viessmann die Geräte ab 2023 auch für den Feldtest in Kaisersesch zugelassen haben und für den kommerziellen Markt dann ab ca. 2025. Die CE-Zertifizierung wurde bereits angestoßen.

Viessmann sieht ein mögliches Entwicklungshemmnis eher in einer zögerlichen Ertüchtigung des Gasverteilnetzes und weniger in der Entwicklung der Endgeräte. So kostet beispielsweise allein ein einziges Messgerät für die Bestimmung der Gaszusammensetzung (im Hinblick auf die Heizwertbestimmung) heute ca. 100.000 Euro. Eine Umstellung von reinem Erdgasbetrieb heute auf einen mittel- und langfristig grünen H<sub>2</sub>-Betrieb will daher gut geplant sein und sollte dabei möglichst wenige kostenintensive Umbauschritte beinhalten, um sogenannte Stranded Assets (= verlorene Investitionen) zu vermeiden. Jedoch erwartet Viessmann auch einen wachsenden politischen Handlungsdruck durch die Nichterfüllung international vereinbarter CO<sub>2</sub>-Ziele und vermutet daher, dass H<sub>2</sub>-Geräte eher als derzeit geplant am Markt nachgefragt werden.

Die Heizgeräte für den Betrieb mit Erdgas bzw. mit Wasserstoff-Gemischen werden so entwickelt, dass anders als z.B. bei der Gasumstellung von L-Gas zu H-Gas keine manuellen Eingriffe zum Umbau mehr erforderlich sind. D.h., alle Heizgeräte, auch für den Einsatz mit Erdgas, werden bereits so entwickelt, dass sie einfach auf 100% H<sub>2</sub> umstellbar werden (Materialwahl z.B. für Dichtungen). Bei der anschließenden Umstellung kann dann über ein wenige 100 Euro kostendes Umbaukit eine Umstellung auf den 100% H<sub>2</sub>-Betrieb mit wenigen Handgriffen erfolgen. Des Weiteren geht Viessmann davon aus, dass sich mit der Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie (Lebensdauer, spezifische Kosten) der Anteil der verbrennungsmotorischen KWK-Geräte zu Gunsten der Brennstoffzelle verringern dürfte. Auch dürfte sich das Angebot an Heizgeräten dann stetig zu größeren Leistungen hin entwickeln.

Bezüglich der Kosten geht Viessmann davon aus, dass 100% H<sub>2</sub>-Neugeräte im Vergleich zu den Erdgas-Pendants nur wenig im Preis steigen werden, Umbaukits werden für deutlich weniger als 500 Euro inkl. Umbauaufwand durch den SHK (Sanitär-Heizung-Klima)-Fachbetrieb zu kaufen sein. Mit einem deutschen Heizgerätebestand von heute ca. 20 Millionen Gasbrennern, 4 Millionen Ölbrennern und 1 Million elektrischen Wärmepumpen geht Viessmann dann von einem Achtungserfolg für die elektrische Wärmepumpe aus, sollte sich ihr Marktanteil von heute 6% auf langfristig 50% steigern lassen.

---

<sup>38</sup> H<sub>2</sub>-ready – Kennzeichnung der (sicherheits)technischen Tauglichkeit von gasführenden Anlagen zum Betrieb mit Wasserstoff oder Methangas bzw. Wasserstoffgemischen attestiert.

Aus Sicht von Viessmann dürften derzeit in Entwicklung befindliche H<sub>2</sub>-Brennwertgeräte also noch für lange Zeit auch wegen der hohen Kundenakzeptanz einen wichtigen Marktbeitrag liefern. Neben den reinen Effizienzargumenten und dem Marktdesign (Kundenwünsche) sieht Viessmann auch soziale Aspekte (Bezahlbarkeit im Bestandsgebäudebereich) von Bedeutung. Außerdem ist auch der Aspekt der technischen Umsetzbarkeit von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen im Bestandsgebäudebereich zu berücksichtigen. Als Lieferant eines breiten Spektrums von unterschiedlichen Heizgerätetypen mahnt Viessmann daher eine politische Risikominimierung durch technologische Vielfalt anstelle von Einfachheit an.

Viessmann plant derzeit kein Angebot eigener Stand-alone-PtH<sub>2</sub>-Systeme, d.h. also auch keinen Vertrieb eigener Elektrolyseure, sondern bedient dieses Marktsegment mit Partnern. Grundsätzlich jedoch erwartet man eine zunehmende Nachfrage in diesem Segment, selbst für die Versorgung von EFH, da die H<sub>2</sub>-vor-Ort-Strategie nahelegt, dass sich im Süden und insbesondere Südosten Deutschlands erst ab ca. 2035 ein Angebot von 100% grünem Wasserstoff in den Gasverteilnetzen entwickeln wird. Insbesondere Gewerbebetriebe, die sich durch Investitionen in energieautarke Energieversorgungsanlagen auf Basis erneuerbaren Stroms von volatilen Energiemärkten (Strom, Gas) unabhängig machen wollen, könnten hier einen entsprechend frühen Nachfragedruck erzeugen, wie bereits heute in Ansätzen erkennbar wird. Allerdings sind auch hier noch technisch-wirtschaftliche Hürden zu meistern, wie z.B. das Angebot kostengünstiger H<sub>2</sub>-Speichersysteme.

## BEN-Tec

Der Systemkonzeptentwickler BEN-Tec arbeitet in einem Konsortium mehrerer kleiner Unternehmen mit sich ergänzenden Unternehmenskonzepten an der Einführung von Wasserstoff in den Wärmemarkt (BEN-Tec: Ingenieurbüro samt Förderberatung; Powercell: BZ-Systemanbieter; K&N Gebäudetechnik: Gebäudeinstallation; H<sub>2</sub> Campus: Schulung & Prüfung; Hydro Generation: Errichtung von Tankstellen und Elektrolyseuren). Angefangen mit Notstromkonzepten für kleine Gewerbe vor ca. 5 Jahren liegt der Fokus des Anbieterkonsortiums heute auf der Planung und Errichtung von Siedlungsenergiekonzepten auf Basis von Wasserstoff. BEN-Tec versteht sich dabei als Systemintegrator von der Hausenergieversorgung bis zu PtG-Anlagen für die Sektorenkopplung (H<sub>2</sub>-Tankstellen für die Mobilität). Heute liefert BEN-Tec ca. 4 bis 6 Brennstoffzellensysteme pro Monat. Folgende Aspekte stehen dabei im Vordergrund:

- Basis ist derzeit eine 5 kW<sub>el</sub> Brennstoffzelle von Powercell für Siedlungs- bzw. MFH-Energiekonzepte (pragmatischer Grund für Leistungsbeschränkung: Fördermaximum), auch EFH können auf Basis des Panasonic 1 kW<sub>el</sub> BZ-Systems bedient werden, die 5 kW<sub>el</sub>-Systeme für reinen H<sub>2</sub>-Betrieb oder -H<sub>2</sub>-Betrieb aus Erdgas (Kooperation mit dem Unternehmen WS aus Renningen für kleine Erdgas-Dampfreformer).
- Der Ansatz basiert auf einer Projektentwicklung mit als Produkt am Markt verfügbaren Systemkomponenten, um die Gesamtkosten zu reduzieren und sieht hybride Betriebskonzepte aus reinem H<sub>2</sub> (Elektrolyse mit Wind, PV) oder reformiertem Methangas (Erdgas oder Biomethan) vor, je nach lokalen Bedingungen und angepasst an die aktuellen CO<sub>2</sub>-Vermeidungsziele, immer mit der höchsten Wirtschaftlichkeit im Blick. BEN-Tec scheut sich dabei auch nicht, in der Übergangsphase hybride Systeme statt auf Basis von grünem mit blauem Wasserstoff zu planen und zu installieren.
- Da die H<sub>2</sub>-Speicherung bei hohem Druck vor Ort häufig ein wirtschaftliches Ausschlusskriterium darstellt, setzt BEN-Tec je nach Aufgabenstellung und örtlichen Voraussetzungen auf alternative Ansätze:
  - Einsatz von Niederdruck-Speichern (Verwendung robuster 5 m<sup>3</sup> Ein-Tank-Druckspeicher für z.B. 12 kg<sub>H<sub>2</sub></sub> bei 3 MPa in Kooperation mit der Fa. Reuther STC aus Fürstenwalde),
  - Verzicht auf eine separate Verdichtung durch Einsatz von Druckelektrolyseuren z. B. (2,5...3 MPa) oder

- Linepack-Nutzung<sup>39</sup> zur Nutzung des Gasspeicherpotenzials des lokalen Gasverteilnetzes.
- Um die derzeitigen Beschränkungen des Regelwerks für den Einsatz von 100% Wasserstoff im Heizungskeller nicht zu verletzen, hat BEN-Tec ein sog. „Power Cube“-Konzept entwickelt, in dem alle Schlüsselkomponenten für eine MFH-Versorgung möglichst nutzungsnah außerhalb der Gebäudehülle untergebracht werden sollen (Brennstoffzelle und H<sub>2</sub>-Spitzenlastkessel sowie projektspezifisch auch Elektrolyse und Druckspeicher). Im Boden versenkt wird der „Power Cube“-Heizungskeller dann zum „Ground Cube“ in Außenaufstellung. Auch eine Odorierung, die vor allen Dingen in Innenräumen Sinn macht, wird dadurch vermieden. Der PowerCube wurde bereits an fünf Kunden verkauft.
- Da derzeit alle H<sub>2</sub>-Projekte noch mit Fördermitteln finanziert werden, hat BEN-Tec die Fördermittelbeantragung kundenfreundlich formalisiert (<https://www.foerderservice24.de/>), um die herum durch BEN-Tec eine wirtschaftliche Projektentwicklung geplant wird (angestrebte Amortisationszeit: ca. 10 Jahre). In der Projektumsetzung folgt BEN-Tec vor allen Dingen dem Ansatz, Strombezug zu vermeiden (0,29 Euro/kWh<sub>el</sub>) aber möglichst wenig Strom ins Stromnetz (0,04 Euro/kWh<sub>el</sub>) zu exportieren, betreibt seine Anlagen also stromgeführt.
- BEN-Tec ist in verschiedene Pilotprojekte, auch mit kommunaler Trägerschaft, eingebunden wie z.B. das Pilotprojekt in Gütersloh-Avenwedde (siehe Kap.3.2.6), in Bad Bentheim oder im neuen Siedlungsgebiet auf dem alten Nato-Militärflughafen Hopsten-Dreierwalde „H<sub>2</sub>-Revier“ (große Freiflächen für PV mit saisonaler H<sub>2</sub>-Speicherung stehen im Fokus). Wichtige Nutzungen sind die Wärmeversorgung von Gewerbe und Wohnungen in Kombination mit lokaler Mobilität (H<sub>2</sub>-Tankstelle). Um den Prototypen- und Versuchscharakter zu betonen, hat BEN-Tec das 26 Millionen Euro-Förderprojekt auch als „H<sub>2</sub>-Habitat“ zur „Realerprobung“ bezeichnet ([www.h2-airport.com](http://www.h2-airport.com)). In dem Projekt sollen alle Elemente des H<sub>2</sub>-Inselbetriebs aber auch der Netzdienlichkeit durch Anbindung an Strom- und Gasnetz (Ruhrgebiet-Lingen-H<sub>2</sub>-Pipeline) demonstriert und erprobt werden. Im Sinne der Kosteneinsparung wird sogar die Umnutzung vorhandener Kerosinbehälter zu H<sub>2</sub>-Niederdrucktanks geprüft. Gleichzeitig soll die entwickelte PowerCube-Technologie vom technischen Entwicklungsstand TRL 6 auf TRL 8 und später TRL 9 erfolgen. Entwicklungsziel ist eine H<sub>2</sub>-Erzeugung von bis zu 1.000 kg<sub>H<sub>2</sub></sub>/Tag.
- BEN-Tec kann bei Bedarf auch PtG-Systeme zur Sektorenkopplung anbieten, z.B. durch Planung und Realisierung kleiner H<sub>2</sub>-Nachbarschaftstankstellen.

Die wichtigsten Komponenten und Infrastrukturen des H<sub>2</sub>-Airport-Projektes (H2EID) sind auf der folgenden Darstellung (Abbildung 23) zu erkennen.

---

<sup>39</sup> Linepack ist die als „Netzpuffer“ bezeichnete Funktion des Erdgasverteilnetzes, über mögliche geringe Druckdifferenzen eine begrenzte Gasspeicherkapazität zur Verfügung zu stellen. Diese liegt in der Größenordnung von Stunden- oder maximal Tagesbedarfen und hat dadurch keine saisonale Energiespeicherrelevanz.

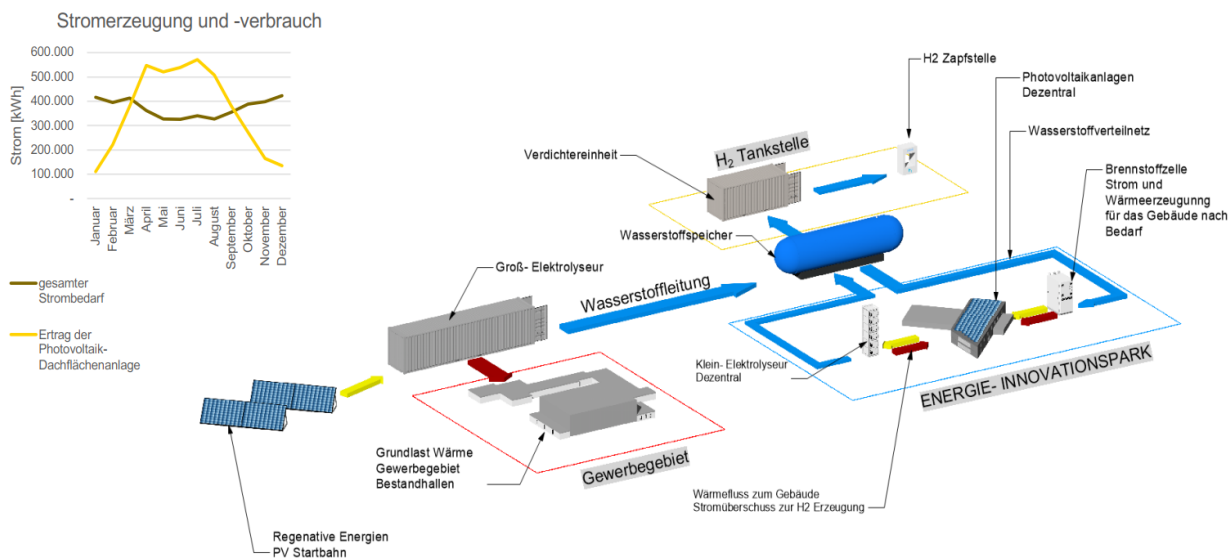


Abbildung 23: Das H<sub>2</sub>-Habitat H<sub>2</sub>-Airport von BEN-Tec (Quelle BEN-Tec, 2022)

Tabelle 2: Steckbrief für das BEN-Tec Power/Ground Cube-Konzept zur Wärmeversorgung von MFH oder Siedlungen

Komponente	Technische Auslegung	Preis
Elektrolyseur	Eigenentwicklung für 120 kW, Auslastungsziel von 5.500 Jahres-VLh, 64% Wirkungsgrad, Produktion in Wetztingen	Marktüblich (ca. 1.200 Euro/kW)
Energiespeicher	H <sub>2</sub> -One-Tank-Speicher (zur Kostenreduktion anstelle von Flaschenbündeln) bei 3 MPa, 12 kg <sub>H<sub>2</sub></sub> , Ø 1,6, Länge 4,6 m, Befüllung direkt aus einem Druckelektrolyseur	k. A.
Brennstoffzelle	5 kW <sub>el</sub> PEM-Druckelektrolyse (PowerCell) mit Wärmeauskoppelung bei ca. 70°C; alternativ (d.h. in EFH-Konzepten) auch 1 kW <sub>el</sub> Brennstoffzelle (Panasonic)	Marktpreis
Kessel/Brenner	H <sub>2</sub> -Spitzenlastbrenner	k. A.
Batteriespeicher	Ausgelegt auf tageszeitliche Spitzenlastabdeckung abhängig vom Objekt (Größe REG-Anlage)	Marktpreis
System	In nutzungsnahe „Power Cube“ oder „Ground Cube“ als 20 Zoll oder 40 Zoll Container unterirdisch integriert, Fokus ist Integration fertiger Produkte zur Erzielung höherer Wirtschaftlichkeit	k. A.

## H2homes

H2homes wurde in 2020 in Rheine gegründet mit dem Ziel, nachhaltige Systemhäuser in Fertig- bzw. Modulbauweise herzustellen. Dabei legt H2homes Wert auf die Nachhaltigkeit bei der Wahl der Baustoffe (z.B. Holztafelkonstruktion, Holzfaserdämmung) als auch im effizienten Betrieb (Niedrigenergiebauweise KfW 40+, maximale PV-Anlage, erdgasbetriebenes kleines Brennstoffzellenaggregat von REMEA mit Reformer und Spitzenlastbrenner (750 W<sub>el</sub>) im Grundlastbetrieb mit ca. 6.000-7.000 h/a, Batterie- und

Warmwasserspeicher). Durch diese Auslegung können dann ca. 90-95% des eigenen Strombedarfes abgedeckt werden, wobei nicht das primäre Ziel die Strom- oder Wärmeautarkie ist. Die KWK-Anlage sollte dabei so groß wie wirtschaftlich umsetzbar sein. H2homes versteht sich als Systemhaus<sup>40</sup> bzw. Generalplaner und kooperiert zur Auslegung seiner Objekte mit unterschiedlichen Gewerken wie z.B. mit Architekten, mit Entwicklern von Energiemanagement-/Steuerungssystemen, Elektrik/Elektrotechnik, gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung (BHKW), usw.

Ein Pilothehaus wurde im Oktober 2021 erstellt, der Bau weiterer Häuser ist in Verhandlung. In der Erkenntnis, dass immer mehr Stadtwerke in Neubausiedlungen auf einen individuellen Gashausanschluss verzichten, ist H2homes auch darauf vorbereitet, ganze Quartiere mit einem wasserstoffbasierten Brennstoffzellen-BHKW und entsprechender Batterie- und virtueller Gasspeicherung über das Gasnetz auszurüsten. Dies würde den nächsten konsequenten Schritt weg von fossil erdgasversorgten hin zum grünen wasserstoffversorgten Brennstoffzellen-BHKW bedeuten. In einer regional geförderten Machbarkeitsstudie für die Stadt Spelle im Emsland wird H2homes mit Partnern verschiedene Versorgungsvarianten für eine geplante Niedrigenergiehaussiedlung mit 15-20 EFH und 1-2 MFH mit je vier bis sechs Wohneinheiten untersuchen. Die Studienergebnisse, die auch auf städtebauliche Aspekte und mögliche teilautarke Energieversorgung inkl. Erdwärmennutzung und Integration von Mobilitätsaspekten eingehen wird, sollen Ende Juni 2022 vorliegen<sup>41</sup>.

Ein weiterer Fokus der Entwicklungen von H2homes liegt neben einer energiebedarfsoptimierten Auslegung individueller Gebäude in der Optimierung des Anlagenbetriebs sowohl durch die Entwicklung von angepasster Kontrollsoftware als auch durch die Anpassung auf die Bedürfnisse der späteren Nutzer im Betrieb. Dadurch strebt H2homes die Entwicklung von Plug&Play-Objekten an.

H2homes ist davon überzeugt, dass aus Netzkapazitätsengpässen, verbunden mit mangelnder öffentlicher Akzeptanz des Stromnetzausbaus, sowie auf Basis eines bereits vorhandenen und funktionierenden Gasnetzes, eine Kombination von strom- und gasbasierter Energieversorgung der privaten Haushalte und des Gewerbes auch künftig unverzichtbar sein wird. Sie bedauern daher, dass es bisher noch keine spezifischen Fördermöglichkeiten für wasserstoffversorgte Gebäude gibt.

## **EXYTRON**

Das emissionsfreie Konzept von EXYTRON aus Rostock weicht insofern von anderen wasserstoffbasierten Wärme- und Strombereitstellungssystemen ab, als der Wasserstoff zur Erzielung einer höheren Energiespeicherdichte, Effizienz und Redundanz durch die vorhandene Erdgasinfrastruktur zunächst in Methan umgewandelt wird. Das so produzierte Methan wird anschließend in einem konventionellen BHKW mit dem Sauerstoff, der ebenfalls bei der Elektrolyse entsteht, stickstofffrei im Abgas zu nahezu reinem CO<sub>2</sub> verbrannt. Geringe Wasseranteile im Abgas können durch Kondensation abgeschieden werden und das verbleibende reine CO<sub>2</sub> wird in der Anlage im Kreislauf gefahren, d.h. wird in der Methanisierungseinheit mit dem aus dem Elektrolyseur produzierten Wasserstoff wieder methanisiert. Der Vorteil des EXYTRON-Konzeptes ist u.a. die höhere Energiespeicherdichte komprimierten Methangases, die allerdings durch den zusätzlichen apparativen Aufwand der Methanisierung sowie der zusätzlichen Zwischenspeicherung von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und CO<sub>2</sub> erkauft wird. Dennoch liegen die Investitionskosten aufgrund der technisch niedrigeren Anforderungen im Vergleich zu reinen Wasserstoffsystemen, um rd. den Faktor 3-4 niedriger.

---

<sup>40</sup> Als Systemhaus wird hier ein Gebäude aus dem Katalog nach vorgegebenem Grundmuster mit Ausstattungsvarianten verstanden.

<sup>41</sup> Weiterführende Informationen sind gegebenenfalls hier erhältlich: <https://esmedia-spelle.de/neues-baugebiet-soll-nachhaltig-mit-energie-versorgt-werden/>

Auch sind die Auflagen zur Vornahme von Genehmigungsverfahren deutlich geringer. Konventionelle Erdgasinstallationen können einfach nachgerüstet werden.

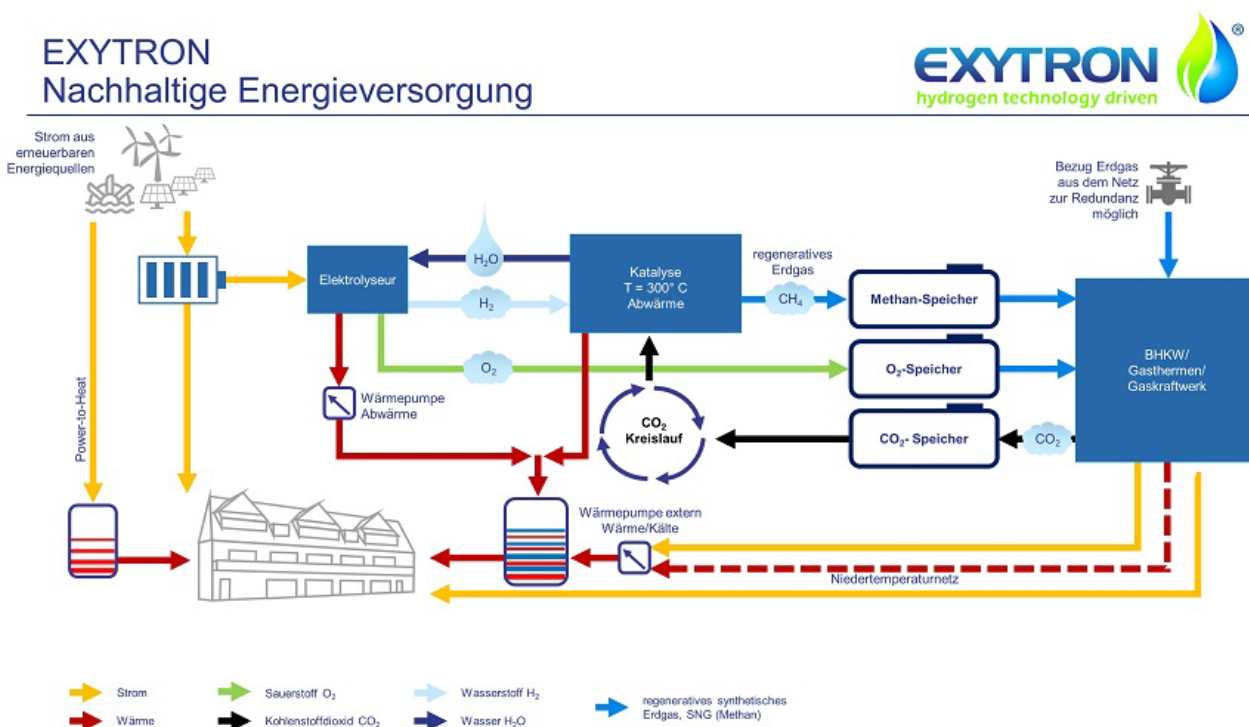


Abbildung 24: Anlagenschema der EXYTRON-Technik zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung in Quartieren

Die Idee für das EXYTRON-Konzept reifte bereits in 2009 und wurde seither in Richtung höherer Skalierung, Effizienz und Wirtschaftlichkeit weiterentwickelt, mit offizieller Firmengründung von EXYTRON in 2013. Das Unternehmen hat bereits erste Anlagen für die private und gewerbliche Wärme- und Stromversorgung realisiert. Das Konzept der Firma EXYTRON lebt aus dem Zuschnitt seiner Technologie auf große Siedlungsobjekte ab ca. 5.000 m<sup>2</sup> bis ca. 200.000 m<sup>2</sup> Wohnfläche. D.h. je größer die Energieversorgungseinheit ausgelegt werden kann, desto größer ist der wirtschaftliche Nutzen, da die spezifischen Kosten vor allen Dingen mit der Anlagengröße sinken. Nach dem Pilotprojekt in Augsburg (SmartEnergyTechnology/SET-Gebäude) strebt EXYTRON zunehmend auch die Energieversorgung in größeren Siedlungen an (SET Energiefabrik). So befindet sich derzeit eine Energiefabrik für einen ganzen Stadtteil in Lübecke südlich von Schwerin in Vorbereitung. Sie versorgt eine Wohnfläche von ca. 57.000 m<sup>2</sup>. Hier liefert auch die gemischte PV- und Windenergieversorgung einen systemischen Vorteil, da sich diese erneuerbaren Stromquellen tageszeitlich und saisonal optimal ergänzen. In Kombination mit CO<sub>2</sub> aus einer nahe gelegenen Biogasanlage kann dann auch überschüssiges Methan produziert werden, mit dem Erdgas-Pkw und -Nutzfahrzeuge klimaneutral betankt werden können.

Inwieweit die Wirtschaftlichkeit der zusätzlichen Systemkomponenten den breiten Einsatz des Systemkonzeptes rechtfertigt, wird sich daher in den Nutzererfahrungen zeigen. Die angestrebte Kostenreduktion bei Wärme- und Stromversorgung gegenüber den konventionellen Versorgungsoptionen Gas- bzw. Stromnetz setzt heute allerdings wie auch in allen anderen Fällen eine Projektförderung voraus. Auch dieses erste größere Projekt lebt derzeit noch aus einem hohen Fördermittelanteil von 15 Millionen Euro (Landesförderung Mecklenburg-Vorpommern) bei einem Gesamtinvestitionsvolumen von ca. 35 Millionen Euro. Die Technik eignet sich zur Multiplikation und ist relativ einfach zu skalieren. Zurzeit befinden sich bereits vier weitere noch größere Projekte mit gesteigerter Wirtschaftlichkeit in der Vorplanung.

Tabelle 3: Steckbrief für das Wärme-Anlagenkonzept der Firma EXYTRON (projektspezifisch auf Basis von Standardkomponenten)

Komponente	Technische Auslegung	Preis
Elektrolyse	Alkalische Elektrolyse (AEL), ausgelegt auf EE-Leistung mit Wärmeauskopplung bei ca. 70°C	Marktüblich (ca. 1.200 Euro/kW)
Methanisierung	Kathalytische Methanisierung mit CO <sub>2</sub> aus Rezyklierung aus den Verbrennungsgasen	Eigenentwicklung, ca. 700 Euro/kW
Energiespeicherung	O <sub>2</sub> -Druckspeicher (Vordruck aus AEL) CH <sub>4</sub> -Speicher (Verdichter vom Methanisierungs-Ausgangsdruck) CO <sub>2</sub> -Speicher (Verdichtung von Verbrennungsabgas bei Umgebungsdruck)	Marktüblich
BHKW	Konventionelles Gasmotor-BHKW, angepasst auf CH <sub>4</sub> -/O <sub>2</sub> -Betrieb mit anschließender Abgastrocknung und Sammlung von CO <sub>2</sub>	Marktpreis
Kessel/Brenner	Konventionelle Erdgasbrenner, angepasst auf CH <sub>4</sub> -/O <sub>2</sub> -Betrieb mit anschließender Abgastrocknung und Sammlung von CO <sub>2</sub>	Marktpreis
Batteriespeicher	Ausgelegt auf tageszeitliche Spitzenlastabdeckung abhängig vom Objekt (Größe REG-Anlage)	Marktpreis
System	Ca. 87 bis 90 % Gesamtsystemeffizienz	

### Home Power Solutions (hps)

Die Firma Home Power Solutions (hps) in Berlin hat sich zum Ziel gesetzt, dezentrale Energiespeichersysteme auf Basis von reinem Wasserstoff für die stromautarke Versorgung von EFH oder MFH zu liefern. Das dabei abfallende Nebenprodukt Wärme (Elektrolyse und Brennstoffzelle) wird ebenfalls zur Unterstützung von Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung genutzt, reicht aber im Allgemeinen nicht aus, um für das Gebäude auch Wärmeautarkie zu gewährleisten. Die Energiespeicherung der schlüsselfertig gelieferten Anlage besteht aus einem Tages-Kurzzeitspeicher (Elektronen) auf Basis von Batterien und einem saisonalen Langzeitspeicher (Moleküle) auf Basis eines Wasserstoff-Hochdruckspeichers.

Das als picea bezeichnete PtG-System besteht aus den folgenden Schlüsselkomponenten:

- Wasseraufbereitung und Elektrolyseur für die Wasserstofferzeugung,
- Brennstoffzelle für die Rückverstromung des Wasserstoffs,
- Batterie mit einer Kapazität von 20 kWh für die Kurzzeitspeicherung,
- Wechselrichter und Solarladeregler für den Anschluss an eine Photovoltaik-Anlage sowie
- Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung für verbessertes Wohnklima und Heizungsentlastung.

hps hat bisher einzelne Systeme für alle Anwendungsbereiche an Kunden verkauft und hat begonnen, erste Betriebserfahrungen in der Praxis zu sammeln. Durch die Modularität der PtG-Anlage können neben EFH auch MFH bzw. gewerblich genutzte Nichtwohngebäude versorgt werden, wobei bis zu 10 einzelne picea-Anlagen zusammengeschaltet werden können. Auch Quartierslösungen auf der Basis von picea sind angedacht, wobei durch eine siedlungszentrale Wasserstoffspeichereinrichtung die spezifischen Systemkosten gesenkt werden können.

**Fazit:** Mit dem Ziel der Erreichung von Stromautarkie im EFH-Bereich, die auch auf MFH und Quartiere zu übertragen ist, bietet hps eine Komponente auch zur Nutzung in Gebäuden mit Effizienzhaus Plus-Gebäudestandard an. Auch, wenn das System nicht in erster Linie auch für die Wärmenutzung konzipiert wurde, kann in Effizienzhaus Plus-Gebäuden der saisonale Wasserstoffüberschuss auch zur Spitzenlastbereitstellung in einem H<sub>2</sub>-Kessel genutzt werden, soweit der H<sub>2</sub>-Druckspeicher die erforderliche Kapazität besitzt. Der Preis eines picea-Systems für Einfamilienhäuser von 70.000 bis 100.000 Euro, vorrangig zum Erzielen von Stromautarkie (und damit Unabhängigkeit bei künftig möglicherweise zunehmenden Blackouts), ist sicherlich nur für finanzstarke Nutzer attraktiv und spricht daher typischerweise Idealisten an. Je geringer der spezifische Wärmebedarf eines Objektes, desto höher wird sein Gesamtdeckungsgrad. Von daher könnte – allerdings eher siedlungsfokussiert – das picea-Konzept auch für den Effizienzhaus Plus-Standard sinnvoll einsetzbar sein.

Tabelle 4: Steckbrief des Stromautarkiesystems für EFH und MFH der Firma Home Power Solutions (Modulares Produkt picea) (<https://www.homepowersolutions.de/wp-content/uploads/2021/10/2021-datenblatt-picea.pdf>)

Komponente	Technische Auslegung	Preis
PV-Anlage	Bis zu 5,8 kW <sub>p</sub> Peakleistung	Marktüblich, nicht im Anlagenpreis enthalten
Elektrolyse	PEM-Druckelektrolyse, ausgelegt auf REG-Leistung mit Wärmeauskopplung bei ca. 55°C	Im Systempreis enthalten
H <sub>2</sub> -Verdichter	Mehrstufige Verdichtung vom Elektrolyse-Ausgangsdruck auf ca. 300 bar Druck im Flaschenbündel	Im Systempreis enthalten
H <sub>2</sub> -Druckspeicherung	Je nach Auslegung 1 bis 5 H <sub>2</sub> -Hochdruckflaschenbündel (30 MPa), Elektrische Äquivalenzspeicherkapazität: 300 bis 1.500 kWh <sub>el</sub> (untere Bandbreite: Basissystem, obere Bandbreite: optionale Ausbaustufen)	Im Systempreis enthalten
Batteriespeicher	20 kWh (36 kWh brutto)	Im Systempreis enthalten
BZ-BHKW	Durch Wärmeauskopplung aus Elektrolyse und Brennstoffzelle für Raumheizung (55 °C) und Heizstab (≤4,5 kW <sub>el</sub> ) sowie gezielte Raumlüftung mit Wärmerückgewinnung wird ein Beitrag zur dezentralen Wärmeversorgung geliefert (bis zu 3.000 kWh <sub>th</sub> Abwärme). Nennleistung: 7,2 kW <sub>el</sub> , Brennstoffzellenleistung: 1,5 kW <sub>el</sub>	Im Systempreis enthalten
System	Gesamtsystemeffizienz bis zu 90%.  1,5 m <sup>2</sup> für Anlagentechnik im Heizungskeller und Aufstellfläche für 2 oder mehr H <sub>2</sub> -Druckflaschenbündel (2 m <sup>2</sup> je Modul) samt 300 bar-Verdichter (1,5 m <sup>2</sup> ) im Außenbereich	Systempreis 85.000 bis 125.000 Euro (mit 10 Jahren Garantie) zzgl. Wartungsvertrag von 499,80 Euro/Jahr. Förderoptionen: PV-Anlage: Rückerstattung 19% Umsatzsteuer Gesamtanlage: KfW 433 (Zuschuss: 15.050 Euro) Solarladeregler, Leistungselektronik, Batteriesystem mit Energiemanagement und Lüftungsgerät in picea enthalten

Es ist auch bemerkenswert, dass die Unternehmen der Wärmebranche, die häufig dem Mittelstand zuzuordnen sind, sich von den Förderprogrammen systematisch („Wasserstoff soll in der Energiewende für den Wärmesektor keine Rolle spielen“) bzw. in der Umsetzung („Bei der Vergabe von Fördermitteln in bestehenden Programmen kommt der Mittelstand im Gegensatz zur Großindustrie häufig zu kurz“) ausgegrenzt fühlen. Entsprechend drücken sich die Unternehmen BEN-Tec und Viessmann sehr kritisch gegenüber der Ausgestaltung der aktuellen Förderprogramme aus<sup>42</sup>.

#### inhouse engineering GmbH

Das Unternehmen inhouse engineering aus Berlin hat seit 2014 auf Basis von Erdgas, angefangen im europäischen ENFIELD-Projekt, 26 Brennstoffzellen-BHKW vom Typ inhouse5000+ bei Kunden im Betrieb, 15 weitere sind aktuell in Produktion. Damit reiht inhouse sich in eine kleine Zahl von deutschen und japanischen Unternehmen ein, die ebenfalls erdgasbetriebene kleine Brennstoffzellen-BHKW für einen Einsatz in der Wärmeversorgung anbieten. Der Unterschied von inhouse ist jedoch zum einen, dass das System anderes als die anderen kleineren Systeme mit einer elektrischen Leistung von ca. 0,5 bis 1 kW<sub>el</sub> mit seiner Leistung von 4,2 kW<sub>el</sub> eher auf die Versorgung von Mehrfamilienhäusern abzielt und zum anderen derzeit ein rein wasserstoffbetriebenes Aggregat mit einer ähnlichen Leistung erprobt wird. Die vorläufige CE Zertifizierung für einen Feldtest soll bis Oktober 2022 erfolgen.

Das Wasserstoff-Aggregat würde sich für einen Einsatz in MFH oder einer kleinen Siedlung im Effizienzhaus Plus Standard verwenden lassen, wenn reiner Wasserstoff z.B. aus einem kleinen Elektrolyseur vor Ort verfügbar wäre. Die Gerätebetriebsdaten sind für diesen Einsatz interessant, da die auskoppelbare Wärme auf Niedertemperaturniveau (50-70°C) bereitgestellt wird, die Leistungsmodulation mit 25% bis 100% relativ breit ist und die Kaltstartzeit mit 15 min relativ kurz ist. Der Systemwirkungsgrad beträgt ca. 85-92% gesamt und 50% (netto) elektrisch. Außerdem soll das System, sobald es ab Herbst 2022 kommerziell verfügbar wird, mit einem optionalen Spitzenlastbrenner zusätzliche Wärme von bis zu 14 kW<sub>th</sub> erzeugen können.

Fazit: Ohne Angebot eines vollständigen Systems Power-to-Power (Strom zu Wasserstoff zu Strom) kann das inhouse5000+ System zur Kraft-Wärme-koppelnden Energiebedarfsdeckung in Mehrfamilienhäusern des Standards Effizienzhaus Plus auf Basis von Wasserstoff eingesetzt werden. Dieser müsste dann durch eine separate Elektrolyse- und Wasserstoffspeichereinheit erzeugt werden.

### 3.4.3 Wohnungswirtschaft

#### Vonovia SE

Die Vonovia ist eine große deutsche Wohnungsgesellschaft, die durch aktuelle Akquisitionen nun über einen Bestand von 416.000 Wohnungen verfügt und an ca. 1 Million Menschen und an ca. 400 Standorten Wohnraum in Deutschland vermietet. Als Teil der Geschäftspolitik befasst sich die Vonovia mit der Verwendung innovativer Wärme-, Kälte- und Strombereitstellungstechnologien auch mit Pilotcharakter, um damit Praxiserfahrungen mit diesen Technologien zu sammeln. Anlässlich des SPD-Wirtschaftsforums,

---

<sup>42</sup> N. Wischmeyer: Hype um Wasserstoff - Die Vergessenen der Wasserstoff-Strategie. Wirtschaftswoche, 30. Januar 2022, <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/hype-um-wasserstoff-die-vergessenen-der-wasserstoff-strategie/27918854.html> (Letzter Aufruf am 31.01.2022).

das am 10.11.2020 unter der Überschrift „**Ein Jahr Klimaschutzpaket – Zwischenbilanz einer Jahrhunderttransformation**“ als Webkonferenz mit Bundesministerin Schulze am 10.11.2020 veranstaltet wurde, äußerte sich der Vorstandsvorsitzende der Vonovia SE Rolf Buch mit folgenden strategischen Feststellungen:

- Die Modernisierung des Altbaubestandes hat für die Vonovia Grenzen, ab denen Abriss und Neubau die wirtschaftlichere Lösung darstellen.
- Gleichzeitig hat die Vonovia den Anspruch, im Betrieb ihrer Immobilien bis 2050 klimaneutral zu werden.
- Dazu besteht die Absicht, „jeden Zentimeter Dach mit PV und Kollektoren zu belegen“.
- Die im Kontext dieser Studie relevante Feststellung betraf den Einsatz von Wasserstoff, den die Vonovia als technisches Konzept sieht, in dem die Elektrolyse als Niedertemperatur-Wärmeerzeuger verstanden wird mit „Wasserstoff als Abfallprodukt“, in Kombination mit dem Einsatz von stationären Brennstoffzellen ebenfalls als Heizung mit dem „Abfallprodukt Strom“.
- Aus diesem Grund wünscht sich die Vonovia als ein Vertreter der deutschen Wohnungswirtschaft an der Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie aktiv teilzunehmen.
- Abschließend betonte Herr Buch jedoch auch, dass sich ihr künftiges Denken auf Quartiere bezieht und nicht auf Einzelgebäude bezogen ist. Nur so sieht Herr Buch die Energiewende im Wohngebäudebereich als umsetzbar.

Um den Einsatz von Wasserstoff im Wärmesektor zu testen, wurde ein erstes Pilotprojekt in Bochum von der Vonovia SE umgesetzt (siehe Kap. 3.2.6).

### **Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. (GdW)**

Auch der Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. (GdW) hat sich im Rahmen eines aktuellen Positionspapiers entsprechend fordernd bezüglich einer künftig aktiven Beteiligung an der Nationalen Wasserstoffstrategie ausgedrückt (GDW, 2021). Er mahnt an, in der Gesetzgebung und im Ordnungsrecht eine voreilige Einschränkung der grünen Wasserstoffnutzung auf bestimmte Verbrauchssektoren (z. B. auf Industrie und Verkehr) zu vermeiden. Insbesondere sollte die Entscheidung des deutschen Nationalen Wasserstoffrates (NWR) zum dekarbonisierten Wärmemarkt (für oder gegen den Einsatz grüner Gase im Wärmesektor) im Frühjahr 2022 abgewartet werden, da dieser auch die Interessen der deutschen Wohnungswirtschaft berücksichtigen wird.

Auch bietet der GdW seine Unterstützung an bei der Erforschung der Wasserstoffnutzung zur Wärmebereitstellung in Gebäuden, insbesondere an modernen Quartierskonzepten unter Einbezug von Wasserstoffherzeugung, Abwärmennutzung der Elektrolyse und direkter Verbrennung im Sinne einer hohen Gesamteffizienz. Der GdW ist dabei insbesondere an einer integrierten Analyse der begonnenen Forschungsvorhaben in Deutschland und Europa hinsichtlich der Erkenntnisse zum Potenzial der Wasserstoffnutzung speziell für den Gebäudesektor interessiert. Hier sieht der GdW gerade im Sinne der Energienutzungsmaximierung auch das Abwärmepotenzial von Elektrolyseanlagen, den Wasserstoffeinsatz in Brennstoffzellen aber auch seine direkte Verbrennung mit Kraft-Wärme-Kopplung oder in Brennwertnutzung als wichtig an. Auch die Umsetzung des Effizienzhaus Plus-Standards wird durch das Positionspapier des GdW mit abgedeckt, indem auf die Option der „eigenen Herstellung von Wasserstoff im Quartier“ hingewiesen wird. Umgehende Einführungsmaßnahmen sollten aus Sicht des GdW allerdings durch diese Abwägungen nicht verhindert oder „ausgesessen“ werden.

An letzter Stelle wird im Positionspapier auch die Wasserstoff-Beimischung ins Gasnetz genannt, die sich derzeit insbesondere mit den maximal zulässigen bzw. aus betrieblicher Sicht noch handhabbaren Zumischraten (Odorierung, Gerätauglichkeit, Umstellungskosten, Brennwertänderungen bei dynamisch wechselnden Gasmischungen, Sicherheit, usw.) befasst. Derzeit ist eine Zumischung von 2 Volumenprozent H<sub>2</sub> in Methan-/Erdgas erlaubt, kurzfristig auch 10 oder 20 Volumenprozent umsetzbar und prinzipiell auch 40 Volumenprozent denkbar, wobei jedoch der Übergang auf künftige 100 % in möglichst wenigen Schritten erfolgen sollte, um vielfache Umrüstkosten zu sparen. Das ist auch von Bedeutung für die Umsetzung von Effizienzhaus Plus-Gebäuden, die ja im Fall einer Anbindung zur Abgabe von Überschusswasserstoff oder zur temporären virtuellen Wasserstoffspeicherung eine eindeutige Schnittstelle zum Gasverteilnetz benötigen (Gasqualität, zeitliche Zumischungsbeschränkungen, usw.). Auf Basis der Erkenntnisse und parallel zur Einführung von Wasserstoff im Gasnetz ist dann auch die laufende Verbesserung des europarechtlichen und nationalen Rahmens eine wichtige Vorbedingung zum später breiteren Einsatz.

Natürlich wird auch die Wirtschaftlichkeit der grünen Wasserstoffnutzung angesprochen. Der GdW fordert hier eine Anpassung der Wärmelieferverordnung, da erneuerbare Wärmeversorgungs-lösungen auf Gebäude- wie Quartiersebene heute nicht zu denselben Energiekosten erzielbar sind wie Wärme aus fossilen Energien. Eine Option besteht z.B. darin, den Kostenvergleich über einen Zeitraum und unter Einbeziehung eines vorgegebenen CO<sub>2</sub>-Preises zu stützen.

### 3.4.4 Kompetenzzentren Wasserstoff in der Wärmeversorgung

In diesem Kapitel werden die Einrichtungen in Deutschland benannt, die zumindest in einigen Aspekten Auskunft zum Thema „Wasserstoffeinsatz in der Wärmeversorgung“ geben können. Einige Institutionen richten sich mehr an die Fachöffentlichkeit, andere auch an den Endverbraucher. Auch die Art der Informationsleistungen kann sich unterscheiden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass manche der angezeigten Stellen auf Grund ihrer Trägerschaft auch verständlicherweise in deren Sinne interessengebunden arbeiten. Die Datenzusammenstellung berücksichtigt auch den aktuellen „Atlas der Wasserstoffnetzwerke in Deutschland“ (A. Gehling, M. Graß, 2021). Dieser stellt eine Fülle an Informationen über Einrichtungen, die sich mit der Einführung von Wasserstoff und Brennstoffzellen in die Energiewirtschaft befassen nach Bundesländern und Förderprogrammen geordnet vor.

Reine Beratungsinstitutionen für den Verbraucher, die neutral und verbraucherorientiert zum Thema Wasserstoff in der Hausenergieversorgung beraten können, finden sich heute nicht. Hier gilt es, den richtigen regionalen oder thematischen Ansprechpartner aus einer Vielzahl möglicher Institutionen herauszusuchen. Eine für den Bürger neutrale Beratungsfunktion müsste erst noch geschaffen werden oder bestehende Institutionen thematisch um die neuen Themen ergänzt werden. Da ein gesellschaftlich breiter Konsens zur Rolle von Wasserstoff im Wärmebereich noch nicht erkennbar ist, werden sich entsprechend beratende Einrichtungen hochdynamisch um den jeweils aktuellen Erkenntniszugewinn bemühen müssen.

Die folgende Tabelle 5 enthält einige ausgewählte Einrichtungen, die unter anderem auch beratend tätig sind, in der Absicht, die Regionalität und thematischen Vielschichtigkeit der institutionellen Aktivitäten in diesem Sektor zu demonstrieren.

*Tabelle 5: Übersicht über deutsche Institutionen/Einrichtungen mit Wasserstoff- bzw. Brennstoffzellenfokus*

Institution/Einrichtung	Ziel/Aktivitäten	Internet
Nationale Organisation H <sub>2</sub> &BZ (NOW), Berlin	Projektbegleitung im Auftrag mehrerer Bundesministerien, Umsetzung und Koordination von	<a href="http://www.now-gmbh.de">www.now-gmbh.de</a>

	Förderprogrammen, Begleitung strategischer Stakeholder-Prozesse, Gestalten internationaler Kooperationen und Engagement für die Akzeptanz alternativer Technologien in der Gesellschaft. Bereiche: Wasserstoff, Brennstoffzelle, Batterie, regenerative Kraftstoffe und Flüssigerdgas – sowohl antriebs- und kraftstoffseitig, als auch auf der Infrastrukturseite.	
HyLand – Wasserstoffregionen in Deutschland	Als Teil des Netzwerks von HyLand werden die Regionen mit den entsprechenden Förderinstrumenten und Netzwerken bei der Erstellung von regional integrierten Konzepten zur Einführung von Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie im Verkehr unterstützt und begleitet (Bewerungsklassen abhängig von Vorarbeiten/Vorkenntnissen: HyStarter, HyExpert, HyPerformer).	<a href="http://www.Hy.Land">www.Hy.Land</a>
Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B)	Strategie- und Koordinationsstelle für wasserstoffbezogene Themen und Aktivitäten in Bayern. Bereiche “Strategie- & Roadmapentwicklung”, “Technologie & Innovation”, “Öffentlichkeitsarbeit” sowie Koordination des H2.B (Wasserstoffbündnis Bayern).	<a href="http://www.h2.bayern">www.h2.bayern</a>
Energieagentur NRW (wurde mit Ablauf 2021 abgewickelt und durch Landesgesellschaft NRW.Energy4Climate ersetzt)	4 übergeordnete Aufgabenbereiche: Benötigte Innovationen und Rahmenbedingungen identifizieren, Investitions- und Förderbedarfe erkennen, Vernetzen und initiieren, sowie Kommunales Handeln unterstützen.	<a href="http://www.energy4climate.nrw">www.energy4climate.nrw</a>
H2BZ H2-Initiative Hessen	Hessisches Kompetenznetzwerk zum Thema Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Zusammenführung von Informationen aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft zum Thema, Technologiemarketing, Initiierung und Koordination von Technologietransfer und Unterstützung und Beratung von Unternehmen, die sich auf diesem Gebiet betätigen oder aktiv werden wollen.	<a href="https://www.h2bz-hessen.de/h2bz-initiative-hessen">https://www.h2bz-hessen.de/h2bz-initiative-hessen</a>
h <sub>2</sub> -netzwerk ruhr, H <sub>2</sub> -Herten, H <sub>2</sub> -Kompetenzzentrum	Bündelung unternehmerischer, akademischer und öffentlicher Aktivitäten der Region zur Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie. Förderung der Entwicklung der H <sub>2</sub> -Ergietechnologie in der Region mit dem Ziel der nachhaltigen Arbeitsplatzschaffung über Information der Öffentlichkeit, Bildungsarbeit, Lobbyarbeit und offene Fachveranstaltungen. Werbung auf Fachmessen für den Standort Metropole Ruhr. Durch Anbahnung gemeinsamer Projekte Förderung der internen Vernetzung.	<a href="https://h2-netzwerk-ruhr.de/">https://h2-netzwerk-ruhr.de/</a>

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband (DWV)	Themen: Gesicherte und wirtschaftliche Energieversorgung der Mobilität, der stationären Energieversorgung und des Wärmesektors, Energiewende als zentraler Punkt für die Wahrung der deutschen Wirtschaftskraft. Aufgaben: Mitgestaltung des Erfolgs der Energiewende im Interesse der deutschen Wirtschaft durch Analysen der aktuellen Lage und Erarbeitung von Vorschlägen zur Weiterentwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept. Seit 2018 gemeinsam koordinierte Aktivitäten mit dem → DVGW.	<a href="https://www.dwv-info.de/">https://www.dwv-info.de/</a>
Initiative Brennstoffzelle (ibz)	Thema: Strom und Wärme direkt im Haus effizient und umweltschonend erzeugen mit kleinen mit Gas betriebenen Brennstoffzellen-Heizungen. Lobbyarbeit zum Thema, Zusammenführen der relevanten Marktpartner, Dialog mit Politik und Öffentlichkeit und Informationsbereitstellung.	<a href="https://gas.info/verband-zukunft-gas/initiative-brennstoffzelle">https://gas.info/verband-zukunft-gas/initiative-brennstoffzelle</a>
H2Cologne	Gründung in 2007 als Netzwerk Wasserstoff Region Rheinland. Zielsetzung den im Kölner Raum als Nebenprodukt anstehenden Wasserstoff für innovative, nachhaltige Lösungen zu nutzen sowie der Erzeugung und Verwertung von „grünem“ Wasserstoff einen Weg zu bahnen: Netzwerk- und Öffentlichkeitsarbeit auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene sowie Partner und Referenten bei nationalen und internationalen Veranstaltungen, um das Know-how der Mitglieder, der Fachwelt und breiten Öffentlichkeit verfügbar zu machen. Beratung und Projektmanagement für Partner in der Realisierung weiterer Projekte mit innovativen Konzepten.	<a href="https://www.hyco-logne.de/">https://www.hyco-logne.de/</a>
HYPOS Leipzig	Gründung von HYPOS e.V. in 2013 zur Vernetzung von Partner*innen aus breitem Kompetenzpool aus Wirtschaft und Wissenschaft mit regionalen Potenzialen, Expertise und Erfahrung. Koordination von Industrieunternehmen aus den Bereichen Energiewirtschaft, Chemie oder Anlagenbau im Verbund mit kleinen und mittleren Unternehmen und Hochschulen sowie Forschungseinrichtungen: Forschungs- und Umsetzungsprojekte beraten und unterstützen, Mitglieder sichtbar machen, zu Wasserstofftechnologien informieren, Potenziale von Grünem Wasserstoff als Energieträger der Zukunft vermitteln, wissenschaftliche Inhalte aufbereiten, Bildungsprojekt für Schulen „HYPOS macht Schule“.	<a href="https://www.hypos-east-germany.de/">https://www.hypos-east-germany.de/</a>
DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches)	Kompetenznetzwerk für alle Fragen rund um die Versorgung mit Gas und Wasser – seit mehr als 160 Jahren. Dem Gemeinwohl verpflichtet setzt	<a href="https://www.dvgw.de/">https://www.dvgw.de/</a>

	<p>sich der DVGW für Sicherheit und Qualitätsstandards im Gas- und Wasserfach ein. Technische Beratung, Forschung und Weiterbildung. Im Themenfeld „Energiewende“ Bearbeitung folgender Einzelthemen: Energieimpulse, Sektorenkopplung, Power-to-Gas, Wasserstoff und Energiewende, Erneuerbare Gase, Smart Grids und Wärmemarkt. Seit 2018 Koordinationsvertrag mit dem → DWV.</p>	
<p>Zukunft Gas e.V.</p>	<p>Zukunft Gas bündelt die Interessen der Branchen und ist Ansprechpartner für Öffentlichkeit, Politik und Verbraucher. Durch eine aktive Presse- und Öffentlichkeitsarbeit Ansprechpartner der Medien für die Energieträger Erdgas und grünes Gas. Zukunft Gas versteht sich als Dienstleister der deutschen Gas-Wirtschaft. Mit Marktpartnern aus der Geräteindustrie werden gemeinsame Interessen gebündelt und gegenüber Endverbrauchern, Kunden, Politik, Wissenschaft und den Medien vertreten.</p>	<p><a href="https://gas.info/">https://gas.info/</a></p>

### 3.5 Technik

#### 3.5.1 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Schlüsseltechnologien, die in einem wasserstoffbasierten Wärmeversorgungssystem für Gebäude nach dem Effizienzhaus Plus-Standard zum Einsatz kommen können, kurz vorgestellt. Dabei folgt die Beschreibung der Abfolge des Geräteeinsatzes entlang der Prozesskette „Primärenergiebereitstellung – H<sub>2</sub>-Produktion – H<sub>2</sub>-Konditionierung – H<sub>2</sub>-Speicherung – H<sub>2</sub>-Verbrauch zur Wärme- und Strombereitstellung“ wie in Abbildung 25 gezeigt. Diese Prozesskette könnte man auch mit dem Begriff Power-to-Gas-to-Power klassifizieren (PtGtP). Neben den Kernanlagenkomponenten sind auch die Energieflüsse eingezeichnet. Die für den Anlagenbetrieb sekundären Stoffströme von Wasser und Sauerstoff (Elektrolyseur), Luft und Wasserdampf (Brennstoffzelle) und Strom (Verdichter) wurden nur in Umrissen angedeutet. Die Anbindung an Strom-, Gas- oder Wärmenetze im Effizienzhaus Plus wurde dabei als optional gestrichelt eingezeichnet.

Der Energiefluss erfolgt von links (erneuerbarer Strom) nach rechts (Strom- und Wärmebedarf). Der Strom erzeugt zunächst Wasserstoff im Wasserelektrolyseur unter Einsatz von Wasser, mit Sauerstoff und Wärme als „Nebenprodukten“. Der so produzierte Wasserstoff bedarf dann – abhängig von der Ausführung des Elektrolyseurs – einer weiteren mechanischen Verdichtung auf den Wasserstoff-Speicherdruck von ca. 30 bar oder kann, z.B. wenn der Speicher voll ist, auch ins Gasverteilnetz eingespeist werden. Wenn die produzierte Wasserstoffqualität genügt, kann fallweise auch auf eine dezentrale Wasserstoffspeicherung ganz verzichtet werden und das Gasnetz übernimmt die virtuelle Gasspeicherfunktion vollständig.

Eine Vor-Ort-Nutzung des produzierten Wasserstoffes im Augenblick der Erzeugung ist nicht sinnvoll, da eine Direktnutzung von Strom ja viel sinnvoller wäre. Die Energiespeicherung oder Gasnetzeinspeisung bzw. Abgabe an weitere Nutzer z. B. via Lkw-Trailer steht also im Fokus dezentraler Wasserstoffanlagen, ob nun dezentral oder zentral gespeichert. Jedoch kann dann gespeicherter Wasserstoff in sogenannten kalten Dunkelflautephasen, also Zeiten tiefer Temperaturen ohne Sonnenschein oder Windenergie, auch

vor Ort wiedereingesetzt werden. Vom Wasserstoffspeicher geht es in die Umwandlungstechnologie, die entweder ein Brennstoffzellen- bzw. ein Gasmotor-BHKW zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung sein können oder alternativ ein H<sub>2</sub>-tauglicher Brenner, der ausschließlich der Wärmeerzeugung dient. Auf wasserstoffbetriebene BHKW gehen wir in dieser Studie jedoch nicht näher ein, da sie in den aktuellen Demonstrationsprojekten eher eine Ausnahme darstellen. Heutige H<sub>2</sub>-KWK-Aggregate werden vornehmlich stromgeführt betrieben und Strom und Wärme ggfs. in einem Batteriespeicher oder einem Warmwasserspeicher gepuffert.

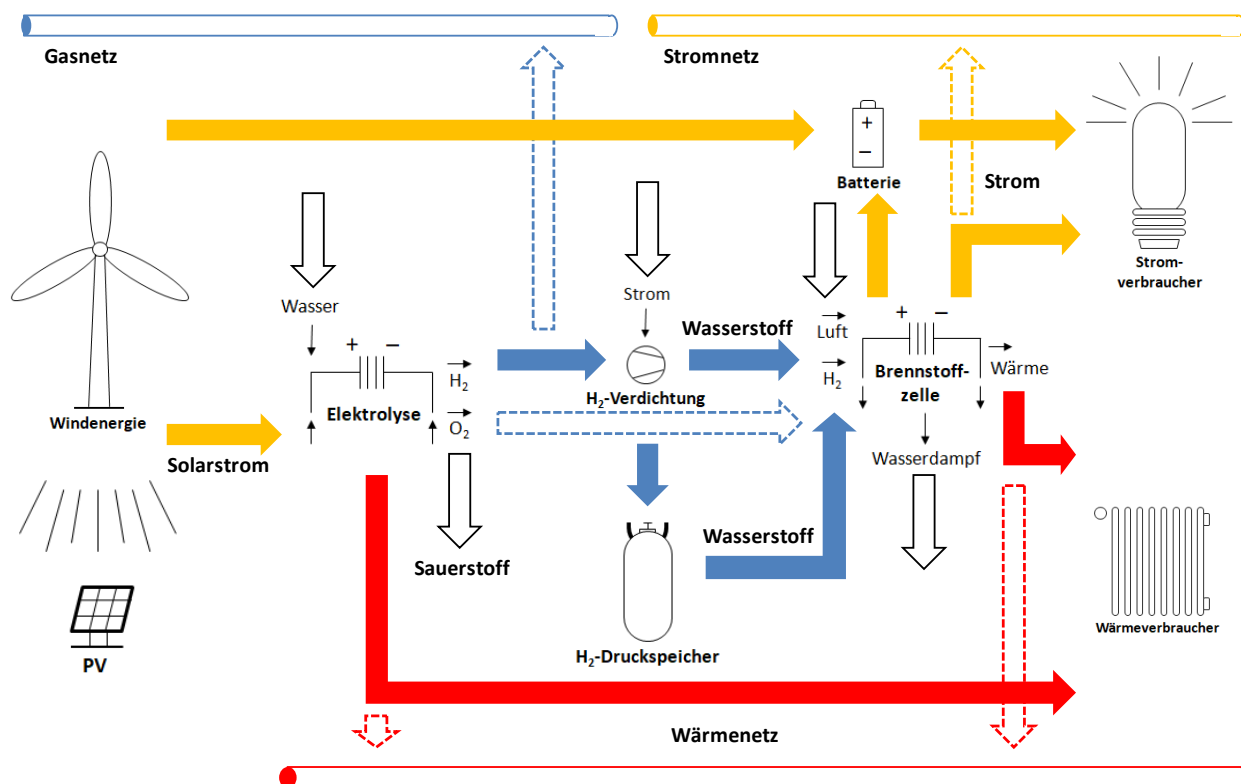


Abbildung 25: Prozesskette von der Primärenergiebereitstellung bis zum Wasserstoffumsatz zur Wärme- und Stromgestehung

Der Gesamtwirkungsgrad für die Strom-zu-Strom-Umwandlungskette eines wasserstoffbasierten, mit Strom aus Erneuerbaren Energien betriebenen kombinierten Elektrolyseur- und Brennstoffzellensystems mit Wasserstoff-Druckgaspeicher errechnet sich in erster Näherung mit folgenden Annahmen (Zielwerte 2030) zu den Energieverlusten pro Prozessschritt durch Multiplizieren der Einzelwirkungsgrade zu insgesamt ca. 36%:

- Strombereitstellung von der -Strom aus einer Erneuerbare Energie - Anlage zum Elektrolyseur 5%
- Wasserstofferzeugung im Elektrolyseur: 30%
- Verdichtung und Speicherung des Wasserstoffs im Druckbehälter: 10% und
- Rückverstromung des Wasserstoffs in einer Brennstoffzelle mit Abwärmenutzung: 40% (bei kleinen Brennstoffzellen ist dieser Wirkungsgrad noch etwas geringer wie z.B. 32-37% für PEMFC-Brennstoffzellen)

Die Verlustenergie von Elektrolyseur und Brennstoffzelle, die als Niedertemperaturwärme anfällt, beläuft sich auf ca. 52% der eingesetzten erneuerbaren Endenergie. Diese kann lokal direkt oder verteilt über ein Wärmenetz genutzt werden.

Als Haupteinsatzstoff verbrauchen handelsübliche Elektrolyseure Wasser, das vor der Spaltung zunächst zu deionisieren ist. Pro kg Produktwasserstoff werden ca. 9 kg Wasser benötigt. Ausgehend von einem für den deutschen Wohngebäudebestand mittleren flächenbezogenen Heiz-Wärmebedarf von ca. 130 kWh/m<sup>2</sup>a und unter Berücksichtigung der Brennstoffzellen- und Verdichterverluste beträgt der jährliche Wasserstoffbedarf für ein Gebäude mit 100m<sup>2</sup> Wohnfläche dann ca. 43 MWh<sub>H<sub>2</sub></sub>/a, oder 1,3 t<sub>H<sub>2</sub></sub>/a bzw. der zugehörige Wasserbedarf 11,7 m<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub>O</sub>/a. Ins Verhältnis gesetzt zum durchschnittlichen Bedarf der Bundesbürger von 128 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/(pro Tag und Person) oder 46.720 l<sub>H<sub>2</sub>O</sub>/(pro Jahr und Person) beträgt dann der durchschnittliche zusätzliche Wasserbedarf zur dezentralen wasserstoffbasierten Heizenergie- und Stromversorgung bei 2,5 Personen, die in einer 100 m<sup>2</sup> Wohnung wohnen, ca. 10 %.

### 3.5.2 Elektrolyseure

Elektrolyseure sind elektrochemische Apparate, die mit Hilfe von Strom Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Sauerstoff (O<sub>2</sub>) zerlegen. Der Verwendungszweck dieser Technologie im Zusammenhang mit der Wärmeversorgung ist dabei, aus (überschüssigem) erneuerbarem Strom einen Energieträger zu produzieren, der aus Sicht des Gesamtenergiesystems (nicht aus Sicht des einzelnen privaten oder gewerblich/industriellen Verbrauchers) effizienter und kostengünstiger transportier- und speicherbar ist.

Es gibt mehrere Elektrolyseverfahren, die sich in der Ausstattung, Materialwahl, den spezifischen Kosten, der Betriebstemperatur und dem Betriebsdruck, der Betriebsdynamik, der Kalt- und Warmstartfähigkeit, des möglichen Teillastspektrums und insbesondere der geringstmöglichen Teillast, dem Wirkungsgrad und schlussendlich den Investitions- bzw. den Betriebskosten unterscheiden. Damit eignen sich unterschiedliche Elektrolysetypen in ihrem Einsatzpotenzial für die Wärmeversorgung; hauptsächlich werden jedoch PEM-Elektrolyseure (Betriebstemperatur 70°C, Betriebsdruck bis 30 bar) oder alkalische Elektrolyseure (AEL, Betriebstemperatur 70°C, Betriebsdruck typischerweise nahe dem Umgebungsdruck) verwendet. Alternativ dazu verfolgt ein Hersteller die Produktion sogenannter AEM-Elektrolyseure, die ohne teures Katalysatormaterial auskommen, aber bisher erst begrenzte Betriebserfahrungen mitbringen (Enapter, 2021).

Alle Elektrolyseure eint die Modularität und damit Anpassungsmöglichkeit an ein breites Leistungsspektrum von wenigen Kilowatt Leistung bis hin in den Megawattbereich, und das bei einem gleichbleibend hohen Systemwirkungsgrad von ca. 65% heute bis 75% künftig erwartet über die Last, mit einem Maximum bei Teillast. Tatsächlich zeigt jedoch eine Darstellung der Elektrolyse-Wirkungsgrade eine signifikante Abhängigkeit von der Systemleistung. Trotz der gleichbleibenden Wirkungsgrade des Elektrolysestacks unabhängig von der Systemleistung, sinkt die Effizienz der Wasserstoffproduktion hin zu kleinen Leistungen signifikant aufgrund parasitärer Verluste der Subsysteme.

Abbildung 26 enthält eine Übersicht der Wirkungsgrade von Elektrolyseuren kleiner bis großer Leistung auf Basis konkreter Herstellerangaben (Proton onsite, Cummins/Hydrogenics, Hoeller Elektrolyseure). Danach sinkt der Wirkungsgrad großer Elektrolyseure (4.000 Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>/h) von ca. 70% auf gerade mal 41% bei Elektrolyseuren kleiner Leistung im Bereich weniger Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>/h. Jedoch zeigt die Grafik auch, dass die Elektrolyseure unterschiedlicher Hersteller im kleinen Leistungsbereich eine hohe Variation aufweisen. Ein alkalischer Elektrolyseur mit 10 Nm<sup>3</sup><sub>H<sub>2</sub></sub>/h weist einen deutlich höheren Wirkungsgrad auf als der eines anderen Herstellers.

Tendenziell lässt sich jedoch ableiten, dass aufgrund der spezifisch geringen Wirkungsgrade aber auch der spezifisch höheren Kosten die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Elektrolyseuren hin zu kleinen Systemleistungen abnimmt. Am besten eignet sich daher ihr Einsatz in Wohnsiedlungen oder aber in Anwendungen, in dem sich die als Nebenprodukt anfallende Niedertemperaturwärme kostendämpfend und wirkungsgradsteigernd verwenden lässt. Gerade in Nahwärmenetzen lässt sich künftig auch im Effizienzhaus Plus

die als Nebenprodukt erzeugte Niedertemperaturwärme wirkungsgradsteigernd verwenden und fallweise auch der produzierte Sauerstoff (z.B. in Kläranlagen) kostendämpfend einsetzen.

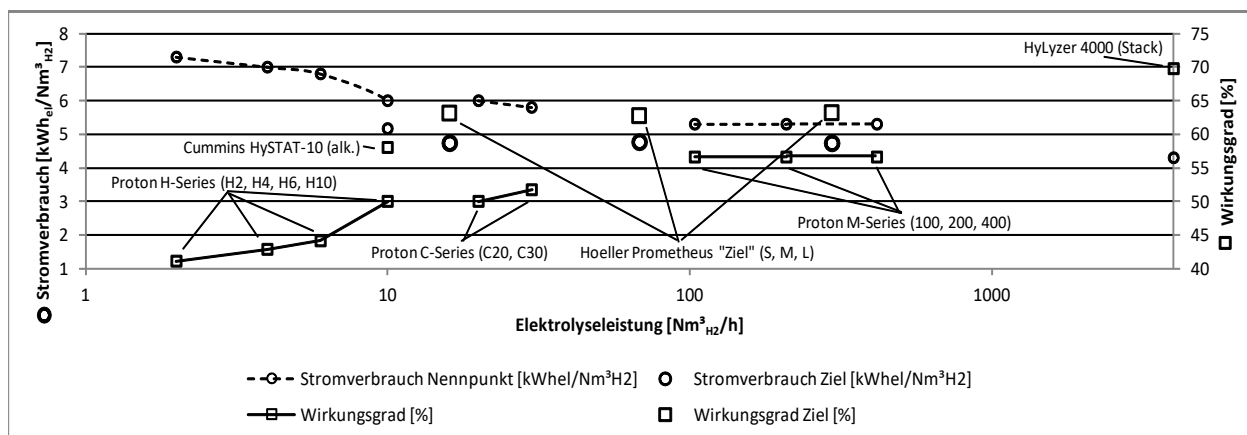


Abbildung 26: Elektrolysewirkungsgrad in Abhängigkeit von der installierten Elektrolyseleistung (die Daten beruhen auf Spezifikationen der Elektrolyseurhersteller Proton Onsite (Proton H-Series H2, H4, H6, C-Series (C10, C20, C30), M-Series (M100, M200, M400), Cummins/Hydrogenics (HySTAT 10 (alk.), HyLyzer 4000, Stack) sowie Hoeller (Prometheus S, M und L, jeweils Entwicklungsziele))

Insbesondere die Verwendung druckbetriebener Elektrolyseure (z.B. bis 35 bar) bietet sich für dezentrale Installationen an, da diese die zusätzliche Beschaffung eines zudem wartungsaufwändigen mechanischen Verdichters ersparen können. Da die Druckerhöhung im Elektrolyseur elektrochemisch erfolgt, ist diese im Gegensatz zur mechanischen Verdichtung weniger wartungsanfällig.

Die Beschaffungskosten kleiner Elektrolyseure im wenige bis 100 kW-Bereich liegen heute bei 2.000 Euro/ $\text{kW}_{\text{el}}$  Leistung. Es wird aber erwartet, dass diese durch Serienherstellung, insbesondere auch in Megawattanlagen auf wenige hundert Euro sinken werden (Graf, 2019). Auch heute noch bestehen bei allen Preisangaben große Unsicherheiten, welche Anlagenteile jeweils dazu gezählt werden und welche nicht. Ein richtiger Markt kleiner Elektrolyseure mit Produktcharakter hat sich bis heute noch nicht etabliert.

### 3.5.3 Wasserstoff-Verdichter

Für die Verwendung in einer dezentralen PtGtP-Anlage kommen aus physikalischen Gründen entweder mechanische Kolbenverdichter in Frage oder aber die elektrochemische Verdichtung z.B. in einem Metallhydridspeicher. Zur letztgenannten Technologie werden jedoch heute noch keine massentauglichen Geräte angeboten. Im Falle der Verwendung druckbehafteter Elektrolyseure kann die separate Verdichtung sogar ganz entfallen. Diese wird daher im Allgemeinen die richtige Wahl sein und harmonisiert in Bezug auf das erforderliche Druckniveau auch mit dem Speicherdruckniveau von ca. 30 bar. Kleine elektrisch betriebene Verdichter sind dazu inhärent wartungsaufwändig, müssen schmiermittelfrei betrieben werden, da etwaige Verunreinigungen einer Brennstoffzelle dauerhaft schaden könnten und sind spezifisch teuer in der Anschaffung. Für eine Verdichtung im kleinen Maßstab kann heute mit einem spezifischen Energieverlust von ca. 8-10 % gerechnet werden. Aktuelle Kostenangaben zu mechanischen  $\text{H}_2$ -Verdichtern lagen uns dazu nicht vor.

### 3.5.4 Wasserstoff-Speicherung

Wasserstoff in kleinen Mengen wird heute in zylindrischen Gastanks gespeichert oder in Flaschenbündeln transportiert. Die Flaschenbündel können gleichzeitig als stationäre Speicher verwendet werden. Typischerweise besteht ein Bündel aus 12 Einzelflaschen von je 50 l geometrischem und 8,9 Nm<sup>3</sup> Wasserstoffinhalt bei 200 bar, was ca. 0,8 kg Wasserstoff entspricht. Ein Flaschenbündel speichert also knapp 10 kg Wasserstoff bei 200 bar oder im Fall von 300 bar Flaschen auch bis zu 13,6 kg. Flaschenbündel werden industriell heute generell verliehen. Ein 300 bar Flaschenbündel kostet dabei etwa 8.000 Euro. Für kleine Wasserstoffmengen bei niedrigen Drücken von z.B. 30-50 bar werden typischerweise zylindrische Behälter aus geschweißten Stahlblechen verwendet.

Zylindrische Druckbehälter sind deutlich preisgünstiger als Flaschenbündel. Auf der Suche nach kostengünstigeren H<sub>2</sub>-Stationärspeichern sind Systemintegratoren daher derzeit bestrebt, Flaschenbündel durch zylindrische und im optimalen Fall erdgebunden aufgestellte Stahlzylinder zu ersetzen. Der Kostenvorteil begründet sich dabei einerseits aus der Tatsache, dass pro Speichervolumen weniger Speichermaterial zum Einsatz kommt und damit auch geringere Fertigungskosten einhergehen, andererseits auch aus der Tatsache, dass die komplexe Instrumentierung (ein Ventil pro Druckflasche) und die ggfs. aufwändige Gasbefüll- und Entnahmestrategie aus einzelnen Flaschen vereinfacht wird.

Alternativ zur Vor-Ort-Speicherung, die aufgrund der geringen volumetrischen Speicherdichte sowie der metallversprödenden Eigenschaften von Wasserstoff eher kostenintensiv ist, kann in Versorgungssituationen, in denen ein Gasverteilnetz bereits verfügbar oder aber ein Anschluss an ein Verteilnetz in unmittelbarer Nähe möglich ist, dieses zur „virtuellen Speicherung“ genutzt werden. Die Voraussetzungen dafür sind:

- Der entsprechende Netzabschnitt wurde bereits auf 100% Wasserstoffbetrieb umgestellt<sup>43</sup>,
- Der via Elektrolyse hergestellte Wasserstoff genügt den Qualitätsanforderungen des Gasnetzbetreibers,
- Der betroffenen Gasverteilnetzabschnitt ist auf eine Übernahme von Wasserstoff aus dezentralen Produktionseinheiten (Power-to-Gas) technisch (passende Druckstufe und Sicherheitstechnik, keine Konflikte mit dem Umgang der eingespeisten Wasserstoffmenge, d.h. ausreichende Speicherkapazität oder „reversed flow“<sup>44</sup>) und betrieblich (Energienmengenzähler, Abrechnungsverfahren, ggfs. Möglichkeit einer Einspeisebegrenzung) ausgelegt.

Prinzipiell steht die deutsche Gasindustrie einer dezentralen Einspeisung von Wasserstoff aus sog. Power-to-Gasanlagen ins Gasverteilnetz offen gegenüber und hat diese Option nicht nur dokumentiert (DVGW, 2020) sondern in 2019 auch von einem wissenschaftlichen Team auf mögliche Potenziale in Deutschland untersuchen lassen (DVGW, 2019). Die Option der Wasserstoffspeicherung im Gasnetz kann auch als „Wasserstoff-Cloud“ bezeichnet werden. Die durch die Vorkehrungen zur Ein- und Ausspeisung entstehenden Kosten sowie die Kosten für die Gasverteilnetznutzung als Speicherdienstleistung

---

<sup>43</sup> Eine Gasnetzzumischung kann nicht als virtuelle Wasserstoffspeicherlösung betrachtet werden, da ein Gasbezug aus dem Netz dann keinen Wasserstoff, sondern eine Gasmischung aus Methan und Wasserstoff liefern würde.

<sup>44</sup> Als „reversed flow“ ist die Anpassung des Gasnetzes auf dezentral eingespeiste Gasmengen bezeichnet, das in Perioden hoher dezentraler Einspeisung und gleichzeitig geringer Abnahme, d.h. z.B. im Sommer, Gas zur Speicherung an die überlagerte Transportnetzebene übergeben wird. Das wiederum erfordert statt einer Druckminderung von der traditionellen Gasbelieferung aus dem Transport- an das Gasverteilnetz eine Hochverdichtung des ins Gasverteilnetz bei niedrigen Drücken eingespeisten Gases auf Gastransportnetzebene, um dort z.B. in Salzkavernen gespeichert zu werden. Diese Diskussion wird bereits seit einigen Jahren im Zusammenhang mit der dezentralen Einspeisung von Biomethan geführt.

müssen jedoch im Vergleich zur dezentralen Wasserstoffdruckspeicherung in Einzeltanks noch näher untersucht werden.

Im Hinblick auf die spezifischen Speicherkosten liegen diese für die Gasspeicherung unter denen für die direkte Stromspeicherung in Batterien. Jedoch sind die Speicherkosten in kleinen Drucktanks um ein Vielfaches höher als die in großen Speichern (z.B. Untertagespeicherung in Salzkavernen). In diesem Zusammenhang sind jedoch eher die Systemspeicherkosten zu berücksichtigen, die bei den Batterien auch die Ladestrategie und -steuerung und bei den Drucktanks auch die Verdichtung beinhalten. Diese hängen jedoch stark von der jeweiligen Gebäudekonzeption ab.

### 3.5.5 Wasserstoff-Heizgeräte

Wasserstoffheizgeräte sind den konventionellen Erdgasheizgeräten sehr ähnlich. Wichtige Unterschiede betreffen die Konstruktion bzw. Auslegung der Brenner, da sich die Brenneigenschaften von Wasserstoff deutlich von denen von Methangas unterscheiden. Z.B. sind die Flammgeschwindigkeit und Flammentemperatur für Wasserstoff viel höher. Dadurch können die konventionellen Brenner für Methangas überhitzen und Wasserstoffflammen in das Gerät zurückschlagen. Außerdem können unerwünschte Stickoxid (NO<sub>x</sub>)-Emissionen entstehen. Von Kesselherstellern unter anderem in den Niederlanden wurden bereits entsprechende wasserstofftaugliche Brenner für die Anwendung in Haushalten entwickelt (S. Gersen, 2020). Durch die adaptierte Technologie konnten die NO<sub>x</sub>-Emissionen sogar unter die des vergleichbaren Erdgasbrenners gesenkt werden.

Die Firma Viessmann Hausgeräte hat einen marktfähigen Wasserstoff-Brenner zum Austausch gegen konventionelle Erdgasbrenner in bestehenden Heizungssystemen angekündigt. Der Austausch soll selbst durch Laien möglich sein und nur sehr geringe Kosten von unter 500 Euro pro Installation verursachen. Mit der Tauglichkeit zum Einsatz in Erdgas-Wasserstoffgemischen soll dieser Brenner dann auch 100% Wasserstoff verbrennen können. Damit können bestehende Gasheizungsinstallationen mit geringsten Kosten umgestellt werden. In den Niederlanden entwickeln Bekaert Heating und Gasterra ebenfalls H<sub>2</sub>-taugliche Brenner. Diese Systeme sollen vor allen Dingen in zwei groß angelegten Demonstrationsprojekten in den Niederlanden mit jeweils mehreren Hundert Gebäuden eingesetzt werden (siehe Hoogeveen und Stad aan't Haringvliet in Kap. 3.2.6).

### 3.5.6 Wasserstoff-Brennstoffzellen

Je nach Verwendungszweck kommen unterschiedliche Brennstoffzellentypen zum Einsatz:

- Niedertemperatur-Brennstoffzellen:
  - PEM-Brennstoffzelle (PEMFC)
  - Alkalische Brennstoffzelle (AFC)
- Hochtemperatur-Brennstoffzellen:
  - Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC)
  - Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC)

Aus dieser Vielfalt an Brennstoffzellentypen sind im Wesentlichen PEMFC- und SOFC-Brennstoffzellenbasierte Aggregate kommerziell verfügbar. Vereinzelt werden auch kleine AFC am Markt angeboten. Im Übrigen besteht weiterer Entwicklungsbedarf auch in Hinblick auf umschaltbare „reversible“ Brennstoffzellen, die dann wahlweise als Elektrolyseur betrieben werden können.

PEMFC und SOFC unterscheiden sich vor allen Dingen in ihrer betrieblichen Dynamik (Lastregelung, geringst mögliche Teillast und Schwarzstartfähigkeit) und im Wirkungsgrad. Während PEMFC bei 70 bis 90°C

betrieben werden und einen elektrischen Wirkungsgrad von 32-37% aufweisen, liegt die Betriebstemperatur von SOFC bei 650 bis 1.000°C und der elektrische Wirkungsgrad beträgt 33 bis 60%. Dafür können PEMFC jedoch sehr dynamisch betrieben werden, innerhalb von Minuten vom Stillstand auf Volllast gebracht werden und eignen sich gut für einen dynamischen Betrieb mit wechselnden Stromlasten (z.B. direkte Kopplung mit REG-Anlagen). SOFC sind dagegen eher Grundlastaggregate, da betriebliche Dynamik auf Grund möglicher Wärmespannungen in Folge von Lastwechseln die Lebensdauer reduzieren würde. Gleichzeitig ist ihr elektrischer Wirkungsgrad deutlich höher als der von PEMBZ und auch die Wärme kann bei höherer Temperatur ausgekoppelt werden.

Aus Sicht von Effizienzhaus Plus-Gebäuden, die weitgehend autark von Strom- und Gasnetz betrieben werden sollen, dürften PEMFC daher die bessere Wahl sein. Sie können sich den dynamischen Betriebsanforderungen idealerweise anpassen. Da anzustreben ist, so viel wie möglich von dem solaren Stromangebot direkt zu nutzen oder aber in einem Batteriespeicher zu puffern, werden Brennstoffzellen eher nur in Zeiten von Stromknappheit betrieben, also in den Übergangszeiten oder im Winter. Brennstoffzellenbasierte Klein-BHKW werden von mehreren Herstellern angeboten, beginnend bei sehr geringen Leistungen von 0,5-1 kW<sub>el</sub> für gasnetzgekoppelte EFH als auch als Bestandteil von PtGtP-Systemlösungen mit z.B. einer Dauerlast von 1,5 kW<sub>el</sub> (System für stromnetzautarken Betrieb) oder zweistelligen kW<sub>el</sub>-Leistungen für die gekoppelte Strom- und Wärmeversorgung von MFH oder Siedlungen.

### 3.6 Wirtschaftlichkeit

Wasserstoff als Ersatz für Erdgas für die Wärmeversorgung wurde bereits in den 1980er und 1990er Jahren diskutiert (siehe z.B. (Fasold, 1988), (Bünger, Zittel, & Schmalschläger, 1993)). Dabei stand eine 1:1 Ablösung auf Basis konventioneller Energiewandlungstechnologien im Vordergrund. Ähnlich muten die aktuellen Analysen zu einem 100%-Einsatz von Wasserstoff als Energieträger in Großbritannien an (siehe auch Kap. 3.2.6 H21 - Leeds City Gate Projekt). Die Weiterentwicklung der Diskussionen um den Einsatz von Wasserstoff als universellem Energieträger hat jedoch andere Optionen in den Fokus gerückt, u.a. mit der Folge, dass eine direkte Verbrennung von aus regenerativem Strom gewonnenem Wasserstoff im Vergleich mit der direkten Nutzung von Strom zur Wärmebereitstellung z.B. in elektrisch betriebenen Wärmepumpen als weniger sinnvoll erscheint. Die neuen H<sub>2</sub>-Anwendungskonzepte, die von einer intelligenteren gekoppelten Erzeugung von Wärme und Strom aus Wasserstoff ausgehen, sind jedoch erst seit Kurzem konkret in Erwägung, sodass bisher erst wenige Anwendererfahrungen verfügbar sind. Als Folge sind bisher auch erst wenige Anwenderdaten und damit verbunden auch wenige Informationen zur Wirtschaftlichkeit realer H<sub>2</sub>-Wärmeenergiekonzepte verfügbar.

Zudem werden die Produktionskosten von grünem in Deutschland aus Regenerativstrom hergestellten Wasserstoff bisher auf ca. 0,17 Euro/kWh<sub>H2</sub> (5,8 Euro/kg<sub>H2</sub>) abgeschätzt, mit der Perspektive auf ca. 0,09 Euro/kWh<sub>H2</sub> (3 Euro/kg<sub>H2</sub>, 2030) und 0,06 Euro/kWh<sub>H2</sub> (2 Euro/kg<sub>H2</sub>, 2050) fast gedrittelt zu werden (siehe Abbildung 27). Im Vergleich zu einem Erdgaspreis in Deutschland von heute ca. 0,06 Euro/kWh<sub>th</sub>, aus dem Wasserstoff im kostengünstigsten Fall über verlustbehaftete Schritte (Wirkungsgrad Dampfreformierung ca. 80%) erst hergestellt werden müsste, zeigt, dass eine Wirtschaftlichkeit heute nicht gegeben sein kann und sich erst aus einer systemischen Notwendigkeit zur Abkehr von fossilen Brennstoffen (Wettbewerb mit Erdgas) bzw. einer systemischen Erfordernis von kostengünstiger saisonaler Energiespeicherung bzw. von Energietransport im großen Stil (Wettbewerb mit Grünstrom) ergeben kann. Mit Beginn des Russland-Ukraine-Kriegs ist jedoch der Erdgaspreis auf ein Vielfaches gestiegen, sodass bei im Verhältnis weniger stark gestiegenen Investitionskosten für erneuerbare Energieproduktionsanlagen grüner Wasserstoff verhältnismäßig günstiger geworden ist. Selbst blauer Wasserstoff (CO<sub>2</sub>-reduziert aber nicht CO<sub>2</sub>-frei) kann nun seinen vor Kurzem noch angepriesenen Preisvorteil gegenüber grünem Wasserstoff nicht mehr ausspielen.

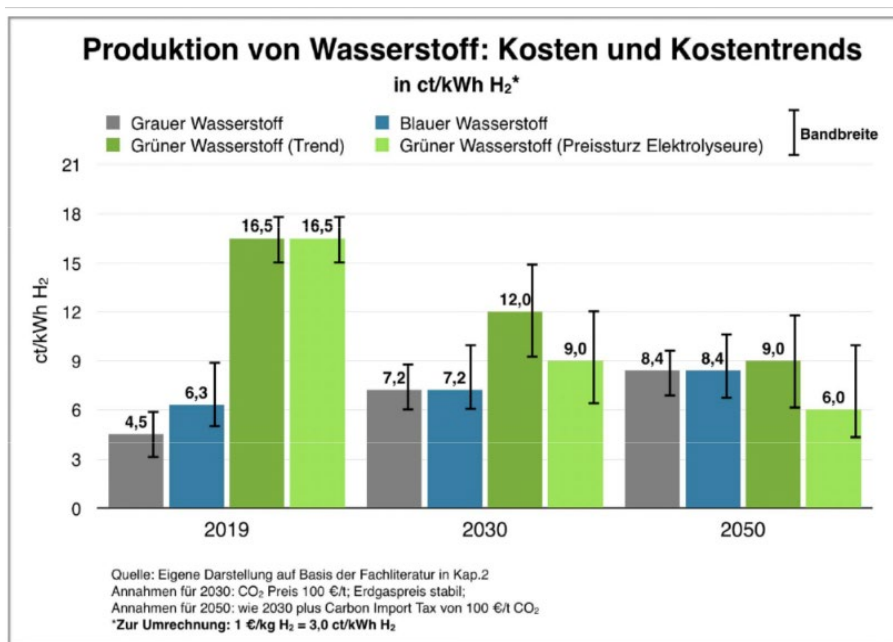


Abbildung 27: Vorhersage der Kostenentwicklung für die Produktion von Wasserstoff in Deutschland (Quelle: (Deutscher Bundestag, 2020) auf Basis (Bukold, 2020))

Aus diesen Gründen greifen wir an dieser Stelle auf Aussagen zur Wirtschaftlichkeit geplanter oder erst wenige Monate in Betrieb befindlicher Anlagen zurück.

EXYTRON z.B. geht für die Wirtschaftlichkeit seiner „Energiefabrik“ für das geplante Stadtteilprojekt in Lübesse davon aus, dass die Wirtschaftlichkeit der Anlage von mehreren Faktoren abhängt, zum einen von technischen Auslegungsdetails wie z.B. vom Gesamtanlagennutzungsgrad (derzeit ca. 87%) aber auch der gesetzlichen Unterstützung (derzeit wird für diese Anlage die EEG-Umlage mehrfach fällig)<sup>45</sup>. EXYTRON behauptet auch, auf Basis der jetzigen Analysen nahe an der Wirtschaftlichkeit zu sein, geht jedoch von einer ca. 50%igen Förderrate der Investitionen aus. EXYTRON hofft, aus dem tatsächlichen Betrieb Erfahrungen zu sammeln im Sinne einer optimalen Dimensionierung und technischen Verbesserung sowie Besserstellung durch gesetzliche Rahmenbedingungen.

Konkret rechnet EXYTRON für die Anlage in Lübesse für Haushaltskunden mit einem Stromgrundpreis von ca. 170 Euro/Jahr und einem Arbeitspreis von rund 0,25 Euro/kWh<sub>el</sub>. Zum Vergleich wird angeführt, dass beim aktuellen Grundversorger ein Grundpreis von 188,16 Euro/Jahr und ein Arbeitspreis von 0,2837 Euro/kWh<sub>el</sub> berechnet wird. Für einen Haushalt mit 2.500 kWh<sub>el</sub>/Jahr ergibt sich somit ein Vorteil von rund 100 Euro/Jahr zum Vorteil der Exytron-Anlage. In Bezug auf die Nahwärmeversorgung wird den Kunden ein Arbeitspreis von 0,062 Euro/kWh<sub>th</sub> angeboten bei einem Grundpreis von 150 bis 500 Euro pro Jahr in Abhängigkeit von Anschlussleistung und Laufzeit. Für ein durchschnittliches EFH mit einem Wärmebedarf von 20.000 kWh<sub>th</sub>/Jahr und bei 20 Jahren Laufzeit ergeben sich ca. 1.300 Euro Heizkosten pro Jahr im Vergleich zu einer Versorgung mit Erdgas von ca. 1.800 Euro pro Jahr (inkl. Kosten für Wartung und Instandhaltung).

<sup>45</sup> [https://exytron.online/wp-content/uploads/2021/02/2019-02-26\\_energategate-messenger\\_3-Fragen-an-Alfred-Muellner.pdf](https://exytron.online/wp-content/uploads/2021/02/2019-02-26_energategate-messenger_3-Fragen-an-Alfred-Muellner.pdf) (letzter Aufruf: 08.11.2021)

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit mangelt es heute an einer gezielten Förderung von grün versorgten Wasserstoff-Heizgeräten. Die aktuelle Situation verzerrt die tatsächlichen Beiträge einzelner Systeme zur (schnellen) CO<sub>2</sub>-Reduktion, wobei H<sub>2</sub>-basierte Systeme besonders benachteiligt scheinen. Z.B. ist der Heizgerätehersteller Viessmann der Ansicht, dass das Gebäudeenergiegesetz künftig auch grünen Wasserstoff beinhalten sollte. Hier erhofft sich die Branche eine eindeutigere Definition grünen Stroms und grüner Gase, sodass ein mit grünem Wasserstoff betriebenes Brennstoffzellen-BHKW nicht mehr schlechter gestellt wird als ein mit Erdgas betriebenes. Werden Brennstoffzellen-BHKW außerdem mit Biogas betrieben, sind bereits heute die CO<sub>2</sub>-Emissionen niedriger als mit elektrischen Wärmepumpen.

## 4 Beschreibung von Planungs-, Genehmigungs- und Umsetzungserfahrungen

Es ist das ureigene Interesse der Gaswirtschaft, das deutsche und europäische z.T. dichte Gasnetz zu ertüchtigen, um im Sinne der politischen Vorgaben zur Erfüllung der Klimaziele beitragen zu können. Ein wichtiger Bestandteil dieser Aktivitäten ist die Anpassung des bestehenden Regelwerkes für Erdgas (L- und H-Qualität) auf grüne Gase, insbesondere aber auf Wasserstoff. In den folgenden Unterkapiteln werden Hinweise auf für die Umstellung wichtiger technischer Regeln gegeben, bestehende Lücken aufgezeigt und im Hinblick auf die Relevanz für das Effizienzhaus Plus interpretiert.

### 4.1 Relevanz des bestehenden Regelwerks

Das heutige Gasregelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW) beinhaltet eine Vielzahl von Arbeitsblättern, die für die unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen der Gasversorgung von der Planung über die Erstellung bis hin zum sicheren Betrieb von Anlagen „anerkannte Regeln der Technik“ beschreiben. Zusätzlich gibt es Normen, die vor allen Dingen die sichere Ausführung von Heizungsgeräten beschreiben. Diese beziehen sich vornehmlich auf Serienprodukte. Mit Blick auf den europäischen Markt sind europäische Normen bzw. Zertifizierungen (CE) relevant. Auch der DVGW bereitet ein sogenanntes Zertifizierungsprogramm vor, das als Provisorium Einzelzulassungen ermöglicht. Für alle anderen Bereiche, die eher einen Projekt- denn einen Produktcharakter haben, gilt das DVGW-Regelwerk.

Die für den Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt relevanten Regelwerke sind die Arbeitsblätter G260 (Gaszusammensetzungen und ihre Beschaffenheit), G262 (Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung), auf denen die anwendungsspezifischen Arbeitsblätter aufbauen, G221 (Gasinfrastruktur) sowie G655 (Gasanwendung). Zusätzlich ist auch das Arbeitsblatt G491 von Bedeutung, das die Ausführung und den Betrieb von Gasdruckregelanlagen beschreibt. Auch das Blatt G459/2, das die Gasübergabe vom Netz an die Haushalte regelt, setzt sich bereits heute mit der Einführung von Wasserstoff auseinander. Auf der Entwicklungsstufe eines Merkblattes befindet sich das im November 2020 in erster Auflage erschienene Regelwerk „Energieeffizienz“, das nach „Gebäude“ und „Industrie“ unterscheidet. Der im Rahmen dieser Studie relevante Teil ist die technische Regel G800-1, Teil 1 – Wärmeversorgung Gebäude (DVGW G 800-1, 2020). Für jeden dieser Bereiche gibt es beim DVGW eigene Zuständigkeiten.

Das heutige DVGW-Regelwerk (Arbeitsblätter G260, G262), das im Rahmen der Überarbeitung in einer einheitlichen Regel zusammengefasst werden soll, erlaubt bereits jetzt eine Zumischung von 20 Volumenprozent H<sub>2</sub>, soll aber für 30 Volumenprozent erweitert werden. Der Anpassungsprozess des DVGW-Regelwerkes sieht vor, dass innovative Entwicklungen (zu diesen zählt die Einführung von Wasserstoff als Brenngas) zunächst über Merkblätter beschrieben werden, die aber zunächst noch nicht öffentlich abgestimmt sind, sondern auf der Gremienarbeit des DVGW intern beruhen. Ziel ist es jedoch, spätestens nach Ablauf von 5 Jahren, diese Merkblätter unter Beteiligung der Öffentlichkeit in die Arbeitsblätter zu

überführen. Entwürfe für die Merkblätter für G221, G655 und G800-1 liegen bereits vor, sodass ein sicherer Betrieb von Wasserstoffheizgeräten in absehbarer Zeit möglich wird, sowohl für den Betrieb mit H<sub>2</sub>-Zumischung als auch mit reinem Wasserstoff. Parallel dazu werden für innovative Themen sogenannte Leitfäden entwickelt, die als Zwischenstufe auf dem Weg zu einer Einführung eines innovativen Konzeptes die Auslegung oder Anwendung des bestehenden Regelwerkes beschreiben.

In der G800-1 liegt der derzeitige Fokus auf einem Überblick über innovative effiziente Gasttechnologien, konkrete Hinweise auf deren Verwendung in der Gebäudesanierung und im Neubau, dem Technologievergleich zur Effizienzsteigerung und potenziellen CO<sub>2</sub>-Einsparung, zu Fördermöglichkeiten und abschließend zum Potenzial grüner Gase wie Biomethan und Wasserstoff. Für die Gerätehersteller sind zudem die Gasgeräte-richtlinie EN 15502 (Heizkessel für gasförmige Brennstoffe) sowie der Entwurf der Feuergerätenorm EN 298 (Feuerungsautomaten für Brenner und Brennstoffgeräte für gasförmige oder flüssige Brennstoffe) von Relevanz, die ebenfalls derzeit auch für den Einsatz von Wasserstoff mit dem Entwicklungsziel Mitte 2023 angepasst werden.

Aus der heutigen Praxis der Installation erster prototypischer Wasserstoffheizsysteme kann berichtet werden, dass Heizungssysteme für bis zu 20 Volumen% H<sub>2</sub> bereits heute installiert werden können. Der Heizgerätehersteller Viessmann z.B. geht davon aus, dass bereits heute 70-75% seiner Geräte für eine H<sub>2</sub>-Zumischung von bis zu 20 Volumen% tauglich (= H<sub>2</sub>-ready) sind.

So führt, z.B. im Fall des Pilotprojektes Kaisersesch mit Inbetriebnahme eines H<sub>2</sub>-Heizkessels noch in 2022, Viessmann mit Begleitung eines Notified Bodies, in diesem Fall dem TÜV-Rheinland, auch ohne vorliegende endgültige Prüfgrundlage eine Gerätesicherheitsprüfung durch. Das Prüfergebnis wird sich dann bereits auf Grund der Beteiligung des Notified Bodies an der Gremienarbeit (wie auch der DVGW, das Engler-Bunte-Institut oder DBI bereits sehr nahe am derzeitigen Entwicklungsstand des endgültigen Regelwerkes orientieren. Selbst eine CE-Zertifizierung wird angestrebt, die es erlauben soll, die in Kaisersesch eingesetzten Heizgeräte bereits kurz nach Vorliegen der endgültigen Prüfgrundlagen ab ca. Mitte 2023 am Markt anbieten zu können.

## 4.2 Bedarf zur Regelwerksanpassung

Eine wichtige Voraussetzung für die Einführung von Wasserstoff als Energieträgermedium im Wärmemarkt ist die entsprechend richtige und genau zu spezifizierende Berücksichtigung im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Mit der letzten Novellierung des EnWG wurde „Wasserstoff“ erstmalig als weiterer gleichwertiger Energieträger neben Elektrizität und Gas aufgeführt (EnWG, 2021). Der neu eingeführte Artikel 3b enthält nun eine Regelung für reine Wasserstoffnetze. Obwohl in dieser erstmaligen Formulierung für Wasserstoffnetze Netzanschluss, -zugang und -entgelte geregelt werden sowie die Umstellung bestehender Erdgasleitungen auf reinen Wasserstoff, ist gleichzeitig eine Vorschrift zur Entflechtung und Netzplanung von Erdgas- und Wasserstoffnetz beinhaltet. Diese verhindert die Umlagefinanzierung des frühen Infrastrukturaufbaus, was die ersten Netzkunden belastet und den Zielen der Sektorenkopplung zuwiderläuft. Dieser Aspekt ist für Effizienzhäuser Plus jedoch nur dann relevant, wenn sie H<sub>2</sub> in das Gasnetz einspeisen.

Die Einführung von Wasserstoff (und zum kleinen Teil auch von Biomethan) im Wärmemarkt ist ein Eckpfeiler für das Überleben der Gaswirtschaft. Aus diesem Grund hat der DVGW einen ehrgeizigen Zeitplan

für die Umstellung von Gastransport- und -verteilnetz<sup>46</sup> als auch spezifisch für die Anpassung des Regelwerkes erarbeitet. Die Grundzüge des 2-stufigen Umsetzungsplans für die Umstellung individuell zu genehmigender Gebäude für wasserstoffhaltige methanreiche Gase oder Wasserstoff in Stufe I bzw. flächendeckend der gesamten Gasnetzinfrastruktur von Erdgas auf Wasserstoff sind aus Abbildung 28 ersichtlich.

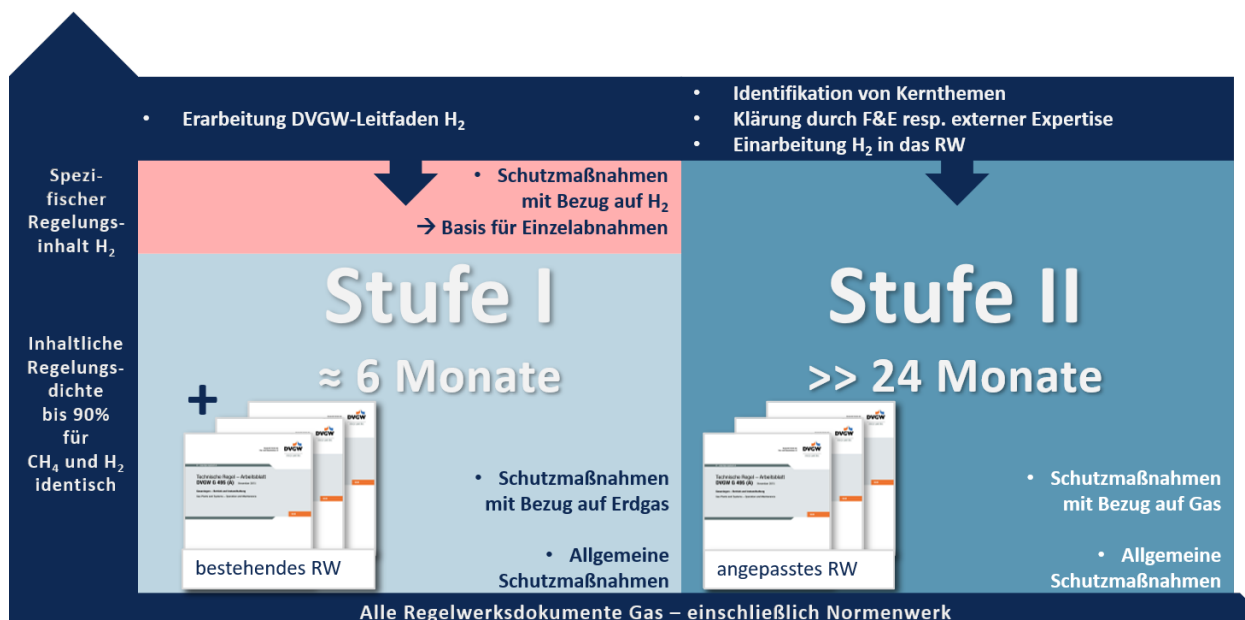


Abbildung 28: 2-stufiger Umsetzungsplan für die Umstellung einzelner Gebäude bzw. flächendeckend der Gasnetzinfrastruktur von Erdgas auf wasserstoffhaltige methanreiche Gase oder Wasserstoff (Steiner & Schrader, 2021)

Während systemische und politische Aspekte eher durch die H<sub>2</sub>-vor-Ort Aktivitäten abgedeckt werden, obliegt es der DVGW-Fachgremienarbeit, die entsprechenden Merkblätter und Leitfäden für den sicheren Umgang mit Wasserstoff zu entwickeln, die dann später sukzessive in die Arbeitsblätter überführt werden. Diese beinhalten die Zumischung von Wasserstoff als auch seine 100%ige Nutzung. So soll es ab 2023 dann möglich sein, wasserstoffhaltige Methangase oder auch Wasserstoff in geschlossenen Kellerräumen zu nutzen.

Dabei legt der DVGW Wert darauf, dass alle Anwendungsbereiche abgedeckt werden. Daher werden auch mögliche Einsatzfälle und spezifische Aspekte von Effizienzhaus Plus-Anwendungen berücksichtigt, d.h. die dezentrale Erzeugung von Wasserstoff und seiner möglichen Einspeisung in das Gasnetz bzw. die Errichtung von Heizzentralen zur Erzeugung von Nahwärme zur Quartiersversorgung. Allerdings stehen diese nicht im Fokus der Interessen der Gasnetzbetreiber.

Aus Sicht der Anlagenhersteller, und hier insbesondere ihrem Interesse zur Umsetzung erster Demonstrationsvorhaben (z.B. Siedlung Avenwedde in Gütersloh, Reallabor Kaisersesch und das H<sub>2</sub>-Habitat H<sub>2</sub>-Aiport Hopsten-Dreierwalde) haben die Projektentwickler Wege gefunden, eine frühzeitige Installation trotz noch nicht existierenden allgemeingültigen H<sub>2</sub>-Regelwerkes zu ermöglichen. Während die Heizgeräteher-

<sup>46</sup> Siehe <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/energiewende/umsetzungsplan-2050-wasserstoff-klimaneutrale-gase-dvgw.pdf>

steller sich eines sogenannten „Notified Body’s“ bedienen, Unternehmen bzw. Institutionen die die laufende Regelwerksentwicklung begleiten, um die Geräte zulassungsfähig im Hinblick auf die kommende Kommerzialisierung und sogar nahezu CE-fähig zu machen, gehen Entwickler komplexer PtG-Projekte einen anderen Weg. Hier wird durch eine sichere Aufstellung eine einfache Baugenehmigung (z.B. Powercube) ermöglicht, wenn die Anlage (z.B. ein Container) außerhalb der Gebäudehüllen bzw. sogar unterirdisch erfolgt.

Gefragt nach ihren Erwartungen im Hinblick auf das künftige Regelwerk gehen die Heizgerätehersteller als Entwickler CE-fähiger Produkte davon aus, dass sich das für die Zulassung ihrer H<sub>2</sub>-Geräte erforderliche Regelwerk bereits in Entwicklung befindet und dass ab Ende 2023 erste Geräte danach zulassungsfähig sind. Die Zulassung in der Übergangszeit bis dahin orientiert sich bereits stark an dem erwarteten Regelwerk. Sie sehen also derzeit keinen zusätzlichen Handlungsbedarf über das hinaus, was bereits heute erfolgt. Eine PtX-Projektentwicklung sprach sich für verstärkte Standardisierung bei der Regelwerksentwicklung für die Genehmigung von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen aus, da dies heute noch komplexe und langwierige Zulassungsvorbereitungen erfordere. Z.B. bedurfte es kürzlich bei der Zulassung einer H<sub>2</sub>-Tankstelle in Rheine einer Genehmigungsphase von zwei Jahren. Aber auch Projektentwickler lassen sich heute im Zweifel in Punkto Zulassung durch einen Notified Body unterstützen.

## 5 Vorschlag zur Umrüstung des Bundesmodellvorhabens

### 5.1 Das Bundesmodellvorhaben

Das damalige Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat 2011 mit dem Forschungsvorhaben »Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität« ein Gebäude in zentraler Lage Berlins errichten lassen, das deutlich mehr Energie bereitstellt, als für den Gebäudebetrieb benötigt wird. Dieser Energieüberschuss soll für die Elektromobilität verwendet werden.

Das Energiekonzept des Gebäudes ist aus Abbildung 29 ersichtlich. Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse des zweijährigen Monitorings.

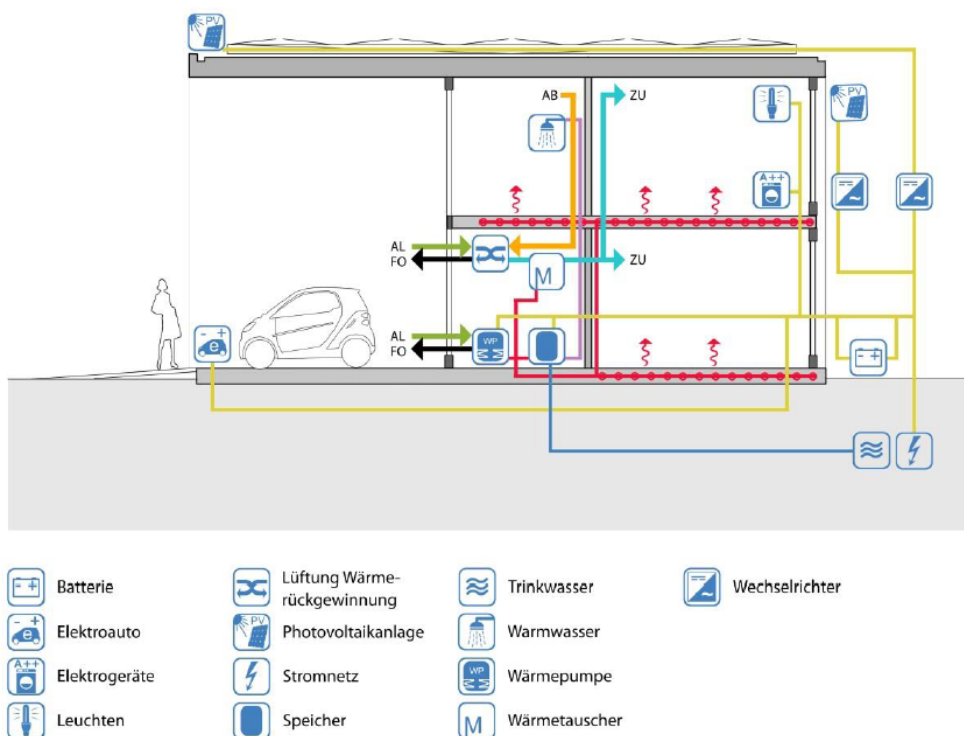


Abbildung 29: Konzept der haustechnischen Anlagen im Effizienzhaus Plus Modellvorhaben Berlin; Quelle: Fraunhofer IPB entnommen aus (BBSR, 2016)

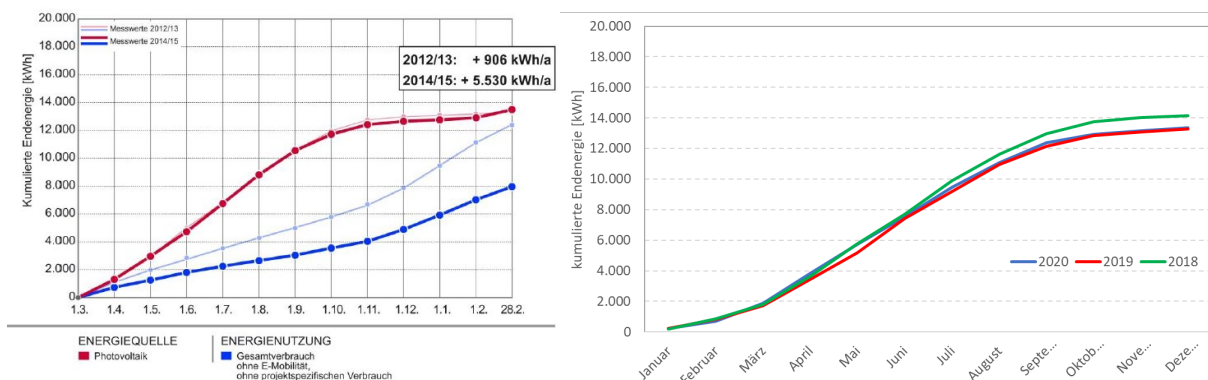


Abbildung 30: linkes Diagramm: Kumulierte Endenergie aus dem Gebäude-Monitoring im Effizienzhaus Plus Modellvorhaben Berlin (BBSR, 2016); rechtes Diagramm: Kumulierte Erträge aus Photovoltaik 2018-2020 (IKzB)

Der jährliche Ertrag aus Photovoltaik beträgt relativ konstant etwa 13.000 bis 14.000 kWh/a. Etwas mehr als die Hälfte davon wird im Gebäude selbst genutzt. Der jährliche Elektroenergieverbrauch des Gebäudes liegt laut Nebenkostenabrechnung bei etwa 7.000 bis 9.000 kWh. Schwankungen resultieren aus der unterschiedlichen Nutzung des Gebäudes. Aus den Erfahrungen der letzten Jahre kann von einer Eigenverbrauchs- bzw. Eigennutzungsquote von etwa 55 % ausgegangen werden. Die Netzeinspeisung von Überschussstrom beträgt 6.000 bis 6.500 kWh/a. Damit ließen sich vor Ort ca. 125 kg Wasserstoff im Jahr herstellen. Dies entspricht etwa sechs Gasflaschen à 20 kg, wie in Abbildung 31 dargestellt.



Abbildung 31: Sauerstoffgasflasche, z.B. 20 kg oder 50 kg (Quelle [www.hausundwerkstatt24.de](http://www.hausundwerkstatt24.de))

## 5.2 Vorschlag zur Umrüstung

Aus Sicht der Demonstration der Sinnhaftigkeit eines H<sub>2</sub>-Modellvorhabens im Effizienzhaus Plus sollten die relevanten Aspekte, die zum sinnvollen Einsatz eines Wasserstoff-Produktions- und Speichersystems im Wärmebereich erforderlich sind, in einem Demonstrationsprojekt zusammenfallen. Ziel der Um- und Nachrüstung der Wasserstoffsysteme besteht z.B. darin, Erfahrungen in einer netzdienlichen Betriebsführung zu sammeln. Bei der Auswahl einer Demonstrationsanwendung sind mindestens folgende Kriterien zu beachten

- **Richtige Skalierung:** auf Grund spezifischer Kosten- und Effizienzvorteile sollte die Installation zumindest in einem Mehrfamilienhaus und besser in einem Quartier (Power-to-X und Sektorenkopplung, Systemrelevanz) durchgeführt werden
- **Projektdauer:** die Projektlaufzeit sollte zumindest einige Jahre betragen, um Planungsphase, Testbetrieb mit Datensammlung und Auswertung zu ermöglichen.
- **Sichtbarkeit:** das Modellvorhaben sollte eine ansprechende Basis für die Kommunikation, die räumliche Relevanz und die Prominenz des Modellvorhabens bieten.
- **Systemische Relevanz:**
- **Innovation:** Wenn möglich sollte neben der Tatsache, dass ein Wasserstoff-Produktions- und Speichersystem in einem Modellvorhaben demonstriert wird, auch weitere innovative Aspekte mit untersucht werden. Diese Aspekte können z.B. in der Berücksichtigung von netz- oder systemdienlichen sowie sektorenkoppelnden Funktionen liegen. Eine weitere Innovation aus Sicht des Effizienzhaus Plus ist die Anbindung an ein vorhandenes Gasnetz, um dessen Funktion als virtueller Gasspeicher (H<sub>2</sub>-Cloud) nachzuweisen, äquivalent zum Stromnetz als virtuellem Stromspeicher.
- **Innovation:** Da die Wasserstoffanlage in der Fasanenstraße eher sehr klein und mit begrenztem funktionalen Umfang realisiert würde, würden sich nur wenige der innovativen Aspekte demonstrieren lassen. Daher dürfte die Fasanenstraße auch aus diesem Aspekt heraus wenig geeignet sein.

Auf Basis der bisher gesammelten und in diesem Bericht zusammengefassten Erkenntnisse und Erfahrungen zu Wasserstofftechnologien im Gebäudebereich werden für die Umrüstung des Effizienzhaus Plus-Gebäudes in der Fasanenstraße nachfolgend drei Fragen diskutiert. Aus den Antworten wird deutlich,

dass es zu einer Umrüstung bzw. Nachrüstung von Wasserstofftechnologien in ein bestehendes Effizienzhaus Plus keine eindeutige Position gibt, sondern Argumente sowohl für als auch gegen solche nachträglichen Maßnahmen sprechen.

1. Ist es generell sinnvoll, in das bestehende und seit 2011 betriebene Gebäude Wasserstofftechnologien nachzurüsten?

**Ja**, denn es entspräche dem Charakter eines Bundesmodellvorhabens, das Effizienzhaus Plus in Berlin auch mit Technologien zur Wasserstoffproduktion und -nutzung vor Ort auszustatten, um so die Anwendung von Wasserstofftechnologien im Kontext des Effizienzhaus Plus zu erproben und zu demonstrieren. Außerdem verfügt das Modellvorhaben über eine hohe Sichtbarkeit und Prominenz, so dass eine hohe Nachnutzung der Erkenntnisse möglich wäre (im Übrigen auch unabhängig vom Effizienzhaus Plus-Standard). Der Sinn eines Modellvorhabens ist neben der Sammlung relevanter Daten auch über die Sinnhaftigkeit des gewählten Lösungsansatzes öffentlich zu kommunizieren. Aus dieser Sicht wäre eine Ergänzung des Modellvorhabens in Berlin, also in der Nähe politischer Entscheidungsträger oder dem Sitz vieler Verbände sicherlich als sinnvoll einzustufen.

**Nein**, denn auch wenn es sich bei dem Modellvorhaben grundsätzlich um ein genutztes Gebäude handelt, wäre der Wert der auszuwertenden Daten eher eingeschränkt, da die praktische und alltägliche Nutzungsfunktion des Modellvorhabens nicht repräsentativ ist. Vorzuziehen wäre daher der Einsatz in einer realen Nutzungsumgebung.

2. Wäre die Anwendung von Wasserstofftechnologien im Modellvorhaben Fasanenstraße innovativ?

**Ja, aber** nur, wenn neben der Tatsache, dass ein Wasserstoff-Produktions- und Speichersystem in einem Modellvorhaben demonstriert wird, auch weitere innovative Aspekte mit untersucht werden. Diese Aspekte können z.B. in der Berücksichtigung von netz- oder systemdienlichen sowie sektorenkoppelnden Funktionen liegen. Eine weitere Innovation aus Sicht des Effizienzhaus Plus ist die Anbindung an ein vorhandenes Gasnetz, um dessen Funktion als virtueller Gasspeicher (H<sub>2</sub>-Cloud) nachzuweisen, äquivalent zum Stromnetz als virtuellem Stromspeicher. Generell bietet sich hier auch die Chance, den Bilanzkreis des Effizienzhauses Plus um den Energieträger Gas zu erweitern. Der Erkenntnisgewinn einer reinen Einspeisung des produzierten Wasserstoffs in örtliche Gasnetze wird als gering angesehen. Daher sollten die Komponenten Elektrolyseur, Wasserstofftank, Brennstoffzelle nachgerüstet werden. Der erforderliche Wasserstoffspeicher wird auf eine Größe von 100-200 kg geschätzt.

**Nein**, denn weil die Wasserstoffanlage in der Fasanenstraße eher sehr klein und mit begrenztem funktionalen Umfang realisiert würde, würden sich nur wenige der innovativen Aspekte demonstrieren lassen. Daher dürfte die Fasanenstraße auch aus diesem Aspekt heraus wenig geeignet sein.

3. Sind die zur Verfügung stehenden energetischen Überschüsse und damit die potenziellen Wasserstoffproduktionskapazitäten groß genug?

**Ja, aber** die systemische Relevanz des Vorhabens wäre sehr gering. Der Wasserstoff kann auch zur Nutzung als Fahrzeugkraftstoff hergestellt werden, der z.B. an die Wasserstoff-Fahrzeuge der Nationalen Organisation Wasserstoff (NOW) mit Sitz an der Fasanenstraße vertankt werden könnte. Wie die Analysen gezeigt haben, erschließt sich der Wasserstoffeinsatz für die Wärmebereitstellung immer dann besonders gut, wenn die dezentral erzeugte Wärme mit genutzt werden kann bzw. der hergestellte Wasserstoff auch netzdienlich verwendet werden kann bzw. sektorenübergreifend (z.B. stoffliche Nutzung im Gewerbe oder als Kraftstoff für die Mobilität). Ein Einsatz in einem entsprechend breit angelegten Modellvorhaben wäre daher zu begrüßen.

**Nein**, auf Grund spezifischer Kosten- und Effizienzvorteile sollte die Installation zumindest in einem Mehrfamilienhaus und besser in einem Quartier (Power-to-X und Sektorenkopplung, Systemrelevanz) durchgeführt werden. Eine wichtige Erkenntnis der Arbeiten an diesem Bericht war, dass Wasserstoff-Produktions- und Speichersysteme umso unwirtschaftlicher zu betreiben sind, je kleiner das versorgte dezentrale Objekt ist. Ein Einsatz im Einfamilienhaus wurde zwar demonstriert, der Hersteller Home Power Solutions sieht darin sogar einen Teil seines Geschäftsmodells, die Übertragbarkeit jedoch auf viele Versorgungsobjekte wird als eher gering eingestuft. Als Konsequenz bietet sich das Modellvorhaben an der Fasanenstraße daher eher nicht an. Im Gegenteil könnten die spezifische hohen Kosten bzw. die geringen Wirkungsgrade nicht nur kritische Fragen aufwerfen, sondern könnte für den Zweck der Maßnahme sogar kontraproduktiv sein. Aus der Perspektive seines Charakters als Einfamilienhaus und aus Systemsicht ist daher das Objekt Fasanenstraße eher wenig geeignet.

## Fazit und Empfehlung

Mit der Einsicht, dass sich das bestehende Modellvorhaben an der Fasanenstraße in Berlin eher nicht für die Ergänzung um eine wasserstoffproduzierende und -speichernde Anlage eignet, wird kein konkreter Vorschlag für die Umrüstung erarbeitet. Es stellt sich als nächstes vielmehr die Frage, wie denn ein geeignetes Projekt aussehen müsste. Auf der Suche danach wurden die bereits laufenden Demonstrationsprojekte noch einmal analysiert. Als ein potenziell sinnvolles Beispiel haben wir das H<sub>2</sub>-Airport-Projekt im westlichen Niedersachsen identifiziert. Es zeichnet sich nicht nur durch eine Erfüllung aller oben genannten Kriterien aus, sondern würde auf Grund der geplanten möglichen Erweiterung der Reallabor-Funktionalität sogar eine zeitlich sinnvolle und zeitnahe Umsetzung ermöglichen.

Aus Abbildung 32 ist die Unterteilung des Projektes in drei Betreibermodule oder auch, unternehmerisch gesehen, Einzelgewerke

- Betreibermodell I: Energieerzeugung,
- Betreibermodell II: Energieinfrastruktur und Anlagenbetrieb und
- Betreibermodell III: Gewerbebetrieb

zu erkennen. Jedes dieser Gewerke wird dabei von einem anderen Unternehmen koordiniert. Diese Gewerke können noch um weitere Betreibermodule ergänzt werden, was den systemischen Charakter des Projektes sogar noch erweitern würde. Denkbar wäre hier ein Modul Betreibermodul IV „Privates Wohnquartier“. Tatsächlich bestehen in der benachbarten Gemeinde Dreierwalde die Absicht, sich an das Reallabor anzuhängen, sodass sich diese ggfs. um die Aspekte der Effizienzhaus Plus Entwicklung ergänzen ließen (Niehoff, 2022). Da sich das Reallabor neben seiner Anbindung an das örtliche Stromnetz auch durch eine Gasnetzanbindung auszeichnet, würde dieses als ein innovativer Ansatz demonstriert werden können. Dieses umso mehr, als dass das Projekt in einer späteren Ausbaustufe an die H<sub>2</sub>-Transportleitung der OGE, die Lingen mit dem Ruhrgebiet verbinden soll, angeschlossen werden soll. Neben der Anwendung Wärme werden im Projekt auch die Sektoren Industrie, Kleingewerbe, Mobilität und Stromerzeugung integriert. Eine hohe Sichtbarkeit ist durch den Charakter des Reallabors gegeben, sollte diese im Juni 2022 positiv beschieden werden. Außerdem handelt es sich bei der Siedlung um eine eher ländlich geprägte Umgebung, mit der sich das Projekt von anderen bereits umgesetzten Effizienzhaus Plus Siedlungen oder -Objekten innovativ abheben würde.

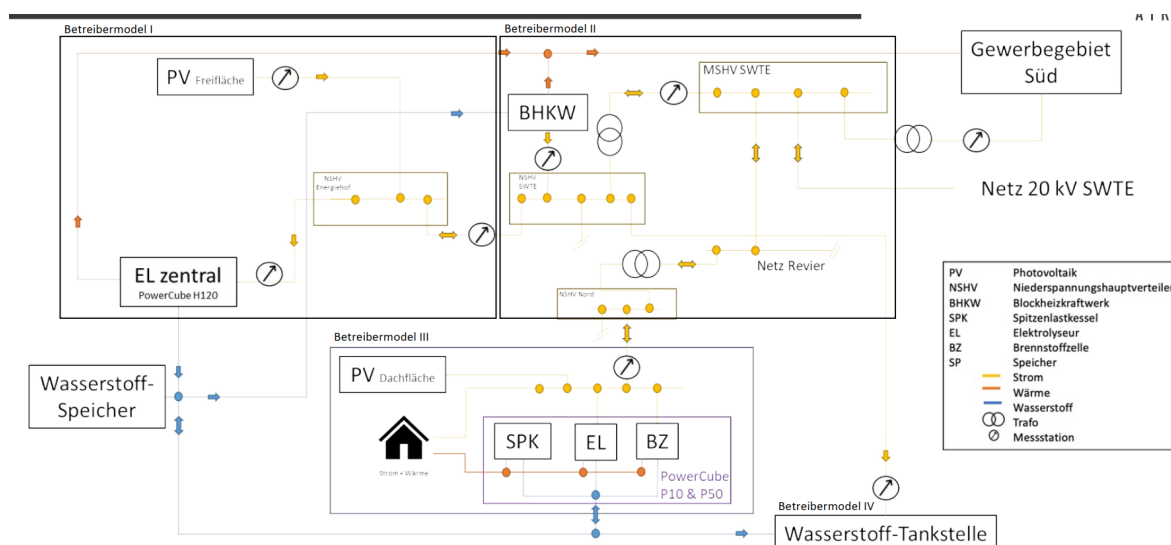


Abbildung 32: Systemische Struktur des geplanten Reallabors "H2-Airport"

In einem Projekt, wie für Dreierwalde geplant, könnte die Demonstration einer grünen Wasserstoff-Nutzung zur Nutzung in der Wärmeanwendung im Sinne des Effizienzhaus Plus Standards umfangreich und mit systemischem Charakter vollumfassend demonstriert werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die wesentlichen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen aus dem Vorhaben werden in Form von sieben Thesen formuliert und zur Diskussion gestellt. Es ist zu beachten, dass die nachfolgend aufgeführten Thesen zum Einsatz wasserstoffbasierter Technologien im Gebäudebereich Ergebnis dieser Studie sind und sich in besonderer Weise auf die Anwendung von Wasserstoff-Technologien im Effizienzhaus Plus-Gebäudestandard beziehen.

Die Thesen berücksichtigen dabei nicht nur den kurzfristigen Nutzen durch Effizienzsteigerungen im Gebäudesektor, sondern befassen sich auch vorausschauend mit der möglichen Transformation des gesamten Energiesystems hin zur künftig vollständig CO<sub>2</sub>-freien Energiebedarfsdeckung mit erneuerbaren Energien. Die Thesen lauten:

- 1. Wasserstofftechnologien für die Anwendung im Gebäude sind prinzipiell verfügbar.**  
 Technologien zur Wasserstoffherzeugung (Elektrolyse) und zeitversetzten Wasserstoffnutzung (Kessel, Brennstoffzelle) bzw. Einspeisung sind auch für den Einsatz im Gebäudebereich marktverfügbar. Damit ist ergänzend zur industriellen Wasserstoffwirtschaft eine praktische Anwendung auch mit kleinen Leistungen im Gebäudesektor technisch grundsätzlich möglich. Effizienzhaus Plus-Gebäude bieten – aufgrund der positiven Energiebilanz (mit Energieüberschüssen aus Erneuerbaren Energien und dem Erfordernis zu deren kurz- und langfristiger Speicherung) – besondere Potenziale für die Umsetzung der Wasserstoff-Technologien.
- 2. Mit abnehmender Objektgröße steigen die Gesamtkosten für H<sub>2</sub>-basierte Systeme.**  
 Die dezentrale Produktion von „grünem“ Wasserstoff sowie seine Wiederverstromung in Brennstoffzellen ist zwar ähnlich effizient wie die zentrale Produktion (d.h. Wirkungsgrade sind weitestgehend unabhängig von der Leistung der Aggregate), die umsatzbezogenen Kosten (Euro/kWh)

insbesondere der gasseitigen Infrastruktur sind für dezentrale Systeme jedoch absehbar deutlich höher, je kleiner das Objekt. Wesentliche Gründe hierfür sind hohe leistungsspezifische Investitionskosten, daraus abgeleitete hohe Fixkostenanteile und schlechtere Nutzungsgrade in Anlagen kleiner Leistung.

Volkswirtschaftlich ist es daher angeraten, auf eine dezentrale Power2Power-Transformation (PtP) auf Basis von Wasserstoff in Effizienzhaus Plus-Gebäuden zu verzichten und weiter die Stromeinspeisung zu priorisieren. Eine fluktuierende, nicht regelbare Einspeisung belastet aber das Stromverteilnetz zusätzlich und könnte zu betrieblichen Restriktionen führen (siehe These 4).

**3. Die Bilanzierungsmethodik des Effizienzhaus Plus ist um die Nutzung der Wasserstoffspeicherung zu ergänzen.**

Eine Wasserstoffproduktion im oder am Gebäude kann helfen, den Autarkiegrad der Energieversorgung zu erhöhen (siehe These 4). Die Stärkung des Autarkiegrades im Gebäudebereich durch Effizienzsteigerung und Einsatz erneuerbarer Energiequellen ist ein lohnenswertes Ziel. Gleichzeitig steigt die Resilienz des Energiesystems.

Es entstehen jedoch weitere verlustbehaftete Umwandlungsketten (z. B. Elektrolyse, Brennstoffzelle). Damit verschlechtert sich die Endenergiebilanz und die Gebäude verlieren ggf. den Status des Effizienzhaus Plus.

Die primärenergetische Anrechnung der Wasserstoffeinspeisung und die Nutzung des Gasverteilnetzes als virtueller Gasspeicher sind zu klären.

**4. Nichtautarke, dezentrale H<sub>2</sub>-basierte und P-to-Power-Systeme haben immer Wirkungen auf das Gesamtsystem.**

Die höhere dezentrale Autarkie ist konform mit einem künftig voll erneuerbar versorgten Energiesystem (Entlastung Stromverteilnetz, Sektorenkopplung, öffentliche Akzeptanz). Jedoch ist die systemische Wirkung der dezentralen Produktion von grünem Wasserstoff mit den Optionen Einspeisung in das Gasnetz<sup>47</sup> oder die Wiederverstromung in Brennstoffzellen näher zu betrachten und zu untersuchen.

Es sind geeignete Lenkungs- und Anreizsysteme zu etablieren sowie Einspeiseregeln zu entwickeln.

**5. Technologieoffenheit wahren und Praxiserfahrungen sammeln**

Der Einsatz von wasserstoffbasierten Technologien in Gebäuden und Quartieren sollte förderlich und regulativ maßvoll unterstützt werden, um technisch-wirtschaftliche Praxiserfahrungen zu sammeln, den Hochlauf eines Wasserstoffmarktes zu begleiten (inkl. Technologieanbieter) und die Akzeptanz zu erhöhen; wasserstoffbasierte Lösungen könnten eine mögliche Option für den Effizienzhaus Plus-Gebäudestandard werden, da Wasserstoffanwendungen dabei helfen können, die Energieüberschüsse aus Erneuerbaren Energien im Effizienzhaus Plus durch Energiespeicherung zu optimieren.

**6. Regelwerks- und genehmigungstechnischer Rahmen sind zu entwickeln.**

Das aktuelle Regelwerk für den Wasserstoffeinsatz im Gebäudebereich ist kompatibel zum derzeit in Entwicklung befindlichen DVGW-Regelwerk anzupassen, um zusätzliche Hürden und Kosten im Genehmigungsprozess zu vermeiden. Dies gilt sowohl für den Effizienzhaus Plus-Gebäudestandard als auch für konventionelle GEG-Gebäude.

**7. Aktivitäten zur Etablierung von Wasserstoff-Technologien mindern die Abhängigkeiten von Erdgas als dominierenden Energieträger im Gebäudesektor.**

Deutschland besitzt eine der dichtesten Gas-Infrastrukturen in Europa; 55% der Wärmeversorgung erfolgt mittels Erdgas. Bestehende Abhängigkeiten von fossilen Erdgasimporten erfordern

---

<sup>47</sup> Einspeisung in das Gasnetz umfasst alle sonstigen Verwertungen des Gases durch Dritte an anderer Stelle inkl. Verkehrssektor, Gewerbe, ...; anstelle der Einspeisung ist auch das nichtleitungsgebundene Sammeln und Abtransportieren gemeint

Anstrengungen in der Bereitstellung CO<sub>2</sub>-freier Gase (potenzialbeschränkt Biomethan und Wasserstoff), Auch in Deutschland werden neben anderen Ländern wie Großbritannien und den Niederlanden bereits Wasserstoffanwendungen im Gebäudebereich erprobt. Dabei werden strategische Überlegungen und Pläne verfolgt, um Wasserstoff wahlweise in bestehende Infrastrukturen einzubinden und neue Erzeugungs- und Verteilsysteme zu errichten. Die bestehende dichte Gasinfrastruktur ist ein aus strategischer Sicht wichtiger und kostendämpfender Bestandteil einer schnellen CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktionsstrategie auch im Gebäudebestand.

#### 8. Internationale Zusammenarbeit

Die Aktivitäten im Bereich des Wasserstoffeinsatzes zur Wärmeversorgung haben in anderen Ländern bereits einige Aktivitäten hervorgerufen, die zur Entwicklung und Anwendung realer Systeme (NL, UK, JP), zu einem intensiven Austausch mit Endanwendern (NL), zur Entwicklung von Simulationssoftware zum Vergleich unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-freier Heizsysteme aber auch zur Entwicklung angepasster Routinen zum sicheren Umgang mit Wasserstoff im privaten Umfeld geführt haben. Die Kontakte, die im Rahmen dieser Studie genutzt wurden, um Expertenwissen zum Studienthema zu beschaffen, lassen die Fortführung bzw. Intensivierung dieser Kontakte als sinnvoll erscheinen, wurden doch interessante Aspekte aufgegriffen, die in einem allein deutschen Kontext bisher nicht aufgefallen sind.

## 7 Literaturverzeichnis

- A. Gehling, M. Graß. (2021). *Innovation und Fortschritt: Atlas der Wasserstoff-Netzwerke in Deutschland*. Abgerufen am 18. 02 2022 von NOW GmbH: <https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/08/NOW-Atlas-H2-Netzwerke.pdf>
- A. Wang, K. van der Leun, D. Peters, M. Busema. (Juli 2020). *European Hydrogen Backbone – How a dedicated hydrogen infrastructure can be created*. Abgerufen am 11. 02 2022 von Studie von Guidehouse für Enagás, Energinet, Fluxys Belgium, Gasunie, GRTgaz, NET4GAS, OGE, ONTRAS, Snam, Swedegas, Terégas: [https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/07/2020\\_European-Hydrogen-Backbone\\_Report.pdf](https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2020/07/2020_European-Hydrogen-Backbone_Report.pdf)
- BBSR. (2016). Steckbrief zum Effizienzhaus – Plus mit Elektromobilität Berlin. (N. B. Bundesministerium für Umwelt, Hrsg.)
- BDEW. (Juni 2020a). *Roadmap Gas: Dekarbonisierung, Versorgungssicherheit und Flexibilität mit klimaneutralen Gasen*. Abgerufen am 7. 10 2021 von <https://www.bdew.de/service/publikationen/roadmap-gas/>
- BDEW. (04. 09 2020b). *Stellungnahme zur Marktkonsultation der BNetzA zur Regulierung von Wasserstoffnetzen*. Abgerufen am 7. 10 2021 von <https://www.bdew.de/media/documents/5053798.pdf>
- BMI. (2018). *Wege zum Effizienzhaus Plus. Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude*. 6. Aufl. .
- BMWi. (Juni 2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie. Herausgegeben durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)*. Abgerufen am 27. 9 2021 von [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=20](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20)

- BMWi. (Februar 2021). *Dialog Klimaneutrale Wärme. Zielbild, Bausteine und Weichenstellungen 2030/2050*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/dialog-klimaneutrale-waerme-zielbild-bausteine-weichenstellung-2030-2050.html> abgerufen
- Bosch. (2021). *Energieeffizient in die Zukunft - Das stationäre Brennstoffzellen-System von Bosch. Infobroschüre der Bosch GmbH*. Abgerufen am 27. 9 2021 von <https://assets.bosch.com/media/de/global/stories/sofc/solid-oxide-fuel-cell.pdf>
- Bothe, D., & Janssen, M. (2021). *Die Rolle von Wasserstoff im Wärmemarkt*. frontier economics.
- Brint. (November 2020). *VE 2.0 - Brint- og PtX-strategi, Analyse af potentialerne for storskala brint og PtX i Danmark; Bericht der Brintbranchen Hydrogen Denmark*. Abgerufen am 27. 09 2021 von <https://brintbranchen.dk/wp-content/uploads/2020/10/VE-2.0-Brint-og-PtX-strategi-2.pdf>
- Bukold. (2020). *Blauer Wasserstoff - Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades*. Abgerufen am 24. 3 2022 von <https://green-planet-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>
- Bünger, U., Zittel, W., & Schmalschläger, T. (1993). *Durchführbarkeitsstudie für einen räumlich begrenzten H2-Einsatz im Versorgungsgebiet der Stadtwerke München*. Studie der Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH im Auftrag der Stadtwerke München.
- Dan Sadler et. al. (2016). *Leeds City Gate. Studie der Northern Gas Networks gemeinsam mit den Partnern Wales & West Utilities, kiwa Gastec, und Amec Foster Wheeler*. Abgerufen am 29. 6 2022 von <https://h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/>
- Deutscher Bundestag. (03. 04 2020). *Kosten der Produktion von grünem Wasserstoff. Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 029/20*. Abgerufen am 8. 11 2021 von <https://www.bundestag.de/resource/blob/691748/01a954b2b2d7c70259b19662ae37a575/WD-5-029-20-pdf-data.pdf>
- DVGW. (2019). *M. Zdrallek, H. Krause, R. Albus, A. Moser: Potenzialstudie von Power-to-Gas-Anlagen in deutschen Verteilungsnetzen*. Abgerufen am 09. 02 2022 von Studie des RWTH-IAEW, gwi, DBI-GUT und Bergische Universität Wuppertal für den DVGW: <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g201617-ptg-potenziale-verteilnetze-abschlussbericht.pdf>
- DVGW. (2020). *H2vorOrt – Wasserstoff über die Gasverteilnetze für alle nutzbar machen*. Abgerufen am 22. 10 2021 von <https://www.dvgw.de/themen/energie/wende/wasserstoff-und-energie/wende/h2vorort-wasserstoff-gasverteilnetz-dvgw-broschuere.pdf>
- DVGW G 800-1. (2020). *DVGW-TRGE Effizienz, Technische Regel, Teil 1 - Wärmeversorgung Gebäude. Merkblatt zur TRGE Gebäude*. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- EC. (2021). *European Commission: Impact Assessment for Communication “Stepping up Europe’s 2030 Climate Ambition”*. Abgerufen am 7. 10 2021 von [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/eu-climate-action/docs/impact\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/eu-climate-action/docs/impact_en.pdf)
- EHB. (Juni 2021). *European Hydrogen Backbone – Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen*. Abgerufen am 7. 10 2021 von <https://gasforclimate2050.eu/wp->

content/uploads/2021/06/EHB\_Analysing-the-future-demand-supply-and-transport-of-hydrogen\_June-2021\_v3.pdf

- EHB. (2022). *European Hydrogen Backbone – Five hydrogen supply corridors for Europe in 2030*. Abgerufen am 4. 6 2022 von [https://ehb.eu/files/downloads/1653999355\\_EHB-Supply-corridors-presentation-Full-compressed-1.pdf](https://ehb.eu/files/downloads/1653999355_EHB-Supply-corridors-presentation-Full-compressed-1.pdf)
- Enapter. (2021). *Produktdatenblatt Elektrolyseur EL 2.1*. Abgerufen am 16. 2 2022 von [https://handbook.enapter.com/electrolyser/el21a/downloads/Enapter\\_Datasheet\\_EL21a\\_EN.pdf](https://handbook.enapter.com/electrolyser/el21a/downloads/Enapter_Datasheet_EL21a_EN.pdf)
- Energistyrelsen. (2014). *Gasinfrastrukturen - Den fremtidige anvendelse af gasinfrastrukturen. Berichte der dänischen nationalen Energistyrelsen*. Abgerufen am 27. 9 2021 von [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/EnergiKlimapolitik/gasinfrastrukturen\\_-\\_analyse\\_2014\\_web.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/EnergiKlimapolitik/gasinfrastrukturen_-_analyse_2014_web.pdf)
- EnWG. (2021). Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG). *BGBI. I S. 3436*.
- EU. (Januar 2019). *EU EC JRC – Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050; FCH JU Roadmap*. Abgerufen am 7. 10 2021 von [https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe\\_Report.pdf](https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf)
- Fasold, H.-G. (1988). Wasserstoffgas – ein potentieller Energieträger des 21. Jahrhunderts ? Möglichkeiten von Transport, Verteilung und Speicherung. *Gwf-Gas/Erdgas* 129, S. 281-291.
- Gatzen, C., & Lenz, A.-K. (2021). *Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Wärmesektors*. frontier economics.
- GDW. (September 2021). *Die Wohnungswirtschaft Deutschland: Information Wasserstoffnutzung in der Wohnungswirtschaft*. Abgerufen am 8. 11 2021 von [https://www.gdw.de/media/2021/05/21\\_05\\_11\\_gdw-positionspapier-zu-wasserstoffnutzung-in-der-wohnungswirtschaft\\_de.pdf](https://www.gdw.de/media/2021/05/21_05_11_gdw-positionspapier-zu-wasserstoffnutzung-in-der-wohnungswirtschaft_de.pdf)
- Graf. (2019). *EU-wide innovation support is key to electrolysis in Europe. Bericht von Agora Energiewende*. Abgerufen am 24. 2 2022 von <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/opinion/eu-wide-innovation-support-is-key-to-electrolysis-in-europe/>
- Hoogeveen. (November 2020). *Waterstofwijk - Plan voor waterstof in Hoogeveen. Öffentlicher Bericht des Waterstof Hoogeveen Konsortiums*. Abgerufen am 27. 09 2021 von [https://www.researchgate.net/publication/345429782\\_Waterstofwijk\\_Plan\\_voor\\_Waterstof\\_in\\_Hoogeveen\\_-\\_Hydrogen\\_plan\\_in\\_the\\_Dutch\\_town\\_of\\_Hoogeveen](https://www.researchgate.net/publication/345429782_Waterstofwijk_Plan_voor_Waterstof_in_Hoogeveen_-_Hydrogen_plan_in_the_Dutch_town_of_Hoogeveen)
- IEA. (2020). *International Energy Agency: The Netherlands 2020 - Energy Policy Review. Country report 2020*. Abgerufen am 13. 10 2021 von <https://www.iea.org/reports/the-netherlands-2020>
- J. Bard, N. Gerhardt. (2022). *The limitations of hydrogen blending in the European gas grid*. Berlin: Fraunhofer IEE im Auftrag der European Climate Foundation (ECF).
- J. Jens, A. Wang, K. van der Leun, D. Peters, M. Busema. (April 2021). *Extending the European Hydrogen Backbone - A European hydrogen infrastructure vision covering 21 countries*. Abgerufen am 11. 02 2022 von Studie von Guidehouse für Creos, DESFA, Elering, Enagás, Energinet, Eustream, FGSZ, Fluxys Belgium, Gasgrid Finland, Gasunie, GAZ-SYSTEM, GCA, GNI, GRTgaz, National Grid, NET4GAS, Nordion Energi, OGE, ONTRAS, Plinovodi, Snam, TAG, Teréga:

[https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/06/European-Hydrogen-Backbone\\_April-2021\\_V3.pdf](https://gasforclimate2050.eu/wp-content/uploads/2021/06/European-Hydrogen-Backbone_April-2021_V3.pdf)

- N. Gebhardt et. al. (2020). *Studie zum Einsatz von H2 im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung*. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE.
- Neue Weststadt. (2021). *Klimaneutrales Stadtquartier, Leuchtturmprojekt Solares Bauen / Energieeffiziente Stadt in Esslingen am Neckar. Entwurf einer Informationsbroschüre eines Projektes der Stadt Esslingen mit dem Steinbeis-Innovationszentrum Energie, Gebäude- und Solartechnik*.
- Niehoff. (2022). Persönliche Mitteilung Hr. Sebastian Niehoff, Geschäftsführer der BEN-Tec in Rheine am 11.05.2022.
- Rexroth, S. et.al. (2017). *Endbericht der Modellvorhaben Effizienzhaus Plus Nr. 33. Wissenschaftliche Begleitung des Effizienzhaus Plus LaVidaVerde*. Berlin: HTW.
- Rongé, J., & Francois, I. (2021). *Use of hydrogen in buildings. BatHyBuild study*. KU Leuven.
- S. Gersen, M. v. (2020). *Demonstration of high performance (low NOx) domestic hydrogen boilers*. Abgerufen am 16. 02 2022 von [https://www.wasserstofhoogeveen.nl/fileadmin/waterstof\\_hoogeveen/PDF/DNV\\_GL\\_\\_\\_-\\_Bekaert\\_-\\_Demonstration\\_of\\_domestic\\_hydrogen\\_boilers\\_-\\_November\\_5\\_-\\_2020.pdf](https://www.wasserstofhoogeveen.nl/fileadmin/waterstof_hoogeveen/PDF/DNV_GL___-_Bekaert_-_Demonstration_of_domestic_hydrogen_boilers_-_November_5_-_2020.pdf)
- SPD, B90/Grüne, FDP. (2021). *Koalitionsvertrag 2021-2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*.
- Steiner, K., & Schrader, A. (8 2021). *Anwendung des DVGW-Regelwerkes auf die leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Wasserstoff. energie / wasser-Praxis*.
- Tjarks, G. (2017). *PEM-Elektrolyse-Systeme zur Anwendung*. Dissertation RWTH Aachen: ISBN 978-3-95806-217-7.
- Viessmann. (Dezember 2020). *Heizen mit Wasserstoff – Innovative Brennwertechnik für die klimaneutrale Zukunft. Produktpräsentation*. Abgerufen am 27. 9 2021 von <https://www.viessmann.family/de/newsroom/loesungsangebot/heizen-mit-wasserstoff-innovative-brennwertechnik-fuer-die-klimaneutrale-zukunft>
- Viessmann. (Februar 2021). *Wegweiser „Zukunftstechnologie: Heizen mit Wasserstoff“*. Informationsbroschüre der Viessmann Deutschland. Abgerufen am 27. 09 2021 von <https://www.viessmann.de>
- VKU. (2017). *Erdgasinfrastruktur in der Zukunft: Darauf können wir aufbauen*. Abgerufen am 9. 2 2022 von [https://www.vku.de/fileadmin/user\\_upload/Verbandsseite/Sparten/Energiewirtschaft/Gasthemen/VKU\\_Broschuere-Erdgas\\_2050.pdf](https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/Verbandsseite/Sparten/Energiewirtschaft/Gasthemen/VKU_Broschuere-Erdgas_2050.pdf)
- VKU. (02. 03 2021). *Positionspapier: Strategie zur Transformation der Gasverteilnetze*. Abgerufen am 7. 10 2021 von

[https://www.vku.de/fileadmin/user\\_upload/210302\\_Strategie\\_Transformation\\_der\\_Gasverteilnetze.pdf](https://www.vku.de/fileadmin/user_upload/210302_Strategie_Transformation_der_Gasverteilnetze.pdf)

WVStahl. (Dezember 2020). *Engagement für Stahl - Jahresbericht 2020*. Abgerufen am 15. 2 2022 von Wirtschaftsvereinigung Stahl: [https://issuu.com/stahlonline/docs/wv-stahl\\_jahresbericht\\_2020-rz\\_web\\_final](https://issuu.com/stahlonline/docs/wv-stahl_jahresbericht_2020-rz_web_final)