

Badelt, Ole

Book Part

Sozial-ökologische Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem

Provided in Cooperation with:

ARL – Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft

Suggested Citation: Badelt, Ole (2024) : Sozial-ökologische Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem, In: Finger, Anne Badelt, Ole Dahmen, Kathleen Heilen, Lydia Mai, Nora Seegers, Ronja Seewald, Eva Śnieg, Filip Wiemer, Leonie (Ed.): Transformationsprozesse in Stadt und Land: Erkenntnisse, Strategien und Zukunftsperspektiven, ISBN 978-3-88838-117-1, Verlag der ARL - Akademie für Raumentwicklung in der Leibniz-Gemeinschaft, Hannover, pp. 90-109, <https://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0156-1171086>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/286124>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Badelt, Ole:

Sozial-ökologische Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0156-1171086>

In:

Finger, Anne; Badelt, Ole; Dahmen, Kathleen; Heilen, Lydia; Mai, Nora; Seegers, Ronja; Seewald, Eva; Śnieg, Filip; Wiemer, Leonie (Hrsg.) (2024): Transformationsprozesse in Stadt und Land – Erkenntnisse, Strategien und Zukunftsperspektiven.

Hannover, 90-109. = Forschungsberichte der ARL 23.

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0156-11713>



<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Ole Badelt

SOZIAL-ÖKOLOGISCHE HERAUSFORDERUNGEN BEI DER INTEGRATION VON WASSERSTOFF IN DAS ENERGIESYSTEM

Gliederung

- 1 Einleitung
 - 2 Charakteristika der Energiewende als Transformationsprozess
 - 2.1 Komplexität
 - 2.2 Projektion von Umweltwirkungen
 - 2.3 Akzeptanz
 - 3 Wasserstoff im Rahmen der Energiewende: Welche Herausforderungen sind zu erwarten?
 - 3.1 Wasserstoffintegration als *wicked problem*
 - 3.2 Umweltauswirkungen von Wasserstoffinfrastrukturen
 - 3.3 Akzeptanz zusätzlicher Wasserstoffinfrastrukturen
 - 4 Schlussfolgerungen und Ausblick
- Literatur

Kurzfassung

Wasserstoff (H₂) wird unter dem Stichwort „Sektorenkopplung“ eine Schlüsselrolle in Wirtschaft und Politik zugesprochen, da er vielfältig einsetzbar, speicherbar und umweltfreundlich produzierbar ist. Noch nicht abschließend geklärt ist, wie der Ausbau wasserstoffspezifischer Infrastrukturen die deutsche Energielandschaft verändern und ob dieser zukünftige Ausbau als Treiber für potenzielle Umweltbelastungen wirken wird. Denn multimodale Wasserstoffsysteme sind mit neuartigen und zusätzlichen Infrastrukturen im Raum verbunden, deren Auswirkungen auf Menschen und Umwelt bisher unzureichend untersucht wurden. Ziel dieses Beitrages ist es, die sozial-ökologischen Herausforderungen bei der Integration von Wasserstoff in das Energiesystem zu identifizieren und anhand folgender Aspekte näher zu untersuchen: 1) die Komplexität der Wasserstoffwende und ihre Charakteristika eines *wicked problems*, 2) die Projektion möglicher Umweltwirkungen verschiedener Ausbaupfade und 3) die Abschätzung der Akzeptanz von Wasserstofftechnologien. Darauf aufbauend werden relevante Belange abgeleitet, die bei einem nachhaltigen Ausbau der H₂-Wirtschaft zu berücksichtigen sind.

Schlüsselwörter

Energiewende – Wasserstoff – Akzeptanz – Umweltwirkungen – wicked problems

Of being wicked: how can decision support system tools contribute to socio-ecological challenges in integrating hydrogen into the energy system?

Abstract

Hydrogen (H₂) is considered to play a key role in the economy and politics of the energy transition as it is a universal medium that can be used in a variety of ways, stored and produced in an environmentally friendly way. However, it is not yet fully clear how the expansion of hydrogen-specific infrastructures will change the German energy landscape and whether this future expansion will be a driver for potential environmental impacts. Multimodal hydrogen systems are associated with novel and additional infrastructures, the effects of which have not yet been adequately investigated. The aim of the article is to identify the socio-ecological challenges in the integration of hydrogen into the energy system and to examine them in more detail based on selected aspects: 1) the complexity of the hydrogen transition and its characteristics as a *wicked problem*, 2) the projection of possible environmental impacts of different expansion paths, and 3) the estimation of the acceptance of hydrogen technologies. Based on this, relevant concerns are derived, which must be taken into account for a sustainable expansion of the H₂ economy.

Keywords

Energy transition – hydrogen – acceptance – environmental impacts – wicked problems

1 Einleitung

Die deutsche Energiewende hängt maßgeblich von einer erfolgreichen Klimapolitik ab. Durch das sogenannte Osterpaket der Bundesregierung soll ein beschleunigter, konsequenter Ausbau erneuerbarer Energien (EE) verfolgt werden (Deutscher Bundestag 2022). Demnach sollen bis zum Jahr 2030 80 Prozent des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energien stammen, bis 2035 soll die Stromversorgung in Deutschland nahezu vollständig auf erneuerbaren Energien beruhen. Für die Wind- und Solarenergie bedeutet dies jährliche Ausbauraten von 10 GW bzw. 22 GW. Zum Vergleich: Im Jahr 2021 stieg die installierte Leistung von Windenergie an Land und auf See um 1,67 GW. Der Photovoltaik-Zubau lag 2021 bei 5 GW (UBA 2022).

Dieser ambitionierte Ausbau muss gleichzeitig sozial- und naturverträglich umgesetzt werden, um gesellschaftliche Akzeptanz auf bundesweiter, regionaler und lokaler Ebene zu finden. Nicht erst jetzt zeichnet sich ab, dass die Umsetzung der Energiewende auf lokaler Ebene Konfliktpotenzial birgt (Fraune/Gözl/Knodt et al. 2019). Zwar befürwortet eine große Mehrheit die Energiewende allgemein, gleichzeitig bilden sich jedoch regelmäßig Widerstände gegen konkrete Projekte vor Ort (Local Energy Consulting 2020). Dieser als Mismatch bezeichnete Mechanismus (Moss/Newig 2010; Folke/Pritchard/Berkes et al. 1998), bei dem Ziele auf hoher politischer Ebene einer unzureichenden Umsetzung vor Ort gegenüberstehen, wird dadurch verstärkt, dass Kosten und Nutzen des Ausbaus nicht immer gleich verteilt sind (vgl. Wiehe/Thiele/

von Haaren 2020). Ganz im Sinne der schon von Hardin (1968) beschriebenen Tragik der Allmende trägt auch der verstärkte Ausbau von Windkraft und Photovoltaik zu einer übermäßigen Nutzung von frei verfügbaren, aber begrenzten Ressourcen (z. B. Fläche, Erholungswert der Landschaft) bei, dessen Kosten die Allgemeinheit tragen muss. Globale Ziele auf der einen Seite kollidieren mit lokalen Bedürfnissen auf der anderen. Die Zunahme globaler Nachhaltigkeits Herausforderungen resultiert in einer Vielzahl politischer Agenden und Schnelllebigkeit. Vorgaben auf Bundesebene entsprechen nicht immer den Zielen der Länder und Regionalplanungsaemter mussten in das Thema „Energiewende“ erst hineinwachsen (Gailing/Overwien/Plehn et al. 2021: 5). Klimaprogramme, Energiekonzepte und Windenergieerlasse sind in ihren Aussagen nicht automatisch aufeinander abgestimmt. Unstrittig ist, dass Kommunen hierbei schnell überfordert sind (Megerle/Frick 2022: 8). Doch gerade auf dieser Ebene werden die konkreten Vorhaben letztendlich umgesetzt und müssen von den Bürgerinnen und Bürgern getragen werden. Diese Verantwortung innerhalb des geplanten Ausbaus wird oft nicht klar.

Zusätzlich zu diesen Entwicklungen wird Wasserstoff unter dem Stichwort „Sektorenkopplung“ (die Verbindung der bislang eher getrennten Sektoren Mobilität, Wärme und Stromerzeugung) eine Schlüsselrolle zugesprochen, da er vielfältig einsetzbar, speicherbar und umweltfreundlich produzierbar ist (SRU 2021: 6). Mindestens 10 GW sollen bis zum Jahr 2030 in Deutschland an Elektrolyseleistung installiert werden (BMWi 2020). In Norddeutschland wird die Wasserstoffwirtschaft mit Forschungsprojekten und Fördergeldern für Unternehmen enorm angekurbelt (Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer 2019). Vor allem Niedersachsen will Vorreiter in Sachen grüner – also durch erneuerbare Energien erzeugten – Wasserstoff werden (MW Nds. 2020). Das Bundesland kann dabei auf eine Reihe von Alleinstellungsmerkmalen zurückgreifen: Neben hohen Erzeugungskapazitäten für regenerativen Strom (On- und Offshore) (Thiele/Wiehe/Gauglitz et al. 2021: 192; Badelt/Niepelt/Wiehe et al. 2020) zählen dazu auch die geologischen Besonderheiten zur untertägigen Speicherung von Wasserstoff in Kavernen- oder Porenspeichern (LBEG 2022: 65) sowie eine in Teilen bereits vorhandene Infrastruktur zur Distribution (KEAN 2022). Die niedersächsische Wirtschaft bietet gute Voraussetzungen für eine Anwendung von Wasserstoff, sowohl zur Substitution von fossilem Wasserstoff in der Industrie als auch für weitere Nutzungspfade: als Kraftstoff im Verkehrssektor (Züge, Schiffe und Nutzfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb), als erneuerbarer Ausgangsstoff für die chemische Industrie (Stahlerzeugung, Raffinerien) oder als Edukt für die Konversion und anschließende Nutzung im Industrie- und Wärmesektor, z. B. in Form von synthetischem Methan (MW Nds. 2022: 8).

Vor diesem Hintergrund muss abgeschätzt werden, inwieweit die Ziele der Wasserstoffwirtschaft Niedersachsens zu Konflikten mit Umweltbelangen führen. Aus umweltplanerischer Perspektive kann der Ausbau wasserstoffspezifischer Infrastrukturen als Treiber im Sinne des Driver-Pressure-State-Impact-Response-Modells (DPSIR-Modell) der Europäischen Umweltagentur bezeichnet werden (EEA 1999). Dieses Modell veranschaulicht die Zusammenhänge von menschlichen Aktivitäten und den damit verbundenen Umweltbeeinträchtigungen. Bislang ist noch nicht abschließend geklärt, wie der zusätzliche Treiber Wasserstoff auf die niedersächsische Energielandschaft einwirken wird. Denn multimodale Wasserstoffsysteme sind mit neuar-

tigen und zusätzlichen Infrastrukturen im Raum verbunden, deren Auswirkungen auf Menschen und Umwelt bisher noch nicht bekannt sind. Außerdem ist die Produktion von grünem Wasserstoff aktuell noch sehr kostspielig, weshalb er auch als „Champagner der Energiewende“ bezeichnet wird (Kemfert 2020). Eine frühzeitige Integration von Lösungsstrategien für projizierte Umweltprobleme oder Reaktionen von Betroffenen in das Wasserstoffsystem sind daher die Voraussetzung zur Vermeidung von Konflikten bei der Einführung und Allokation der Anlagen in der Landschaft.

Gleichzeitig existieren zum übergeordneten Thema „Energiewende“ und den damit einhergehenden sozial-ökologischen Herausforderungen bereits diverse Erklärungs- und Lösungsansätze unterschiedlicher wissenschaftlicher Fachdisziplinen. Als sozial-ökologische Herausforderungen werden in diesem Beitrag konfliktbehaftete Beziehungen zwischen Gesellschaft und Natur nach Becker (2003) verstanden, die sowohl eine soziale als auch eine ökologische Dimension umfassen. Die Energiewende kann hier als „Neukonfiguration des Verhältnisses zwischen Gesellschaft und Natur“ gesehen werden (Herdritschka/Hülz/Kapitza et al. 2022: 43).

Inwieweit sich die bisherigen Erkenntnisse der Energiewendeforschung auf die Integration von Wasserstoff in das Energiesystem übertragen lassen, ist Gegenstand des vorliegenden Beitrags. Dazu wurde folgende Forschungsfrage formuliert:

- > Welche sozial-ökologischen Herausforderungen bringt eine Integration von Wasserstoff in das Energiesystem mit sich?

Anhand sozial-ökologischer Charakteristika der Energiewende als Transformationsprozess sollen Rückschlüsse auf die bevorstehende Integration von Wasserstoff in das Energiesystem gezogen und damit verbundene Herausforderungen identifiziert werden. Dazu werden zunächst drei ausgewählte Aspekte der Energiewende anhand unterschiedlicher Konzepte und Theorien näher beleuchtet:

- 1 die Komplexität der Energiewende und ihre Charakteristika als *wicked problem* (Rittel 1984),
- 2 die Projektion möglicher Umweltauswirkungen von erneuerbaren Energien und
- 3 die Abschätzung ihrer Akzeptanz.

Im Anschluss werden diese Aspekte auf den Themenbereich „Wasserstoff“ übertragen. Dabei wird erörtert, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen bisherigen Transformationsprozessen der Energiewende zur Integration von Wasserstoff bestehen.

2 Charakteristika der Energiewende als Transformationsprozess

Erstmals in einem Bericht des Freiburger Öko-Instituts e.V. erwähnt (Krause/Bossel/Müller-Reißmann 1980), verbindet man den Begriff „Energiewende“ mit dem 2011 von der Bundesregierung gefassten Beschluss zu einem stufenweisen Atomausstieg

(13. AtGÄndG)¹ sowie dem Aufbau eines Energiesystems auf Basis erneuerbarer Energien. Die Energiewende kann aus politikwissenschaftlicher Sicht „als eine Transformation mit intendiertem Pfadwechsel“ gesehen werden (Czada/Radkte 2018: 70). Sie ist damit eine politisch beabsichtigte und gestaltete Wende, beinhaltet aber auch sozio-technische Transformationsprozesse ohne Wendecharakter, die bspw. markt- und technikgetrieben sind (ebd.).

Dieser gesamtgesellschaftliche Prozess geht mit dem Anspruch einher, nachhaltige Lösungen zu finden und ökologische, soziale und gesundheitliche Probleme auf ein Minimum zu reduzieren. Damit kann die Lösung dieser Probleme als zentrale Aufgabe des 21. Jahrhunderts gesehen werden (Stremke/van den Dobbelsteen 2012: 3).

Hierbei sind die nachfolgend vorgestellten Aspekte nicht losgelöst voneinander zu betrachten und verändern sich dynamisch in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen. Aus umweltplanerischer Sicht sind die nachfolgenden Themen essentiell, um ein Verständnis dieser Transformation herzustellen und nachhaltige Gestaltungsmöglichkeiten zu identifizieren.

2.1 Komplexität

Die Entscheidung, die fossil-nukleare Energieerzeugung zu beenden und eine auf erneuerbaren Energien basierende Versorgung zu schaffen, führte zu einer Kaskade von Herausforderungen in vielerlei Hinsicht. Mit diesem Übergang verbunden ist nicht nur der Ausbau erneuerbarer, dezentraler Energien, um die bisherige zentralisierte Produktion konventioneller Energieträger zu ersetzen, sondern ein grundsätzlicher Umbau der deutschen Energieinfrastruktur (wie z.B. Netzinfrasturktur), die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Verkehr und Industrie, eine Steigerung der Energieeffizienz und das Ausschöpfen von Energieeinsparungspotenzialen (Thiele/Wiehe/Gauglitz et al. 2021). Dass es für die dahinterstehenden Fragen nicht immer eindeutige Lösungen gibt, ist eine Charakteristik spezifischer Probleme, die als *wicked problems* bezeichnet werden (Rittel/Webber 1973; vgl. auch Thollander/Palm/Hedbrant 2019):

- 1 There is no definitive formulation of a wicked problem.
- 2 Wicked problems have no stopping rule.
- 3 Solutions to wicked problems are not true-or-false, but good-or-bad.
- 4 There is no immediate and no ultimate test of a solution to a wicked problem.
- 5 Every solution to a wicked problem is a “one-shot operation”; because there is no opportunity to learn by trial-and-error, every attempt counts significantly.
- 6 Wicked problems do not have an enumerable (or an exhaustively describable) set of potential solutions, nor is there a well-described set of permissible operations that may be incorporated into the plan.

¹ Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes vom 31.07.2011 (BGBl. I S. 1704).

- 7 Every wicked problem is essentially unique.
- 8 Every wicked problem can be considered to be a symptom of another problem.
- 9 The existence of a discrepancy representing a wicked problem can be explained in numerous ways. The choice of explanation determines the nature of the problem's resolution.
- 10 The planner has no right to be wrong.

Auch die mit der Energiewende assoziierten Probleme innerhalb politischer und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen – Pluralismus, Globalisierung, technologischer Wandel – sind anders als „tame problems“ aufgrund unvollständiger, widersprüchlicher oder sich ändernder Anforderungen nur schwer zu lösen (Rittel 1984; Thollander/Palm/Hedbrant 2019: 2). Die Energiewende kann sogar als *super wicked problem* bezeichnet werden, wie Levin/Cashore/Bernstein et al. (2012: 124) zeigen, indem sie den mit der Energieerzeugung verbundenen Klimawandel durch vier Schlüsselkriterien charakterisieren: 1) Die Zeit läuft ab, 2) die Problemverursacher sind gleichzeitig diejenigen, die das Problem lösen müssen, 3) eine zentrale Autorität zur Lösung des Problems existiert nicht bzw. ist schwach und 4) zum Teil als Folge davon wird die Zukunft bei politischen Entscheidungen nicht im richtigen Verhältnis berücksichtigt. Parallelen dazu finden sich auch in Teilaspekten der Energiewende, wie z. B. bei der Endlagersuche für Atommüll (Brunnengräber/Di Nucci/Häfner et al. 2014), oder des Ausbaus erneuerbarer Energien, bei dem unterschiedliche Perspektiven und Interessen vieler Akteurinnen und Akteure aufeinandertreffen (Haukkala 2019; Komendantova 2021). Auch durch mit der Zeit zunehmende Wechselwirkungen sozialer, rechtlicher, ökonomischer und globaler klimatischer Systeme kann die Energiewende als *super wicked problem* angesehen werden (Jakimowicz 2022: 2). Diesen Wechselwirkungen gegenüber steht der Anspruch, langfristige Planbarkeit herzustellen (Moallemi/Malekpour 2018: 2).

Aber schon Rittel und Webber haben aufgezeigt, dass *wicked problems* sich gerade nicht durch lineare Problemlösungsstrategien bewältigen lassen, also etwa dadurch, auf Basis einer spezifizierten Problemlage Daten zu erheben und zu analysieren, um daraus eine Lösung abzuleiten (Rittel/Webber 1973: 161). Denn nicht nur die Problemdefinition, sondern auch die Vorstellung von dessen Lösung unterscheidet bei einer zunehmenden Anzahl an Akteurinnen und Akteuren komplexe von verzwickten Problemen (vgl. Alford/Head 2017, Abb. 1). Einen weiteren Versuch, *wicked problems* als spezifischen Problemtyp einzuordnen, haben Andersson/Törnberg (2018) unternommen: Sie stellen das Spektrum überfordernder Systeme vor („Spectrum of Overwhelming Systems“, SOS), innerhalb dessen Systeme sich danach kategorisieren lassen, wie komplex und wie kompliziert sie sind. Komplizierte Systeme sind bspw. Maschinen oder Organismen, die i. d. R. aus einer großen bis sehr großen Anzahl an Einzelementen bestehen (im Gegensatz zu simplen Systemen), aber nach bekannten und verständlichen Gesetzmäßigkeiten funktionieren (Amaral/Ottino 2004). Komplexe Systeme wiederum bestehen i. d. R. auch aus einer Vielzahl an Einzelementen, die identisch sein können, allerdings sind die ihnen zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten schlecht definiert oder ändern sich (Grabowski/Strzalka 2008: 571 ff.). Beispiele

sind soziale Netzwerke, Verkehr oder ein Schwarm Fische (Andersson/Törnberg 2018: 122). Die Kombination aus komplizierten und komplexen Systemen stellen *wicked systems* dar, aus denen sich entsprechende Problematiken ergeben können: „Wicked problems here emerge as the product of an ontologically distinct and describable type of system that blends dynamical and organizational complexity“ (Andersson/Törnberg 2018: 118).

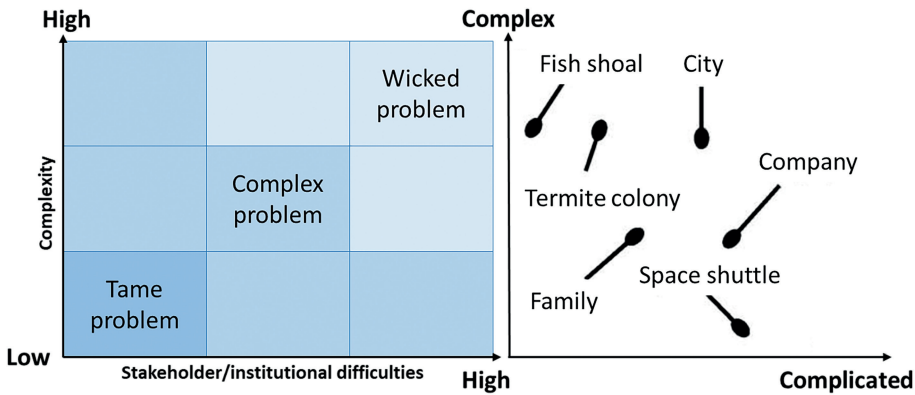


Abb. 1: Zwei Erklärungsansätze zur Einordnung von *wicked problems*

Links: das Spektrum von Problemtypen entlang der Dimensionen „Problemdefinition“ und „Beteiligte Akteurinnen und Akteure“; rechts: das Spektrum überfordernder Systeme / Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Alford/Head (2017) (links) und Andersson/Törnberg (2018) (rechts)

Die vorgestellten Charakteristika von *wicked problems* bzw. *systems* finden sich auch in Teilprozessen der Energiewende wieder (vgl. Brunnengräber/Di Nucci 2014; Haukкала 2019; Komendantova 2021). Tendenziell scheinen diese Charakteristika nicht nur auf die technischen Dimensionen, sondern vor allem auf vielschichtige Governance-Prozesse der Energiewende zurückführbar zu sein (Biehl/Missbach/Riedel et al. 2022).

2.2 Projektion von Umweltwirkungen

Ein wesentliches Ziel der Energiewende ist der Ausbau erneuerbarer Energien, allen voran Windenergieanlagen an Land und See sowie Photovoltaikanlagen. Erklärtes Ziel der Bundesregierung ist hierbei, dass die Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien nicht zu Lasten der biologischen Vielfalt gehen darf (BMUB 2007). Um diesem Ziel Rechnung zu tragen, ist die Ermittlung der damit verbundenen Umweltauswirkungen Anlass zahlreicher Forschungsvorhaben (BfN 2020; vgl. Thiele/Wiehe/Gauglitz et al. 2021; Badelt/Niepert/Wiehe et al. 2020). Damit der weitere Ausbau also naturverträglich gestaltet und gesteuert werden kann, müssen zunächst die Zusammenhänge zwischen dem EE-Ausbau und der Umwelt verstanden werden. Einen ersten Erklärungsansatz, wie menschliche Aktivitäten zu Umweltbeeinträchtigungen führen, bietet das DPSIR-Modell der Europäischen Umweltagentur (EEA 1999): Es soll helfen, die Auswirkungen sozialer und wirtschaftlicher Entwicklungen auf die Umwelt zu ver-

stehen und dient als Rahmen für die Beschreibung und Analyse kausaler Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt (Burkhard/Müller 2008). Treiber (*Driver*) sind anthropogene Aktivitäten, die Einfluss auf die Umwelt haben (*Pressure*) und zu einer Veränderung des Zustandes von Ökosystemen (*State*) führen. Die damit hervorgerufenen Umweltauswirkungen (*Impacts*) lösen in der Regel Reaktionen in Politik und Gesellschaft aus (*Response*) (Kosmol/Kanthak/Herrmann et al. 2012: 6). Der Ansatz des DPSIR-Modells wird im Rahmen der Landschaftsplanung auch in der ökologischen Risikoanalyse eingesetzt und ermöglicht die Abschätzung der Auswirkungen bestehender und geplanter Eingriffe in die Landschaft (Albert/Galler/von Haaren 2022: 123 f.). Raumrelevante Auswirkungen auf die im Bundesnaturschutzgesetz aufgeführten Schutzgüter (§ 1 BNatSchG) hängen unter anderem mit dem dezentralen Charakter und der damit verbundenen Inanspruchnahme neuer Flächen zusammen (BfN 2020: 4). Maßgeblich für die Intensität der Auswirkungen sind die anlagenspezifischen Wirkprofile sowie die standortspezifischen Empfindlichkeiten der Schutzgüter (BMVI 2015). Als Beispiele für Windenergieanlagen sind der Individuenverlust von Vögeln und Fledermäusen durch Kollisionen mit Onshore-Windenergieanlagen oder die Störung von Brut- und Rastvögeln und dadurch Meidung des Gebietes (Lebensraumverlust) zu nennen (Walter/Wiehe/Schlömer et al. 2018: 66), sowie bei Freiflächensolaranlagen die Beeinträchtigung des Naturhaushalts durch Bodenversiegelung oder -überschirmung und der Lebensraumverlust durch direkte Flächeninanspruchnahme (Badelt/Niepelt/Wiehe et al. 2020: 37 ff.). Relevant für eine naturverträgliche Planung und Steuerung des EE-Ausbaus ist also, wo welche Anlagen wie in die Landschaft integriert werden können, um die Ausbauziele zu erreichen. Die Ermittlung dieses menschen- und naturverträglichen EE-Erzeugungspotenzials der Landschaft im Sinne einer Klimaschutzfunktion kann damit als Bestandteil der Landschaftsplanung betrachtet werden (Albert/Galler/von Haaren 2022: 273).

2.3 Akzeptanz

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für das Gelingen der Energiewende ist deren Akzeptanz in der Bevölkerung. Ein naturverträglicher Ausbau kann akzeptanzsteigernd wirken, vermutlich spielen aber weitere Faktoren eine Rolle (Hübner/Pohl/Warode et al. 2020: 13). Es existiert eine Vielzahl von Erklärungsansätzen, wie Akzeptanz bzw. Nicht-Akzeptanz zustande kommt, welche Dimensionen der Begriff umfasst und worin sich Akzeptanz ausdrückt (vgl. Schäfer/Keppler 2013).

Um die Relevanz von Akzeptanz in der Energiewende und nachfolgend auch für die Integration von Wasserstoff zu erörtern, wird in diesem Kapitel eine grobe Einführung bestehender Erklärungsmuster aus der aktuellen Forschung gegeben. In mehreren Begriffserläuterungen wird Akzeptanz heruntergebrochen auf die Frage, „wer [Akzeptanzsubjekt], was [Akzeptanzobjekt], innerhalb welcher Ausgangs- bzw. Rahmenbedingungen akzeptieren soll [Akzeptanzkontext]“ (Sonnberger/Ruddat 2016: 8; vgl. dazu auch Schäfer/Keppler 2013). Akzeptanzsubjekt, -objekt und -kontext können dabei aus unterschiedlichen Forschungsdisziplinen (z. B. Sozialwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften oder Umweltwissenschaften) betrachtet werden (Schmälz 2018: 20 f.).

Um verschiedene Akzeptanzdimensionen zu verstehen, ist das Dreieck der sozialen Akzeptanz von Wüstenhagen/Wolsink/Bürer (2007) ein weit verbreitetes Erklärungsmuster. Dabei stellt die sozio-politische Akzeptanz die öffentliche Meinung dar, die z. B. durch Meinungsumfragen oder von Politikerinnen und Politikern getätigte Aussagen geprägt wird. Die Marktakzeptanz wird durch Zahlungsbereitschaften, Investitionen oder Kaufentscheidungen bestimmt, während lokale Akzeptanz die Einstellung der Anwohner/innen zu konkreten Infrastrukturvorhaben darstellt.

Vor allem die lokale Akzeptanz spielte bislang in der Energiewende eine populäre Rolle, da die Zustimmung oder Ablehnung von Vorhaben vor Ort direkte Auswirkungen auf deren Umsetzung haben kann, bspw. bei der Errichtung eines Wind- oder Solarparks. Die Spannweite dieser Akzeptanzausprägungen wurde von Zoellner/Rau/Schweizer-Ries (2009) auf einer Bewertungs- (positiv bis negativ) und Handlungsebene (aktiv bis passiv) eingeordnet, woraus vier Kombinationen resultieren: Ablehnung (negativ/passiv), Widerstand (negativ/aktiv), Befürwortung (positiv/passiv) und aktives Engagement (positiv/aktiv). Dabei sind nach empirischer Verteilung 70,7 Prozent der befragten Personen als stille Befürworter einzuordnen, während lediglich 3,2 Prozent zu denjenigen gehören, die aktiv Widerstand leisten (ebd.).

Dies ist vor allem relevant, wenn man sich vor Augen führt, dass Kommunen enormen Einfluss sowohl auf die dezentrale Energieproduktion als auch auf einen effizienten Energieverbrauch haben (Rau/Hildebrand/Heib et al. 2017). Unbestritten jedoch ist, dass eine frühzeitige Betrachtung ökologischer und gesellschaftlicher Aspekte essentiell für eine erfolgreiche Umsetzung von Energieinfrastrukturvorhaben ist (IAO 2020). Umso wichtiger erscheint es daher, potenzielle Konfliktfelder so früh wie möglich zu erkennen. Auch wenn Akzeptanz als Gelingensfaktor anzusehen ist, gibt es hierbei keine Blaupause. Je nach Situation spielen unterschiedliche Rahmenbedingungen eine Rolle, ob Bürger/innen ein konkretes Vorhaben akzeptieren. Die Wirksamkeit von Kommunikation und Transparenz stößt z.B. dann an ihre Grenzen, wenn das Vorhaben mit Belastungen für die Anwohner/innen einhergeht, der Nutzen für die Allgemeinheit umstritten ist oder das Vorhaben großflächige Veränderungen des Ortsbildes mit sich bringt (Renn 2014: 77). Diese Faktoren spiegeln sich auch in den von Hübner/Pohl/Warode et al. (2020) vorgestellten Themen als entscheidende Faktoren lokaler Akzeptanz wider, die sie mittels Befragungen von Expertinnen und Experten sowie Anwohnerinnen und Anwohnern identifiziert haben: wirtschaftliche Faktoren, die allgemeine Einstellung zur Energiewende, das Vertrauen in Akteurinnen und Akteure, Belastung für Natur und Mensch sowie soziale Normen.

3 Wasserstoff im Rahmen der Energiewende: Welche Herausforderungen sind zu erwarten?

Vor dem Hintergrund der vorgestellten Erkenntnisse der Energiewendeforschung wird im Folgenden auf die Integration von Wasserstoff in das Energiesystem eingegangen. Dabei wird erörtert, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen bisherigen Transformationsprozessen der Energiewende zur Integration von Wasserstoff bestehen.

3.1 Wasserstoffintegration als *wicked problem*

Auf Basis der in Kapitel 2 diskutierten Aspekte der Energiewende soll an dieser Stelle erörtert werden, inwieweit die Wasserstoffintegration in das deutsche Energiesystem ebenfalls verzwickte Aspekte aufweist. Festgestellt wurde, dass ein *wicked problem* ein komplexes Problem ist, das schwer zu definieren ist, mehrere voneinander abhängige Variablen und Perspektiven aufweist und für das es keine eindeutige Lösung gibt. Beim Thema „Wasserstoff“ gibt es mehrere Aspekte, die es zu einem komplexen und schwierigen Problem machen können. Eine Betrachtung aus mehreren Perspektiven erscheint daher sinnvoll. Das von Head (2008) entwickelte Konzept, das *wicked problems* als das Zusammenwirken von Ungewissheit, Komplexität und Wertedivergenz herausstellt, soll nachfolgend für die Betrachtung der Wasserstoffintegration herangezogen werden.

Ungewissheit

Das Thema „Wasserstoff“ erlebt seit einigen Jahren einen regelrechten Hype in Politik, Wirtschaft und Wissenschaft (IÖW 2022; Tagesschau 2022). Er wird für viele Anwendungen als Energiequelle der Zukunft gesehen, bei denen bislang fossile Energieträger eingesetzt wurden. Der Wasserstoffausbau kann als Prozess gesehen werden, der mit einem hohen Maß an Unsicherheit behaftet ist. Dabei sind Fragen zu Erzeugungsmethoden, seiner Kosteneffizienz und den Infrastrukturanforderungen zu stellen. Es wird regelmäßig übersehen, dass Angebot und Nachfrage von Wasserstoff sich noch am Anfang des Ausbaus befinden, wie Clausen (2022) in einer Veröffentlichung des Borderstep Institutes zeigt: Auf Basis aktueller Metastudien wird aufgezeigt, dass absehbar vorerst nur kleine Mengen an Wasserstoff erzeugt und verbraucht werden können.

Darüber hinaus bestehen Unsicherheiten in Bezug auf die Umweltauswirkungen der Wasserstoffproduktion, -speicherung und -nutzung sowie das Potenzial zur Verringerung der Treibhausgasemissionen (vgl. Kap. 3.2).

Bei der vielfach favorisierten ausschließlichen Nutzung von grünem Wasserstoff müssen nahezu alle Prozesse von der Produktion bis zum Verbrauch transformiert werden: zusätzliche Anlagen zur Erzeugung von EE-Strom, Ausbau der Elektrolysekapazität und dazugehörige Infrastruktur für Transport, Speicherung und Verteilung sowie Schnittstellen bei den verbrauchenden Sektoren. Hinzu kommt die Abschätzung der Kosten grünen Wasserstoffs. Aufgrund der großen Bandbreite verschiedener potenzieller Ausbaupfade und ihren unterschiedlichen zeitlichen Perspektiven und Kosten tragen diese zur Komplexität bei und sind zudem mit großen Unsicherheiten behaftet (Odenweller/George/Müller et al. 2022; Ariadne-Kurzdossier 2021). Schwer abzuschätzen sind unter anderem die Themen „Technologieentwicklungen“, „Kosten des Wasserstoffs“ und „Alternative Dekarbonisierungsoptionen“ (SRU 2021: 13). Gleichzeitig ist es wichtig, jetzt schon die Weichen für die kommenden Jahre zu stellen, um einen frühzeitigen Markthochlauf zu ermöglichen (ebd.).

Komplexität

Der Einsatz von Wasserstoff als Alternative zu fossilen Brennstoffen erfordert die Lösung komplexer sozialer, politischer und wirtschaftlicher Fragen, wie z.B. rechtliche Rahmenbedingungen, öffentliche Akzeptanz und Wettbewerb in der Industrie. Als

Beispiel ist die Entwicklung und der Ausbau der notwendigen Infrastruktur für die Produktion, Speicherung, den Transport und die Verteilung von Wasserstoff zu nennen, wobei gleichzeitig schon vorhandene Energieinfrastrukturen berücksichtigt werden müssen (z. B. Stromnetz, Erdgasleitungen oder Tankstellen). Wie müssen diese Infrastrukturen zeitlich und räumlich aufeinander abgestimmt werden, um ein möglichst ökonomisches und nachhaltiges Energiesystem zu schaffen? Welche Ausbaupfade sind als No-regret-Wege zu favorisieren und wie gestaltet man diese möglichst effizient, sicher und skalierbar? So kann bspw. die Elektrolysekapazität als Engpass für die Produktion von grünem Wasserstoff angesehen werden. Der Ausbau stellt eine koordinative Herausforderung dar, um das Henne-Ei-Problem des Wasserstoff-Markthochlaufs zu lösen: der gleichzeitige Hochlauf von Wasserstoffangebot, -nachfrage und -infrastruktur (Schulte/Sprenger/Schlund 2021: 5 ff.).

Auch geopolitische Entwicklungen wie der russische Angriff auf die Ukraine haben Einfluss auf die Weichenstellung beim Wasserstoffausbau. Die damit verbundene Energiekrise führte zum Beispiel zu deutlich angehobenen Zielen des Elektrolyseausbaus innerhalb der EU (Europäische Kommission 2022). Damit einher geht die Frage, welcher Anteil des nationalen Wasserstoffbedarfs inländisch produziert werden kann. Daher steht der weitere Ausbau von Windenergie- und Solaranlagen in direktem Zusammenhang mit dem zukünftigen Wasserstoffbedarf. Zwar bestehen noch große Flächenpotenziale für deren Ausbau, jedoch kann man durchaus infrage stellen, inwieweit Akzeptanzprobleme, Konflikte mit dem Naturschutz und anderen Landnutzungen in Zukunft zunehmen werden (SRU 2021: 68).

Wertedivergenz

Hinzu kommt, dass trotz eines weitgehenden Konsenses über die eindeutig zu priorisierenden Anwendungen noch Anwendungsfelder bleiben, in denen der Einsatz von Wasserstoff umstritten ist. Abbildung 2 verdeutlicht die Uneinigkeit sinnvoller Nutzungspfade und die damit verbundene Aufgabe der Priorisierung, um einen Lock-in (Pfadabhängigkeit durch bspw. hohe Wechselkosten) zu vermeiden. Prominentes Beispiel dafür ist die Debatte um batteriebetriebene Fahrzeuge oder wasserstoffbasierte Antriebe (Clausen 2022: 32 ff.).

Eine Wertedivergenz drückt sich demnach in den Ansichten darüber aus, in welchen Sektoren und Anwendungen Wasserstoff einzusetzen ist, aber auch in der Debatte um die Herstellungsart bzw. die „Farbe“ des Wasserstoffs.² So ist bislang noch nicht endgültig entschieden, ob Wasserstoff aus Erdgas mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS) zur Überbrückung der mittelfristigen Knappheit grünen Wasserstoffs sinnvoll ist. Die hier vertretenen Positionen sind mitunter klar wirtschaftlich geprägt (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021: 6 ff.). Es resultieren konkurrierende Innovationspfade, die nicht nur eine Abschätzung der sozial-ökologischen Folgen, sondern auch rasche politische Entscheidungen erschweren (ebd.).

2 Je nachdem, welche Energiequelle bzw. Ausgangsstoff und welches Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff genutzt wird, unterscheidet sich dessen Bezeichnung. So wird „grüner Wasserstoff“ i. d. R. durch erneuerbare Energien im Rahmen der Wasserelektrolyse hergestellt, während bspw. „blauer Wasserstoff“ aus der Dampfreformierung von Erdgas entsteht (SRU 2021: 15).

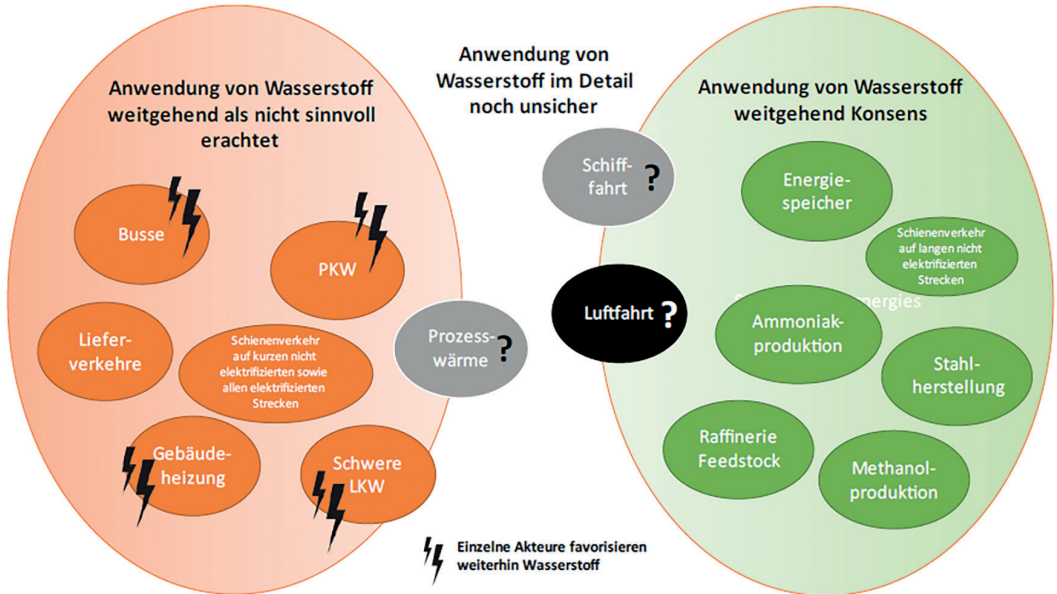


Abb. 2: Einschätzung des zukünftigen Einsatzes von Wasserstoff als Energieträger / Quelle: Clausen 2022

3.2 Umweltauswirkungen von Wasserstoffinfrastrukturen

Der Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft ist mit neuartigen und zusätzlichen Infrastrukturen im Raum verbunden, deren Auswirkungen auf Menschen und Umwelt bisher noch nicht bekannt sind. Tatsächlich gibt es bislang wenige Studien zu Umweltauswirkungen durch Wasserstoffinfrastrukturen auf Böden, Gewässer und die Biodiversität (SRU 2021: 26). Dies könnte auch daran liegen, dass viele Komponenten auf schon bekannten, teilweise bereits existierenden Technologien und Anlagen beruhen: Mögliche H_2 -Pipelines sind in ihren Dimensionen identisch zu bestehenden Erdgaspipelines, ebenso können bereits genutzte Untergrundspeicher für Erdgas potenziell auch für Wasserstoff genutzt werden. Weiterhin ergab eine Recherche über das Umweltverträglichkeitsprüfungs-Portal der Länder (UVP-Portal 2023), dass dort aufgeführte Vorhaben zu Errichtung und Betrieb von Anlagen zur Wasserstoffherzeugung mehrheitlich in einer negativen Vorprüfung resultieren, also keine erheblichen nachteiligen Umweltauswirkungen zu erwarten sind. Dies legt nahe, dass Elektrolyseure als bauliche Anlagen neben anderen Umweltwirkungen keine bislang bekannten, erheblichen umweltschädlichen Emissionen zu erzeugen scheinen, noch durch vertikale oder horizontale Großflächigkeit auffallen, wie es bei Windenergieanlagen und Solarparks der Fall ist. Zu erwähnen ist aber auch, dass der aktuelle Forschungsfokus stark auf der wirtschaftlichen, technischen und rechtlichen Ebene angesiedelt ist. Vor allem Stoffbilanzierungen im Rahmen von Lebenszyklusanalysen sind in der Wasserstoffforschung vermehrt anzutreffen (Fredershausen/Lechte/Willnat et al. 2021; IEA Hydrogen 2018). Um gravierende Fehlentwicklungen bei der zeitlich angespannten Energietransformation zu vermeiden, muss trotz bestehender Unsicherheiten eine

räumliche Konkretisierung aller potenziell betroffenen Schutzgüter erfolgen. Daher ist analog zu den Herausforderungen im Ausbau der erneuerbaren Energien die Projektion der Umweltwirkungen wichtig, um aufzuzeigen, wo und unter welchen Auflagen der Ausbau von Wasserstofftechnologien naturverträglich möglich ist (Thiele/Wiehe/Gauglitz et al. 2021). Dabei kann durch die Ermittlung von Flächen- und Energiepotenzialen auch aufgezeigt werden, welchen Beitrag die regionale und lokale Ebene zum Erreichen nationaler Klimaziele leisten kann (Wenzel/Thiele/Badelt et al. 2022: 280 ff.).

Mit spezifischem Fokus auf Wasserstoffelektrolyse als Kernelement der Wasserstoffproduktion bestehen noch Unsicherheiten, welche Standorte zukünftig in Betracht kommen (Merten/Scholt/Krüger et al. 2020), was die Bewertung der damit einhergehenden standortspezifischen Umweltauswirkungen schwierig macht. Der Großteil aktueller Anlagenstandorte lässt noch keine Rückschlüsse auf eine Standorteignung zu, da diese eher aus politischen oder forschungsseitigen Gründen gewählt wurden (FFE 2019). Dabei sind es vor allem ökonomische sowie infrastrukturelle Kriterien, die den Standort beeinflussen. Offensichtliche Standortkriterien sind die Versorgung mit elektrischer Energie, die verfügbare Infrastruktur sowie die Weiterverwendung von Wasserstoff und Sauerstoff (Günther 2014). Aktuell zeichnet sich die Tendenz ab, dass Standorte verbrauchsnahe geplant werden, wenn der Fokus auf Elektrifizierung liegt (Michalski/Altmann/Bünger et al. 2019: 51). In diesem Fall führt die Vorbelastung des Gebietes durch schon existierende Infrastrukturen der Abnehmerseite i. d. R. zu vergleichsweise geringen lokalen Umweltauswirkungen. Auf der anderen Seite könnte es auch effizienter, kostengünstiger und netzdienlicher sein, Anlagen erzeugernah zu errichten, wenn vor allem Wasserstoff produziert werden soll (ebd.). In diesem Fall würde die Wasserstoffproduktion dort realisiert werden, wo bereits große Mengen an Strom durch erneuerbare Energien generiert werden.

Weiterhin sollten durch die Standortwahl bestehende Netzengpässe nicht verschärft werden, sodass Elektrolyseure dort sinnvoll sind, wo bereits viel Strom produziert wird (Agora Energiewende, Agora Industrie 2022: 32). Im Umkehrschluss sollten in Gebieten geringer Netzdurchdringung, in denen es beim Import zu Netzengpässen kommen kann, zusätzliche EE-Anlagen gebaut werden (ebd.).

Erste eigene Recherchen zu potenziellen Umweltauswirkungen weisen auf einen möglichen Konflikt beim Wasserbedarf der Elektrolyse hin, vor allem in Regionen, die schon jetzt mit Trockenheit und Dürre zu kämpfen haben (Global Alliance Powerfuels 2021: 6). Das ist vor allem relevant, da diese Regionen aufgrund ihrer hohen Globalstrahlung und dementsprechend hohem Solarenergiepotenzial zu den favorisierten Regionen für die Wasserstoffproduktion gehören (z. B. Länder des Mittleren Ostens und Nordafrika, siehe Abb. 3). Inwieweit Deutschlands Wasservorräte nachhaltig nutzbar sind, ist bislang kaum untersucht (Saravia/Graf/Schwarz et al. 2023; Eggers 2022).

Für Niedersachsen zeigt sich, dass auch hier der Landeswasserhaushalt berücksichtigt werden muss, wenn es um Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse geht. Das Wasserversorgungskonzept Niedersachsen macht klar, dass es mittelfristig auch in Niedersachsen Regionen geben wird, in denen sich z. B. das Grundwasserdargebot

verschlechtern wird. Veränderungen der Entnahmemengen relevanter Nutzergruppen wie die öffentliche Wasserversorgung, Landwirtschaft (Feldberegnung und tierhaltende Betriebe) und Industrie sind bereits jetzt wahrnehmbar (MUNds. 2022). Wieviel Grundwasser effektiv in den Gemeinden für die Wasserstoffproduktion übrig bleibt, ohne grundwassersensible Landökosysteme zu beeinträchtigen, ist daher eine relevante Frage.

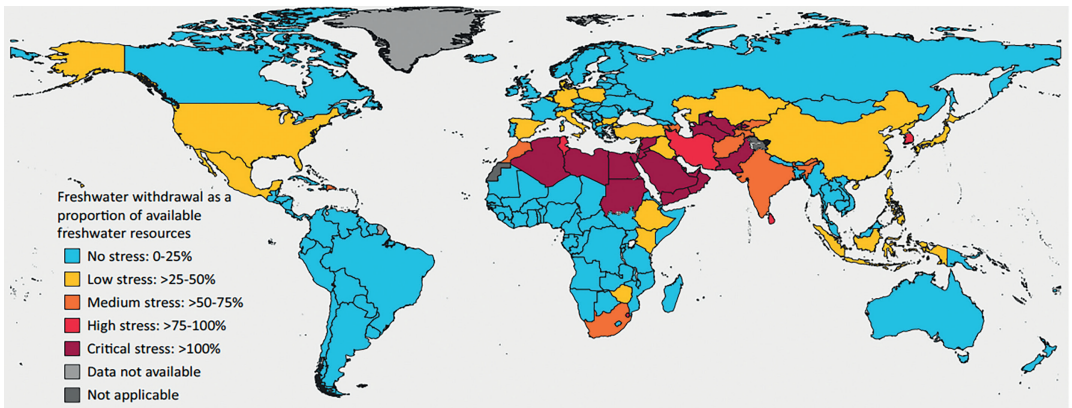


Abb. 3: Globales länderspezifisches Wasserstress-Level / Quelle: UN-Water 2021

3.3 Akzeptanz zusätzlicher Wasserstoffinfrastrukturen

Studien zur Akzeptanz von Wasserstoffinfrastrukturen bzw. einem Ausbau der Wasserstoffwirtschaft weisen auf eine grundsätzlich positive Einstellung bei Befragten hin: Eine Mehrheit von 62 Prozent befürwortet den Ausbau von Wasserstofftechnologien, 57 Prozent sprechen dem Ausbau einer Wasserstoffwirtschaft eine zentrale Rolle bei der Transformation des Energiesystems zu. Gleichzeitig sind lediglich 23 Prozent der Befragten Anwendungsfelder von Wasserstofftechnologien bekannt (Arndt 2022: 19 ff.). Inwieweit die im Ausbau von Wind- und Solarenergie gewonnenen Erfahrungen im Bereich der Akzeptanzforschung für den Wasserstoffausbau hilfreich sind, ist Gegenstand aktueller Forschung (IAAP 2017; Fraune/Gözl/Knodt et al. 2019; Taubitz/Hildebrand 2019). Diese Erfahrungen können als Orientierung für den Umgang mit Wasserstofftechnologien dienen.

Für die Umsetzung von Infrastrukturvorhaben im Wasserstoffbereich ist hier zu beachten, dass es relativ wenig Erfahrungen mit den zum Teil noch jungen Technologien in großem Maßstab gibt. Die Situation wird dadurch verschärft, dass zusätzlich zu den bisherigen Ausbauzielen für jedes GW Elektrolyse ein bis vier GW zusätzliche erneuerbare Energien installiert werden müssen (Agora Energiewende, Agora Industrie 2022: 32).

Diese Faktoren können beim Umgang mit der Wasserstoffintegration ins Energiesystem hilfreich sein, sollten jedoch, wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, nicht als Blau-

pause verwendet werden. Wenn wir uns auf die Charakteristiken der Wasserstofftechnologien zurückbesinnen, zeigt sich, dass hier im Gegensatz zu EE-Technologien vor der Frage nach ihrer Akzeptanz zunächst die Frage nach ihrer Akzeptabilität (vgl. Grunwald 2005) gestellt werden muss: Wie zumutbar sind zu erwartende Entwicklungen neuer Wasserstoffanwendungen und welche Faktoren werden für die Akzeptanz der Anwendungen eine Rolle spielen? Der Begriff „Akzeptabilität“ bezieht sich auf die Eigenschaften, die ein System generell akzeptanzwürdig machen und Zustimmung- und Einverständnis Potenzial eines Systems darstellen (Schmälz 2018: 26). Er drückt also eine Erwartbarkeit auf Basis gesellschaftlicher Wert- und Zielvorstellungen aus und fußt damit auf normativen Maßstäben, während Akzeptanz an empirischen Befunden gemessen wird (ebd.).

Hildebrand/Gebauer/Taubitz (2019) argumentieren in diesem Sinne für eine Abschätzung der konditionalen Akzeptanz bzw. Akzeptabilität bei der Wasserstoffintegration ins Energiesystem, da sich aufgrund der noch relativ niedrigen Technologieentwicklungsstadien kaum Erfahrungswerte für größere Anwendungsmaßstäbe ableiten lassen. Sie erläutern dies am Beispiel der Hochtemperatur-Ko-Elektrolyse und stellen eine Matrix vor, die als Screeninginstrument zur Identifikation akzeptanzsensibler Bereiche für Wasserstoffanwendungen (PtX) dient (Tab. 1).

Akzeptanzfaktor	PtX-Pfad 1	PtX-Pfad n
Zuverlässigkeit		
Risikobewertung (Unfallgefahr, gesundheitliche Wirkungen)		
angenommene Raumwirkungen/Flächenverbräuche/Flächenkonkurrenzen		
Kosten/Nutzen-Wahrnehmung; Verteilungsgerechtigkeit		
Umweltwirkungen/Nachhaltigkeitsbewertung		
Passung ins Energiesystem, Kompatibilität, zusätzlich benötigte Infrastruktur		
räumliche Verteilung, Grad von regionalen Betroffenheiten		

Tab. 1: Matrix zur Abschätzung der Akzeptanz von Wasserstofftechnologien / Quelle: Eigene Darstellung nach Hildebrand/Gebauer/Taubitz 2019

Auch der Leitfaden des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO 2020) spricht sich für ein prospektives (vorausschauendes) Akzeptanzmanagement aus und gibt konkrete Empfehlungen für Akteurinnen und Akteure aus dem Be-

reich Wasserstoff. Dabei wird der Stellenwert von partizipativen Ansätzen unterstrichen, um potenzielle Konfliktfelder zu identifizieren und Vertrauen in die Akteurinnen und Akteure zu fördern. Wichtig dabei ist eine frühzeitige Beteiligung, um entsprechende Ideen oder Kritik von Betroffenen noch in die Planung einfließen lassen zu können und tatsächliche Mitgestaltung zu ermöglichen (vgl. Arnstein 1969).

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Trotz vielfacher Unsicherheiten bzgl. möglicher Ausbaupfade ist der Ausbau der Wasserstoffwirtschaft sinnvoll und notwendig, um eine Dekarbonisierung aller Sektoren zu erreichen. Ganz im Sinne eines *wicked problems* sind die Herausforderungen dabei aufgrund unvollständiger, widersprüchlicher oder sich ändernder Anforderungen nur schwer zu lösen. Diese müssen auf unterschiedlichen Ebenen über eine möglichst transdisziplinäre Herangehensweise bewältigt werden. Eine besondere Rolle spielt hierbei ein prospektives Akzeptanzmanagement und eine frühzeitige Beteiligung aller relevanten Akteurinnen und Akteure. Technische Innovationen und ökonomische Rahmenbedingungen sowie der ökologische Spielraum im Rahmen der planetaren Grenzen sind dabei nicht losgelöst voneinander zu denken (Rockström/Steffen/Noone et al. 2009). Der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse kommt eine zentrale Bedeutung zu, da sie das zentrale Element zwischen elektrischem Energiesystem und den nachgelagerten Anwendungssektoren ist (Hebling/Ragwitz/Fleiter et al. 2019: 12).

Die dafür notwendige Transformation des Energiesystems ist jedoch kein Selbstläufer, sondern muss immer wieder im Angesicht neuer technischer, ökonomischer und politischer Entwicklungen nachjustiert werden. Das erfordert langen Atem, Transparenz bei möglichen Ausbauoptionen und vor allem die Akzeptanz vor Ort. Grundlage dafür ist eine ausreichend breit aufgestellte Regionalplanung, um auch verzwickten Problemen begegnen zu können sowie ein reger Austausch, sowohl mit der Landes- als auch der lokalen Planungsebene. Zusätzlich dürfen Biodiversität und der Zustand von Ökosystemleistungen nicht beeinträchtigt werden. Da sich abzeichnet, dass EE-Infrastrukturen zu den maßgeblichen Landnutzungen des 21. Jh. gehören werden, müssen wir stärker darüber nachdenken, wie wir diese in unser Lebensumfeld integrieren können und den Prozess aktiv gestalten – nachhaltige Energielandschaften, die angepasst sind an die Nutzung lokal verfügbarer erneuerbarer Energien und gleichzeitig die Bereitstellung anderer erforderlicher Ökosystemleistungen gewährleisten (Stremke 2013: 4).

Literatur

- Agora Energiewende, Agora Industrie (Hrsg.) (2022): 12 Thesen zu Wasserstoff. Berlin.
- Albert, C.; Galler, C.; von Haaren, C. (Hrsg.) (2022): Landschaftsplanung. Stuttgart.
DOI: 10.36198/9783838585796-273-292
- Alford, J.; Head, B. W. (2017): Wicked and less wicked problems: a typology and a contingency framework. In: Policy and Society 36 (3), 397-413.
- Amaral, L.; Ottino, J. (2004): Complex systems and networks: challenges and opportunities for chemical and biological engineers. In: Chemical Engineering Science 59 (8-9), 1653-1666.

- Andersson, C.; Törnberg, P. (2018): Wickedness and the anatomy of complexity. In: *Futures* 95, 118-138.
- Ariadne-Kurzdossier (2021): Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie. Wie die Politik Wasserstoffpfade hin zur Klimaneutralität 2045 finden kann. Potsdam.
- Arndt, P. (2022): Transformation & Gesellschaft: Ein Stimmungsbild – Studie zur Energiewende und der Akzeptanz von Wasserstoff. Repräsentative Online-Erhebung 2022. Hamburg.
- Arnstein, S. R. (1969): A Ladder Of Citizen Participation. In: *Journal of the American Institute of Planners* 35 (4), 216-224.
- Badelt, O.; Niepelt, R.; Wiehe, J.; Matthies, S.; Gewohn, T.; Stratmann, M.; Brendel, R.; von Haaren, C. (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Hannover.
- Becker, E. (2003): Soziale Ökologie: Konturen und Konzepte einer neuen Wissenschaft. In: Matschonat, G.; Gerber, A. (Hrsg.): *Wissenschaftstheoretische Perspektiven für die Umweltwissenschaften*. Weikersheim, 165-195.
- BfN – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.) (2020): Erneuerbare Energien Report. Bonn-Bad Godesberg.
- Biehl, J.; Missbach, L.; Riedel, F.; Stemmler, R.; Jüchter, J.; Weber, J.; Kucknat, J.; Odenweller, A.; Nauck, C.; Lukassen, L.; Zech, M.; Grimm, M. (2022): Wicked facets of the German energy transition – examples from the electricity, heating, transport, and industry sectors. DOI: 10.21203/rs.3.rs-2134870/v1
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. Berlin.
- BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.) (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. = BMVI-Online-Publikation 8.
- BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. Berlin.
- Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (Hrsg.) (2014): Im Hürdenlauf zur Energiewende. Wiesbaden.
- Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R.; Häfner, D.; Isidora Losada, A. M. (2014): Nuclear Waste Governance – ein wicked problem der Energiewende. In: Brunnengräber, A.; Di Nucci, M. R. (Hrsg.): *Im Hürdenlauf zur Energiewende*. Wiesbaden, 389-400.
- Burkhard, B.; Müller, F. (2008): Driver-Pressure-State-Impact-Response. In: *Encyclopedia of Ecology*, 967-970. DOI: 10.1016/B978-008045405-4.00129-4
- Clausen, J. (2022): Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen. Berlin.
- Czada, R.; Radtke, J. (2018): Governance langfristiger Transformationsprozesse. Der Sonderfall „Energiewende“. In: Radtke, J.; Kersting, N. (Hrsg.): *Energiewende*. Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-658-21561-3_3
- Deutscher Bundestag (2022): Bundesrat fordert Nachbesserungen am Osterpaket. Klimaschutz und Energie/Unterrichtung - 31.05.2022 (hib 274/2022). <https://www.bundestag.de/presse/hib/kurzmeldungen-897420> (04.10.2022).
- EEA – European Environment Agency (1999): Environmental indicators: Typology and overview. Copenhagen. = EEA Technical report 25.
- Eggers, J. (2022): Wird das Wasser knapp in Niedersachsen? Bewertung der Standorteignung für die Wasserstoffproduktion bezogen auf den Landschaftswasserhaushalt in Zeiten des Klimawandels. Masterarbeit. Hannover. DOI: 10.15488/13179
- Europäische Kommission (Hrsg.) (2022): REPowerEU Plan. Document 52022DC0230. Brüssel.
- FFE – Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft MbH (2019): Studie zur Regionalisierung von PtG-Leistungen für den Szenariohorizonten NEP-Gas 2020-2030. München.
- Folke, C.; Pritchard, L.; Berkes, F.; Colding, J.; Svedin, U. (1998): The problem of fit between ecosystems and institutions. Bonn. = IHDP Working Paper 2.
- Fraune, C.; Gözl, S.; Knodt, M.; Langer, K. (Hrsg.) (2019): Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation. Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung. Darmstadt/Freiburg.
- Fredershausen, S.; Lechte, H.; Willnat, M.; Witt, T.; Harnischmacher, C.; Lembcke, T.-B.; Klumpp, M.; Kolbe, L. (2021): Towards an Understanding of Hydrogen Supply Chains: A Structured Literature Review Regarding Sustainability Evaluation. In: *Sustainability* 13 (21), 11652.
- Gailing, L.; Overwien, P.; Plehn, M.; Gaasch, N.; Lewerentz, H.; Riechel, R.; Bues, A.; Naumann, M.; Hoffmann, J. (2021): Regionale Steuerung der Energiewende in Nordostdeutschland. Innovationen im Planungssystem? Hannover. = Forschungsberichte der ARL 17.

- Global Alliance Powerfuels** (2021): *Water Consumption of Powerfuels*. Berlin.
- Grabowski, F.; Strzalka, D.** (2008): Simple, complicated and complex systems – the brief introduction. In: *Conference on Human System Interactions*. Krakow. DOI: 10.1109/HSI.2008.4581503
- Grunwald, A.** (2005): Zur Rolle von Akzeptanz und Akzeptabilität von Technik bei der Bewältigung von Technikkonflikten. In: *Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis* 14 (13), 54-60.
- Günther, T.** (2014): *Entwicklung einer Bewertungsmethodik zur Standortplanung und Dimensionierung von Wasserstoffanlagen*. Dissertation an der Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.
- Hardin, G.** (1968): The Tragedy of the Commons. In: *Science* (162), 1243-1248.
- Haukkala, T.** (2019): *The wicked problem of a low carbon energy transition – Structure, agency and framing in the multi-actor process of solar PV deployment in Finland*. Dissertationsschrift. Aalto Universität.
- Head, B.** (2008): Wicked Problems in Public Policy. In: *Public Policy* 3 (2), 101-118.
- Hebling, C.; Ragwitz, M.; Fleiter, T.; Groos, U.; Härle, A.; Held, M.; Jahn, N.; Müller, N.; Pfeifer, T.; Plötz, P.; Ranzmeyer, O.; Schaddt, A.; Sensfuß, F.; Smolinka, T.; Wietschel, M.** (2019): *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*. Karlsruhe/Freiburg.
- Herditschka, T.; Hülz, M.; Kapitza, K.; Mölders, T.** (2022): Geschlechterperspektive auf räumliche Transformationsprozesse der Energiewende. In: *Nachrichten der ARL* 52 (2-3), 42-45.
- Hildebrand, J.; Gebauer, C.; Taubitz, A.** (2019): Anforderungen an die gesellschaftliche Einbettung von Power-to-X Pfaden – Entwicklung einer Akzeptanzmatrix als Bewertungsmethodik. In: *Fraune, C.; Gözl, S.; Knodt, M.; Langer, K.* (Hrsg.): *Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation. Gesellschaftliche Herausforderungen jenseits von Technik und Ressourcenausstattung*. Darmstadt/Freiburg, 441-461.
- Hübner, G.; Pohl, J.; Warode, J.; Gotchev, B.; Ohlhorst, D.; Krug, M.; Salecki, S.; Peters, W.** (2020): *Akzeptanzfördernde Faktoren erneuerbarer Energien*. Bonn. = BfN-Skripten 551. DOI: 10.19217/skr551
- IAAP – International Association of Applied Psychology** (Hrsg.) (2017): *Theories of Change in Sustainability Transitions and Social Innovation*. ICEP 2017, Book of Abstracts. Coruña (Spain).
- IAO – Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation** (Hrsg.) (2020): *Prospektives Akzeptanzmanagement bei H2-Projekten*. Stuttgart.
- IEA Hydrogen – International Energy Agency Hydrogen Technology Collaboration Programme** (2018): *IEA Hydrogen Task 36. Life Cycle Sustainability Assessment of Hydrogen Energy Systems – Final Report*. Bethesda, MD: Hydrogen Technology Collaboration Programme Secretariat.
- IÖW – Institut für ökologische Wirtschaftsforschung** (2022): *Wasserstoff-Hype: Studie fordert klare Prioritäten in der Energiepolitik*. <https://www.ioew.de/news/article/wasserstoff-hype-studie-fordert-klare-prioritaeten-in-der-energiepolitik> (20.03.2023).
- Jakimowicz, A.** (2022): The Energy Transition as a Super Wicked Problem: The Energy Sector in the Era of Prosumer Capitalism. In: *Energies* 15 (23), 9109.
- KEAN – Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen** (Hrsg.) (2022): *Aktuelles Themen-Spezial „Wasserstoff in Niedersachsen“*. KEAN-Newsletter. <https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/aktuelles/Aktuelles-Themen-Spezial-Wasserstoff-in-Niedersachsen-2528> (26.03.2023).
- Kemfert, C.** (2020): Wasserstoff: Grün und effizient! In: *Wirtschaftsdienst* 100 (12), 906.
- Komendantova, N.** (2021): Transferring awareness into action: A meta-analysis of the behavioral drivers of energy transitions in Germany, Austria, Finland, Morocco, Jordan and Iran. In: *Energy Research & Social Science* 71, 101826.
- Kopernikus-Projekt Ariadne** (Hrsg.) (2021): *Durchstarten trotz Unsicherheiten: Eckpunkte einer anpassungsfähigen Wasserstoffstrategie*. Ariadne-Kurz Dossier. Potsdam.
- Kosmol, J.; Kanthak, J.; Herrmann, F.; Golde, M.; Alsleben, C.; Penn-Bressel, G.; Schmitz, S.; Gromke, U.** (2012): *Glossar zum Ressourcenschutz*. Dessau-Roßlau.
- Krause, F.; Bossel, H.; Müller-Reißmann, K.-F.** (1980): *Energiewende. Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*. Frankfurt am Main.
- LBEG – Landesamt für Bergbau, Energie, und Geologie** (Hrsg.) (2022): *Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland 2021. Jahresbericht*. Hannover.
- Levin, K.; Cashore, B.; Bernstein, S.; Auld, G.** (2012): Overcoming the tragedy of super wicked problems: constraining our future selves to ameliorate global climate change. In: *Policy Sciences* 45 (2), 123-152.

- Local Energy Consulting** (2020): Akzeptanz und lokale Teilhabe in der Energiewende. Handlungsempfehlungen für eine umfassende Akzeptanzpolitik. Impuls im Auftrag von Agora Energiewende. Berlin.
- Megerle, H. E.; Frick, A.** (2022): Energie(wenden) im Ländlichen Raum: Auswirkungen, Chancen und Risiken am Beispiel von Baden-Württemberg. In: Standort 46, 250-258.
- Merten, F.; Scholt, A.; Krüger, C.; Heck, S.; Girard, Y.; Mecke, M.; Goerge, M.** (2020): Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung. Erarbeitet im Auftrag des Landesverbands Erneuerbare Energien NRW e.V. (LEE-NRW). Wuppertal.
- Michalski, J.; Altmann, M.; Büniger, U.; Weindorf, W.** (2019): Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Erarbeitet im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Moallemi, E. A.; Malekpour, S.** (2018): A participatory exploratory modelling approach for long-term planning in energy transitions. In: Energy Research & Social Science 35, 205-216.
- Moss, T.; Newig, J.** (2010): Multilevel water governance and problems of scale: setting the stage for a broader debate. In: Environmental Management 46 (1), 1-6.
- MU Nds. – Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz** (2022): Wasserversorgungskonzept Niedersachsen. Hannover.
- MW Nds. – Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung** (2020): Wasserstoffwirtschaft in Norddeutschland etablieren – Niedersachsens Stärken ausspielen! Gemeinsamer Appell der niedersächsischen Sozialpartner, der Landesregierung und der demokratischen Fraktionen im Landtag. Hannover.
- MW Nds. – Niedersächsisches Ministerium für Wirtschaft, Arbeit, Verkehr und Digitalisierung** (2022): Wasserstoff. Energie der Zukunft in Niedersachsen. Hannover.
- Odenweller, A.; George, J.; Müller, V.; Verpoort, P.; Gast, L.; Pflüger, B.; Ueckerdt, F.** (2022): Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam.
- Rau, I.; Hildebrand, J.; Heib, S.; Schweizer-Ries, P.** (2017): Communities as key drivers for energy transition. In: IAAP – International Association of Applied Psychology (Hrsg.): Theories of Change in Sustainability Transitions and Social Innovation. ICEP 2017, Book of Abstracts. Coruña (Spain), 270.
- Renn, O.** (2014): Gesellschaftliche Akzeptanz für die bevorstehenden Phasen der Energiewende. In: FVEE Themen, 75-78.
- Rittel, H.** (1984): Planning problems are wicked problems. In: Developments in design methodology, 135-144.
- Rittel, H.; Webber, M.** (1973): Dilemmas in a General Theory of Planning. In: Policy Sciences (4), 155-169.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S.; Lambin, E. F.; Lenton, T. M.; Scheffer, M.; Folke, C.; Schellnhuber, H. J.; Nykvist, B.; de Wit, C. A.; Hughes, T.; van der Leeuw, S.; Rodhe, H.; Sörilin, S.; Snyder, P. K.; Costanza, R.; Svedin, U.; Falkenmark, M.; Karlberg, L.; Corell, R. W.; Fabry, V. J.; Hansen, J.; Walker, B.; Liverman, D.; Richardson, K.; Crutzen, P.; Foley, J. A.** (2009): A safe operating space for humanity. In: Nature 461 (7263), 472-475.
- Saravia, F.; Graf, F.; Schwarz, S.; Gröschl, F.** (2023): Genügend Wasser für die Elektrolyse. Wieviel Wasser wird für die Erzeugung von grünem Wasserstoff benötigt und gibt es ausreichende Ressourcen? Bonn.
- Schäfer, M.; Keppler, D.** (2013): Modelle der technikorientierten Akzeptanzforschung. Überblick und Reflexion am Beispiel eines Forschungsprojekts zur Implementierung innovativer technischer Energieeffizienz-Maßnahmen. Berlin. = ZTG discussion paper 34.
- Schmälz, I.** (2018): Akzeptanz von Großprojekten. Eine Betrachtung von Konflikten, Kosten- und Nutzenaspekten und Kommunikation. Stuttgart.
DOI: 10.1007/978-3-658-23639-7
- Schulte, S.; Sprenger, T.; Schlund, D.** (2021): Perspektiven auf den Wasserstoffmarkthochlauf. Stakeholderanalyse mit Fokus Deutschland. Köln. = EWI Policy Brief.
- Sonnberger, M.; Ruddat, M.** (2016): Die gesellschaftliche Wahrnehmung der Energiewende. Ergebnisse einer deutschlandweiten Repräsentativbefragung. = Stuttgarter Beiträge zur Risiko- und Nachhaltigkeitsforschung 34.
- SRU – Sachverständigenrat für Umweltfragen** (2021): Wasserstoff im Klimaschutz. Klasse statt Masse. Stellungnahme. Berlin.
- Stremke, S.** (2013): Sustainable Energy Landscape: Implementing Energy Transition in the Physical Realm. In: Encyclopedia of Environmental Management, 1-9.
DOI: 10.1081/E-EEM-120053717
- Stremke, S.; van den Dobbelsteen, A.** (Hrsg.) (2012): Sustainable Energy Landscapes. Boca Raton (USA).
DOI: 10.1201/b13037

- Tagesschau** (2022): Energieträger der Zukunft. Es hakt noch beim Wasserstoff. 22.02.2022. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/finanzen/wasserstoff-energie-investitionen-101.html> (20.03.2023).
- Taubitz, A.; Hildebrand, J.** (2019): Akzeptanz neuer Energiewende-Technologien: Beispiel Power-to-X. In: *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 69 (11).
- Thiele, J.; Wiehe, J.; Gauglitz, P.; Pape, C.; Lohr, C.; Bensmann, A.; Hanke-Rauschenbach, R.; Kluß, L.; Hofmann, L.; Kraschewski, T.; Breitner, M.; Demuth, B.; Vayhinger, E.; Heiland, S.; von Haaren, C.** (2021): Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben. Bonn-Bad Godesberg. = BfN-Skripten 614. DOI: 10.19217/skr614
- Thollander, P.; Palm, J.; Hedbrant, J.** (2019): Energy Efficiency as a Wicked Problem. In: *Sustainability* 11 (6), 1569.
- UBA – Umweltbundesamt** (2022): Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#ueberblick> (04.10.2022).
- UN-Water** (2021): Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all. Genf. https://www.unwater.org/app/uploads/2021/07/SDG-6-Summary-Progress-Update-2021_Version-July-2021.pdf (19.06.2022).
- UVP-Portal** (2023): Informationen über UVP-pflichtige Vorhaben finden. <https://www.uvp-verbund.de/startseite> (20.03.2023).
- Walter, A.; Wiehe, J.; Schlömer, G.; Hashemifarzad, A.; Wenzel, T.; Albert, I.; Hofmann, L.; zum Hingst, J.; von Haaren C.** (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100% erneuerbaren Energien 2050. Bonn-Bad Godesberg. = BfN-Skripten 501. DOI: 10.19217/skr501
- Wenzel, T.; Thiele, J.; Badelt, O.; Makala, M.; Makala, C.; von Haaren, C.** (2022): Erfassen und Bewerten der Klimaschutzfunktion: Treibhausgasspeicher und Erzeugung erneuerbarer Energien in der Landwirtschaft. In: Albert, C.; Galler, C.; von Haaren, C. (Hrsg.): *Landschaftsplanung*. Stuttgart, 273-292.
- Wiehe, J.; Thiele, J.; von Haaren, C.** (2020): Global denken, lokal handeln: Umsetzung einer mensch- und naturverträglichen Energiewende. In: Sahling, U. (Hrsg.): *Klimaschutz und Energiewende in Deutschland*. Berlin/Heidelberg, 1-21. DOI: 10.1007/978-3-662-62081-6_46-1
- Wirtschafts- und Verkehrsministerien der norddeutschen Küstenländer** (2019): Norddeutsche Wasserstoffstrategie. <https://norddeutschewasserstoffstrategie.de/wp-content/uploads/2020/11/norddt-H2-Strategie-final.pdf> (05.10.2023).
- Wüstenhagen, R.; Wolsink, M.; Bürer, M. J.** (2007): Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. In: *Energy Policy* 35 (5), 2683-2691.
- Zoellner, J.; Rau, I.; Schweizer-Ries, P.** (2009): Akzeptanz Erneuerbarer Energien und sozialwissenschaftliche Fragen. Projektendbericht. Magdeburg.

Autor

Ole Badelt, M.Sc. Umwelplanung, ist seit 2018 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umwelplanung der Leibniz Universität Hannover. In seiner bisherigen Forschung hat er sich mit der Integration von Freiflächenphotovoltaik in die Energielandschaft auseinandergesetzt. Aktuell widmet er sich dem Themenbereich Wasserstoff.