



TransHyDE-Projekt Systemanalyse
Partnerspezifisches Vorhabensthema

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil I: Kurzbericht

Stand:	30.09.2025
Einreichungsdatum (TIB):	
Partnerin/Partner:	Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen
Autorin/Autor:	Mehrnaz Anvari
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE-Systemanalyse
Förderkennzeichen:	03HY201M
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung	3
II. Vormaliger Stand des Wissens	3
III. Ablauf des Vorhabens	4
IV. Wesentliche Ergebnisse	5
Literaturverzeichnis	6

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Einspeisung von grünem Wasserstoff in das bestehende deutsche Gastransportnetz ist eine zuverlässige und praktische Strategie während der Energiewende. Dieser Ansatz unterstützt nicht nur die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen, sondern stärkt auch die Energiesicherheit durch die Diversifizierung der Energieversorgung. Um diesen Prozess effektiv zu planen, zu steuern und zu analysieren, müssen bestehende Simulationsmodelle verbessert werden, um Gasgemische mit einem hohen Wasserstoffgehalt genau darzustellen [1]. Dies umfasst die Entwicklung von Algorithmen, die das Verhalten von Wasserstoff im Gasnetz simulieren können, wobei die einzigartigen Eigenschaften im Vergleich zu Erdgas berücksichtigt werden [2,3].

Darüber hinaus muss die Integration mit den relevanten Stromnetzen beschleunigt werden, da dies das effektive Management erneuerbarer Energiequellen erleichtert und die allgemeine Systemresilienz verbessert. Die Koordination der Wasserstoffproduktion, -speicherung und -verteilung mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen wird entscheidend sein, um die Energieflüsse zu optimieren.

Diese waren die Hauptziele des Fraunhofer SCAI im TransHyDE-Projekt. Das Projekt hatte zum Ziel, nicht nur die Technologie und Modelle für die Wasserstoffintegration voranzutreiben, sondern auch die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren im Energiesektor zu fördern. Durch die Einbindung von Industriepartnern, politischen Entscheidungsträgern und Forschungseinrichtungen strebte Fraunhofer SCAI an, einen umfassenden Rahmen zu schaffen, der die erfolgreiche Umsetzung von grünen Wasserstofflösungen in ganz Deutschland unterstützt. Letztendlich wird dies zu einer nachhaltigeren und effizienteren Energieversorgung in der Zukunft beitragen.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg der Energiewende ist die Sektorkopplung. Dieses Konzept umfasst die Integration verschiedener Energiesektoren, einschließlich Elektrizität, Gas (wie Wasserstoff), Heizung und Kühlung sowie Transport. Durch die Schaffung von Synergien zwischen diesen Sektoren können wir die Effizienz und Resilienz des Energiesystems verbessern [4].

Strombasierte Energieträger sind besonders gut für diese Integration geeignet, da sie zur Produktion von Wasserstoff und gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen verwendet werden können, wenn auch mit einigen Umwandlungsverlusten. Diese Vielseitigkeit ermöglicht es, Energie in verschiedenen Formen zu speichern und zu transportieren, was die Balance von Angebot und Nachfrage über verschiedene Sektoren erleichtert. Viele dieser Energieträger können teilweise in bestehenden Infrastrukturen und Verbrauchsanlagen wiederverwendet werden, was den Bedarf an neuen Investitionen verringert und einen reibungsloseren Übergang erleichtert.

Darüber hinaus reicht das Potenzial der Sektorkopplung über den reinen Energieaustausch hinaus; es umfasst auch die Entwicklung von Smart-Grid-Technologien, die eine Echtzeitüberwachung und -optimierung von Energieflüssen ermöglichen. Diese Technologie kann die Integration erneuerbarer Energiequellen wie Solar- und Windenergie in den Energiemix erleichtern und somit die Nachhaltigkeit weiter fördern.

Folglich ist es entscheidend, potenzielle Transformationswege für strombasierte Energieträger zu erkunden und die damit verbundenen Kosten zu bewerten. Das Verständnis dieser Wege wird helfen, die effizientesten und wirtschaftlich tragfähigsten Strategien für die Umsetzung zu identifizieren. Darüber hinaus wird die Analyse der finanziellen Auswirkungen wertvolle Erkenntnisse für Entscheidungsträger und Stakeholder liefern, um sicherzustellen, dass Investitionen mit langfristigen Energiezielen im Einklang stehen.

Letztendlich kann eine effektive Sektorkopplung zu einem integrierteren, flexibleren und nachhaltigeren Energiesystem führen, das den Weg für einen erfolgreichen Übergang zu einer kohlenstoffarmen Zukunft ebnet.

III. Ablauf des Vorhabens

Während des TransHyDE-Sys-Projekts modellierte SCAI das zukünftige Wasserstoffnetz und seine Transformationswege. Zu diesem Zweck entwickelte und implementierte das Institut ein detailliertes Simulationsmodell, das für alle im Projekt betrachteten Transformationswege hinsichtlich Dynamik, Steuerung und Gaszusammensetzung sowie der Kopplung zwischen dem Strom- und Wasserstoffnetz geeignet ist. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurden Szenarien für diese Transformationswege des H₂-Transportnetzes entwickelt, analysiert und simuliert, um die technische Machbarkeit dieser Transformation zu demonstrieren und potenzielle Probleme zu identifizieren. Auch die Möglichkeit, dass gesamte Abschnitte des Netzes ausschließlich mit Wasserstoff gefüllt werden könnten, zusätzlich zur Einspeisung von H₂ in das bestehende Gasnetz, wurde in Betracht gezogen. Die Ergebnisse dieser Analysen informierten die folgenden Arbeitsschritte:

- Vergleich von Modellen, Nachhaltigkeitsbewertung und Roadmapping. Das Hauptziel im technischen/wissenschaftlichen Bereich dieses Teilprojekts war die Erweiterung des von SCAI entwickelten Gasnetzmodells, insbesondere.
- die Entwicklung von Netzwerkmodellen für deutsche Gasnetze mit variablen oder steigenden Mengen wasserstoffdominierter Gase aus verschiedenen Quellen (Elektrolyse, Biogas), unter Berücksichtigung der umliegenden europäischen Region.
- die Entwicklung eines Netzwerkmodells für das europäische Gasnetz.
- die Entwicklung von Transformationswegen für den Übergang von einer erdgasdominierten Netzstruktur zu einer Transportinfrastruktur für grünen Wasserstoff.
- die Mitentwicklung von Transformationswegen für Gasverdichterstationen (von konventionellen Turboverdichtern zu speziell für Wasserstoff entwickelten Verdichtertypen).
- die Implementierung von Speichermodellen und Schnittstellen zu prototypischen mechatronischen Komponentenmodellen, namentlich Elektrolyseanlagen, Brennstoffzellenkraftwerken, wasserstofffähigen Verdichter- und Regelungsmodellen sowie begleitenden Modellen (Vorerhitzer und Kühler).

Bestehende Modelle wurden erweitert oder ersetzt, um Gasgemische mit einem Wasserstoffgehalt zwischen 0 und 100 % darzustellen, sowie die Anteile anderer Substanzen, die in Erdgas nicht prominent sind. Darüber hinaus muss die Integration mit relevanten Stromnetzen vorangetrieben werden. Die physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff unterscheiden sich erheblich von denen von Erdgas. Dies wurde sowohl in den Modellierungs- als auch in den Berechnungsmethoden berücksichtigt. Ein weiteres technisches Ziel des Projekts war es, den bereits für den industriellen Einsatz geeigneten MYNTS-Gasnetzsimulator vollständig im Wasserstoffbereich (0 bis 100 %) und auch in dynamischen Berechnungen betriebsbereit zu machen.

IV. Wesentliche Ergebnisse

Umfassendes Wasserstoffnetzmodell: Entwicklung eines detaillierten Simulationsmodells, das zukünftige Wasserstoffnetze genau darstellt, einschließlich aller Transformationswege in Bezug auf Dynamik, Steuerung und Gaszusammensetzung.

Szenarioanalyse und Simulation: Erfolgreiche Erstellung und Analyse mehrerer Szenarien für Wasserstofftransportnetze, die die technische Machbarkeit des Übergangs zu wasserstoffdominanten Systemen demonstrieren.

Strategien zur Wasserstoffintegration: Identifizierung potenzieller Herausforderungen und Lösungen für die Einspeisung von Wasserstoff in Abschnitte des bestehenden Gasnetzes sowie die Integration von Wasserstoff in die bestehende Infrastruktur.

Erweiterte Gasnetzmodelle: Erweiterung des Gasnetzmodells zur Berücksichtigung variabler Wasserstoffmengen aus unterschiedlichen Quellen.

Entwicklung eines europäischen Gasnetzmodells: Erstellung eines umfassenden Modells für das europäische Gasnetz, das den grenzüberschreitenden Wasserstofftransport und die Integration erleichtert.

Transformationswege: Entwicklung klarer Transformationswege für den Übergang von einer erdgasdominierten Infrastruktur zu einer, die den Transport von grünem Wasserstoff unterstützt.

Innovationen bei Gasverdichterstationen: Mitentwicklung neuer Transformationswege für Gasverdichterstationen, Übergang von konventionellen Turboverdichtern zu speziell für Wasserstoff entwickelten Verdichtern.

Modellierungserweiterung für Wasserstoffgehalt: Erfolgreiche Erweiterung oder Ersetzung bestehender Modelle, um Gasgemische mit einem Wasserstoffgehalt von 0-100 % und anderen nicht typischerweise in Erdgas enthaltenen Komponenten genau darzustellen.

Dynamischer MYNTS-Gasnetzsimulator: Finalisierung des MYNTS-Gasnetzsimulators, um effizient im Wasserstoffbereich (0 bis 100 %) zu arbeiten und dynamische Berechnungen zu integrieren, wodurch er vollständig für industrielle Anwendungen betriebsbereit ist.

Zusammenarbeit und Wissensaustausch: Stärkung der Partnerschaften mit den Projektbeteiligten durch die gemeinsame Entwicklung von Szenarien und den Austausch von Erkenntnissen, wodurch das gegenseitige Verständnis der Herausforderungen bei der Wasserstoffintegration verbessert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Carvalho, L. Buzna, F. Bono, E. Gutiérrez, W. Just, and D. Arrowsmith, 'Robustness of trans-European gas networks', *Phys. Rev. E*, vol. 80, no. 1, p. 016106, Jul. 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.016106.
- [2] T. Ahmad, R. Madonski, D. Zhang, C. Huang, and A. Mujeeb, 'Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 160, p. 112128, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112128.
- [3] F. Božić, D. Karasalihović Sedlar, I. Smajla, and I. Ivančić, 'Analysis of Changes in Natural Gas Physical Flows for Europe via Ukraine in 2020', *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5175, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14165175.
- [4] Kisse, Jolando M., et al. "Flexible electrolysers as a tool for renewable energy integration and congestion management: comparison of different allocation methods in a transmission system case study for Germany 2030." *23rd Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2024)*. Vol. 2024. IET, 2024.



TransHyDE-Projekt LNG2Hydrogen Partnerspezifisches Vorhabensthema

Sachbericht zum Verwendungsnachweis Teil II: Langfassung

Stand:	30.09.2025
Einreichungsdatum (TIB):	
Partnerin/Partner:	Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen
Autorin/Autor:	Mehrnaz Anvari
Fördertitel:	Verbundvorhaben TransHyDE-Systemanalyse
Förderkennzeichen:	03HY201M
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin/beim Autor/den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Inhaltsverzeichnis

	Tabellenverzeichnis	3
I.	Ursprüngliche Aufgabenstellung	4
II.	Vormaliger Stand des Wissens.....	4
III.	Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten.....	5
IV.	Wesentliche Ergebnisse.....	6
V.	Verwendung der Zuwendung	7
	V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	
	V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeit	
VI.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans.....	8
VII.	Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit.....	9
VIII.	Erfolgte Veröffentlichungen	10
	Literaturverzeichnis	11

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Erfolgte Veröffentlichungen 10

I. Ursprüngliche Aufgabenstellung

Die Einspeisung von grünem Wasserstoff in das bestehende deutsche Gastransportnetz ist eine zuverlässige und praktische Strategie während der Energiewende. Dieser Ansatz unterstützt nicht nur die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen, sondern stärkt auch die Energiesicherheit durch die Diversifizierung der Energieversorgung. Um diesen Prozess effektiv zu planen, zu steuern und zu analysieren, müssen bestehende Simulationsmodelle verbessert werden, um Gasgemische mit einem hohen Wasserstoffgehalt genau darzustellen [1]. Dies umfasst die Entwicklung von Algorithmen, die das Verhalten von Wasserstoff im Gasnetz simulieren können, wobei die einzigartigen Eigenschaften im Vergleich zu Erdgas berücksichtigt werden [2,3].

Darüber hinaus muss die Integration mit den relevanten Stromnetzen beschleunigt werden, da dies das effektive Management erneuerbarer Energiequellen erleichtert und die allgemeine Systemresilienz verbessert. Die Koordination der Wasserstoffproduktion, -speicherung und -verteilung mit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen wird entscheidend sein, um die Energieflüsse zu optimieren.

Diese waren die Hauptziele des Fraunhofer SCAI im TransHyDE-Projekt. Das Projekt hatte zum Ziel, nicht nur die Technologie und Modelle für die Wasserstoffintegration voranzutreiben, sondern auch die Zusammenarbeit zwischen den Akteuren im Energiesektor zu fördern. Durch die Einbindung von Industriepartnern, politischen Entscheidungsträgern und Forschungseinrichtungen strebte Fraunhofer SCAI an, einen umfassenden Rahmen zu schaffen, der die erfolgreiche Umsetzung von grünen Wasserstofflösungen in ganz Deutschland unterstützt. Letztendlich wird dies zu einer nachhaltigeren und effizienteren Energieversorgung in der Zukunft beitragen.

II. Vormaliger Stand des Wissens

Ein Schlüsselfaktor für den Erfolg der Energiewende ist die Sektorkopplung. Dieses Konzept umfasst die Integration verschiedener Energiesektoren, einschließlich Elektrizität, Gas (wie Wasserstoff), Heizung und Kühlung sowie Transport. Durch die Schaffung von Synergien zwischen diesen Sektoren können wir die Effizienz und Resilienz des Energiesystems verbessern [4].

Strombasierte Energieträger sind besonders gut für diese Integration geeignet, da sie zur Produktion von Wasserstoff und gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen verwendet werden können, wenn auch mit einigen Umwandlungsverlusten. Diese Vielseitigkeit ermöglicht es, Energie in verschiedenen Formen zu speichern und zu transportieren, was die Balance von Angebot und Nachfrage über verschiedene Sektoren erleichtert. Viele dieser Energieträger können teilweise in bestehenden Infrastrukturen und Verbrauchsanlagen wiederverwendet werden, was den Bedarf an neuen Investitionen verringert und einen reibungsloseren Übergang erleichtert.

Darüber hinaus reicht das Potenzial der Sektorkopplung über den reinen Energieaustausch hinaus; es umfasst auch die Entwicklung von Smart-Grid-Technologien, die eine Echtzeitüberwachung und -optimierung von Energieflüssen ermöglichen. Diese Technologie kann die Integration erneuerbarer Energiequellen wie Solar- und Windenergie in den Energiemix erleichtern und somit die Nachhaltigkeit weiter fördern.

Folglich ist es entscheidend, potenzielle Transformationswege für strombasierte Energieträger zu erkunden und die damit verbundenen Kosten zu bewerten. Das Verständnis dieser Wege wird helfen, die effizientesten und wirtschaftlich tragfähigsten Strategien für die Umsetzung zu identifizieren. Darüber hinaus wird die Analyse der finanziellen Auswirkungen wertvolle Erkenntnisse für Entscheidungsträger und Stakeholder liefern, um sicherzustellen, dass Investitionen mit langfristigen Energiezielen im Einklang stehen.

Letztendlich kann eine effektive Sektorkopplung zu einem integrierteren, flexibleren und nachhaltigeren Energiesystem führen, das den Weg für einen erfolgreichen Übergang zu einer kohlenstoffarmen Zukunft ebnet.

III. Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Modellentwicklung und Implementierung: Ein detailliertes Simulationsmodell wurde entwickelt, um das zukünftige Wasserstoffnetz und seine verschiedenen Transformationswege darzustellen. Dieses Modell wurde so angepasst, dass es Dynamik, Steuerungsmechanismen und Gaszusammensetzung berücksichtigt, um die Komplexität der Wasserstoffintegration zu bewältigen.

Szenarioanalyse: In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden verschiedene Szenarien für die Transformationswege des Wasserstofftransportnetzes konzipiert. Jedes Szenario wurde gründlich analysiert und simuliert, um die technische Machbarkeit des Übergangs von einem erdgasbasierten System zu einem System mit signifikanten Wasserstoffmengen zu bewerten.

Untersuchung von Netzwerk-Konfigurationen: Das Projekt untersuchte die Möglichkeit, gesamte Abschnitte des Netzes ausschließlich mit Wasserstoff zu füllen. Dies umfasste die Bewertung der Auswirkungen der Einspeisung von Wasserstoff in die bestehende Gasinfrastruktur und der potenziellen Herausforderungen, die mit solchen Konfigurationen verbunden sind.

Modellerweiterung: Bestehende Gasnetzmodelle wurden erweitert oder ersetzt, um Gasgemische mit einem Wasserstoffgehalt von 0 % bis 100 % genau darzustellen. Dies erforderte ein umfassendes Verständnis der physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff, da diese sich erheblich von denen des Erdgas unterscheiden.

Europäisches Gasnetzmodell: Ein Modell für das europäische Gasnetz wurde entwickelt, das die Analyse des Wasserstofftransports über nationale Grenzen hinweg ermöglicht und das Verständnis der regionalen Energiedynamik verbessert.

Gasverdichterstationen: Das Projekt entwickelte Strategien zur Transformation von Gasverdichterstationen, wobei der Übergang von konventionellen Turboverdichtern zu Designs erfolgte, die speziell für Wasserstoff optimiert sind. Diese Arbeit beinhaltete die Bewertung von Leistungskennzahlen und Betriebsanforderungen für Wasserstoffverdichter.

Dynamische MYNTS-Simulator-Verbesserungen: Der MYNTS-Gasnetzsimulator wurde aktualisiert, um effizient im Wasserstoffbereich (0 bis 100 %) zu arbeiten und dynamische Berechnungen zu unterstützen. Diese Verbesserung machte den Simulator vollständig betriebsbereit für industrielle Anwendungen und erhöhte seinen Nutzen für die Stakeholder.

Dokumentation und Berichterstattung: Im Verlauf des Projekts wurde eine detaillierte Dokumentation der Methoden, Ergebnisse und Befunde erstellt. Dies kulminierte in umfassenden Berichten, die die technische Machbarkeit, Nachhaltigkeitsbewertungen und Roadmaps für die zukünftige Wasserstoffintegration umreißen.

IV. Wesentliche Ergebnisse

Umfassendes Wasserstoffnetzmodell: Entwicklung eines detaillierten Simulationsmodells, das zukünftige Wasserstoffnetze genau darstellt, einschließlich aller Transformationswege in Bezug auf Dynamik, Steuerung und Gaszusammensetzung.

Szenarioanalyse und Simulation: Erfolgreiche Erstellung und Analyse mehrerer Szenarien für Wasserstofftransportnetze, die die technische Machbarkeit des Übergangs zu wasserstoffdominanten Systemen demonstrieren.

Strategien zur Wasserstoffintegration: Identifizierung potenzieller Herausforderungen und Lösungen für die Einspeisung von Wasserstoff in Abschnitte des bestehenden Gasnetzes sowie die Integration von Wasserstoff in die bestehende Infrastruktur.

Erweiterte Gasnetzmodelle: Erweiterung des Gasnetzmodells zur Berücksichtigung variabler Wasserstoffmengen aus unterschiedlichen Quellen.

Entwicklung eines europäischen Gasnetzmodells: Erstellung eines umfassenden Modells für das europäische Gasnetz, das den grenzüberschreitenden Wasserstofftransport und die Integration erleichtert.

Transformationswege: Entwicklung klarer Transformationswege für den Übergang von einer erdgasdominierten Infrastruktur zu einer, die den Transport von grünem Wasserstoff unterstützt.

Innovationen bei Gasverdichterstationen: Mitentwicklung neuer Transformationswege für Gasverdichterstationen, Übergang von konventionellen Turboverdichtern zu speziell für Wasserstoff entwickelten Verdichtern.

Modellierungserweiterung für Wasserstoffgehalt: Erfolgreiche Erweiterung oder Ersetzung bestehender Modelle, um Gasgemische mit einem Wasserstoffgehalt von 0-100 % und anderen nicht typischerweise in Erdgas enthaltenen Komponenten genau darzustellen.

Dynamischer MYNTS-Gasnetzsimulator: Finalisierung des MYNTS-Gasnetzsimulators, um effizient im Wasserstoffbereich (0 bis 100 %) zu arbeiten und dynamische Berechnungen zu integrieren, wodurch er vollständig für industrielle Anwendungen betriebsbereit ist.

Zusammenarbeit und Wissensaustausch: Stärkung der Partnerschaften mit den Projektbeteiligten durch die gemeinsame Entwicklung von Szenarien und den Austausch von Erkenntnissen, wodurch das gegenseitige Verständnis der Herausforderungen bei der Wasserstoffintegration verbessert wird.

V. Verwendung der Zuwendung

V.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projektbudget wurde für Personalkosten, insbesondere für einen Senior Scientist am SCAI, sowie für Reisekosten, die mit der Teilnahme an Meetings und Workshops im Zusammenhang mit dem Projekt verbunden sind, verwendet.

V.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Ausrichtung an den Projektzielen: Die durchgeführten Arbeiten unterstützen direkt die Ziele des Projekts und behandeln wichtige Fragen im Zusammenhang mit der Wasserstoffintegration und der Energiewende.

Beitrag zu Wissen und Innovation: Die Ergebnisse des Projekts liefern wertvolle Erkenntnisse und innovative Lösungen für die Wasserstoffintegration und erweitern das Verständnis von Energiesystemen. Dies verstärkt die Angemessenheit der angewendeten Methoden.

Relevanz für Stakeholder: Die Arbeiten bezogen verschiedene Stakeholder ein und stellten sicher, dass die Ergebnisse und Methoden für Akteure der Industrie, politische Entscheidungsträger und Forscher anwendbar und vorteilhaft sind. Diese Einbindung hebt die umfassendere Wirkung des Projekts hervor.

Grundlage für zukünftige Forschung: Die Ergebnisse des Projekts dienen als Basis für zukünftige Initiativen, was die Arbeiten im Kontext laufender Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich Wasserstoff und Energiesysteme angemessen macht.

VI. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Schlüsselvorteile

Verbesserte Wasserstoffintegration: Die Entwicklung eines umfassenden Simulationsmodells für Wasserstoffnetze wird die nahtlose Integration von Wasserstoff in bestehende Gasinfrastrukturen erleichtern. Dies unterstützt den Übergang zu erneuerbaren Energiequellen und reduziert die Kohlenstoffemissionen.

Verbessertes Entscheidungsmanagement: Die detaillierten Szenarien und Analysen, die im Verlauf des Projekts erstellt wurden, bieten den Stakeholdern wertvolle Einblicke für fundierte Entscheidungen zu Infrastrukturinvestitionen, Betriebsstrategien und regulatorischen Rahmenbedingungen.

Nachhaltigkeit und Resilienz: Die Identifizierung von Transformationswegen für Wasserstofftransportnetze trägt zu einem nachhaltigeren und resilienteren Energiesystem bei, das in der Lage ist, sich an zukünftige Energieanforderungen und Umwelt-Herausforderungen anzupassen.

Wirtschaftliche Chancen: Die Ergebnisse des Projekts können zu neuen Geschäftsmöglichkeiten in der Wasserstoffproduktion, -speicherung und -verteilung führen, was das Wirtschaftswachstum im Bereich erneuerbare Energien fördert.

Zusammenarbeit und Wissensaustausch: Durch die Einbindung verschiedener Stakeholder fördert das Projekt die Zusammenarbeit und den Wissensaustausch und verbessert das gemeinsame Verständnis der Herausforderungen und Lösungen bei der Wasserstoffintegration.

Anwendbarkeit der Ergebnisse

Politikentwicklung: Die Ergebnisse können Entscheidungsträger informieren, indem sie Daten und Empfehlungen für regulatorische Rahmenbedingungen bereitstellen, die die Wasserstoffintegration in Energiesysteme unterstützen.

Branchenstandards: Die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können zur Etablierung von Branchenstandards für den Wasserstofftransport und die Speicherung beitragen, was Sicherheit und Effizienz fördert.

Infrastrukturplanung: Die entwickelten Modelle können von Energieunternehmen und Infrastrukturplanern genutzt werden, um Wasserstoffnetze zu gestalten und zu optimieren, die auf regionale Bedürfnisse und Möglichkeiten zugeschnitten sind.

Ausbildung und Weiterbildung: Die Ergebnisse können in Bildungsprogramme und Schulungsworkshops integriert werden, um Fachkräfte im Energiesektor mit dem Wissen und den Fähigkeiten auszustatten, die für Wasserstofftechnologien erforderlich sind.

Ausrichtung mit dem Exploitation Plan

Kommerzialisierungsstrategien: Der Exploitation-Plan skizziert Strategien zur Kommerzialisierung der Projektergebnisse, wie z. B. die Lizenzierung der entwickelten Simulationsmodelle an Industriepartner oder das Angebot von Beratungsdiensten auf Basis der Ergebnisse.

Einbindung der Stakeholder: Der Plan betont die fortlaufende Zusammenarbeit mit den Stakeholdern und stellt sicher, dass die Ergebnisse effektiv kommuniziert und in der Praxis umgesetzt werden.

Feedback-Mechanismen: Es werden Mechanismen eingerichtet, um Feedback von Endnutzern und Stakeholdern zu sammeln, um die während des Projekts entwickelten Modelle und Methoden kontinuierlich zu verfeinern und zu verbessern.

Zukünftige Forschungsrichtungen: Die Ergebnisse des Projekts werden als Grundlage für zukünftige Forschungsinitiativen dienen, um weitere Fortschritte in der Wasserstoffintegration und den Strategien zur Energiewende zu ermöglichen.

VII. Fortschritt des Projektumfelds während der Laufzeit

Wachstum der Partnerschaften: Das Projekt förderte Partnerschaften zwischen verschiedenen Stakeholdern, einschließlich Forschungseinrichtungen und Industrieakteuren. Dieses kollaborative Rahmenwerk erleichterte den Austausch von Wissen, Ressourcen und Fachkenntnissen.

Regelmäßige Kommunikation: Häufige Treffen, Workshops und Diskussionen halfen, die Abstimmung unter den Partnern aufrechtzuerhalten und sicherzustellen, dass die Projektziele verstanden und priorisiert wurden. Diese offene Kommunikationslinie ermöglichte zeitnahe Rückmeldungen und Anpassungen der Projektansätze.

Modellentwicklung: Das Projekt verzeichnete erhebliche Fortschritte in der Simulation und Modellierung, insbesondere im Zusammenhang mit der Wasserstoffintegration. Diese Entwicklungen verbesserten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Modelle, die zur Analyse von Wasserstofftransportnetzen verwendet werden.

Forschungsinnovationen: Kontinuierliche Forschung führte zur Identifizierung neuer Methoden und Werkzeuge, die die analytischen Fähigkeiten des Projekts verbesserten und eine bessere Bewertung der Transformationswege ermöglichten.

Veröffentlichungen und Präsentationen: Das Projekt produzierte zahlreiche Veröffentlichungen, Präsentationen und Berichte, die Erkenntnisse und Einsichten an die breitere Gemeinschaft verbreiteten. Dieser Wissensaustausch förderte das Bewusstsein und das Verständnis für Themen der Wasserstoffintegration.

VIII. Erfolgte Veröffentlichungen

Tabelle 1: Erfolgte Veröffentlichungen

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel	Autoren
2022	https://doi.org/10.5220/0011123000003274 In SIMULTECH (pp. 178-185)	Principal Component Analysis in Gas Transport Simulation	Baldin, A., Cassirer, K., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I. N., Nikitina, L., & Pott, S.
2021	10.1007/978-3-031-23149-0_8 In International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (pp. 138-152). Cham: Springer International Publishing	On advanced modeling of compressors and weighted mix iteration for simulation of gas transport networks.	Baldin, A., Cassirer, K., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.
2022	https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=infocomp_2022_1_10_60004 INFOCOMP, 1-5.	Solving Stationary Gas Transport Problems with Compressors of Piston and Generic Type	Baldin, A., Cassirer, K., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.
2022	https://personales.upv.es/thinkmind/dl/journals/sysmea/sysmea_v15_n34_2022/sysmea_v15_n34_2022_4.pdf Int. J. On Advances in Systems and Measurements, 15, 93-106	Modeling and sensitivity analysis of compressor stations in gas transport simulations	Baldin, A., Cassirer, K., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.
2024	10.1088/1742-6596/2701/1/012009 In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 2701, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.	Stability of dynamic fluid transport simulations	Anvari, M., Baldin, A., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.
2023	https://www.thinkmind.org/articles/infocomp_2023_1_10_60008.pdf In INFOCOMP 2023: The Thirteenth International Conference on Advanced Communications and Computation, June 26-30, 2023, Nice, France (pp. 1-6). ThinkMind.	Simulation of Pipeline Transport of Carbon Dioxide with Impurities	Anvari, M., Baldin, A., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.
2021	https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-23149-0_8 In International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications (pp. 138-152). Cham: Springer International Publishing	On advanced modeling of compressors and weighted mix iteration for simulation of gas transport networks.	Baldin, A., Cassirer, K., Clees, T., Klaassen, B., Nikitin, I., Nikitina, L., & Pott, S.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Carvalho, L. Buzna, F. Bono, E. Gutiérrez, W. Just, and D. Arrowsmith, 'Robustness of trans-European gas networks', *Phys. Rev. E*, vol. 80, no. 1, p. 016106, Jul. 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.016106.
- [2] T. Ahmad, R. Madonski, D. Zhang, C. Huang, and A. Mujeeb, 'Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 160, p. 112128, May 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112128.
- [3] F. Božić, D. Karasalihović Sedlar, I. Smajla, and I. Ivančić, 'Analysis of Changes in Natural Gas Physical Flows for Europe via Ukraine in 2020', *Energies*, vol. 14, no. 16, p. 5175, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14165175.
- [4] Kisse, Jolando M., et al. "Flexible electrolysers as a tool for renewable energy integration and congestion management: comparison of different allocation methods in a transmission system case study for Germany 2030." 23rd Wind & Solar Integration Workshop (WIW 2024). Vol. 2024. IET, 2024.