

Die Rolle des Wasserstoffs in Deutschlands Wohngebäuden

**Kevin Knosala^{1(a)}, Lukas Langenberg^(a), Noah Pflugradt^(a), Peter Stenzel^(b),
Leander Kotzur^(a), Detlef Stolten^(a,c)**

^(a) Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Deutschland; ^(b) TH Köln, Cologne Institute for Renewable Energy (CIRE), Betzdorfer Straße 2, 50679 Köln, Deutschland; ^(c) Lehrstuhl für Brennstoffzellen, RWTH Aachen University, c/o Institut für Techno-ökonomische Systemanalyse (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH

Kurzfassung:

Die vorliegende Bottom-up-Studie untersucht die Rolle des Wasserstoffs für die klimaneutrale Energieversorgung von Gebäuden im Vergleich zu strombasierten Systemen. Basierend auf einer Auswahl von Typgebäuden für Ein- und Mehrfamilienhäuser unterschiedlichen Baujahrs wurden für jedes Gebäude Bedarfsprofile simuliert und das jeweils kostenoptimale Versorgungssystem bestimmt. Für den Aufbau dieses Systems standen die mit Strom betriebenen Technologien Heizgerät und Wärmepumpe sowie die Wasserstofftechnologien Wasserstoff-Brennwertkessel und Brennstoffzellen-KWK zur Verfügung. Basierend auf den Ergebnissen der Optimierung wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese Analysen verfolgen das Ziel, Schwellwerte des Energieträgerpreises für die Nutzung von Wasserstoff in Gebäudeenergiesystemen zu identifizieren sowie dessen stufenweise Nutzung sichtbar zu machen. Die aus den Sensitivitätsanalysen identifizierbaren Schwellwerte der Wasserstoffnutzung im Gebäude zeigen, dass Wasserstoff in diesem Sektor zukünftig eine gewichtige Rolle spielen kann. Wasserstoffbasierte Energiesysteme stellen eine wirtschaftlich sinnvolle Alternative zu strombasierten Systemen mit Wärmepumpen dar. Sie können zur Wärmeversorgung und mit Kraft-Wärme-Kopplungs- (KWK) Anlagen auch zur Stromversorgung von Gebäuden genutzt werden. Strom-Wasserstoff-Preis-Verhältnisse für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Wasserstoff in den untersuchten Gebäuden reichen von 1,67 bis 2,82. Oberhalb dieser Werte ist ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden möglich. Für die einzelnen Gebäudegruppen kann für das Jahr 2050 eine Kennzahl von 2,5 für Einfamilienhäuser und 1,8 für Mehrfamilienhäuser ermittelt werden, die durch den Einsatz von KWK begünstigt wird. Welche Rolle Wasserstoff zukünftig spielen wird, hängt zu großen Teilen von politischen Entscheidungen zu Verteilungsfragen und Preissignalen ab.

Keywords: Wohngebäude, Wärmeversorgung, Wasserstoff, Renovierung, Preissensitivität, Bottom-up

¹ Jungautor, k.knosala@fz-juelich.de, www.fz-juelich.de/iek/iek-3

1 Motivation

Mit dem Klimaschutzgesetz 2021 verankert die deutsche Bundesregierung das Ziel der Klimaneutralität in allen Sektoren bis zum Jahr 2045 [1]. Der Gebäudesektor in Deutschland ist, Stand 2020, durch den Einsatz von Brennstoffen für Heizung und Warmwasser-Bereitung für 16% der gesamtdeutschen CO₂-Emissionen verantwortlich [2]. Um einen treibhausgasneutralen Gebäudesektor zu erreichen, wird in der Nationalen Wasserstoffstrategie der Einsatz von Wasserstoff im Wärmemarkt als ein Baustein ausdrücklich genannt [3]. Die vorliegende Studie untersucht in diesem Kontext die Rolle des Wasserstoffs für die klimaneutrale Energieversorgung von Gebäuden im Vergleich zu strombasierten Systemen. Es sollen Schwellwerte des Wasserstoffpreises für unterschiedliche Gebäudegruppen bestimmt werden, ab denen der wirtschaftlich sinnvolle Einsatz von Wasserstoff in Betracht gezogen werden kann.

1.1 Szenarien für das Energiesystem der Zukunft

Während die Bedeutung von Wasserstoff zur Dekarbonisierung des Deutschen Energiesystems sowohl von Forschern als auch von politischen Entscheidungsträgern erkannt wird, ist die Rolle von Wasserstoff im Gebäudesektor in Energieszenarien unklar. Gerhardt et al. weisen in ihrer Studie zum Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden für das Energiesystem der Zukunft auf die geringe Energieeffizienz des Heizens mit Wasserstoff hin und argumentieren mit dem hohen Energiebedarf des Gebäudesektors und den hohen Umrüstkosten für Wasserstoffkessel gegen den Einsatz von Wasserstoff im Gebäude [4]. Sie plädieren für den flächendeckenden Einsatz von Wärmepumpen, auch ohne Sanierung des Gebäudebestandes, und damit für die direkte Nutzung von Strom. In Studien mit einem größeren Blickwinkel auf das Energiesystem werden ebenfalls Wärmepumpen sowie zusätzlich Fernwärme für die Wärmeversorgung bevorzugt [5]–[8]. Im Allgemeinen wird Wasserstoff, aufgrund seiner hohen Energiedichte und geringen Treibhausgas-Emissionen, als große Chance zur Dekarbonisierung des Industrie- und Transportsektors gesehen, die Rolle im Gebäudesektor wird als gering eingeschätzt [9]. Es ist jedoch zu beobachten, dass durch ein vermehrtes Aufkommen in den Sektoren Industrie und Verkehr regionale Systeme entstehen, welche Wasserstoff im Gebäude nutzbar machen könnten. Prädestiniert dafür sind Gebiete im Norden Deutschlands, in denen aus überschüssigem Strom aus Windkraft Elektrolyseure betrieben werden, als auch im Ruhrgebiet, in dem der Industriebedarf besonders hoch ist. Hinzu kommt, dass durch eine Umwidmung bestehender Gasnetze deren Rückbau verhindert wird. Schließlich ist eine Elektrifizierung einiger Häusertypen aufgrund von Platzrestriktionen oder Denkmalschutz in einigen Fällen nicht möglich. Hier kann die Versorgung mit Wasserstoff eine Alternative zum Fernwärmenetz darstellen. Die genannten Top-down-Studien sind nur bedingt in der Lage solche regionalen Entwicklungen abzubilden [9].

1.2 Stand der Technik von Versorgungskomponenten mit Wasserstoff im Gebäudesektor

Ein möglicher Transformationspfad hin zur Anwendung von Wasserstoff im Gebäudesektor kann die Beimischung von Wasserstoff in das Gasnetz sein. Schiri et al. stellen fest, dass eine Beimischung von bis zu 20% Wasserstoff in Erdgas für Haushaltsgaskessel möglich ist [10]. Gemische mit einem höheren Wasserstoffgehalt erfordern aufgrund des niedrigeren Heizwerts

von Wasserstoff einen höheren Brennstoffdurchsatz, um die gleiche Wärmeleistung zu erreichen. Außerdem muss der Brenner bei einem Wasserstoffgehalt von mehr als 20% neu konstruiert werden, um das Risiko einer unbeabsichtigten Zündung und eines Rückschlags zu vermeiden [10].

Worcester-Bosch geht als führender Hersteller von Gaskesseln davon aus, dass wasserstofftaugliche Kessel die gleichen Kosten verursachen werden wie derzeitige Erdgaskessel [11]. Neben der Anschaffung neuer wasserstofftauglicher Heizkessel besteht eine Möglichkeit darin, bestehende Erdgaskessel mit neuen Brennerspitzen und Steuerungen nachzurüsten. Bundesweite Umrüstungsmaßnahmen wurden bereits bei der Umstellung von Stadtgas auf Erdgas durchgeführt und können als Beispiel dienen [12]. Als Feldversuch für Wasserstoffheizungen wird ein Wohnkomplex in den Niederlanden mit 100% Wasserstoff beheizt, wobei wasserstofftaugliche Heizkessel zum Einsatz kommen [13].

Alternativ zu wasserstofftauglichen Heizkesseln können (Mikro-)KWK-Anlagen mit einer Brennstoffzelle zur Anwendung kommen [12]. Bei einem entsprechenden Verhältnis zwischen Wärme- und Strombedarf bieten diese Systeme eine deutlich höhere Effizienz der Umwandlung. Für Anwendungen in Privathaushalten werden in der Regel Protonenaustauschmembran- (PEM) und Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) gewählt. Preise für Brennstoffzellen-Geräte sinken stetig. Zwischen 2012 und 2018 halbierte sich der Preis auf etwa 8.400 €/kW_{el}, während die Lebensdauer der Komponenten stieg [12]. Gegenwärtig werden Brennstoffzellensysteme mit Erdgas betrieben, können aber mit geringfügigen Modifikationen auch auf Wasserstoff umgestellt werden.

2 Methodik

Zur Untersuchung der Rolle des Wasserstoffes für die klimaneutrale Energieversorgung von Gebäuden wird eine Optimierung von Gebäudeenergiesystemen mit dem Ziel minimaler Investitions- und Betriebskosten durchgeführt.

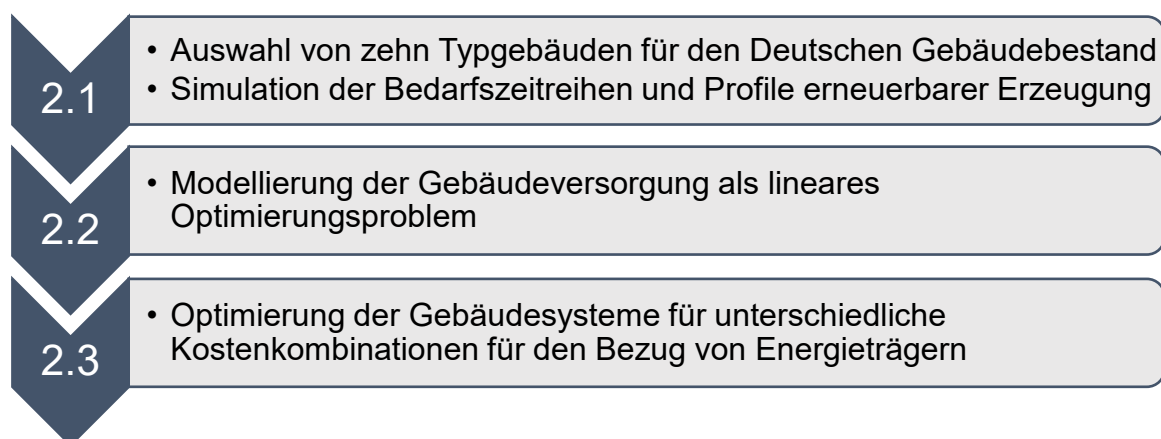


Abbildung 1: Flowchart der methodischen Vorgangsweise.

Hierbei wird sowohl die Strom- als auch die Wärmeversorgung der Systeme betrachtet. Als Ausgangspunkt dieser Optimierung werden stündlich aufgelöste Lastprofile für Strom und Wärme für zehn Typgebäude simuliert. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht des Vorgehens.

2.1 Auswahl und Simulation der Typgebäude

Die Typgebäude stellen eine exemplarische Auswahl aus dem deutschen Gebäudebestand mit Baujahren zwischen 1919 und 2016 dar, welche aus der TABULA Datenbank für Gebäudetypologien in Deutschland entnommen wurden [14]. Betrachtet werden Einfamilienhäuser (EFH) in Reihen- und freistehender Bauweise sowie Mehrfamilienhäuser (MFH) mit 6, 12 und 20 Haushalten. Mithilfe der Gebäudetypologien wurden die Wärmeübergangskoeffizienten der Gebäudehüllen für unterschiedliche Renovierungsstufen bestimmt (keine Renovierung, übliche Renovierung, ambitionierte Renovierung).

In dieser Bottom-up-Studie wurde das Bewohnerverhalten anhand einer agentenbasierten Bedürfnissimulation² bestimmt. Die Simulation ergibt ein minutengenaues Profil der Bewohneraktionen im Haushalt, Abwesenheits- und Schlafzeiten. Aus den Bewohneraktionen und Annahmen zum Verbrauch der elektrischen Geräte des Haushaltes wurden elektrische Bedarfsprofile und Profile des Warmwasserbedarfs pro Haushalt bestimmt. Die Profile des Raumwärmebedarfs pro Haushalt wurden anhand der Aktivitätsprofile, der Parameter der Gebäudehülle in Abhängigkeit der Renovierungsstufe und Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes für ein typisches Meteorologisches Jahr (TRY) für die Region Köln im Python-Paket TSIB³ in einer 5R1C-Gebäudewärmesimulation bestimmt. Hinzu kommen Profile der Stromerzeugung [kWh/(kW_p·a)] aus Photovoltaik auf den Dachflächen, welche für die Ausrichtungen Süd-Ost und Nord-West mithilfe des Python-Pakets pvLib⁴ bestimmt wurden.

2.2 Modellierung des Versorgungssystems

Im Zuge der Optimierung der klimaneutralen Energiesysteme der einzelnen Typgebäude können verschiedene mit erneuerbarem Strom oder grünem Wasserstoff betriebene Versorgungssysteme sowie zwei Sanierungspakete zur Reduktion des Wärmebedarfs gewählt werden, siehe Abbildung 2. Die Wahl des Sanierungspaketes beeinflusst die nötige Vorlauf-temperatur des Heizungssystems sowie den simulierten Gesamtwärmebedarf.

² <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/LoadProfileGenerator>

³ <https://github.com/FZJ-IEK3-VSA/tsib>

⁴ <https://github.com/pvlib/pvlib-python>

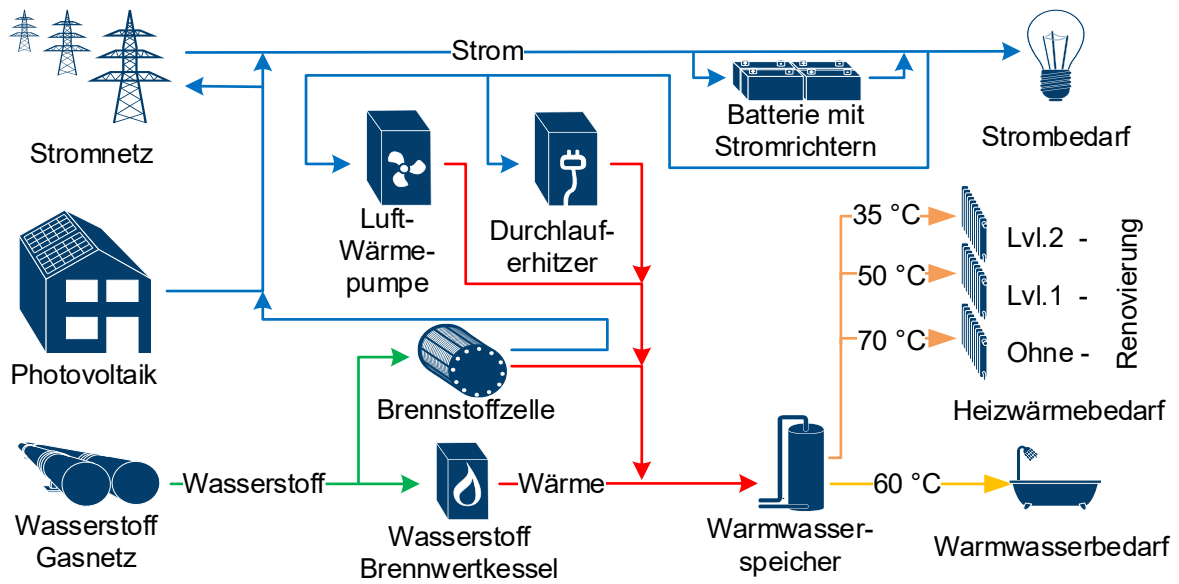


Abbildung 2: Technologien und Verschaltung eines möglichen Versorgungsystems.

Zur strombasierten Wärmeversorgung stehen dem Modell eine Luft-Wasser Wärmepumpe und ein Durchlauferhitzer zur Verfügung. Der Coefficient of Performance (COP) der Wärmepumpe ist dabei abhängig von dem Verhältnis der Außentemperatur zu jeder Stunde zur Vorlauftemperatur des Heizungssystems. Mit Wasserstoff aus dem Verteilnetz kann ein Wasserstoff Brennwertkessel sowie eine Brennstoffzelle betrieben werden. Bei der Brennstoffzelle wird weiter zwischen eine Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) und einer Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) unterschieden. Wesentlich für das Gebäudeversorgungssystem sind Unterschiede zwischen den beiden Technologien in der Temperatur der Abwärme (90 und 600 °C) und in der Modulierbarkeit des Betriebs, welche im Falle der SOFC nur eingeschränkt möglich ist (Mindestlast 30%). Es werden unterschiedliche Temperaturniveaus der Wärmeerzeugung und des Bedarfs im Modell berücksichtigt. Ein geschichteter Wärmespeicher ist in der Lage Wärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus einzuspeichern und abzugeben. Ein Batteriespeicher kann zur Zwischenspeicherung des mit der Photovoltaikanlage erzeugten Stroms gewählt werden.

Tabelle 1: Auszug aus den techno-ökonomischen Annahmen für das Gebäude-Energiesystem. Zur Berechnung der annualisierten Kosten über die Komponentenlebensdauer wurde ein Zinssatz von 3% angenommen. Detaillierte Annahmen sind in [15] zu finden.

	Investment fix [€]		Investment variabel [€/kW]		O&M fix [€]		O&M variabel [€/kW]		Lebensdauer [a]
	2020	2050	2020	2050	2020	2050	2020	2050	
Wärmepumpe	5000	5000	600	600	50	50	6	6	20
SOFC	4300	4000	5500	1500	600	120	0	45	10
PEM	3500	4000	8800	1500	300	120	20	45	10
H2 BW Kessel	2800	2800	100	100	42	42	1,5	1,5	20
Elektrischer Heizer	400	400	60	60	0	0	1,2	1,2	20

Für die Komponenten dieser Systeme und die Sanierungspakete sind technische und ökonomische Parameter für die Zieljahre 2020 und 2050 hinterlegt. Investitionskosten teilen sich auf in investitionsbezogene Kosten für die Installation (Investment fix) und leistungs- bzw. kapazitätsabhängige Kosten, welche von der Größe der verbauten Komponente abhängig sind (Investment variabel). Eine Übersicht der techno-ökonomischen Annahmen ist in Tabelle 1 zu finden; für Details zur Modellierung wird auf [15] verwiesen.

Die Energieträgerpreise für Strom und Wasserstoff werden im Folgenden in einer Sensitivitätsanalyse variiert. Ein rabattierter Tarif für den Betrieb der Wärmepumpe sowie die Erträge aus der Einspeisung überschüssigen Stroms werden hierbei als Anteile des Strompreises definiert. Der Wärmepumpentarif wird bei 70% des Normalpreises für den Strombezug angenommen. Erträge für die Einspeisung überschüssigen Stroms in das Netz führen zu einem Erlös in Höhe von 16% im Jahr 2020 und 26% im Jahr 2050 des vorliegenden Strompreises. Das entspricht bei einem Strompreis von 0,31 €/kWh einem Wärmepumpentarif von 0,22 €/kWh und Erträge für die Stromeinspeisung von 0,05 €/kWh im Jahr 2020 und 0,08 €/kWh im Jahr 2050. Entsprechend der geltenden Vorgaben des Erneuerbare-Energien-Gesetz werden für das Jahr 2002 die Förderung der KWK-Anlage in Höhe von 0,08 €/kWh bis zu einem Betrieb von 6000 Volllaststunden sowie die Förderung des erzeugten PV-Stroms in Höhe von 0,03 €/kWh für 70% der Erzeugungsleistung im Jahr 2020 berücksichtigt. Für das Zieljahr 2050 werden keine Förderungen angenommen.

2.3 Systemoptimierung und Sensitivitätsanalyse

Das in 2.2 erstellte lineare Optimierungsmodell wird in Hinblick auf die Jährlichen Gesamtkosten optimiert. Investitionskosten zu Beginn der Lebenszeit werden dabei durch den Annuitätsfaktor a_d auf das einzelne Jahr heruntergebrochen. Der Annuitätsfaktor berechnet sich aus der Lebensdauer τ_d und dem Kalkulationszinsfuß i_d wie folgt:

$$a_d = \frac{i_d(1 - i_d)^{\tau_d}}{i_d(1 - i_d)^{\tau_d} - 1}$$

Mit den gewählten Parametern werden Auslegung und Betrieb der Gebäudeenergiesysteme stundengenau für den Betrieb von einem Jahr optimiert. Daraus ergibt sich die Dimensionierung der Komponenten sowie deren Betrieb. Eine optimale Lösung muss in der Lage sein, zu jeder Stunde des Jahres den Energiebedarf des Gebäudes zu decken. In einer Sensitivitätsanalyse für das Verhältnis von Wasserstoff- und Strompreis werden die Bezugspreise der Energieträger zwischen 0,05 und 0,30 €/kWh variiert. Diese Analysen verfolgen das Ziel Schwellwerte für die Nutzung von Wasserstoff in Gebäudeenergiesystemen zu identifizieren sowie dessen stufenweise Nutzung sichtbar zu machen.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

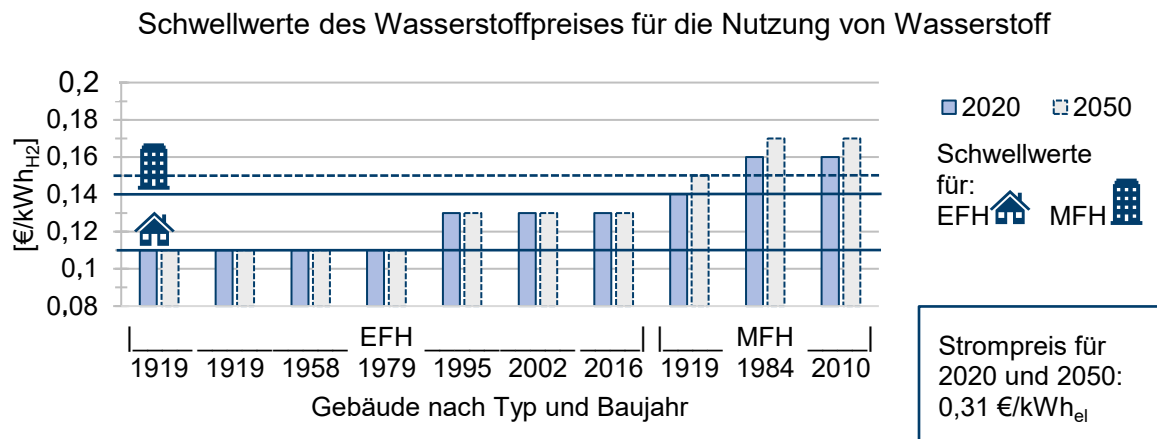


Abbildung 3: Schwellwerte des Wasserstoffpreises zur Nutzung von Wasserstoff im Gebäude für die Zieljahre 2020 und 2050 auf Basis von Sensitivitätsanalysen des Strom- und Wasserstoffpreises in 10 optimierten Typgebäuden der Bauart Einfamilienhaus (EFH) und Mehrfamilienhaus (MFH).

Die Sensitivitätsanalysen ergeben die in Abbildung 3 dargestellten Schwellwerte des Wasserstoffpreises (Break-even Preis) für dessen Nutzung in den untersuchten Gebäudeenergiesystemen für die Zieljahre 2020 und 2050 für einen Strompreis im Zieljahr von 0,31 €/kWh_{el}. Es zeigt sich, dass Wasserstoff als Brennstoff im Jahr 2020 nach Kosten Gesichtspunkten keine Rolle spielt. Bei einem angenommenen Bezugspreis von 0,2 €/kWh_{H2} (nach Heizwert 6,67 €/kg) reicht keiner der Schwellwerte in den Bereich einer wirtschaftlichen Wasserstoffnutzung hinein. Für das Zieljahr 2050 zeigt sich hingegen, dass alle untersuchten Energiesysteme kosteneffizient mit Wasserstoff unter der Annahme eines Wasserstoffpreises von 0,1 €/kWh_{H2} (nach Heizwert 3,33 €/kg), unter Berücksichtigung eines theoretischen Best-Case-Szenarios, betrieben werden können.

Betrachtet man sowohl einen variablen Strompreis als auch einen variablen Wasserstoffpreis, lassen sich tiefere Aussagen über Art und Umfang der Nutzung von Wasserstoff (Brennwertkessel, Brennstoffzelle, Hybridgeräte etc.) in den untersuchten Energiesystemen treffen. Abbildung 4 zeigt das Verhältnis des jährlichen Wasserstoffbezugs in kWh_{H2} zum jährlichen Wärmebedarf für die untersuchten EFH mit Baujahren von 1919 bis 1979 und von 1995 bis 2016 sowie von den untersuchten MFH mit Baujahren von 1984 bis 2010. Hieraus lässt sich der Schwellwert des Wasserstoffpreises für diese drei Gebäudegruppen in Abhängigkeit eines variablen Strompreises entnehmen, sowie der Grad der Wasserstoffnutzung. Hierbei ist zu beachten, dass Strom-Tarif für den Betrieb der Wärmepumpe 70% des Normalpreises entspricht. Für ein Verhältnis deutlich über eins wird Wasserstoff neben der Wärmeerzeugung auch zur Stromerzeugung in einer Brennstoffzelle genutzt. Weiterführende Details zur Sensitivität der Technologiewahl sind in [15] zu finden.

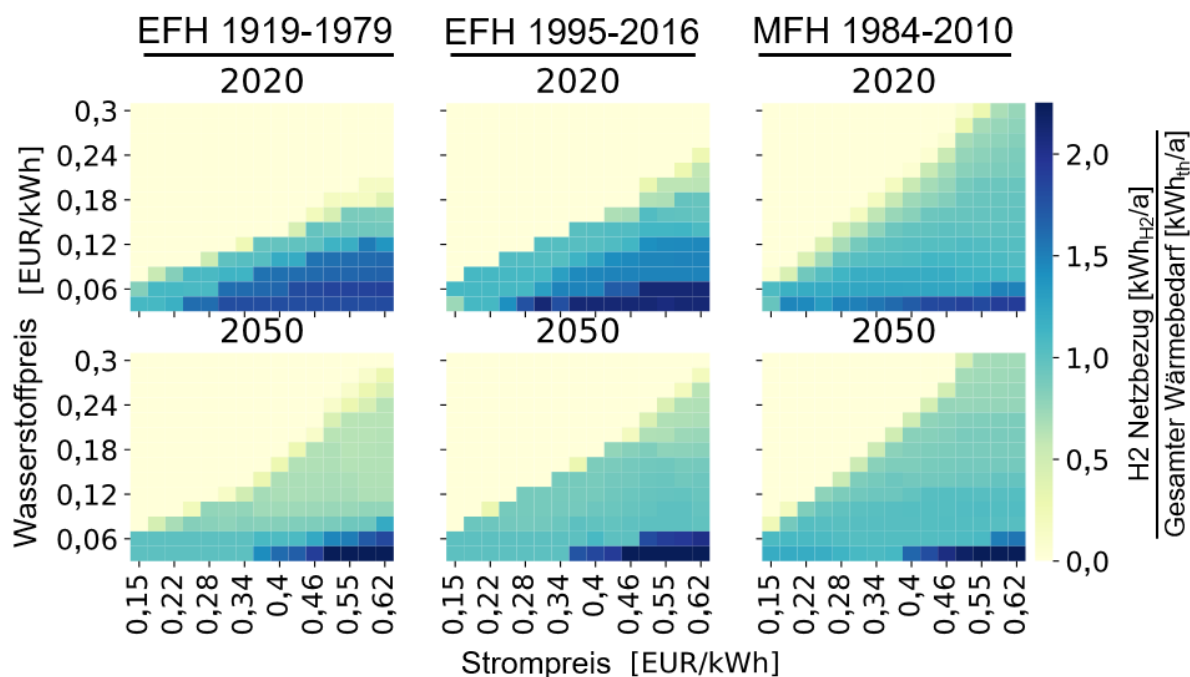


Abbildung 4: Sensitivitätsanalyse mit variablem Wasserstoff- und Strompreis. Die Farben repräsentieren das Verhältnis des jährlichen Wasserstoffbezugs in kWh_{H_2} zum jährlichen Wärmebedarf. Der Wärmepumpentarif entspricht 70% des Strompreises.

Es ist zu beobachten, dass sich der Schwellwert der Wasserstoffnutzung im Gebäude zwischen den Zieljahren für EFH nicht verändert, wie bereits Abbildung 3 zu entnehmen ist, da in diesen Gebäuden nur Wasserstoff Brennwertkessel eingesetzt werden, für die keine bedeutende Kosten- und Effizienzentwicklung erwartet wird. Gebäude älterer Baujahre weisen einen leicht niedrigeren Schwellwert auf, da hier ambitionierte Renovierungsmaßnahmen mit einer Umrüstung auf Wasserstoff konkurrieren. Bei MFH ist ein leichter Unterschied zwischen den Zieljahren erkennbar, der mit der Nutzung von KWK-Anlagen in diesen Gebäuden zusammenhängt, für die eine deutliche technische und ökonomische Entwicklung erwartet wird. Anhand dieser Analysen, sowie weiteren zum Technologiewechsel in [15], zeigt sich, dass die Technologiewahl durch Preissignale für den Wasserstoff- oder Strombezug gesteuert werden kann.

Aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse lassen sich Strom-Wasserstoff-Preis-Verhältnisse für den wirtschaftlich sinnvollen Einsatz von Wasserstoff in den untersuchten Gebäuden ermittelt. Die Verhältnisse reichen von 1,67 bis 2,82. Oberhalb dieser Werte ist ein wirtschaftlich sinnvoller Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden möglich. Für die einzelnen Gebäudegruppen kann für das Jahr 2050 eine Kennzahl von 2,5 für SFH und 1,8 für MFH ermittelt werden, die durch den Einsatz von KWK begünstigt wird.

Ein Blick auf projizierte Import-Preise für Wasserstoff durch die International Renewable Energy Agency (IRENA) [16] zeigt, dass der Wasserstoffpreis voraussichtlich nicht der Engpass für die Nutzung von Wasserstoff in Gebäuden darstellen wird. Laut IRENA Angaben können die Kosten für importierten Wasserstoff so weit sinken, dass für das Jahr 2050 ein Wasserstoffpreis für den Einsatz in Wohngebäuden in Höhe von 0,12 €/ kWh_{H_2} möglich ist. Zu diesem Preis könnten die Energiesysteme der meisten betrachteten Gebäude wirtschaftlich sinnvoll mit Wasserstoff betrieben werden. Nur die vier ältesten EFH erreichen mit ihrem

Schwellwert der Wasserstoffnutzung nicht diesen Preis, liegen allerdings nur 0,01 €/kWh_{H₂} darunter. Hier könnten Preissignale aus der Politik eine für die Verbraucher wirtschaftliche Nutzung von Wasserstoff ermöglichen, beispielsweise durch eine finanzielle Förderung des Wasserstoffbezugs. Neben der Kostenfrage stellt sich für den Einsatz von Wasserstoff die Frage, wie die zumindest anfangs geringen Mengen an Wasserstoff verteilt werden können, was eine politische und regionale Entscheidung ist.

Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen kann Wasserstoff eine wichtige Rolle bei der Deckung des Wärmebedarfs der Gebäude spielen, wenn sich die Preise wie prognostiziert entwickeln. Für Gebäudegruppen, bei denen eine umfassende Sanierung der Gebäudehülle nicht möglich ist, kann Wasserstoff zukünftig einen Beitrag leisten, indem er leistungsstarke Heiztechnologien zur Deckung eines hohen Wärmebedarfs befeuert. Wenn ein bestehendes Gasnetz vorliegt, das für den Transport und die Verteilung von Wasserstoff genutzt werden kann, ist anzunehmen, dass dies zu geringen Kosten möglich ist.

Literatur

- [1] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Klimaschutzgesetz 2021 - Generationenvertrag für das Klima“. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (zugegriffen Juni 17, 2021).
- [2] C. Senkpiel, „Bericht zur Vorjahresschätzung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2020“, S. 140, 2020.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Die nationale Wasserstoffstrategie“. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=20 (zugegriffen Juni 17, 2021).
- [4] N. Gerhardt, J. Bard, R. Schmitz, M. Beil, M. Pfennig, und D. T. Kneiske, „HYDROGEN IN THE ENERGY SYSTEM OF THE FUTURE: FOCUS ON HEAT IN BUILDINGS“, S. 46.
- [5] P. Gerbert *u. a.*, „Klimapfade für Deutschland“, Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI), 2018.
- [6] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf
- [7] Prognos AG, Öko-Institut e.V., und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, „Klimaneutrales Deutschland“, Agora Energiewende, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_195_KNDE_WEB.pdf
- [8] Umweltbundesamt (UBA), „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet_auflage2_juni-2021.pdf
- [9] C. J. Quarton *u. a.*, „The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios“, *Sustainable Energy & Fuels*, Bd. 4, Nr. 1, S. 80–95, 2020, doi: 10.1039/C9SE00833K.
- [10] F. Schiro, A. Stoppato, und A. Benato, „Modelling and analyzing the impact of hydrogen enriched natural gas on domestic gas boilers in a decarbonization perspective“, *Carbon Resources Conversion*, Bd. 3, S. 122–129, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.crcon.2020.08.001.

- [11] Bosch Thermotechnology Ltd., „Hydrogen Boiler | Worcester Bosch“. <https://www.worcester-bosch.co.uk/hydrogen> (zugegriffen Juli 23, 2021).
- [12] I. Staffell u. a., „The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system“, *Energy Environ. Sci.*, Bd. 12, Nr. 2, S. 463–491, Feb. 2019, doi: 10.1039/C8EE01157E.
- [13] FuelCellsWorks, „Netherlands: Apartment Complex In Rotterdam Municipality Rozenburg Heated With Hydrogen - FuelCellsWorks“. <https://fuelcellsworks.com/news/netherlands-apartment-complex-in-rotterdam-municipality-rozenburg-heated-with-hydrogen/> (zugegriffen Juli 22, 2021).
- [14] Institut für Wohnen und Umwelt, „EPISCOPE and TABULA Website“. <https://episcope.eu/iee-project/> (zugegriffen Juni 24, 2021).
- [15] L. Langenberg, K. Knosala, N. Pflugradt, L. Kotzur, D. Stolten, und P. Stenzel, „The Role of Hydrogen in German Residential Buildings“, *ENGINEERING*, preprint, Sep. 2021. doi: 10.20944/preprints202109.0008.v1.
- [16] IRENA, „Hydrogen: A renewable energy perspective“, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.