

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Vorhabenbezeichnung	hyTracks: Entwicklung einer Stakeholderorientierten Interaktionsplattform für die Gestaltung resilienter Transformationspfade einer regionalen Wasserstoffwirtschaft
Laufzeit des Vorhabens	01.12.2020 – 31.05.2024
Förderkennzeichen	03EW0017
Zuwendungsempfänger	Universität Bremen – FG RES, DML, IERP
Berichts- und Bewilligungszeitraum	01.12.2020 – 31.05.2024
Projektleitung und Verfasser	<p><i>Fachgebiet Resiliente Energiesysteme (FG RES)</i></p> <p><i>(Projektleitung):</i> Geo Kocheril, Philipp Eppe, Bennet Petzник, Vishal Sharma, Elisavet Proedrou, Dr. Torben Stührmann</p> <p><i>Digital Media Lab (DML):</i> Leon Dratzidis, Dr. Michael Bonfert, Dr. Susanne Putze</p> <p><i>Institute for Economic Research and Policy (IERP):</i> Susanna Bolz, Dr. Tobias Wendler</p> <p>Hinweis: „Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor“</p>

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1	Kurzbericht.....	3
2	Eingehende Darstellung	3
2.1	Einleitung.....	3
2.2	Stand der Wissenschaft und Technik.....	4
3	Projektergebnisse.....	6
3.1	Analyse des soziotechnischen Systems (IERP).....	6
3.1.1	Arbeitspaket 1.1 – Identifikation der Stakeholder und der Systemdimension.....	6
3.1.2	Arbeitspaket 1.2 – Analyse der Verknüpfungen im Gesamtsystem.....	7
3.1.3	Arbeitspaket 1.3 – Analyse von Stressoren und deren Effekten auf das System.....	9
3.2	Entwicklung der Modelle und Simulationen (RES).....	13
3.2.1	Arbeitspaket 2.1: Modellkonzeption.....	13
3.2.2	Arbeitspaket 2.2: Umsetzung der Modellierung.....	17
3.2.3	Arbeitspaket 2.3: Validierung von Modellierung und Tool sowie Durchführung von Workshops.....	19
3.3	Frontend-Design (DML).....	22
3.3.1	Arbeitspaket 3.1: Identifikation geeigneter Technologien.....	22
3.3.2	Arbeitspaket 3.2: Iterativer Entwicklungsprozess des Frontends.....	22
3.3.3	Arbeitspaket 3.3: Entwicklung von Visualisierungen.....	23
3.3.4	Arbeitspaket 3.4: Entwicklung von Interaktionstechniken.....	23
3.3.5	Arbeitspaket 3.5: Integration von Backend und Frontend.....	24
3.4	Projektmanagement und Evaluation (RES).....	24
3.4.1	Arbeitspaket 4.1: Projektmanagement.....	24
3.4.2	Arbeitspaket 4.2: Workshop-Organisation.....	24
3.4.3	Arbeitspaket 4.3: Evaluation.....	24
3.4.4	Arbeitspaket 4.4: Dokumentation.....	24
4	Verwertbarkeit der Ergebnisse und Ausblick.....	24
5	Veröffentlichungen und Publikationsliste.....	25
6	Anhang.....	25
	Literaturverzeichnis.....	31

1 Kurzbericht

Aufgabenstellung

Das Projekt hyTracks zielte darauf ab, eine digitale, interaktive Plattform zu entwickeln, die Entscheidungsträger partizipativ darin unterstützt, Transformationspfade für die regionale Wasserstoffwirtschaft zu identifizieren und zu bewerten. Der Fokus lag auf der Dekarbonisierung eines energieintensiven industriellen Zentrums, genauer gesagt dem Bremer Industriehafen und dem dort ansässigen integrierten Stahlwerk. Der Fokus lag insbesondere auf Unsicherheiten in politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie den technologischen und ökonomischen Entwicklungen.

Wissenschaftlicher Hintergrund

Wasserstoff wird als Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung energieintensiver Industrien gesehen, insbesondere in „hard to abate“-Sektoren wie der Stahlindustrie. Trotz technologischen Fortschritten bestehen weiterhin Barrieren, darunter hohe Investitions- und Betriebskosten sowie Unsicherheiten in Preisentwicklungen und regulatorischen Rahmenbedingungen. hyTracks untersucht mit einem inter- und transdisziplinären Ansatz regionale Perspektiven einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft in Bremen.

Projektansatz

Das Projekt hatte vier Schwerpunkte: erstens, die Systemanalyse, was bedeutet, dass relevante Akteure und Dimensionen entlang der STEEP-Kriterien (sozial, technologisch, ökonomisch, ökologisch, politisch) identifiziert wurden. Zweitens die Szenarien- und Modellentwicklung sowie deren Implementierung in Tools zur Agentenbasierten Modellierung wie GAMA und MESA. Drittens der partizipative Schwerpunkt des Projektes: lokale Akteure wie swb, ArcelorMittal Bremen und die Geschäftsstelle Wasserstoffwirtschaft Bremen wurden eng eingebunden. Durch iterativ angelegte Diskussionen und Workshops wurde der Projektablauf abgestimmt und die Ergebnisse validiert. Viertens die Interaktionsplattform: ein benutzerfreundliches Tool zur Visualisierung und Exploration von Szenarien und Simulationsdaten wurde mit Unity, Kivy (DML) und Streamlit (FG RES) entwickelt und in Workshops erprobt.

Wesentliche Ergebnisse

Die Interaktionsplattform ermöglicht die Bewertung unterschiedlicher Transformationspfade anhand von verschiedenen Szenarien und unter Berücksichtigung ökonomischer, technologischer und politischer Dimensionen. Eine interaktive Plattform zur Diskussion von Transformationspfaden wurde erfolgreich entwickelt. Drei Rahmenszenarien („Green Deal“, „Green Deal+“, „Green Deal-“) wurden mit Unterszenarien zu Kosten und politischen Rahmenbedingungen entwickelt, um die Auswirkungen verschiedener politischer und wirtschaftlicher Bedingungen zu analysieren. Die enge Einbindung lokaler Akteure führte zu praxisnahen und realistischeren Szenarien, Modellen und Ergebnissen.

Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen

Das Projekt wurde an der Universität Bremen vom Fachgebiet Resiliente Energiesysteme in Kooperation mit dem Digital Media Lab (DML) und dem Institute for Economic Research and Policy (IERP) umgesetzt. Ergebnisse, Tools und Modelle sind in das Nachfolgeprojekt hyBit integriert worden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Einleitung

Die Dringlichkeit, eine klimaneutrale Wirtschaft bis 2045 bzw. 2038 in Bremen zu etablieren, stellt Deutschland und Bremen vor erheblichen Herausforderungen, insbesondere in industriellen Zentren wie Bremen. Ein bedeutender Faktor hierbei ist die Stahlindustrie, die weltweit maßgeblich zu den CO₂-Emissionen beiträgt. Die Reduzierung dieser Emissionen ist entscheidend für das Erreichen der Klimaziele. Der Bremer Industriehafen spielt eine zentrale Rolle in dieser Transformation, da er sowohl logistisch als auch industriell von großer Bedeutung ist. Der Hafen dient als Umschlagsort für diverse Güter – von Baustoffen über Stahl und Stahlerzeugnisse bis hin zu Containern und Fahrzeugteilen – und ist somit ein wesentlicher Bestandteil der regionalen Wirtschaft. Das Projekt hyTracks wurde initiiert, um die Unsicherheiten in politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen sowie technologische und ökonomische Dynamiken zu adressieren. Ziel war es, eine digitale interaktive Plattform zu entwickeln, die als Entscheidungsunterstützung dient, um fundierte und nachhaltige Transformationspfade zur Errichtung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft zu identifizieren und zu bewerten. Diese Plattform soll Entscheidungsträgern dabei helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen und nachhaltige Transformationspfade zu gestalten.

Koordiniert von der Universität Bremen, lief das Projekt vom 01.12.2020 bis zum 31.05.2024. Die Gesamtkosten betragen 899.237,24 €. Unter der Leitung von Dr. Torben Stührmann vom Fachgebiet Resiliente Energiesysteme zielte das Projekt darauf ab, verschiedene Transformationspfade gemeinsam mit Stakeholdern entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette zu modellieren und Lösungsansätze zu entwickeln. Angesichts des Ziels, 2038 in Bremen Klimaneutralität zu erreichen, müssen neue Perspektiven für die Region entwickelt werden. Industrielle und politische Akteure treten für eine industrielle Weiternutzung des Hafens ein, da dieser Standort aufgrund seiner hervorragenden logistischen Voraussetzungen – inklusive Hafen, Bahn, Autobahn sowie großskaligen Gas-, Wärme- und Stromanschlüssen – optimale Bedingungen bietet, um den Herausforderungen der industriellen Dekarbonisierung zu begegnen. Das Projekt hyTracks greift diese Herausforderungen auf und entwickelt gemeinsam mit Stakeholdern Szenarien, Modelle und Lösungskonzepte, um die Transformation hin zu einer regionalen Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen.

2.2 Stand der Wissenschaft und Technik

Wasserstoff kommt eine besondere Rolle bei der Dekarbonisierung unseres Wirtschaftssystems zu. Dies gilt insbesondere für bestimmte energie- und emissionsintensive Industrien, bei denen Elektrifizierung nicht möglich ist (sogenannte „hard to abate“-Industrien). Zu diesen Industrien gehören unter anderem die Stahl- und Luftfahrtindustrie, die jeweils in Bremen angesiedelt sind (Liebreich, 2021). Entsprechend gibt es verschiedene Wasserstoffstrategien von Bundesländern und der Bundesrepublik Deutschland, in denen die politische Strategie zur Unterstützung des Wasserstoffhochlaufs dargelegt werden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2020; European Commission, 2020; Die Senatorin für Wirtschaft, Arbeit und Europa et al., 2021).

Die erfolgreiche Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft ist unter den aktuellen Umständen immer noch eine Herausforderung, trotz bedeutender Fortschritte in der Technologie und politischen Unterstützung (Abrardi, 2019). Die Barrieren bei der Diffusion grüner Technologien sind divers (Bossle et al., 2016).

Prominente Barrieren für Unternehmen sind unter anderem verschiedene Unsicherheiten in Bezug auf die weitere technologische Entwicklung, regulatorische Rahmenbedingungen sowie die Preisentwicklung. Viele Unternehmen setzen auf eine Strategie, bei der sie abwarten, welche Technologie andere Unternehmen nutzen, um ihr eigenes Risiko zu senken (sog. „wait and see“), was bestehende Pfadabhängigkeiten weiter bestärkt (Bolz et al., 2024).

Auch die Bedeutung von Netzwerken ist zentral, da über (Unternehmens-)Netzwerke Wissen über den Einsatz und die Vorteile grünerer Technologien sowie Fördermöglichkeiten stattfinden kann (Bolz et al., 2024).

Eine weitere große Barriere ist die Wirtschaftlichkeit – grünere Technologien sind oft noch teurer, gleichzeitig ist nicht garantiert, dass die Zahlungsbereitschaft der Kunden und Abnehmerindustrien für grüne Produkte höher ist. Im Fall von Wasserstoff in der Stahlindustrie (und anderen kapitalintensiven Industrien) kommt hinzu, dass die Umstellung auf eine neue Technologie mit sehr hohen Investitionskosten verbunden ist und neben der Investition in den Unternehmen auch die entsprechende Energieinfrastruktur, wie Netzanschlüsse, Pipelines und Speicher, zur Verfügung gestellt werden muss (Ajanovic & Haas, 2018, 2021).

Insgesamt hat der Staat hier durch die Bereitstellung von Förderprogrammen, regulatorischen Bedingungen für neue Technologien, die eigene Nachfrage nach grünen Technologien (das sog. „Green Public Procurement“) sowie den Ausbau der notwendigen Infrastruktur erhebliche Gestaltungsmöglichkeiten (Cecere et al., 2020).

Aufgrund dieser prominenten Stellung und der hohen Politikrelevanz gibt es aktuell mehrere Forschungsprojekte, die sich mit unterschiedlichen Perspektiven rund um Wasserstoff auseinandersetzen. Aktuelle und für hyTracks relevante Projekte sind die 3 BMBF-Leitprojekte H2-Giga, H2-Mare und TransHyDE sowie die Reallabore der Energiewende Westküste100 und Norddeutsches Reallabor. Diese Forschungsprojekte adressieren die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette von Erzeugung, Speicherung über Transport bis zur Nutzung von Wasserstoff. Zudem gibt es eine Vielzahl an Studien und Szenarien, die die mögliche Umsetzung eines Wasserstoffhochlaufs untersuchen (Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2019; Agora Industry et al., 2024; European Commission, 2021; Prognos et al., 2020; Wietschel et al., 2021). Diese Studien fokussieren sich allerdings auf einen Vergleich europäischer Länder (Samadi & Barthel, 2020) oder auf die Strategie der EU als Ganzes (International Energy Agency, 2021) und sie haben einen (inter)nationalen und weniger einen regionalen Analyse-schwerpunkt.

Nichtsdestotrotz steht eine grüne Wasserstoffwirtschaft weiterhin am Anfang ihrer Entwicklung. Technologische und wirtschaftliche Unsicherheiten sowie eine mangelnde Vernetzung von Akteuren verringern die Investitionsbereitschaft von Unternehmen erheblich. Um diese Barrieren zu überwinden, ist eine verstärkte Verknüpfung zwischen den Akteuren sowie die Reduktion von Unsicherheiten notwendig. Hierfür sind interdisziplinäre und sektorübergreifende Strategien und Diskussionsgrundlagen erforderlich, die eine umfassende Beteiligung und Einbindung von Schlüsselakteuren aus dem öffentlichen und privaten Sektor sicherstellen (Nationaler Wasserstoffrat, 2024).

HyTracks adressiert zudem regionale Verknüpfungen: die Bedeutung lokaler Charakteristika für die Transformation wurde bereits in der wissenschaftlichen Literatur herausgestellt (Busch & McCormick, 2014; Heidrich et al., 2016; Losacker et al., 2023; Schönberger, 2013). Die Fokussierung auf die Region Bremen sowie der interdisziplinäre Ansatz, der sich in der Verwendung der STEEP-Dimensionen widerspiegelt, ermöglichen, Technologien, wirtschaftliche Verflechtungen, Logiken der Akteure sowie politische und regionale Rahmenbedingungen genauer zu analysieren und deren Auswirkungen auf die Transformation zu verstehen.

Plattformen, die regionale Effekte übersichtlich darstellen und die inhomogenen, nichtlinearen Abläufe zwischen sozialen und technischen Netzwerken aufbereiten, sind notwendig. Digitale Werkzeuge können diese Kultur der Beteiligung im Transformationsprozess der Energiewende unterstützen, indem sie die Diversifizierung der Beteiligten fördern und die Komplexität für Laien sowie Politik und Verwaltung reduzieren (Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik [IEE], 2023).

Die HCI-Forschung (Human-Computer Interaction) zeigt, dass direkte, multimodale und natürliche Interaktion mit digitalen Medien helfen kann, abstrakte Konzepte besser zu begreifen und Laien den Zugang zu komplexen Problemen zu erleichtern (Jacob et al., 2008; Shneiderman, 1982) TUIs (Tangible User Interfaces) ermöglichen eine spielerische und kreative Exploration von Daten und fördern die Kollaboration zwischen Nutzern in Multi-User-Anwendungen (Fan et al., 2014).

Das Projekt hyTracks nutzte Erkenntnisse aus der HCI-Forschung zur natürlichen und greifbaren Interaktion und entwickelt Interaktions- und Visualisierungsmethoden für das entwickelte agentenbasierte Modell. Diese Methoden sollen bei der partizipativen Exploration der Transformationsprozesse erprobt werden. Diese Ansätze zeigen, dass trotz der Herausforderungen eine koordinierte Anstrengung und die Nutzung fortschrittlicher Technologien und Methoden die Umsetzung einer Wasserstoffwirtschaft unterstützen können.

3 Projektergebnisse

3.1 Analyse des soziotechnischen Systems (IERP)

3.1.1 Arbeitspaket 1.1 – Identifikation der Stakeholder und der Systemdimension

Zur Identifikation der Stakeholder und Systemdimensionen wurden verschiedene Konzepte und Datengrundlagen herangezogen. Zum einen wurde auf die ORBIS-Datenbank (Bureau van Dijk) zurückgegriffen, um die am Bremer Industriehafen ansässigen Unternehmen zu identifizieren. Zur Identifikation der für die Dekarbonisierung des Stahlwerkes relevanten Akteure wurde auf die Studie von Schlund et al. (2022) zurückgegriffen. In dieser Studie haben die Autoren Stakeholdergruppen identifiziert, die für den Wasserstoffhochlauf wichtig sind, dazu gehören z.B. Übertragungsnetzbetreiber, aber auch energieerzeugende Unternehmen oder Unternehmen, die Elektrolyseure herstellen. Diese Analyse zeigt, dass viele wichtige Stakeholdergruppen am Bremer Industriehafen angesiedelt sind. Besonders häufig vertreten sind die Stahlindustrie, der Bausektor, städtische Versorgungsbetriebe und der Transportsektor. Gar nicht vertreten ist der Agrarsektor, NGOs sowie zivilgesellschaftliche Organisationen, Netzbetreiber, Wasserstoffhandel und politische Akteure sowie die chemische Industrie. Letzteres lässt sich durch die Industriestruktur Bremens erklären, da die chemische Industrie traditionell nicht in Bremen angesiedelt ist.

Zu beachten ist hierbei zudem, dass für diese Analyse eine starke geografische Einschränkung vorgenommen wurde, nämlich die Einschränkung auf den Bremer Industriehafen. Weitere Forschung kann hier überprüfen, inwieweit alle für den Wasserstoffhochlauf wichtigen Akteursgruppen in Bremen insgesamt vertreten sind. Dennoch lässt sich bereits zeigen, dass die meisten Akteursgruppen in Bremen vertreten sind und damit eine Grundvoraussetzung für die Transformation hin zu einer Wasserstoffwirtschaft gegeben sind.

In einem nächsten Schritt wurde auf Grundlage von wissenschaftlicher Literatur zum Stahlsektor und möglichen Dekarbonisierungsoptionen für die Stahlproduktion sowie von Pressemitteilungen und Jahresberichten von ArcelorMittal ermittelt, welche Akteursgruppen für die Dekarbonisierung des Stahlwerkes relevant sind und mit welchen konkreten Bremer Unternehmen bereits Kooperationen, z.B. durch gemeinsame Forschungsprojekte sowie Unternehmensbeteiligungen, bestehen. Auf Basis dieser Daten wurden 5 zentrale Stakeholder ausgewählt.

Bei Betrachtung der STEEP-Dimensionen zur Definierung der Systemgrenze, die relevant für die Dekarbonisierung des Stahlwerkes sind, wurde entschieden, den Fokus auf die Dimensionen „technologisch“, „ökologisch“, „ökonomisch“ und „politisch“ gelegt. Die soziale Dimension wurde für dieses Projekt nicht betrachtet. Eine im Projekt durchgeführte Literaturanalyse zur Operationalisierung der STEEP-Dimensionen hat ergeben, dass bei der sozialen Dimension häufig betrachtete Elemente Awareness, Unterstützung, Akzeptanz, Sicherheit, Aktion, Nutzen, Commitment, Nachfrage, Bildung, Im-

pact, Teilhabe, Produktion und Transport sind. Insgesamt sind Privathaushalte nur indirekt bei der Umstellung der Produktion eines Stahlwerkes betroffen. Stahl ist ein weiterverarbeitetes Produkt, damit ist für das Stahlunternehmen die Nachfrage anderer Unternehmen relevant, nicht die von privaten Konsumentinnen, was auch im Rahmen von Feldgesprächen mit den relevanten Stakeholdern bestätigt wurde. Bolz et al. (2024) zeigen in Fokusgruppeninterviews mit Stakeholdern zum Einsatz von Wasserstoff in der Logistikbranche, dass Unternehmen erwarten, dass die Akzeptanz der Privathaushalte für die Einführung von Wasserstoff nur untergeordnet relevant ist.

3.1.2 Arbeitspaket 1.2 – Analyse der Verknüpfungen im Gesamtsystem

Das zweite Arbeitspaket konzentrierte sich auf die Analyse der Verknüpfungen im Gesamtsystem. Bei den Analysen wurde auf die in Kapitel 3.1.1 beschriebenen Datenquellen zurückgegriffen. Auf Basis der Pressemitteilungen, Jahresberichte und der ORBIS-Datenbank wurden für die STEEP-Dimensionen Netzwerkbeziehungen ermittelt. Ergänzend wurde wissenschaftliche Literatur sowie branchenbezogene Dokumente wie Branchenreports oder Berichte von Verbänden ausgewertet. Dabei wurde auch die Entwicklung über die Zeit betrachtet, um die Dynamik der identifizierten Stakeholder-Unternehmen am Bremer Industriehafen sowie die Dynamik der Branchen insgesamt zu betrachten.

Um die komplexen Beziehungen systematisch abzubilden, wurden die Akteure und deren Beziehungen in einer Flowchart (siehe Kapitel 3.2.1) dargestellt. Diese diente auch als Grundlage für die Modellentwicklung.

Es zeigte sich, dass insbesondere Faktoren aus den Bereichen der ökonomischen, technologischen sowie politischen Dimension Einfluss auf die Dynamik haben. Für jede Dimension wurden geeignete Indikatoren ausgewählt, auf Basis dessen Szenarien definiert wurden.

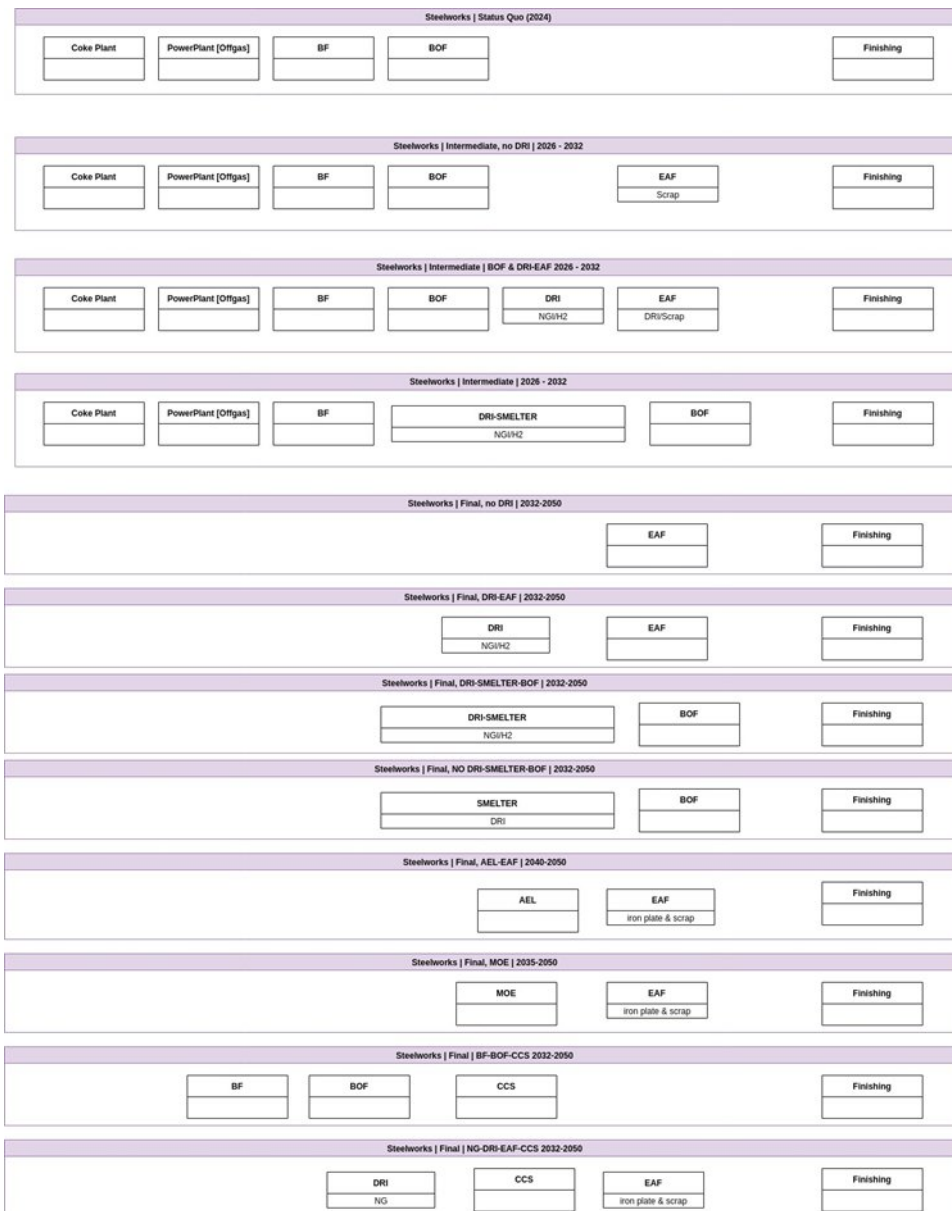
Für die ökonomische Dimension wurden die Investitions- und Betriebskosten, die Emissionskosten und Energie- und Ressourcenkosten sowie daraus resultierende Wirtschaftlichkeitsrechnungen betrachtet. Diese Elemente wurden jeweils auf Basis von verschiedenen Preisszenarien analysiert. Die Preisszenarien beschreiben erwartete Preisentwicklungen von Rohstoffen wie Eisenerz, Kohle oder Amine, Energieträger wie Wasserstoff oder Elektrizität sowie Emissionskosten und weitere relevante Preise.

Für die politische Dimension wurden die Auswirkungen der für die Umstellung der Produktion zentralen politischen Rahmenbedingungen inkludiert, dies sind die aktuelle Ausgestaltung sowie geplanten Veränderungen des EU-ETS inklusive der Einführung des CBAM, die Gestaltung von Strom- und Wasserstoffpreisen, sowie die Förderung von CAPEX- und OPEX-Kosten. Basierend auf dem „technology/market/regulation-framework“ zur Analyse der Diffusion von grünen Technologien spiegelt diese Auswahl die in der empirischen Literatur analysierten Einflussfaktoren auf die Anwendung grüner Technologien wider (Aflaki et al., 2021; Calel, 2020; Horbach et al., 2012; Leitner, 2018; Silva et al., 2021). Eine ausführlichere Beschreibung der Szenarien zur ökonomischen und politischen Dimension findet sich in Kapitel 3.1.3.

Die technologische Dimension des Gesamtsystems ist essenziell für die Umsetzung einer regionalen Wasserstoffwirtschaft. Verschiedene Technologien entlang der Wasserstoff-Wertschöpfungskette, die eine Rolle spielen oder spielen könnten, wurden durch umfangreiche Literaturrecherche und im Austausch mit den Stakeholdern vor Ort identifiziert. Die Erzeugungstechnologien, insbesondere die Elektrolysetechnologien, sind grundlegend für die Produktion von grünem Wasserstoff. Hierbei sind sowohl die Alkalische- als auch Protonenaustauschmembran-(PEM)-Elektrolyseure besonders relevant, die durch ihre unterschiedlichen technischen und ökonomischen Parameter charakterisiert werden. Ebenso ist die DRI (Direct Reduced Iron)-Technologie essenziell, sie produziert Eisen aus Eisenoxid (Eisenerz) ohne Schmelzprozess im Hochofen. Dabei wird Eisenoxid bei Temperaturen von

ca. 800–1000 °C mit einem Reduktionsmittel, meist Erdgas oder Kohlenstoff oder klimaneutraler mit grünem Wasserstoff, reduziert. Es entsteht Eisenschwamm, der in Elektro Stahlwerken (EAF) weiterverarbeitet werden kann (DRI-EAF-Route). Alternativ zur DRI-EAF-Route kann auch ein elektrischer Schmelzer (DRI-SMELTER) in Verbindung mit einem klassischen Hochofen verwendet werden. Eine solche Route wird am Standort Duisburg von thyssenkrupp Steel geplant. Am Standort ArcelorMittal Bremen wird mit der DRI-EAF-Route geplant. Hierbei gibt drei DRI-Hauptverfahren: Gas-DRI mit Erdgas, Kohlenstoff-DRI mit Kohlenstoffquellen wie Koks und das neue Wasserstoff-DRI-Verfahren. (Åhman et al., 2017; Norgate et al., 2007). Die folgende Abbildung 1 “Technologiepfade” zeigt die unterschiedlichen Technologiepfade und Optionen, die betrachtet wurden:

Abbildung 1 - Technologiepfade



Im industriellen Bereich, insbesondere in der Stahlproduktion, wird Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt. Dies bietet eine kohlenstoffarme Alternative zu herkömmlichen Verfahren, die auf Koks und Kohle bzw. Erdgas basieren. Die Umstellung erfordert jedoch erhebliche Investitionen in neue Anlagen und die Anpassung der bestehenden Infrastruktur.

Die Speicherung und der Transport des erzeugten Wasserstoffs erfolgen über verschiedene Technologien wie Drucktanks, Flüssigwasserstofftanks und chemische Speicher. Diese Speichertechnologien haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile in Bezug auf Kosten, Effizienz und technische Machbarkeit. Der Transport, der sowohl über Pipelines als auch über Tankwagen oder Schiffe erfolgen kann, hängt maßgeblich von der Menge und der Entfernung ab. Die Transportkosten werden für die Produktion vor Ort, Import aus dem Europäischen Wirtschaftsraum (EWR) und aus Nicht-EWR-Regionen in der Kostenanalyse berücksichtigt.

Die technologische Vernetzung und Systemintegration spielen eine zentrale Rolle in der erfolgreichen Umsetzung der Wasserstoffwirtschaft und klimaneutralen Umstellung des Stahlwerkes. Insgesamt zeigt sich, dass die erfolgreiche Umsetzung der Wasserstoffwirtschaft auf einer Vielzahl technologischer Innovationen und deren Integration in bestehende Systeme beruht. Die fortschreitende Entwicklung und Optimierung dieser Technologien sowie die Schaffung einer unterstützenden Infrastruktur sind entscheidend für die Transformation hin zu einer nachhaltigen und klimaneutralen Wirtschaft.

Die multikriterielle Bewertung und Auswahl der Technologien erfolgte entlang der Kriterien Treibhausgasemissionen, Investitions- und Betriebskosten und Technology Readiness Level (TRL). TRL ist ein System zur Bewertung des Entwicklungsstandes von Technologien. Es umfasst neun Stufen, von der grundlegenden Forschung (TRL 1) bis hin zur vollständigen Marktbereitschaft (TRL 9). Der TRL bietet eine Grundlage, um den Reifegrad von Technologien zu beurteilen und hilft bei der Entscheidungsfindung für Investitionsrisiken und zeitlichen Verfügbarkeit von Technologien (U.S. Department of Energy, 2011).

3.1.3 Arbeitspaket 1.3 – Analyse von Stressoren und deren Effekten auf das System

Im dritten Arbeitspaket wurden Stressoren und deren Effekte auf das System analysiert. Zum einen wurden zwei Umfragen zu wahrgenommenen Hindernissen und Risiken der Wasserstofftechnologie bei der Hydrogen Technology Conferences & Expo in den Jahren 2021 und 2022 durchgeführt. Zum anderen wurde auf empirische wissenschaftliche Literatur, Literatur zu von anderen erarbeiteten Modellen und Szenarien sowie Dokumente zu aktuellen und geplanten Politikmaßnahmen und Förderprogrammen zurückgegriffen. Dadurch wurde sichergestellt, sowohl bisherige gesicherte Ergebnisse (auf Basis der wissenschaftlichen Literatur) sowie auf aktuell wahrgenommene Probleme und zukünftige Politikgestaltung (Umfrage und Politikdokumente) bei der Erarbeitung der Szenarien zu beachten.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 1.2 und 1.3 flossen in die Definition verschiedener Rahmenszenarien ein, die die Reaktion des Systems auf interne und externe Stressoren abbilden. Dabei wurden drei qualitative Rahmenszenarien ("Storylines") erarbeitet, die politischen Rahmenbedingungen widerspiegeln, die der Dekarbonisierung insgesamt förderlich sind ("Green Deal"), sehr förderlich sind ("Green Deal +"), oder der Dekarbonisierung entgegenstehen ("Green Deal -"). Abbildung 2 fasst die zentralen Annahmen der Rahmenszenarien zusammen. Die einzelnen Elemente der Szenarien stellt zentrale Einflussfaktoren auf die Dekarbonisierung des Stahlsektors dar: finanzielle Förderung von Investitionen, die gesellschaftliche Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen, der technologische Fortschritt, CO₂-Kosten im Sinne der Preise des Europäischen Emissionshandels (EU-ETS), die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff sowie der Ausbau erneuerbarer Energien.

Das "Green Deal +"-Szenario ist die Zusammenstellung der insgesamt günstigsten Rahmenbedingungen für die Dekarbonisierung, das "Green Deal -"-Szenario stellt die ungünstigsten Rahmenbedingungen

gen dar und das “Green Deal”-Szenario zeichnet sich durch günstige, aber nicht optimale Rahmenbedingungen aus.

Abbildung 2 - Rahmenszenarien

Green Deal	Green Deal +	Green Deal -
Schwache finanzielle Förderung	Starke finanzielle Förderung	Schwache finanzielle Förderung
Hohe Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen	Hohe Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen	Niedrige Akzeptanz von Klimaschutzmaßnahmen
Schnelle technologische Fortschritte	Sehr schnelle technologische Fortschritte	Langsame technologische Fortschritte
CO ₂ -Zertifikate und -Preise sind stabil	CO ₂ -Zertifikaten und-Preise sind teuer	CO ₂ -Zertifikate und -Preise sind günstig
Grüner Wasserstoff ist begrenzt verfügbar	Grüner Wasserstoff ist ausreichend verfügbar	Grüner Wasserstoff ist begrenzt verfügbar
Schneller Ausbau erneuerbarer Energien	Sehr schneller Ausbau erneuerbarer Energien	Langsamer Ausbau erneuerbarer Energien

Diese drei qualitativen Rahmenszenarien wurden durch quantitative Preis- und Kostenszenarien spezifiziert (Abbildung 3). Dabei wurden die Kosten der relevanten Roh- und Betriebsstoffe, Preise der Outputs, Energiepreise und die Preise für den europäischen Emissionshandel abgebildet. Für jeden Parameter wurden auf Basis der wissenschaftlichen Literatur und von offiziellen Statistiken ein hoher, mittlerer und ein niedriger Wert ermittelt. Für jedes Rahmenszenario wurden dann die Werte kombiniert. Ziel dieser Art der Szenarien Erstellung ist es, ein möglichst großes Spektrum an Outcomes, “best” und “worst” cases abzubilden.

Abbildung 3 - Preis- und Kosten Szenarien

Parameter	Green Deal +	Green Deal -	Green Deal
Erdgas	Hoch	Niedrig	Mittel
Steinkohle	Hoch	Niedrig	Mittel
Industriestrompreis (grau)	Hoch	Niedrig	Mittel
Ökostrom (Deutschland)	Niedrig	Hoch	Mittel
H2 LCOH (HB) green	Niedrig	Hoch	Mittel
H2 LCOH (HB) green EHB	Niedrig	Hoch	Mittel
Eisenerz (62%)	Niedrig	Hoch	Mittel
Eisenerz (65%)	Niedrig	Hoch	Mittel
Eisenerz (67%)	Niedrig	Hoch	Mittel
H2 (green EU)	Hoch	Niedrig	Mittel
H2 (green/NZE flow)	Niedrig	Hoch	Mittel
DRI Import (EU)	Niedrig	Hoch	Mittel
DRI Import (World)	Mittel	Mittel	Mittel
Schrott	Niedrig	Hoch	Mittel
Schrott (neu)	Niedrig	Hoch	Mittel
Rohstahl	Hoch	Niedrig	Mittel
EU-ETS	Hoch	Niedrig	Mittel
H2-OPEX-Förderung	Hoch	Niedrig	Mittel
H2-CAPEX-Förderung	Hoch	Niedrig	Mittel

Bei den Workshops wurden die Szenarien auf dem Interaktionstisch oder einem zusätzlichen zweiten Display dargestellt (siehe hierzu auch eine ausführliche Beschreibung der Workshops in Kapitel 3.2.3).

Kostenszenarien

Die Kostenszenarien werden in € mit dem Basisjahr 2020 dargestellt, um eine Vergleichbarkeit über die Zeit zu schaffen. Zur Ermittlung der Kostenszenarien wurden verschiedene Quellen genutzt, wie z.B. World Bank (2023), Umweltbundesamt (2022) und European Commission (2021).

Abbildung 4 - Wasserstoffimportkosten



Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Wasserstoffimportkosten für grünen und blauen Wasserstoff, der von außerhalb der EU bezogen wird. Die Darstellung entspricht der Darstellung, wie sie auch bei den Workshops zu sehen ist (siehe hier zur Beschreibung der Workshops Kapitel 3.2.3). Auf Basis von den Daten vom Umweltbundesamt (2022) und Bilici et al. (2024) wurden für diese Variable drei Kostenszenarien (niedrig, mittel, hoch) ermittelt. Das jeweilige Kostenszenario ist dann entsprechend Abbildung zwei Grundlage für das jeweilige Rahmenszenario (Green Deal, Green Deal +, Green Deal -). Die Kostenszenarien spiegeln jeweils die Entwicklungen über die Zeit wider. Im Falle der Importkosten für blauen und grünen Wasserstoff zeigen sich für alle Kostenszenarien durch den Ausbau von internationalen Wasserstoffkapazitäten sinkende Kosten, wobei sich das mittlere Kostenszenario über die Zeit dem hohen Kostenszenario annähert.

Fördererszenarien

Entsprechend den Kostenszenarien wurden Fördererszenarien entwickelt, die das Ausmaß der politischen Förderung abbilden. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die erwartete Preisentwicklung der EU-ETS-Zertifikate auf Basis von den Daten vom Umweltbundesamt (2022). Dabei ist zu erwarten, dass über alle Szenarien die Preise ansteigen, wobei die Preissteigerung für das hohe Szenario am höchsten ausfällt. Das hohe Szenario für den EU-ETS ist dem Rahmenszenario "Green Deal +" zugeordnet, da ein hoher EU-ETS-Preis die Kosten für emissionsintensive Prozesse erhöht und damit die Dekarbonisierung begünstigt (vergleiche hierzu auch Aflaki et al. (2021) und Horbach et al. (2012)). Weitere Fördererszenarienparameter sind der Industriestrompreis, die CAPEX-Förderquote und die OPEX-Förderung der Wasserstoffproduktion von Elektrolyseuren zum Beispiel im Rahmen der Auktion der European Hydrogen Bank (EHB).

Abbildung 5 - Preise EU-ETS-Zertifikate



3.2 Entwicklung der Modelle und Simulationen (RES)

3.2.1 Arbeitspaket 2.1: Modellkonzeption

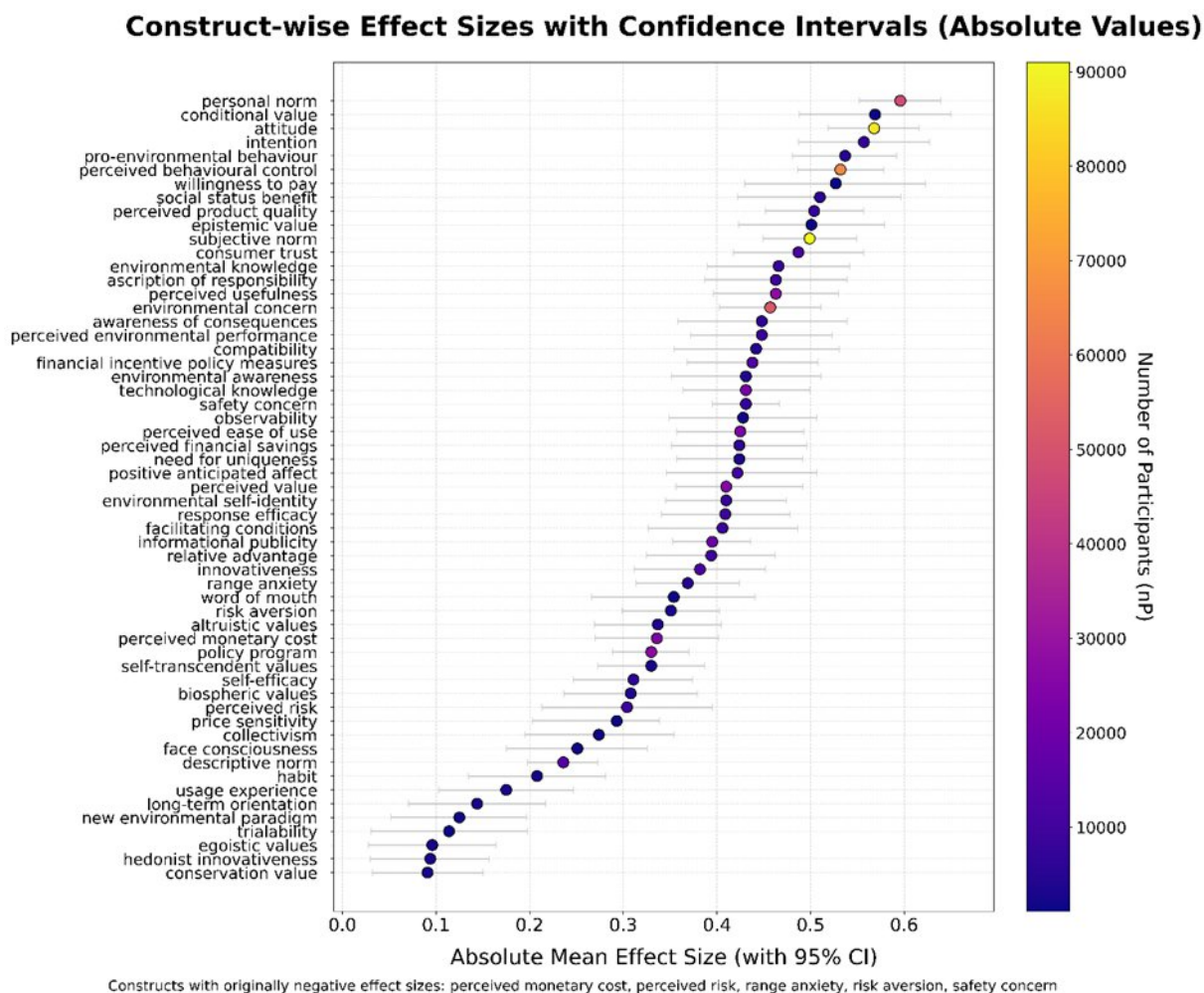
3.2.1.1 Teilpaket 2.1.1: Konzepterstellung

Im Teilpaket 2.1.1 wurde ein umfassendes Konzept für die Modelllogik und Strukturierung entwickelt, das die Grundlage für das agentenbasierte Modell bildet. Das Ziel war es, die in den Systemanalysen des Arbeitspakets 1 gewonnenen Erkenntnisse in ein umsetzbares Modell zu überführen.

Um diese Lücke zu schließen, wurden zusätzliche Wirkungsdiagramme erstellt, um die Interaktionen und Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Akteuren und Systemvariablen klar zu definieren. Diese Flowcharts (siehe Abbildung 6 & 7) visualisieren die komplexen Beziehungen und Abhängigkeiten innerhalb des Systems und stellen sicher, dass alle relevanten Verbindungen und Interaktionen berücksichtigt werden.

Ein Konzept für das agentenbasierte Modell wurde erstellt und umgesetzt, das die Skalierbarkeit und Flexibilität der betrachteten Anlagen und Akteure gewährleistet. Die Modelllogik und -strukturierung für verschiedene technologische Pfade - Business-as-Usual, CCS (Carbon Capture and Storage) und grüner Wasserstoff - wurde entwickelt. Basierend auf einer umfassenden Metaanalyse wurden soziale, persönliche, technologische, wirtschaftliche und politische Faktoren, die bei Investitionen in nachhaltige Technologien eine Rolle spielen, identifiziert und erste Verhaltensmodelle zur Agentensimulation erarbeitet (siehe Abbildung 8 und Anhang 1 für die Ergebnisse der Meta-Analyse).

Abbildung 8 - Ergebnisse der Meta-Analyse



Ein erster Versuch, die Modellkopplungen zu erproben, wurde durchgeführt, um zu verstehen, welche Input-Output-Dynamiken entstehen könnten. Dies umfasste die Nutzung der Daten des Vorläufer-Projektes H2B, um potenzielle Energieflussdynamiken zu analysieren und die Schnittstellen zwischen verschiedenen Modellkomponenten zu testen.

Das Ergebnis dieses Teilpakets war die Erstellung erweiterter Flowcharts und die Definition erster statischer Agentenmodelle, die als Grundlage für die weitere Entwicklung und Umsetzung der Simulation dienen.

3.2.1.2 Teilpaket 2.1.2: Modellformalisierung

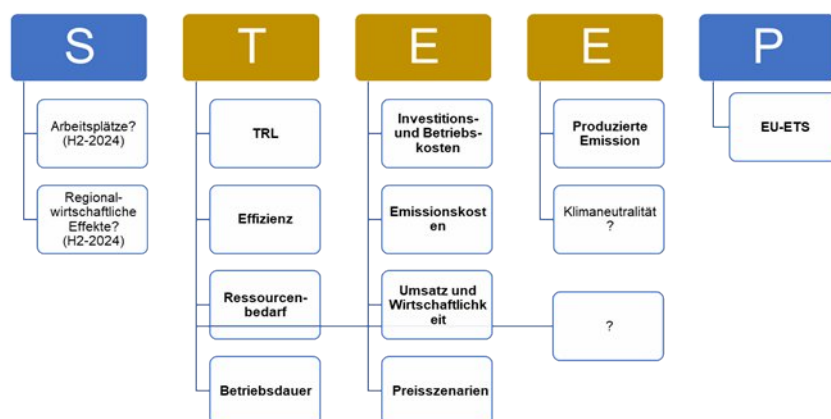
Das Teilpaket 2.1.2 konzentrierte sich auf die Formalisierung der Systemgrenzen, Systemelemente und Dynamiken im Modell (siehe Abbildung 6 und 7 - Wirkungsdiagramme). Ziel war es, die Interaktionen zwischen technischen, ökonomischen und politischen Dimensionen sowie Umwelteinflüssen

in das Modell formalisiert zu integrieren. Die Formalisierung soll die Nachvollziehbarkeit, Transparenz und die nachhaltige Weiterverwendung der Modellierung verbessern.

Ein zentrales Element dieses Prozesses war die detaillierte Ausarbeitung der Flowcharts, um die Interaktionen und Wechselwirkungen der Agenten zu visualisieren. Diese Diagramme halfen dabei, die komplexen Beziehungen und Abhängigkeiten innerhalb des Systems besser zu verstehen und darzustellen. Zunächst wurde die bestehende Open Energy Ontology (OEO) analysiert und beispielhaft erweitert. Die OEO bietet eine umfassende Struktur zur Beschreibung von Energieflüssen und -technologien, jedoch keine detaillierten Verbindungen zwischen Akteuren. Erste Ansätze zur Erweiterung und Erstellung neuer Ontologien wurden erprobt, jedoch nicht weiterverfolgt. Grund dafür war die Priorisierung anderer dringender Arbeiten und begrenzte personelle Ressourcen. Diese ersten Ansätze sollen jedoch im Rahmen des Projekts hyBit weiterentwickelt und verfeinert werden.

Die in Arbeitspaket 1.3 identifizierten Stressoren und Intervalle wurden in das Modell integriert. Diese Stressoren umfassen politische, technologische und ökonomische Einflüsse, die das System in verschiedenen Szenarien belasten können (siehe Abbildung 9). Die Szenarien wurden entwickelt, um die Reaktionen des Systems auf interne und externe Stressoren zu simulieren und mögliche Transformationspfade zu bewerten. Siehe Abbildung 5 für eine beispielhafte Szenarien-Entwicklung für des EU-ETS Preises bis 2050.

Abbildung 9 - STEEP Einflüsse



Erste Meta-Analyseergebnisse wurden einbezogen, um die Systemdynamiken besser zu verstehen und in das Modell zu integrieren. Insbesondere Aspekte der Risikobewertung spielten eine Rolle.

Die Agenten und erste einfache Interaktionen wurden kontinuierlich überprüft und angepasst, basierend auf den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Analysen und den Ergebnissen der Umfragen und Workshops. Diese iterative Vorgehensweise stellte sicher, dass das Modell sowohl präzise als auch flexibel und skalierbar genug war, um verschiedene Szenarien und Veränderungen im System abzubilden.

Das Ergebnis dieses Teilpakets war ein detailliertes Set an Flowcharts, das die Systemdynamiken und vereinfachte Einflüsse von Agenten und Umwelt darstellt. Diese Visualisierungen bilden die Grundlage für die Implementierung und Verifizierung des Modells in den folgenden Arbeitspaketen.

Eine weitergehende Formalisierung des Modells (ABM) wurde anhand von drei Standards - Open Energy Ontology (OEO), ODD (Overview, Design concepts, Details) und RAT-RS - erprobt.

Der RAT-RS (Rigour And Transparency – Reporting Standard) bietet ein strukturierendes Framework für die Dokumentation der Datennutzung in Agentenbasierten Modellen (ABMs) (Achter et al., 2022). Ziel ist es, Transparenz und Reproduzierbarkeit zu verbessern, indem zentrale Aspekte wie Spezifikation, Kalibrierung und Validierung abgedeckt werden. Der Standard erleichtert die Bewertung und Replikation von Modellen durch strukturierte Fragestellungen. Das ODD-Protokoll dient als standardisiertes Schema zur Beschreibung von agentenbasierten Modellen (ABMs) (Grimm et al., 2020). Es umfasst sieben Elemente: Zweck des Modells, Entitäten und Zustandsvariablen, Prozessübersicht und Zeitplanung, Gestaltungskonzepte, Initialisierung, Eingabedaten und Teilmodelle. Dieses strukturierte Format fördert die Transparenz und Replizierbarkeit von Modellen, indem es eine konsistente und detaillierte Dokumentation ermöglicht. Die Open Energy Ontology (OEO) ist eine domänenspezifische Ontologie für die Energiesystemmodellierung, die regelmäßig aktualisiert wird und eine gemeinsame Sprache für dieses Forschungsgebiet bereitstellt (*Open Energy Ontology (OEO)*). Sie bietet ein kontrolliertes Vokabular mit klaren Definitionen und erleichtert die Datenannotation und -integration. Die Ergebnisse der Erprobung waren, dass die OEO (2023) noch zu unvollständig und der Aufwand für die Nutzung der Standards innerhalb der iterativen Entwicklung der Szenarien und Modelle zu hoch ist und deshalb die weitere Erprobung und Entwicklung ausgesetzt wurde. Der aktuelle Stand der OEO umfasst deutlich mehr Konzepte für die Stahl- und Wasserstoffmodellierung. Aktuell ist mit AMIRIS auch ein ABM-Framework mit OEO-Annotation vorhanden (German Aerospace Center, 2021).

3.2.2 Arbeitspaket 2.2: Umsetzung der Modellierung

3.2.2.1 Teilpaket 2.2.1: Softwareimplementierung

Das Ziel von Teilpaket 2.2.1 war die Implementierung des in den vorherigen Arbeitspaketen entwickelten Modells in eine computerbasierte Umgebung. Dies beinhaltete die Nutzung geeigneter Multiagenten-Modellierungssoftware, um die Simulation zu erstellen und zu testen.

Für die Umsetzung des Modells wurden mehrere Ansätze erprobt: GAMA, MESA und Excel/Streamlit.

Ein erster Prototyp des Modells wurde in der Multiagenten-Modellierungssoftware GAMA entwickelt. Dieses anfängliche Modell half dabei, die grundlegenden Strukturen und Logiken zu testen und erste Erkenntnisse über die Modellierung der Agenten zu gewinnen.

Parallel dazu wurde mit der Entwicklung eines Modells in der Multiagenten-Modellierungssoftware MESA begonnen. Dieser Ansatz begann zunächst mit einem einfachen Code, der dann schrittweise zu einem komplexeren Modell weiterentwickelt wurde. Das finale Modell in MESA war modular und skalierbar aufgebaut, um die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Systems zu gewährleisten. Dies ermöglichte es, verschiedene Szenarien und Veränderungen im System effizient abzubilden.

Ein weiterer Ansatz beinhaltete die Nutzung von Excel für die Datensammlung und -analyse, die dann in die Streamlit-Plattform integriert wurde. Streamlit wurde verwendet, um eine benutzerfreundliche Oberfläche für die Visualisierung und Interaktion mit den Modellen zu schaffen. Dies ermöglichte es den Stakeholdern, die Simulationsergebnisse einfach zu interpretieren und mit den Daten zu interagieren.

Parallel dazu wurden die Modellkopplung mit OEMOF erprobt, um die potenziellen Input-Output-Dynamiken zu verstehen und die Schnittstellen zwischen verschiedenen Modellkomponenten zu testen. Die Schnittstelle zum OEMOF-Baukasten für die technischen Simulationsdaten wurde geprüft und als nicht in der verfügbaren Zeit umsetzbar befunden. Die nicht vorhandenen bzw. die zu entwickelnden Schnittstellen für die Nutzung, Import und Export von Daten der vorhandenen OEMOF-Modelle und des OEMOF-Frameworks selbst sollten auch semantisch konsistent mit ontologisch annotierten Begriffen und Konzepten durchgeführt werden.

Ein bedeutender Fortschritt war die Umsetzung der Simulation auf der Interactive Scape-Plattform, die multimodale Interaktionen (Multitouch und TUI) ermöglicht. Diese Plattform wurde gewählt, um die Interaktivität und Benutzerfreundlichkeit der Simulation zu verbessern und eine intuitive Bedienung durch die Stakeholder zu gewährleisten.

Das detaillierte Konzept für das agentenbasierte Modell wurde erfolgreich implementiert. Die Modelllogik und -strukturierung für verschiedene Szenarien wie Business-as-Usual und CCS wurden in der Multiagenten-Modellierungssoftware MESA umgesetzt.

Das Ergebnis dieses Teilpakets war die erfolgreiche Implementierung des Modells in eine interaktive digitale Umgebung. Diese Implementierung legte den Grundstein für die Verifizierung und Validierung des Modells in den folgenden Schritten.

3.2.2.2 Teilpaket 2.2.2: Modellverifizierung

Das Teilpaket 2.2.2 konzentrierte sich auf die Verifizierung des implementierten Modells. Ziel war es, sicherzustellen, dass die Simulation korrekt funktioniert und die erwarteten Ergebnisse liefert.

Ein iterativer Abgleich des Konzepts aus Teilpaket 2.1.2 mit der implementierten Simulation wurde durchgeführt. Dies beinhaltete die Überprüfung der Modelllogik und -strukturierung sowie die Anpassung fehlerhafter Funktionen. Tests der Agententätigkeiten wurden durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Interaktionen und Dynamiken im Modell realistisch und konsistent sind.

Das konzipierte Modell wurde umgesetzt, um verschiedene Transformationspfade der CO₂-armen Wasserstoffproduktion abzubilden. Der Fokus lag dabei auf Technologien zur grünen Wasserstoffherstellung und Dampfreformierung mit CO₂-Abscheidung. Weitere Akteure und Wertschöpfungsketten wurden durch Szenarien integriert, um eine umfassende Abbildung der möglichen Transformationspfade zu gewährleisten.

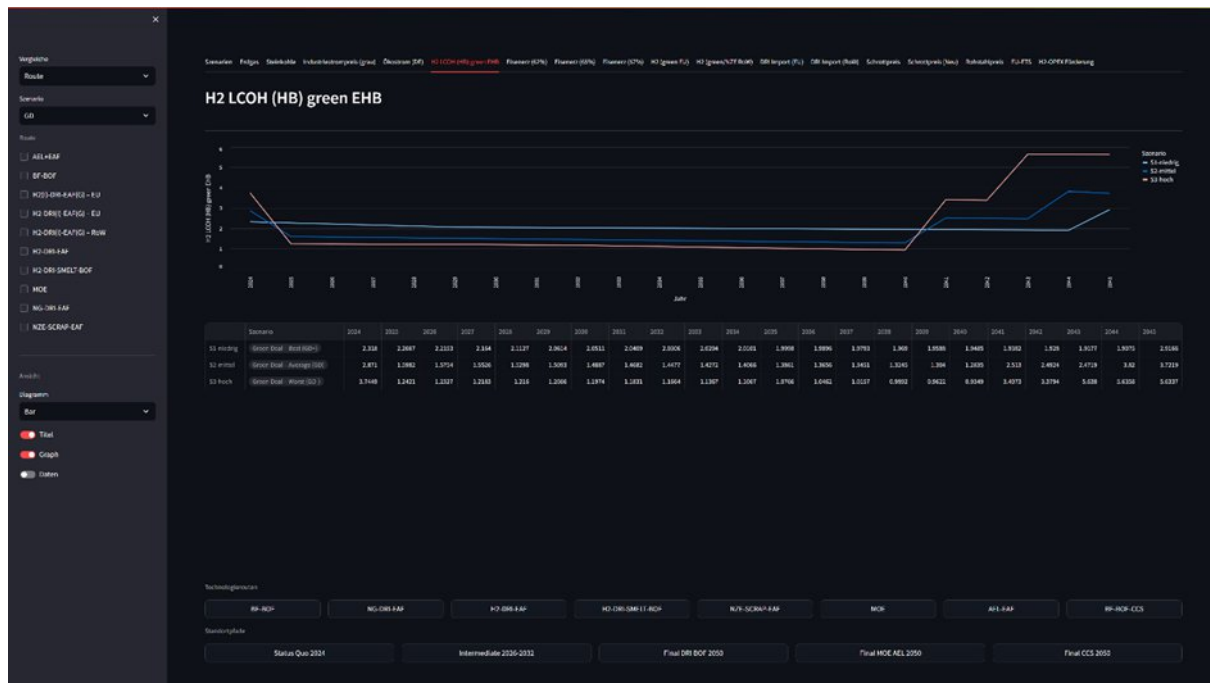
Die Verifizierung umfasste hauptsächlich die Überprüfung der Stoffflüsse. Diese Überprüfung wurde durch eine Reihe von internen Tests und Simulationen unterstützt, die die Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Modells bestätigten. Zusätzlich wurden Rückmeldung von Stakeholdern aus bilateralen Gesprächen oder den Workshops aufgenommen und entsprechende Anpassungen in die Berechnung und Analysen umgesetzt.

Das Ergebnis dieses Teilpakets war die bestätigte Funktionsfähigkeit des Modells und die erfolgreiche Verifizierung der Simulation. Diese Verifizierung stellt sicher, dass das Modell als zuverlässiges Werkzeug für die Analyse und Bewertung verschiedener Transformationspfade in der regionalen Wasserstoffwirtschaft verwendet werden kann.

3.2.2.3 Teilpaket 2.2.3: Parametrisierung

Die verfügbaren Daten aus abgeschlossenen Projekten wie H2B (Schnülle et al., 2023) und Studien wie Agora Industrie (Witecka et al., 2024) wurden für die Parametrisierung der technisch-ökonomischen Szenarien und Entscheidungsoptionen der Simulationsrechnung genutzt (siehe Abbildung 10). Die Ergebnisse und Rückmeldung aus den Interviews und Workshops wurden ebenfalls in die Parametrisierung der Simulations- und Szenarien Daten genutzt. Die Auswahl der Daten wurden hinsichtlich ihrer Anwendbar- und Nutzbarkeit in den geplanten Workshops priorisiert.

Abbildung 11 - Grüne Wasserstoffproduktionskosten vor Ort mit OPEX-Förderung (Bildschirmfoto von der Interaktionsplattform)



Workshop mit Arcelor Mittal Bremen

Der Workshop mit ArcelorMittal Bremen fokussierte sich auf die Validierung der Berechnungsergebnisse und des Interaktionstools. Teilnehmer waren Vertreter von ArcelorMittal, dem Wuppertal-Institut (hyBit) sowie Universität Kassel. Diskutiert wurden die Annahmen, Szenarien und Ergebnisse der Modellierungen, insbesondere hinsichtlich der Kosten und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der Stahlproduktion (siehe Abbildungen 12, 13 und 14) und Wasserstoffnutzung. Es wurde festgestellt, dass die Netzkosten und die Verfügbarkeit von grünem Strom entscheidende Faktoren für die Wirtschaftlichkeit sind, und dass viele Kosten, insbesondere für Wasserstoff, optimistischer angenommen wurden als realistisch. Weitere Themen umfassten die zukünftigen Preise für Eisenerz und Schrott, die technologische Entwicklung von Smeltern und DRI-Technologien sowie die Standortentscheidungen von ArcelorMittal in Bezug auf die politischen Rahmenbedingungen und Stromkosten.

Abbildung 12 - Stahlproduktionskosten (on-site) mit der H2-DRI-EAF Technologieroute in den drei Szenarien GD, GD+, GD- (Bildschirmfoto von der Interaktionsplattform)

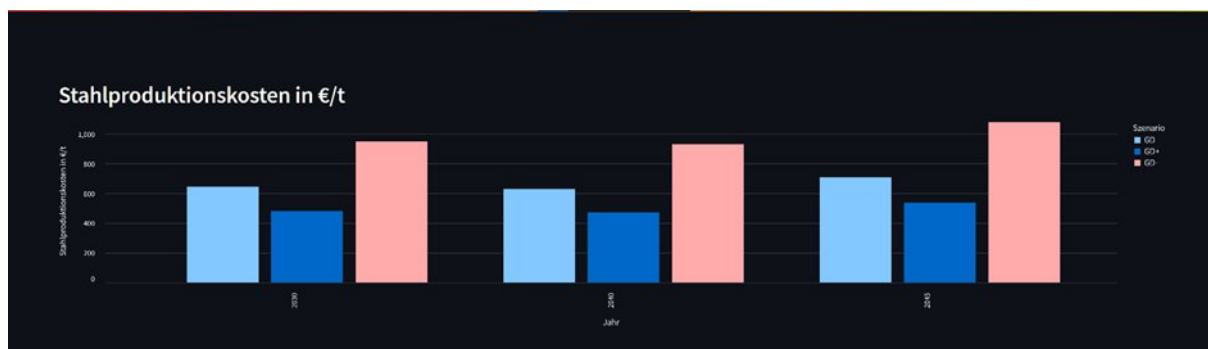


Abbildung 13 - Stahlproduktionskosten DRI Import aus der EU mit der H2-DRI-EAF Technologieroute in den drei Szenarien GD, GD+, GD- (Bildschirmfoto von der Interaktionsplattform)

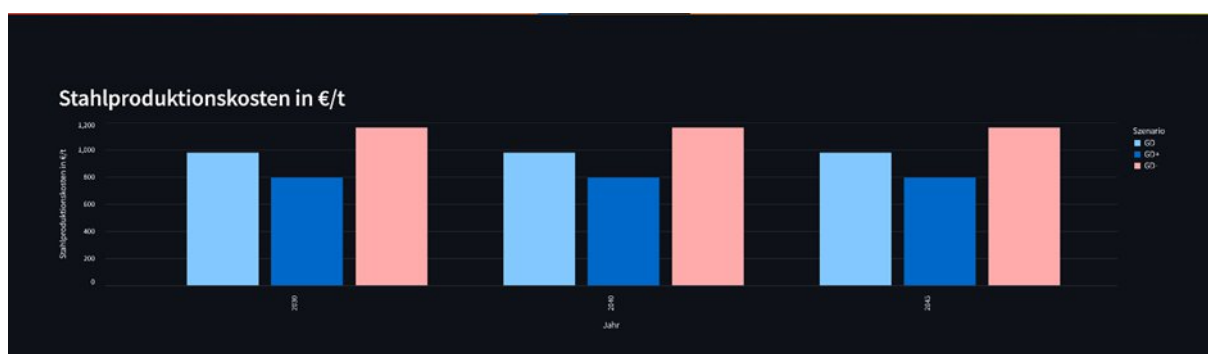
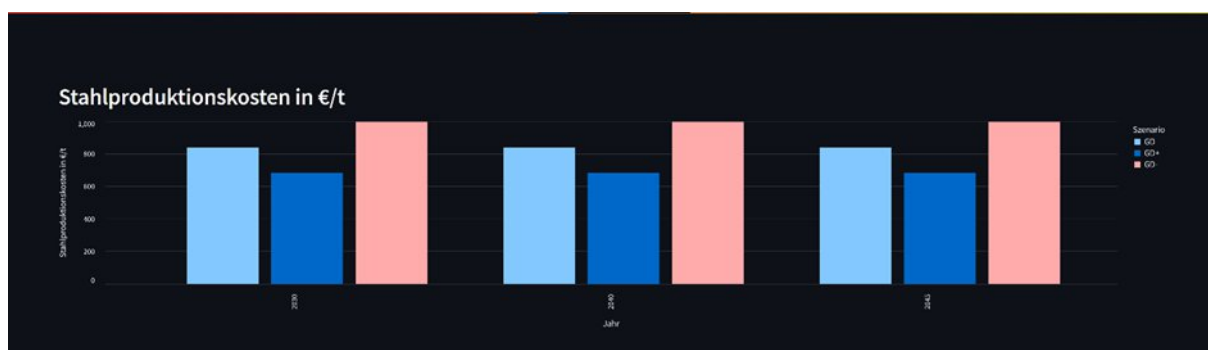


Abbildung 14 - Stahlproduktionskosten DRI Import ausserhalb der EU mit der H2-DRI-EAF Technologieroute in den drei Szenarien GD, GD+, GD- (Bildschirmfoto von der Interaktionsplattform)



Workshop mit der Geschäftsstelle Wasserstoff

Im dritten Workshop, der am 29. Mai 2024 mit der Geschäftsstelle Wasserstoff stattfand, lag der Fokus auf der Identifikation relevanter Wasserstoff-Anwendungsbereiche für Bremen. Zu den wichtigsten Themen zählten die Nutzung von Wasserstoff in der Rohstahlproduktion und im Zugverkehr, die Forschung von Airbus im Bereich Wasserstoff, sowie die Perspektiven für Methanol in der Schifffahrt. Diskutiert wurden zudem alternative Stahlproduktionsrouten (siehe oben) und die Herausforderun-

gen des Schrottrtransports. Es wurden auch Fördermöglichkeiten auf EU-, Bundes- und Landesebene erörtert. Zusätzlich wurden allgemeine regionalwirtschaftliche Aspekte vorgestellt.

3.2.3.1 Teilpaket 2.3.1: Durchführung erster Modellversuche und Datenanalyse

Die Ergebnisse der internen Tests haben einen Einblick in einen möglichen Ablauf eines Workshops mit Stakeholdern gegeben. Mit der Dokumentation der Ergebnisse und Integration der Ergebnisse in den iterativen Entwicklungsprozess wurden verschiedene Parameter einer Transformation der regionalen Wasserstoffwirtschaft für den Zeitraum bis 2038 (Zieljahr Klimaneutralität des Landes Bremen) und 2045 (Zieljahr Klimaneutralität Deutschland) angepasst. Ein besonderer Fokus lag auf den Szenarien Parametern für Investitionsentscheidungen. Verschiedene Gestaltungsformen von Workshops für die Kommunikation und Interaktion wurden getestet.

3.2.3.2 Teilpaket 2.3.2: Soziotechnische Validierung der Modellierung

Die Ergebnisse der Experimente und ersten Analysen wurden intern mit Experten aus dem H2B-Projekt abgestimmt und diskutiert. Weitere Validierung der Modellergebnisse und Kommunikation hat mit den Projektpartnern IERP und DML stattgefunden.

3.2.3.3 Teilpaket 2.3.3: Toolerprobung innerhalb einer Workshop Umgebung

Im Rahmen der insgesamt drei externen Workshops wurde Feedback über das Decision-Support-Tool und Ergebnisse zur Anwendung von Decision-Support-Tools für die Transformationsforschung im Rahmen der Energiewende gewonnen. Eines der Hauptergebnisse ist, dass für die Stakeholder im Workshop Setting sowohl die simulierten Entscheidungsoptionen als auch die Szenarien Daten sehr wichtig sind. Den Ansatz eines durch Workshop-Teilnehmende veränderbaren "custom scenario" wurde nachgefragt und in Teilen auch umgesetzt. Das angepasste Workshop Konzept trägt durch eine stärkere zeitliche Gewichtung dieser Priorisierung Rechnung.

3.3 Frontend-Design (DML)

3.3.1 Arbeitspaket 3.1: Identifikation geeigneter Technologien

Die Identifikation geeigneter Technologien hat erfolgreich den Tangible Multitouch Table ScapeLab55 von Interactive Scapes als Werkzeug für Stakeholder-Workshops identifiziert. Diese Art des Displays bietet sich besonders an, da alle Stakeholder um einen Tisch herumstehen und so ein „Roundtable“-Effekt eintritt. Dadurch sehen alle Teilnehmenden die gleichen Informationen und können diese in der Gruppe diskutieren. In früheren Iterationen setzte das Frontend zudem noch auf Tangibles, die als Tokens zusätzliche Funktionen auf dem Touchscreen einbrachten. Diese physischen Objekte ermöglichten eine intuitive und haptische Interaktion, welche die Benutzerfreundlichkeit und das Verständnis für die diskutierten Themen erhöhte.

In späteren Iterationen wurde jedoch entschieden, nur noch die Touchfunktion zur Interaktion zu nutzen. Diese Anpassung erleichterte die Handhabung und erhöhte die Flexibilität bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche.

3.3.2 Arbeitspaket 3.2: Iterativer Entwicklungsprozess des Frontends

Der iterative Entwicklungsprozess hat sich von Unity über Python bis hin zu Streamlit erstreckt, um die verschiedenen Anliegen der Stakeholder besser adressieren zu können. Daher war nicht nur eine iterative Entwicklung, sondern auch ein Wechsel der Entwicklungsumgebung erforderlich. Die iterative Entwicklung ermöglichte es, stets Änderungen im zugrunde liegenden Datenmodell zu integrieren und in der letzten Iteration sogar das Feedback aus Stakeholder-Workshops sowie konkrete Daten einzubinden.

Zu Beginn des Prozesses wurden Papier-Prototypen erstellt, um die Visualisierung und Interaktion der Stakeholder unter Berücksichtigung von Anforderungen und Systemgrenzen zu ermöglichen. Die-

se Prototypen halfen dabei, frühzeitig wertvolle Rückmeldungen zu sammeln und die grundlegenden Konzepte zu verfeinern.

Ein erster Prototyp des Interaktionstisches wurde mit dem Unity-Framework entwickelt und getestet. Die Erfahrungen aus diesen Tests führten dazu, dass der Entwicklungsprozess für die Tisch-Interaktionsplattform neu ausgerichtet wurde und man sich für die Kivy-Plattform (ein Open-Source-Framework für die Entwicklung von Python-Apps) entschied. Diese Neuausrichtung bot mehr Flexibilität und war besser geeignet, die spezifischen Anforderungen der Stakeholder zu erfüllen.

Der iterative Entwicklungsprozess des Frontends wurde durch weitere Workshops mit Low-Fidelity-Prototypen zur Darstellung der Transformationspfade fortgesetzt. In diesen Workshops wurden sowohl nutzendengetriebene als auch datengetriebene Anforderungen an das Frontend und die Interaktion erarbeitet. Die Einbeziehung der Stakeholder in diesen Prozess war entscheidend, um sicherzustellen, dass die entwickelten Lösungen deren tatsächlichen Bedürfnissen entsprachen und die gewünschten Funktionalitäten optimal umgesetzt wurden.

3.3.3 Arbeitspaket 3.3: Entwicklung von Visualisierungen

Basierend auf ersten Erkenntnissen aus den Workshops und in stetiger Kommunikation mit den Projektpartnern sowie der Evaluation mit der Zielgruppe werden Visualisierungstechniken für die Darstellung der Modelle implementiert.

Zu Beginn des Projekts wurden erste Visualisierungen als Papier-Prototypen erstellt. Diese Prototypen halfen dabei, grundlegende Konzepte zu visualisieren und frühzeitig Feedback von den Stakeholdern einzuholen. Auf Basis dieser Rückmeldungen konnten die Visualisierungen weiter verfeinert und an die spezifischen Anforderungen angepasst werden.

Im nächsten Schritt wurden die Visualisierungen datengetrieben weiterentwickelt und kontinuierlich an Änderungen im Modell angepasst. Dies ermöglichte eine dynamische Darstellung der Modelle, die den aktuellen Stand der Daten widerspiegelt. Durch die iterative Weiterentwicklung der Visualisierungen wurde sichergestellt, dass sie nicht nur technisch korrekt, sondern auch benutzerfreundlich und intuitiv verständlich sind.

Die finale Anpassung der Visualisierungen erfolgte anhand der Wünsche und Anforderungen der Stakeholder-Gruppen. Durch diesen kollaborativen Ansatz konnte ein Visualisierungsmodul entwickelt werden, das den Bedürfnissen aller Beteiligten gerecht wird und eine effektive Darstellung komplexer und großer Datenmengen ermöglicht.

3.3.4 Arbeitspaket 3.4: Entwicklung von Interaktionstechniken

Basierend auf ersten Erkenntnissen aus den Workshops und in stetiger Kommunikation mit den Projektpartnern sowie der Evaluation mit der Zielgruppe implementierten wir Visualisierungstechniken für die Darstellung der Modelle.

Zu Beginn des Projekts erstellten wir erste Visualisierungen als Papier-Prototypen. Diese Prototypen halfen dabei, grundlegende Konzepte zu visualisieren und frühzeitig Feedback von den Stakeholdern einzuholen. Auf Basis dieser Rückmeldungen verfeinerten wir die Visualisierungen und passten sie an die spezifischen Anforderungen an.

Im nächsten Schritt entwickelten wir die Visualisierungen datengetrieben weiter und passten sie kontinuierlich an Änderungen im Modell an. Dies ermöglichte eine dynamische Darstellung der Modelle, die den aktuellen Stand der Daten widerspiegelt. Durch die iterative Weiterentwicklung der Visualisierungen stellten wir sicher, dass sie nicht nur technisch korrekt, sondern auch benutzerfreundlich und intuitiv verständlich sind.

Die finale Anpassung der Visualisierungen erfolgte anhand der Wünsche und Anforderungen der Stakeholder-Gruppen. Durch diesen kollaborativen Ansatz entwickelten wir ein Visualisierungsmodul, das den Bedürfnissen aller Beteiligten gerecht wird und eine effektive Darstellung komplexer und großer Datenmengen ermöglicht.

Für verschiedene Nutzergruppen gab es unterschiedliche Interaktionskonzepte. Ein Interaktionskonzept verwendete Tangibles, wobei wir das Konzept des Tangible User Interfaces (TUI) grundlegend überarbeiteten, um die Herausforderungen der Skalierbarkeit des TUIs aufgrund der Beschränkungen der Hardware auf 20 Tangibles zu adressieren. Dazu studierten wir existierende Ansätze und untersuchten ihre Eignung. Erste Schritte zum neuen Konzept zur Interaktion testeten wir bereits in den Workshops im Rahmen von Arbeitspaket 3.3. Das neue Konzept sah vor, Tangibles insbesondere zur Interaktion mit Entscheidungen einzusetzen und grundlegende Informationen mittels touchbasierter graphischer Nutzungsinterfaces umzusetzen.

Ein weiteres Interaktionskonzept basierte rein auf Touch-Interaktionen, um die grundlegenden Daten genauer zu erforschen. Diese touchbasierte Lösung ermöglichte eine präzisere und detailliertere Analyse der Daten und erleichterte die Navigation durch komplexe Datensätze.

3.3.5 Arbeitspaket 3.5: Integration von Backend und Frontend

Die Integration von Backend und Frontend wurde erfolgreich abgeschlossen. Gemeinsame Schnittstellen und Datenformate wurden spezifiziert und an die aktualisierten Frontend-Konzepte angepasst.

3.4 Projektmanagement und Evaluation (RES)

3.4.1 Arbeitspaket 4.1: Projektmanagement

Iterative Prozesse wurden etabliert, um flexibel auf Änderungen reagieren zu können. Netzwerke und Kooperationen, insbesondere mit Projekten wie hyBit und der Open Energy Platform, wurden aufgebaut, um Synergien zu nutzen und den Wissensaustausch und Wissenstransfer zu fördern.

3.4.2 Arbeitspaket 4.2: Workshop-Organisation

Es wurden insgesamt ein Interview und drei Workshops organisiert, in denen die Interaktion der Teilnehmenden protokolliert und evaluiert wurde. Erste Schritte zur erfolgreichen Durchführung weiterer Workshops wurden eingeleitet, um eine breite Beteiligung der Stakeholder zu gewährleisten.

3.4.3 Arbeitspaket 4.3: Evaluation

Die Evaluation der Workshops erfolgte durch systematische Erfassung von Feedback, das zur kontinuierlichen Verbesserung des Projekts genutzt wurde.

3.4.4 Arbeitspaket 4.4: Dokumentation

Der Projektfortschritt wurde kontinuierlich dokumentiert. Ein ODD-Protokoll wurde aufgesetzt und für die erste Iteration ausgefüllt (siehe Abschnitt Formalisierung), die Workshops wurden jeweils protokolliert, um eine umfassende Dokumentation der Projektarbeit sicherzustellen.

4 Verwertbarkeit der Ergebnisse und Ausblick

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Projekts bieten eine solide Basis für die Weiterentwicklung und Anwendung in weiteren Projekten sowie für andere öffentliche Aufgaben. Die entwickelten Modelle und Tools können zur Unterstützung von Entscheidungsträgern und zur Gestaltung nachhaltiger Transformationspfade genutzt werden. Wirtschaftlich bieten die Ergebnisse funktionale und wirtschaftliche Vorteile für verschiedene Anwendergruppen und Industrien in Deutschland.

Das Projekt hyTracks hat bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung einer Stakeholder-orientierten Interaktionsplattform erzielt. Trotz anfänglicher Verzögerungen aufgrund von Personalwechselln und der Umstellung der Entwicklungsplattform konnten die gesetzten Ziele erreicht werden. Die kontinuierliche Zusammenarbeit mit Stakeholdern und die iterative Entwicklung der Technologien und Modelle waren entscheidend für den Projekterfolg. Die Plattform bietet nun eine fundierte Basis für die Gestaltung und Bewertung von Transformationspfaden in der regionalen Wasserstoffwirtschaft und trägt wesentlich zur nachhaltigen Entwicklung bei. Die im Projekt entwickelten Ansätze und Tools können auch in Zukunft wertvolle Unterstützung bei der Bewältigung komplexer Transformationsprozesse bieten.

Die Daten und Ergebnisse aus Stakeholderworkshops und Modellierung wurden an das Nachfolgeprojekt hyBit übergeben.

5 Veröffentlichungen und Publikationsliste

Veröffentlichungen:

- Eppe, P. S., Bouman, T., & Albers, C. (2023, November). Developing an empirically based agent-based model to support local transitions. In BEHAVE 2023: The 7th European Conference on Behaviour Change for Energy Efficiency.
- Eppe, P. S., Winkeler, L., Kocheril, G., & Stührmann, T. (2023). Leadership in Transitions: The Case of Hydrogen. In de Jong, G., Ünal, B., Faber, N., Long, T. B., Folmer, E., De Gruyter Handbook of Sustainable Entrepreneurship Research. De Gruyter.

Vorträge:

- Workshop at the ABM4Energy Conference 2024 in Freiburg, Germany: Fantastic Models and How to Make Them: A Beginner's Guide to CaterFly. - Mariëlle Rietkerk, Lukas Schubotz, Hannah Galster, Philipp Eppe
- Presentation at the Behave 2023 (7th European Conference on Behaviour and Energy Efficiency) in Maastricht, Netherlands: Developing an empirically based agent-based model to support local transitions (2) - Philipp Eppe, Thijs Bouman, Casper Albers
- Presentation at the ICEP 2023 (International Conference for Environmental Psychology) in Aarhus, Denmark: Developing an empirically based agent-based model to support local transitions (1) - Philipp Eppe, Thijs Bouman, Casper Albers, Torben Stührmann
- Präsentation beim PhD Workshop on Hydrogen Transformation - University of Groningen, Leeuwarden, Niederlande: HyTracks - Development of an Interactive Platform for Stakeholders in the Industry - Susanna Bolz

Masterarbeiten:

- Modellierung von Investitionsentscheidungen industrieller Verbraucher in Batteriespeichertechnologien unter Berücksichtigung von STEEP-Faktoren - Leon von Loh
- Modellierung eines grünen Leitmarktes für Stahl und Analyse der Auswirkungen von Förder Szenarien auf Wertschöpfungsketten - Paul Agostini

6 Anhang

Anhang 1 - Deskriptive Ergebnisse der Meta-Analyse: Einflussfaktoren bei Investitionsentscheidungen in nachhaltige Energie-Technologien

Construct	n	n_p	M (SD)	95% CI	Definition
personal norm	54	47620	.596 (.163)	[.552, .639]	“individual’s conviction that acting in a certain way is right or wrong”
conditional value	3	1105	.569 (.156)	[.488, .650]	“perceived utility derived from discounts or promotions”
attitude	115	87274	.568 (.168)	[.519, .616]	“degree to which a person has a favourable or unfavourable evaluation or appraisal of the [technology] in question”
intention	16	7779	.557 (.124)	[.487, .627]	“capture the motivational factors that influence a behaviour; they are indications of how hard people are willing to try, of how much of an effort they are planning to exert, in order to perform the behaviour”
pro-environmental behaviour	8	5175	.537 (.104)	[.481, .592]	“behaviour that harms the environment as little as possible, or even benefits the environment”
perceived behavioural control	75	65284	.532 (.178)	[.486, .578]	“people’s perception of the ease or difficulty of performing the behaviour of interest”
willingness to pay	6	1691	.527 (.099)	[.430, .623]	“[willingness for a] payment of a premium for green product attributes”
social status benefit	18	6149	.510 (.188)	[.422, .597]	“concern [...] with improving one’s standing in the community by exceeding the norm”
perceived product quality	11	8183	.504 (.177)	[.452, .557]	“an impression of product quality formed in the mind of the consumer upon processing the various extrinsic and intrinsic cues under conditions of limited knowledge of the product’s attributes”
epistemic value	3	1313	.501 (.138)	[.423, .579]	“perceived utility acquired from an alternative’s capacity to arouse curiosity, provide novelty, and/or satisfy a desire for knowledge”
subjective norm	117	91018	.499 (.155)	[.449, .549]	“perceived social pressure to perform or not to perform the behaviour”
consumer	25	12206	.487 (.224)	[.418, .557]	“confidence in an exchange part-

Construct	n	n_p	M (SD)	95% CI	Definition
trust					ner's reliability and integrity"
environmental knowledge	20	8393	.466 (.213)	[.390, .542]	"knowledge and awareness about environmental problems and possible solutions to those problems"
ascription of responsibility	23	9803	.463 (.160)	[.387, .539]	"key belief that the individual is responsible for [negative] consequences in the sense that he or she can take action that would prevent them"
perceived usefulness	52	27747	.463 (.196)	[.396, .530]	"degree to which a person believes that using a particular system would enhance his or her [...] performance"
environmental concern	72	51461	.457 (.140)	[.403, .511]	"[negative] affect associated with beliefs about environmental problems"
awareness of consequences	20	6260	.448 (.207)	[.358, .539]	"key beliefs that a particular condition has harmful consequences for other people"
perceived environmental performance	20	9095	.448 (.130)	[.372, .523]	"[perceived] green contribution [a type of technology] can bring to environmental sustainability"
compatibility	13	4624	.442 (.158)	[.354, .531]	"degree to which an innovation is perceived as consistent with the existing values, past experiences, and needs of potential adopters"
financial incentive policy measures	26	14088	.438 (.118)	[.368, .508]	"[perception of measures that] aim to lower the [technology] purchasing cost and operating cost"
safety concern	4	8109	-.431 (.131)	[-.467, -.395]	"anticipated potential for injury to personal health resulting from [technology use]"
environmental awareness	9	4025	.431 (.226)	[.352, .511]	"knowing of the impact of human behaviour on the environment"
technological knowledge	41	23170	.431 (.174)	[.364, .499]	"how much consumers believe they know about [sustainable] technologies"
observability	5	2074	.428 (.211)	[.349, .507]	"[perceived] degree to which the results of an innovation are visible to others"
perceived ease of	42	23976	.425 (.171)	[.357, .493]	"degree to which a person believes that using a particular system

Construct	n	n_p	M (SD)	95% CI	Definition
use					would be free of effort”
need for uniqueness	6	3721	.424 (.129)	[.357, .492]	“positive striving for abnormality relative to other people”
perceived financial savings	15	7689	.424 (.143)	[.352, .496]	“cognitive belief that product adoption will cause financial savings over the life of the [technology]”
positive anticipated affect	22	10335	.422 (.223)	[.346, .507]	“prospect of feeling positive [...] emotions after performing or not performing a behaviour”
environmental self-identity	13	8469	.410 (.168)	[.345, .474]	“extent to which you see yourself as a type of person who acts environmentally-friendly”
perceived value	35	25348	.410 (.167)	[.356, .492]	“consumer's overall assessment of the utility of a product based on perceptions of what is received and what is given”
response efficacy	19	10158	.409 (.150)	[.341, .478]	“a person's estimate that a given behaviour will lead to certain outcomes”
facilitating conditions	21	9127	.406 (.191)	[.327, .486]	“degree to which an individual believes that an organisational and technical infrastructure exists to support use of the system”
informational publicity	18	19830	.395 (.118)	[.353, .436]	“general information about energy-related problems, or specific information about possible solutions, such as information about various energy-saving measures [or sustainable energy technologies]”
relative advantage	17	9195	.394 (.148)	[.325, .462]	“degree to which an innovation is perceived as being better than the idea it supersedes”
innovativeness	24	12515	.382 (.195)	[.312, .452]	“willingness of an individual to try out any new [...] technology”
range anxiety	7	5619	-.369 (.191)	[-.424, -.314]	“omnipresent concern, or even fear, of becoming stranded with a discharged battery in a limited-range vehicle, away from the electric infrastructure”
word of mouth	5	1778	.354 (.302)	[.266, .441]	“the communication between consumers about a product, service, or a company in which the sources are considered independent of commercial influence”
risk aversion	3	3460	-.351 (.194)	[-.403, -.299]	“tendency, when choosing between alternatives, to avoid options that entail a risk of loss, even if that risk is relatively small”

Construct	n	n_p	M (SD)	95% CI	Definition
altruistic values	6	3832	.337 (.250)	[.269, .405]	“reflect a concern with the welfare of other human beings”
perceived monetary cost	39	24426	-.336 (.194)	[-.402, -.270]	“[perceived] cost of purchasing or using the technology”
policy program	22	26748	.33 (.176)	[.289, .370]	“[policy] measures facilitating [sustainable technology] adoption within society”
self-transcendent values	3	2550	.33 (.059)	[.273, .387]	“values that emphasize concern for the welfare and interests of others (universalism, benevolence)”
self-efficacy	11	7036	.311 (.173)	[.247, .374]	“conviction that one can successfully execute the behaviour required to produce the outcomes”
bio-spheric values	7	4397	.308 (.188)	[.237, .379]	“reflect a concern with the quality of nature and the environment for its own sake”
perceived risk	26	9969	-.304 (.223)	[-.395, -.213]	“consumer's perceptions of the uncertainty and adverse consequences of buying a product (or service)”
price sensitivity	3	1107	.293 (.261)	[.203, .247]	“individual difference variable describing how individual consumers react to price levels and changes in price levels”
collectivism	4	2074	.274 (.154)	[.195, .354]	“set of feelings, beliefs, behavioral intentions, and behaviors related to solidarity and concern for others”
face consciousness	3	1547	.251 (.213)	[.175, .326]	“people's desire to enhance, to maintain, and to avoid losing face in relation to significant others in social activities”
descriptive norm	11	14882	.236 (.153)	[.198, .273]	“describes what is typical or normal”
habit	4	2376	.208 (.354)	[.135, .281]	“process by which a stimulus generates an impulse to act as a result of a learned stimulus-response association”
usage experience	5	2955	.175 (.211)	[.103, .247]	“subjects' self-reported experience with the product category or domain”
long-term orientation	4	2763	.144 (.078)	[.071, .217]	“stands for a society in which differences in economic and social conditions are considered undesirable”
new environmental paradigm	3	1857	.125 (.046)	[.052, .197]	““primitive beliefs” about the nature of the earth and humanity's relationship with it”
trialab-	3	1370	.114 (.209)	[.031, .198]	“degree to which an innovation

Construct	<i>n</i>	<i>n_p</i>	<i>M (SD)</i>	95% CI	Definition
ility					may be experimented with on a limited basis”
egoistic values	4	2783	.096 (.361)	[.028, .164]	“[reflect a concern with] costs and benefits that affect individual resources (such as money and power)”
hedonist innovativeness	3	2813	.094 (.034)	[.030, .157]	“[refers to the] need for stimulation”
conservation value	3	2550	.091 (.076)	[.032, .150]	“individualistic interests characterized by the emphasis on protection of order and self-restraint”

Literaturverzeichnis

- Abrardi, L. (2019). Behavioral barriers and the energy efficiency gap: a survey of the literature. *Journal of Industrial and Business Economics*, 46(1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s40812-018-0107-z>
- Achter, S., Borit, M., Chattoe-Brown, E. & Siebers, P.-O. (2022). RAT-RS: a reporting standard for improving the documentation of data use in agent-based modelling. *International Journal of Social Research Methodology*, 25(4), 517–540. <https://doi.org/10.1080/13645579.2022.2049511>
- Aflaki, S., Basher, S. A. & Masini, A. (2021). Technology-push, demand-pull and endogenous drivers of innovation in the renewable energy industry. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(5), 1563–1580. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02048-5>
- Agora Energiewende & Wuppertal Institut. (2019). *Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement*. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf
- Agora Industry, Wuppertal Institute & Lund University. (2024). *Low-carbon technologies for the global steel transformation: a guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking*. https://epub.wupperinst.org/files/8559/8559_low-carbon-technologies.pdf
- Åhman, M [Max], Nilsson, L. J. & Johansson, B. (2017). Global climate policy and deep decarbonization of energy-intensive industries. *Climate Policy*, 17(5), 634–649. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1167009>
- Ajanovic, A. & Haas, R. (2018). Economic prospects and policy framework for hydrogen as fuel in the transport sector. *Energy Policy*, 123, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.063>
- Ajanovic, A. & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10049–10058. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.122>
- Bilici, S., Holtz, G., Jülich, A [Alexander], König, R., Li, Z., Trollip, H., McCall, B., Tönjes, A., Vishwanathan, S. S., Zelt, O [Ole], Lechtenböhrer, S., Kronshage, S. & Meurer, A. (2024). *Global Trade of Green Iron as a Game Changer for a Near-Zero Global Steel Industry? - a Scenario-Based Assessment of Regionalized Impacts*. Elsevier BV. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4841564>
- Bolz, S., Thiele, J [Julian] & Wendler, T [Tobias] (2024). Regional capabilities and hydrogen adoption barriers. *Energy Policy*, 185, 113934. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113934>
- Bossle, M. B., Dutra de Barcellos, M., Vieira, L. M. & Sauvée, L. (2016). The drivers for adoption of eco-innovation. *Journal of Cleaner Production*, 113, 861–872. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.033>
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2020). *Die nationale Wasserstoffstrategie*. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.pdf>
- [Cannot display the reference "Bureau van Dijk – Orbis", because the template "Bibliography - File - (Default template)" contains only fields that are empty in this reference.]
- Busch, H. & McCormick, K. (2014). Local power: exploring the motivations of mayors and key success factors for local municipalities to go 100% renewable energy. *Energy, Sustainability and Society*, 4(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/2192-0567-4-5>
- Calel, R. (2020). Adopt or Innovate: Understanding Technological Responses to Cap-and-Trade. *American Economic Journal: Economic Policy*, 12(3), 170–201. <https://doi.org/10.1257/pol.20180135>

- Cecere, G., Corrocher, N. & Mancusi, M. L. (2020). Financial constraints and public funding of eco-innovation: empirical evidence from European SMEs. *Small Business Economics*, 54(1), 285–302. <https://doi.org/10.1007/s11187-018-0090-9>
- European Commission. (2020). *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe: (COM(2020) 301 final)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>
- European Commission. (2021). *EU Reference Scenario 2020: Energy, transport and GHG emissions: Trends to 2050*. <https://publications.ec.europa.eu/publication/96c2ca82-e85e-11eb-93a8-01aa75ed71a1/language-en>
- Fan, M., Antle, A. N., Neustaedter, C. & Wise, A. F. (2014). Exploring How a Co-dependent Tangible Tool Design Supports Collaboration in a Tabletop Activity. In *Proceedings of the 18th International Conference on Supporting Group Work* (S. 81–90). ACM. <https://doi.org/10.1145/2660398.2660402>
- Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik. (2023). *Digitalisierung des Energiesystems - 14 Thesen zum Erfolg*. <https://www.iee.fraunhofer.de/de/themen/digitalisierung-energie-wende.html>
- German Aerospace Center. (2021). *AMIRIS: Agent-based Market model for the Investigation of Renewable and Integrated energy Systems*. <https://gitlab.com/dlr-ve/esy/amiris/amiris>
- Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., Deangelis, D. L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J. G., Radchuk, V., Rohwäder, M. S., Stillman, R. A., Thiele, J. C. & Ayllón, D. (2020). The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(7). <http://eprints.bournemouth.ac.uk/33918>
- Heidrich, O., Reckien, D., Olazabal, M., Foley, A., Salvia, M., Gregorio Hurtado, S. de, Orru, H., Flacke, J., Geneletti, D., Pietrapertosa, F., Hamann, J. J.-P., Tiwary, A., Feliu, E. & Dawson, R. J. (2016). National climate policies across Europe and their impacts on cities strategies. *Journal of Environmental Management*, 168, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.043>
- Horbach, J., Rammer, C. & Rennings, K. (2012). Determinants of eco-innovations by type of environmental impact — The role of regulatory push/pull, technology push and market pull. *Ecological Economics*, 78, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.04.005>
- International Energy Agency. (2021). *Global Hydrogen Review 2021*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021>
- Jacob, R. J., Girouard, A., Hirshfield, L. M., Horn, M. S., Shaer, O., Solovey, E. T. & Zigelbaum, J. (2008). Reality-based interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 201–210). ACM. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357089>
- Leitner, S. M. (2018). *Eco-Innovation: Drivers, Barriers and Effects – A European Perspective* (wiiw Working Paper Nr. 159). Vienna: The Vienna Institute for International Economic Studies (wiiw). <https://www.econstor.eu/handle/10419/204024>
- Liebreich, M. (2021). *The Clean Hydrogen Ladder [Now updated to V4.1]*. <https://www.liebreich.com/the-clean-hydrogen-ladder-now-updated-to-v4-1/>
- Losacker, S., Hansmeier, H., Horbach, J. & Liefner, I. (2023). The geography of environmental innovation: a critical review and agenda for future research. *Review of Regional Research*, 43(2), 291–316. <https://doi.org/10.1007/s10037-023-00193-6>
- Nationaler Wasserstoffrat. (2024). *Versorgung mit Wasserstoff – Fristentransformation, Koordination und Produktstrukturierung als notwendige Elemente eines ambitionierten und effizienten Wasserstoffhochlaufs*. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2024/2024-01-19_NWR-Stellungnahme_Midstream.pdf

