

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMWK- Programm

**Synergies Utilising renewable Power REgionally by means of
Power To Gas -**

nutzen Regionaler Synergien Erneuerbarer Energien durch Power to Gas

Förderkennzeichen:

03EI4007A

Zuwendungsempfänger:

DBI-Gastechnologisches Institut gGmbH Freiberg, Halsbrücker Straße 34,
09599 Freiberg

Projektleitung:

Dr. Martin Pumpa

Projektlaufzeit:

01.11.2019 bis 31.03.2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
I Kurzdarstellung.....	1
I.1 Aufgabenstellung.....	1
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	2
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde	5
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
II Eingehende Darstellung	6
II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	6
II.1.1 Allgemeine Tätigkeiten	6
II.1.2 Zusammenfassung der spezifischen Aufgaben	6
II.1.3 DBI-MAT: Microgrid Analysis Tool.....	8
II.1.4 H2- Index III.....	21
II.1.5 SuperP2G Toolbox.....	23
II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	28
II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	28
II.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses	28
II.5 Fortschritte auf dem Vorhabengebiet bei anderen Stellen während der Vorhabendurchführung.....	29
II.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses (erfolgte oder geplante).....	29
III Literaturverzeichnis	31

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorhabenstruktur und Aufbau der Arbeitspakete	3
Abbildung 2: Schematischer Ablauf bei Verwendung des DBI-MAT-Tools.	13
Abbildung 3: Kennlinie lastabhängiger Elektrolysewirkungsgrad für PEM- und alkalische Elektrolyse (ALE) [5].....	17
Abbildung 4: Lokales Multi-Sektoriell Energie system, Beispielanwendung und Demonstration der Fähigkeiten des DBI-MAT.	20
Abbildung 3: Parameteroptimierung mit dem DBI-MAT.....	20
Abbildung 6: User Interface des H ₂ -Index III zur Ermittlung regionaler Potentiale erneuerbarer Energieträger	22
Abbildung 7: Ursprünglich geplante Struktur für das SuperP2G Tool in AP6.....	24
Abbildung 8: Design der Start-Oberfläche des Webtools.....	26
Abbildung 9: Zugang zu Links auf die Fokus- Seiten am Beispiel der Ebene „Processes & Technologies“.....	27
Abbildung 10: Prinzipielles Konzept der „Fokus-Seiten“ im Stil wissenschaftlicher Poster.....	27
Abbildung 11: Der vorgeschlagene Ansatz für die Anwendung von drei SuperP2G-Tools in einer Fallstudie für die Region Apulien	30

I Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Projektes SuperP2G ist die Senkung der Schwelle für die Validierung und Umsetzung von Power-to-Gas (P2G) - Technologien und -systemen für konkrete Interessensvertreter aus den Bereichen „Smart Energy Systemen“, „Sektorenkopplung“ sowie „lokaler und regionaler Entwicklung“.

SuperP2G verbindet dazu führende P2G-Initiativen aus fünf europäischen Ländern und bezweckt damit einen regen und offenen Wissensaustausch. Jedes einzelne nationale Projekt konzentriert sich auf andere Herausforderungen. Die Forschenden schließen sich dabei mit lokalen Stakeholdern zusammen, um gemeinsam Lösungen zu entwickeln. SuperP2G konzentriert sich auf die Verbesserung bestehender Berechnungsprogramme der Konsortialpartner, einschließlich der Entwicklung zu Open Access, sowie die Entwicklung eines neuen öffentlichen Tools, welches auf dem Quellcode der Programme OptiFlow und H2- Index II basiert. Ergänzt wird dies durch eine Analyse der bestehenden Regularien und der Marktpotentiale erneuerbarer Gase, insbesondere durch das Einbeziehen von Stakeholdern aller am Projekt beteiligter Nationen.

Hauptziele des Konsortiums sind:

- 1) Optimierung von P2G-Systemen, indem führende nationale Projekte und deren angekoppelte Regionen mit Bezug zu P2G und die entsprechenden Stakeholder in der EU miteinander zusammengebracht werden, um ihre Synergien im Bezug auf existierende Instrumente und Verfahren bei der Bewertung von P2G zu nutzen.
- 2) Aufzeigen des Potenzials für P2G in jedem der beteiligten Länder und das Ableiten von Schlussfolgerungen in Bezug auf den europaweiten Marktzugang der Technologie mit Blick auf die konkreten Marktbedingungen und die Bedürfnisse der Interessengruppen.
- 3) Erhöhung der Sichtbarkeit und des allgemeinen Kenntnisstands zu den Möglichkeiten von P2G in ganz Europa und insbesondere in den beteiligten Ländern.

Diese Vorgaben bilden den Rahmen für eine erfolgreiche Umsetzung des Projektes. Spezifische Ziele sind:

- a) Bereitstellung einer Reihe von Tools und Verfahren zur Unterstützung der Implementierung von P2G bei der Planung sowie im Betrieb innerhalb von integrierten Energiesystemen.
- b) Verbesserung von bestehenden Werkzeugen, Datenbanken und Methoden in jedem beteiligten nationalen Projekt durch einen regen Wissensaustausch, Synchronisation einer gemeinsamen Datengrundlage und dem transnationalen Feedback der beteiligten Stakeholder.
- c) Entwicklung eines neuen, offenen und gemeinsamen europäischen Best-in-Class-Standardwerkzeugs für die P2G-Bewertung auf der Grundlage der entwickelten Tools OptiFlow (FutureGas) und H2-Index-II (HYPOS) mit einem zusätzlichen Mehrwert aus den anderen nationalen Weiterentwicklungen.
- d) Aufwerten von Wissen und Ergebnissen auf nationaler und europawweiter Ebene bezüglich:
 - i. einer besseren nationalen Bewertung des Potenzials von P2G.

- ii. einem funktionierenden Zertifikatsmarkt für erneuerbares Gas aus P2G-Anlagen
 - iii. dem Aufzeigen von Chancen und Hemmnissen für Stakeholder von P2G bezüglich des regulatorischen Rahmens.
- e) Erfolgreiche Verbreitung der Ergebnisse, sodass die Werkzeuge frei zugänglich sind und auf eine Weise dargestellt werden, um sie für die Interessensgruppen einfach implementierbar zu gestalten.

Jeder nationale Teil des Projekts trägt mit unterschiedlichen Aspekten und Ansätzen zu diesen gemeinsamen Zielstellungen bei.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Produktion und Verbrauch von erneuerbaren Gasen wurden bereits in diversen Studien untersucht. Für die bestehenden Untersuchungen wurden allerdings verschiedene Modelle verwendet, darunter z.B.:

- Lieferketten- und Machbarkeitsmodelle
- Energie-, Umwelt- und Ökobilanz (LCA)
- ganzheitliche und integrierte Energiesystemmodelle.

Energiesystemmodelle berücksichtigen die Systemintegration und eignen sich daher zur Bewertung der potenziellen Rolle von Energietechnologien und -ressourcen bei der Energiewende von lokalen Gebieten, Regionen, Ländern oder länderübergreifenden Regionen. Trotz einer umfangreichen Liste von Forschungsstudien, die sich auf erneuerbare Gase und P2G-Modelle konzentrieren, besteht eine Forschungslücke bei der Entwicklung von Instrumenten, die eine detaillierte Modellierung der gesamten Wertschöpfungskette ermöglichen, angefangen bei der Erzeugung von erneuerbarem Gas bis hin zu Endverbrauchern oder anderen Umwandlungstechnologien, welche gleichzeitig die räumliche und zeitliche Systemintegration zwischen Gas-, Strom- und Fernwärmesystemen berücksichtigen. SuperP2G befasst sich mit diesen Problemen und stellt sicher, dass die identifizierten Forschungslücken durch die im Projekt entwickelten Tools abgedeckt werden. SuperP2G sammelt P2G-Modellierungserfahrungen aus einer Reihe von aktuellen und laufenden Forschungsprojekten, wodurch ermöglicht wird, dass die neuesten Entwicklungen zusammengeführt werden und ein umfassender Wissensaustausch stattfinden kann. Während des Projektes sollte ein neues Open Source-Tool entwickelt werden, das die Stärken des im dänischen FutureGas-Projekt entwickelten OptiFlow-Tools und des im HYPOS-Projekt entwickelten H2-Index-II-Tools kombiniert.

Darüber hinaus wurden bereits bestehende Instrumente bei den Projektpartnern weiterentwickelt und deren Zugänglichkeit für die Öffentlichkeit verbessert.

Der regulatorische Rahmen im Bereich Erneuerbare Energien (EE) bezieht sich meist auf nur eine Art von Energieträger. Das erschwert aus Sicht der Anwender die Umsetzung von P2G-Technologien, da diese über unterschiedliche Energiesysteme hinweg funktionieren. Es ist eine sektorübergreifende Abstimmung des Regelwerkes erforderlich, um Hindernissen entlang der Wertschöpfungsketten vorzubeugen.

Im Projekt SuperP2G wurde dementsprechend auch ein neuartiger Ansatz aus dem Bereich der Spieltheorie angewendet, um regulatorische Probleme zu untersuchen, die vom Projekt identifiziert wurden. Erneuerbare Energien sollten vorzugsweise nur einmal öffentlich unterstützt werden, um

Doppelförderungen zu vermeiden. Es können Hindernisse entstehen, wenn durch P2G eine Form geförderter Erneuerbarer Energieträger (z. B. Elektrizität) in eine andere Form (z. B. Biomethan) umwandelt wird. Trotz bestehender Analysen aus Projekten wie Store & Go [1] und FutureGas [2] lässt sich immer noch eine Forschungslücke in Bezug auf die Auswirkungen eines Zertifikatsystems für Grünen Wasserstoff in Verbindung mit anderen erneuerbaren Energieträgern identifizieren. In SuperP2G soll diese Lücke geschlossen und durch die Analyse eines potenziellen europäischen Marktes für EE-Gas-Zertifikate adressiert werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das SuperP2G-Projekt zielt darauf ab, die Realisierbarkeit von P2G-Projekten durch Systemoptimierung zu verbessern, indem eine Reihe von Werkzeugen mit sich ergänzenden Schwerpunkten verwendet und weiterentwickelt werden. In Deutschland, den Niederlanden und Österreich können vorhandene Instrumente in Zusammenarbeit mit den Stakeholdern und durch gegenseitigen Austausch mit den existierenden Instrumenten der Partner verbessert und validiert werden. In Dänemark sollte dazu das vorhandene Tool OptiFlow auf Open Source-Software umgestellt und für Berechnungen in Echtzeit weiterentwickelt werden.

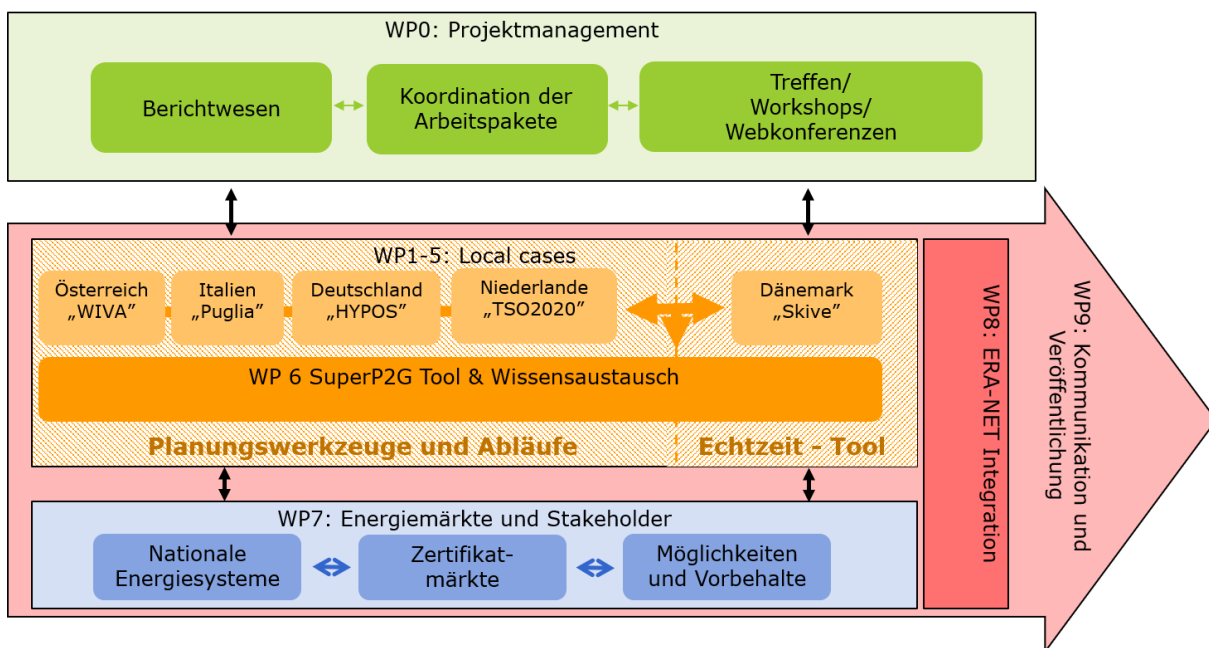


Abbildung 1: Vorhabenstruktur und Aufbau der Arbeitspakete

OptiFlow wurde in den dänischen Forschungsprojekten TopWaste und FutureGas entwickelt und von der Danish Innovation Foundation unterstützt. Es handelt sich um ein Modell, welches eine räumliche und zeitliche Systemintegration zwischen Gas-, Strom- und Fernwärmesystemen ermöglicht. OptiFlow ist ein Open Source Tool, wurde jedoch in der lizenzpflichtigen Umgebung GAMS programmiert.

Das H2-Index-II-Tool bildet die vollständigen lokalen Wertschöpfungsketten von Grünem Wasserstoff ab. Das Programm ermöglicht eine flexible Auswahl technischer Elemente sowie regulatorischer und wirtschaftlicher Aspekte. Der H2-Index-II berechnet den Wasserstoffpreis am

Ende verschiedener Wertschöpfungsketten, wie bspw. Power-to-Liquid, Netzharmonisierung und industrielle H₂-Flotte. Das Tool wurde im Rahmen der HYPOS-Initiative entwickelt und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Beide Programme sollten als Grundlage für das Superior P2G-Tool dienen. Gemäß dem ursprünglichen Plan sollten die Stärken beider Instrumente kombiniert und als Open-Source- und Open-Software-Tool in Dänemark und Deutschland entwickelt werden. Alle Projektpartner sollten dabei unterstützend tätig sein. Die breite Basis europäischer (Projekt-) Partner sollte in diesem Zusammenhang dazu beitragen, einen standardisierten, validierten Ansatz zur Bewertung der potenziellen Rolle von P2G in der Zukunft zu etablieren und potenziellen Interessengruppen durch die generierten Ergebnisse mehr Entscheidungssicherheit zu geben.

Besonderes Augenmerk wird auf die geistigen Eigentumsrechte der Werkzeuge gerichtet, die während des Projekts verwendet und entwickelt werden. Je nach den individuellen Zielvorgaben der Projekte möchten die Partner die Zugänglichkeit zu diesen Werkzeugen so weit wie möglich öffnen.

Der offene Ansatz spiegelt sich besonders deutlich in der Entwicklung des SuperP2G Tools wider, wobei der bestehende Quellcode des OptiFlow-Tools von FutureGas in eine frei zugängliche Programmiersprache umgewandelt wird, um als Basis für das dänische Teilprojekt Skive, sowie für das italienische Projekt Puglia zu dienen. In Arbeitspaket 6 sollte diese Codebasis Verwendung finden, indem sie mit dem H₂-Index-II-Tool zusammengefügt, und beide Teile zu der freien Software SuperP2G erweitert werden.

Im Laufe des Projektes kam es jedoch zu Anpassungen dieser Zielstellung. Die Arbeiten der dänischen Partner ihr Programm in eine offene Programmiersprache zu überführen, konnten aufgrund von personellen Problemen erst mit ca. 1.5 Jahren Verspätung beginnen. Zu diesem Zeitpunkt wurde eine bereits existierende Open Source Software „SPINE“ identifiziert, welche die gewünschten Funktionen abdeckt. Diese Software wurde dann genutzt, um die Untersuchungen im Teilprojekt der dänischen Partner durchzuführen. Dadurch wurden die gemeinsamen Bemühungen, eine kombinierte Lösung zu entwickeln, verworfen.

Bis zu diesem Zeitpunkt lief am DBI allerdings schon die Entwicklung des „DBI-MAT: Microgrid Analysis Tool“. Die Funktionalitäten des Programms wurde von der proprietären MATLAB Umgebung des H₂-Index II nach Python portiert und inhaltlich verbessert. Es dient als flexibleres Berechnungstool für die Methoden des H₂-Index und wird der wissenschaftlichen Community in Form von Open Source Code zur Verfügung gestellt. Für die Veröffentlichungen zum Projekt siehe auch Abschnitt II.6.

In der verbliebenen Projektlaufzeit konnte keine Kopplung der Programme DBI-MAT und SPINE erzielt werden. Stattdessen fand ein „Soft-Coupling“ und damit die Verbindung der Programme in einer Kette von Berechnungsschritten statt. Demonstriert in 2 Veröffentlichungen wurde dadurch der ursprüngliche Gedanke, alle Bereiche der Wertschöpfungskette, regional wie lokaler Ebene abzudecken, erreicht.

Schlussendlich konnte durch eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes erreicht werden, dass die Ergebnisse der Arbeiten aller Partner, trotz der Schwierigkeiten in der Anfangsphase des Projektes, in einer umfassenden Art den Interessensgruppen präsentiert wurden. Von dem ursprünglichen Vorhaben eine eigenständige Softwarelösung zu entwickeln, wurde abgesehen. Die Arbeitsbereiche der Partner konnten in einer gemeinsamen interaktiven Internetpräsenz inhaltlich verknüpft werden. Interessenten können dort passende Antworten und Verweise auf ihre individuellen Fragestellungen in unterschiedlicher regionaler und technischer Auflösung finden.

I.4 Wissenschaftlich-technischer Stand, an den angeknüpft wurde

DBI-GTI bearbeitet Projekte in Forschung, Entwicklung und innovativem Engineering. Schwerpunkte der Forschung und Entwicklung sind praxisrelevante Bereiche der Grundlagen- sowie der industrienahen Forschung mit dem Potential einer mittelfristigen Umsetzung in die Praxis.

Veröffentlichungen/Referenzen mit Projektbezug

- Zwanzig20 HYPOS – H2-Index-II - Weiterentwicklung des Wertschöpfungsketten-Analyse-Tools H2-Index für die Strategiefortschreibung der HYPOS-Initiative und das Monitoring von Ergebnissen. Laufzeit 2017 -2021
- Wehling, A. et al.: SMARAGD Technisch-ökonomische Modellierung eines sektorengerkoppelten Gesamtenergiesystems aus Gas und Strom unter Fortschreibung des regulatorischen Rahmens G 201708; DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.; Bonn 2018.
- H. Krause, M. Kühn, J. Nitzsche, T. Raabe, E. Schuhmann, S. Schütz, Abschlussbericht: Wirtschaftliche Bewertung der HYPOS-Wertschöpfungsketten zur Wasserstofferzeugung im Kontext der verschiedenen Nutzungspfade, Forschungsinitiative HYPOS - HYDROGEN POWER STORAGE & SOLUTIONS EAST GERMANY im Rahmen des Forschungsprogrammes Zwanzig20 des BMBF. Freiberg 2016.
- E. Schuhmann, R. Erler, H. Krause, Methodology for GIS-based heat demand analysis in large urban areas: Proceedings of the International Gas Union Research International Gas Union Research Conference 2014 - WP5-7 2014.
- “Wissenschaftliche Forschung zu Windwasserstoff-Energiespeichern – WESpe“, ein Forschungsprojekt im Rahmen der Förderinitiative „Energiespeicherung“, einer gemeinsamen Initiative des BMWi, BMU und BMBF zur Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet von Energiespeichertechnologien. Laufzeit 2014 -2017
- „CLUSTER - Auswirkungen der Begleitstoffe in den abgeschiedenen CO2-Strömen unterschiedlicher Emittenten eines regionalen Clusters auf Transport, Injektion und Speicherung“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (COORETEC-Initiative). Laufzeit 2015-2018
- „Modellierung von PtGtP-Systemen mittels MATLAB“ - Mit dem Ziel erneuerbare Energien in die Produktion bestehender Werke einzubinden sowie Lastspitzen und Strombezug aus dem öffentlichen Netz zu reduzieren. Industrieprojekt. Laufzeit 2016 -2017

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Als sich im Verlauf des Projektes abzeichnete, dass sich eine webbasierte interaktive Ergebnispräsentation in Form einer datenbankgestützten Datenvisualisierung in Eigenleistung nicht realisieren ließ, wurden externe Entwickler kontaktiert und beauftragt.

In Zusammenarbeit mit den Entwicklern von <https://emvi.com> konnte das Framework für die finale Onlinepräsenz der Ergebnisse des Projektes umgesetzt werden. Zu finden ist der Inhalt unter <https://superp2g.external.dbi-gruppe.de/>.

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Es folgt die eingehende Darstellung der allgemeinen Aufgaben im Projekt, gefolgt von einer Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen den Arbeiten in AP 3 und AP 6. Im Anschluss wird spezifisch auf die Ergebnisse der einzelnen Themenschwerpunkte DBI-MAT, H₂-Index III sowie die endgültige Fassung des SuperP2G Tools eingegangen.

II.1.1 Allgemeine Tätigkeiten

AP 0: Projektmanagement

Das Management-Team (DTU, ERIG, DBI) traf sich in regelmäßigen webbasierten Besprechungen und stand auch auf anderen Wegen (E-Mail, Telefon) in direktem Kontakt.

AP 7: Energiemärkte und Stakeholder

In diesem Teilpaket wurden Zuarbeiten für die Modellierungsarbeiten der DTU geliefert. Im Laufe des Projektes hat das DBI anhand eines Fragebogens der Partner Daten und politische Rahmenbedingungen recherchiert, um den Ist-Zustand des Energie- und Gasmarktes in Deutschland zu erfassen und in die Betrachtungen dieses Arbeitspaketes einfließen zu lassen.

AP 8: ERA Net Integration

Details zum Ablauf der Integration in das Netzwerk wurden von ERA-Net erst im Oktober 2020 kommuniziert. Seitdem ist das DBI jedoch aktiver Bestandteil des Netzwerkes. DBI beteiligt sich an Diskussionsrunden und der gemeinsamen Erstellung von Online-Dokumenten zur Bewertung von Studien und dem Ausarbeiten von Handlungsempfehlungen.

AP 9: Kommunikation und Veröffentlichung

Im Rahmen eines Workshops vor den Mitgliedern des HYPOS e.V. wurden am 08.07.2021 die Projekteinhalte für SuperP2G vorgestellt. Mit Hilfe einer live durchgeführten Befragung wurden dazu auch spezifische aktuelle Fragestellungen der Zielgruppe ermittelt, um die weiteren Arbeiten am H₂-Index III und dem SuperP2G Tool zu lenken.

II.1.2 Zusammenfassung der spezifischen Aufgaben

In den Arbeitspaketen 3 „nationales Teilprojekt Deutschland“ und AP 6, „Wissensaustausch und SuperP2G Tool“ gestaltet sich der Inhalt der Arbeiten wie folgt:

AP 3: Teilprojekt Deutschland

Im AP 3 wurde der H₂-Index II durch das DBI-GTI zum H₂-Index III weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang wurde der im Hintergrund der Benutzeroberfläche für die Berechnungen zuständige Programmcode von MATLAB zu Python überführt und umstrukturiert. Aus der Umstrukturierung des Codes entstand ein eigenständig funktionierende Berechnungswerkzeug, das DBI-MAT Tool. Es

wurde so konzeptioniert, dass es in AP 6 mit dem neu geschriebenen Programm der DTU kombiniert werden konnte. Es sollte die Grundlage für die Arbeiten am SuperP2G Tool bilden.

AP 6: Wissensaustausch

Im Arbeitspaket 6 bestand die Aufgabe einerseits darin, den Wissensaustausch zwischen den Projektpartnern zu fördern und aus den gemeinsamen Zielen und Grundlagen das SuperP2G Tool zu konzeptionieren. Diese Arbeiten wurden vom DBI koordiniert.

Um den Wissensaustausch zwischen den Partnern zu fördern, wurden im Rahmen von AP 6 seitens des DBI-Workshops organisiert, welche den Austausch auf Ebene der bearbeitenden Experten voranbringen sollten. Hier wurde den Wissenschaftlern der beteiligten Institutionen die Möglichkeit gegeben, ihre Ansätze und Ziele untereinander vorzustellen und im Konsortium zu diskutieren. Dadurch wurde der inhaltliche Austausch bereits in einem frühen Stadium der Bearbeitung angeregt, wodurch inhaltliche Überschneidungen in einzelnen Themenbereichen identifiziert und das gemeinsame Wissen vertieft werden konnte. Diese Entwicklung setzte sich in bilateralen Gesprächen fort. Beispiele für die erfolgreiche Zusammenarbeit sind u. A. drei wissenschaftliche Publikationen (zum Berichtstermin in unterschiedlichen Stadien des Publikationsprozesses) des DBI in Kooperation mit den Partnern aus Dänemark und Italien.

II.1.2.1 DBI-MAT als neue Berechnungsgrundlage für den H₂ - Index III

Ein weiteres Ziel des Arbeitspaketes 6 war es ursprünglich, eine gemeinsame Berechnungsgrundlage zu schaffen und Algorithmen aus zwei Programmen zu vereinen, dem H₂-Index II und OptiFlow [3]. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde vom DBI die Berechnungsgrundlage des H₂ Index II neu definiert. Es wurde ein neues Tool entwickelt, das es dem involvierten Nutzer ermöglicht, verknüpfte Wertschöpfungsketten abzubilden und technische Komponenten flexibel in Relation zueinander zu setzen und mit Stoff- und Energieströmen unterschiedlicher Energieträger zu verknüpfen.

Angedacht als Schnittpunkt zum dänischen Programm für das SuperP2G Tool wurde die Entwicklung unter dem Gesichtspunkt betrieben, eine maximale Flexibilität in der Kombination von technischen Komponenten eines Energiesystems zu erreichen. Weitere Ziele waren:

- flexible Erweiterung durch objektorientierte Programmierung
- technische Detailtiefe für Komponenten verbessern, z.B. Wind und PV-Anlagen
- Nutzung einer standardisierten Datenbank
- Ökonomisches Modell erweitern und flexibilisieren

II.1.2.2 H₂-Index III Benutzeroberfläche und Inhalte

Die Weiterentwicklung des H₂-Index als zentraler Aspekt von AP3 sollte von den Entwicklungen des DBI-MAT Tools profitieren. Am Anfang des Projektes wurden der Fokus auf die Entwicklung des DBI-MAT gelegt, was notwendig war, um erst das Backend in Python zu erstellen, bevor sinnvolle Verknüpfungen zwischen den beiden Programmteilen hergestellt werden konnten.

Im H₂-Index III wurden die Optionen für die Benutzer im Vergleich zum H₂-Index II allgemein vereinfacht. Insbesondere wurde die detaillierte Eingabemöglichkeit der Kostenstruktur einzelner Komponenten auf die wichtigsten ökonomischen Kenngrößen reduziert. Es wurde bewusst auf die

Vielzahl vordefinierter Wertschöpfungsketten verzichtet und stattdessen 4 Kernsysteme implementiert. Dadurch wurden die Optionen für die Benutzer nicht reduziert, sondern es wurde lediglich auf überschneidende Wertschöpfungsketten verzichtet, die sich nur durch die Skalierung ihrer Komponenten oder die zugrundeliegenden Lastprofile unterscheiden.

II.1.2.3 Super P2G Tool

Von der Vision eines gemeinsam entwickelten Programmes, welches vom Nutzer installiert und lokal ausgeführt werden kann, musste im Verlauf des Projektes abgewichen werden. Stattdessen entstand als Ergebnis der Arbeiten der Projektpartner eine in enger Zusammenarbeit entwickelte und befüllte Online-Plattform. Hier können Stakeholder Informationen zu ihrem spezifischen Interessengebiet einholen und weiterführende Literatur sowie Kontakte zu den passenden Experten finden.

II.1.3 DBI-MAT: Microgrid Analysis Tool

Das DBI-MAT ist ein Energiesystemmodellierungs- und Optimierungswerkzeug, das zur technischen und ökonomischen Analyse lokaler Energiesysteme (im Folgenden Microgrids genannt) und der darin enthaltenen Energie- und Prozessströmen der jeweiligen technischen Hauptkomponenten dient. Berechnungen werden für Zeitreihen über einen definierten Zeitraum durchgeführt, wobei Ergebnisse folglich bspw. die Stoff- und Energiebilanzen sowie die Kosten eines Systems bei einer definierten Laufzeit sind. Komponenten umfassen alle Anlagen, die Energie- oder Stoffströme bereitstellen, umwandeln, speichern oder nutzen. Das Programm ist darauf ausgelegt, die Energie- und Prozessströme so zu lösen, dass die Energie- und Massenerhaltung zu jedem Zeitpunkt der Berechnung gegeben ist. Zu diesem Zweck kann der implementierte Solver-Algorithmus mehrere Elemente des Systems innerhalb vordefinierter Grenzen steuern. Wenn keine Lösung gefunden werden kann, müssen die Betriebsbereiche angepasst werden. Wenn das technische System gelöst ist, kann eine wirtschaftliche Berechnung durchgeführt werden. Diese Berechnung beinhaltet die Ermittlung der Annuitäten von Neuinvestitionen und die Betriebskosten aller im System enthaltenen Komponenten sowie der über die Systemgrenzen ausgetauschten Ressourcen.

Basierend auf diesem Lösungsalgorithmus kann eine systematische Optimierung von Technik und Fahrweise durchgeführt werden. Dabei kann die definierte Struktur des Energiesystems durch Hinzufügen, Entfernen oder Neuverbinden von Komponenten verändert werden. Der Optimierer modifiziert die Komponenten dann innerhalb benutzerdefinierter Freiheitsgrade, bspw. Speicherkapazität oder elektrische Leistung, um optimierte Ergebnisse für bestimmte Zielfunktionen zu erhalten.

Zusätzlich zu einer bilanziellen Betrachtung können die modellierten Stoff- und Energieströme mit individuellen Eigenschaften versehen sein. Dies können zum Beispiel Druck oder Temperatur sein, aber auch die Zusammensetzung von Fluidströmen aus mehreren Bestandteilen.

Das Modell kann auch dazu verwendet werden, die Betriebsweise der einbezogenen Anlagen durch Priorisierung der Komponenten zu optimieren. Die Definition einer Zielfunktion sowie die Entscheidung für Optimierungsalgorithmen kann für jedes Projekt/Szenario individuell gewählt werden. Systeme können unproblematisch als Black-Box-Funktionen definiert und an externe Solver übergeben werden. Bei dieser Herangehensweise wird das System als "Black Box" betrachtet, da nur die Ein- und Ausgabeparameter sichtbar sind, während die zugrundeliegende Funktionsweise verborgen bleibt. Durch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen werden verschiedene Eingabeparameter getestet, um die optimale Ausgabe oder Lösung des Systems zu finden. Dabei

wird iterativ die Black Box verwendet, um Feedback über die Leistung des Systems zu erhalten und die Eingabeparameter anzupassen, um eine bestmögliche Lösung zu finden.

Stoff- und Energieströme werden in Bilanzgruppen unterteilt, in denen jeweils die Energieerhaltung sichergestellt ist. Das Beispielsystem in Abbildung 4 enthält drei Bilanzgruppen (Strom, Wasserstoff und Wärme). Mehrere Komponenten können mit diesen Bilanzgruppen verknüpft werden. Es gibt fünf Hauptklassen mit unterschiedlichen Berechnungsmethoden und Attributen. Diese Hauptklassentypen sind

- Quellen,
- Senken,
- Transformatoren,
- Speicher
- Netze.
-

Die detaillierten Beschreibungen der Klassen sind im Programmcode enthalten, eine ausführliche Dokumentation kann vom Nutzer mit der Bibliothek Sphinx selbst generiert werden.

Weitere Verbesserungen in Bezug auf die technische Abbildung von Prozessen und Komponenten im Vergleich zur Programmstruktur des H₂ Index II:

- Modularisierbarkeit von Elektrolyseanlagen in
 - einzelne Technologien (PEM + Alkali) bzw.
 - mehrere individuell gesteuerte Stacks
- detaillierte Modellierung von PV- und
- Windkraftanlagen auf Grundlage von Wetterdaten (Siehe Abschnitt II.1.3.7)
- Überarbeitete Datenbasis für Kosten und Betriebsparameter getrennt vom Programm in einer zentralen SQL-Datenbank

II.1.3.1 Anwendungszweck von DBI-MAT

Das Tool DBI-MAT wurde entwickelt, um lokale Energiesysteme zu analysieren und zu optimieren. Es dient dazu, optimierte Szenarien zu ermitteln, um erneuerbare Energiequellen, Wasserstoffanwendungen und andere Prozesse in einer ökonomisch und ökologisch sinnvollen Weise zu integrieren. Dazu enthält das Tool verschiedene Methoden und Komponenten zur Entwicklung effizienter Energiesysteme durch Sektorenkopplung. In bisherigen Anwendungen lag der Schwerpunkt zum Beispiel auf der Integration von Wasserstoff durch die Ermittlung und Umsetzung technischer und wirtschaftlicher Betriebsszenarien für Elektrolyseure, Wasserstoffspeicher und Wasserstoffverbraucher.

II.1.3.2 Allgemeine Programmstruktur

Das DBI-MAT-System wurde in Python entwickelt und folgt einer generischen, objektorientierten und modularen Struktur. Der Code ist in Objekte unterteilt, was bedeutet, dass alle technischen Berechnungen innerhalb der Methoden der Komponentenklassen selbst implementiert sind. Dadurch werden die Berechnungen intrinsisch lösbar gemacht und ermöglichen eine flexible Kombination der Komponenten.

Dieser Ansatz hat 5 Vorteile:

- hohe Flexibilität bei der Verbindung von Komponenten
- hohe Flexibilität bei der Definition von Betriebsarten
- hohe Flexibilität bei der Definition von Optimierungszielen/ Zielfunktionen
- leichte Erweiterung der Komponentenbibliothek
- leichte Vertiefung der technischen Abstraktion möglich

Dieses Framework ermöglicht es dem Benutzer, Komponenten in einem System flexibel hinzuzufügen und sie mit einer der definierten Bilanzgruppen zu verbinden, ohne die internen Berechnungen zu verändern. Dies erleichtert die Modellierung verschiedener Arten von Microgrids auch ohne ein tieferes Verständnis der technologischen Hintergründe und bietet ein hohes Maß an Flexibilität. Wenn die internen Berechnungen einer Komponente in einem anderen technischen Abstraktionsgrad umgesetzt werden sollen, ermöglicht die objektorientierte Programmarchitektur eine einfache Wartbarkeit, da nur die entsprechenden Methoden der Komponentenklassen bearbeitet werden müssen. Dieses Framework ermöglicht eine konsequente Weiterentwicklung des Tools. Neue Komponenten mit neuen Berechnungsmethoden können auf der Grundlage der bestehenden Klassenstrukturen und Objektdefinitionen (Prinzip der Vererbung) erzeugt werden. Die internen Berechnungen neuer Komponenten können zunächst rudimentär sein und bei Bedarf detaillierter ausformuliert werden, je nach Anforderung des Anwendungsfalles. Dies entspricht den Ansätzen einer Botton-Up-Modellierung.

Das DBI-MAT-Werkzeug enthält mehrere Arten von Prozessen, die in den zuvor beschriebenen Hauptklassentypen enthalten sind:

1. *Quelle/Senke-Prozesse*: Vordefinierte Quellen liefern Masse oder Energie an die Bilanzgruppe, während Senken der Bilanzgruppe Masse oder Energie entziehen. Daher werden diesen Prozessen ein Profil oder einen maximal möglichen Wert zugewiesen, den sie der Bilanzgruppe zur Verfügung stellen oder entziehen können.
2. *Umwandlungsprozesse*: Umwandlungsprozesse sind alle Prozesse welche eine Form von Energie/Masse in eine andere umzuwandeln. Sie dienen dazu, unterschiedliche Bilanzgruppen miteinander zu verbinden. Diese Prozesse sind daher hauptsächlich durch Wirkungsgrade und Umwandlungsraten beschrieben, welche alle Ein- und Ausgänge dieser Komponenten verknüpfen.
3. *Speicherprozesse*: Speicherprozesse können Energie oder Masse aus einer Bilanzgruppe entnehmen, wenn ein Überschuss vorhanden ist und sie zu einem anderen Zeitpunkt bereitstellen, wenn sie benötigt werden. Daher sind Speicher in erster Linie durch eine Speicherkapazität beschrieben, welche definiert wie viel Energie/ Masse zwischengespeichert werden kann.
4. *Netzprozesse*: Die Netzprozesse werden verwendet, um das lokale System mit Strömen von außerhalb der Systemgrenzen zu verbinden und die Bilanzen im System auszugleichen. Diese können in eine Richtung oder bidirektional arbeiten und die Verbindung/ der Strom kann jederzeit auf eine bestimmte Energie- oder Massenmenge begrenzt werden.

II.1.3.3 Zeitliche und räumliche Auflösung

Das Tool DBI-MAT bietet keine Möglichkeit der räumlichen Verteilung der einzelnen Prozessschritte und Komponenten. Die Systeme, die mit dem Tool analysiert werden, sind vornehmlich lokale Mikronetze in denen der Transport von Masse oder Energie als verlustfrei angenommen wird. Transportelemente wie Pipelines sind für die Anwendung im H₂-Index III implementiert worden, jedoch werden komplexere Transportprobleme in einer anderen Softwarelösung des DBI umgesetzt.

Das DBI-MAT kann mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen arbeiten. Diese Auflösung wird durch die verwendeten Lastprofile definiert, welche als Eingabe in das System festgelegt werden. Typische Auflösungen, die in früheren Projekten verwendet wurden, liegen zwischen 15 und 60 Minuten. Auch wenn die zeitliche Auflösung frei gewählt werden kann, muss auf die Einflüsse und Limitierungen der technischen Abstraktion geachtet werden. Eine hohe Zeitauflösung führt zu einem höheren Einfluss von dynamischen technischen Zusammenhängen, die aktuell nicht implementiert wurden. Beispielsweise wäre die Implementierung von An- und Abfahrkurven unerlässlich, wenn die Berechnung eines dynamischen Elektrolyseurbetriebs mit einer zeitlichen Auflösung von einzelnen Minuten, oder weniger, angestrebt wird.

II.1.3.4 Ökonomische Berechnung

Zusätzlich zu den flexiblen Kombinationsmöglichkeiten unterschiedlicher technischer Komponenten und Anlagen ist es durch die Komplexität von Großprojekten im Bereich Power to Gas notwendig geworden, die bisherige Berechnungsgrundlage nach VDI 2067 „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“ zu erweitern [4, 5].

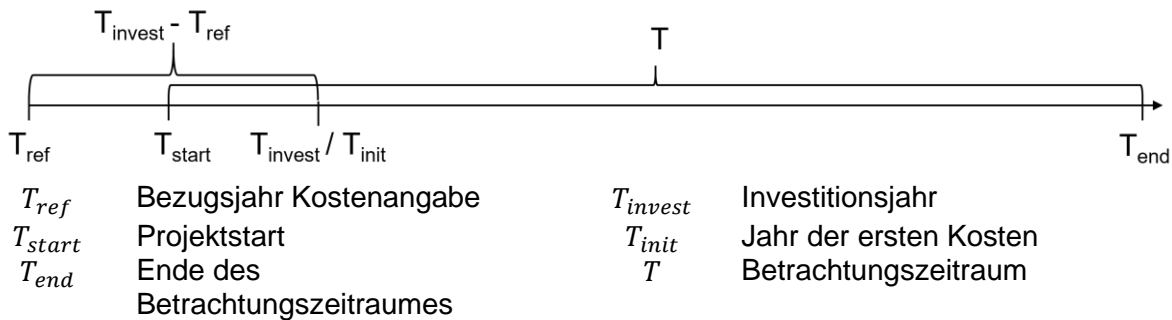
Nach VDI 2067 werden die Kosten einer Investition in folgende Kostengruppen unterteilt:

- Kapitalgebundene Kosten
- Bedarfsgebundene Kosten
- Betriebsgebundene Kosten
- Sonstige Kosten

Unter **kapitalgebundenen Kosten** werden betriebstechnische Investitionen für Anlagenteile und Investitionen für den Bau verstanden. In den kapitalgebundenen Kosten sind Ausgaben für eventuelle Anlagenerneuerungen mit einbezogen. Die **bedarfsgebundenen Kosten** enthalten Kosten für Energie und Brennstoffe und als **betriebsgebundene Kosten** werden Kosten für Instandhaltung, Bedienung, Wartung und dergleichen kategorisiert. Zu **sonstigen Kosten** werden jene Kostenpositionen gerechnet, die von keiner der drei anderen Gruppen gedeckt werden. Dazu gehören beispielsweise Kosten für Versicherungen und Steuern.

Bei Anwendung der Annuitätsmethode zur wirtschaftlichen Analyse von komplexen Systemen in der industriellen Großanwendung wie z.B. den Reallaboren der Energiewende, werden Annuitäten für die Kosten aller Hauptkomponenten ermittelt und zu einer Gesamtannuität für das gesamte Investitionsvorhaben addiert.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass nicht alle Investitionen zur gleichen Zeit geplant werden und somit nicht alle Kostenstellen über die gesamte Projektlaufzeit existieren. Weiterhin kann es vorkommen, dass der geplante Projektbeginn von dem Jahr der Planung abweicht oder Teilprojekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten umgesetzt werden. Aus diesem Grund muss die Betrachtungszeit in mehrere Zeiträume unterteilt werden. Für die Investitionskostenrechnung relevante Zeitpunkte und -abschnitte sind in folgender Abbildung zusammengefasst:



In der VDI 2067 wird nicht erklärt, wie eine Annuität für mehrere Investitionen mit unterschiedlichen Investitionszeitpunkten berechnet werden kann. Aus diesem Grund wurden die Formeln aus der VDI 2067 als Grundlage verwendet und nach den spezifischen Anforderungen für die Investitionsrechnung großer Industrieprojekte angepasst.

Der berechnete Annuitätsbetrag bezieht sich zunächst auf den Zeitpunkt der Erstinvestition. Damit die Annuitäten verschiedener Investitionen zu einer Gesamtannuität für das Projekt summiert werden können, müssen sie mittels Diskontinuierungsmethode auf diesen Zeitpunkt bezogen werden. Das betrifft müssen die Investitionen von Komponenten, deren Erstinvestitionszeitpunkt nicht mit dem Start des Betrachtungszeitraumes übereinstimmt.

Der Annuitätenfaktor a berechnet sich weiterhin aus dem kalkulatorischen Zinsfaktor q und der Länge des gesamten Betrachtungszeitraumes T .

$$a = \frac{q^T \cdot (q - 1)}{q^T - 1}$$

Für die Berechnung des Barwertfaktors b muss außerdem der Zeitraum verwendet werden, in dem die Kosten tatsächlich anfallen um die Annuität der kapitalgebundenen Kosten A_N zu erhalten.

$$A_N = A_{init} \cdot a \cdot b \cdot \frac{1}{q^{T_{init}-T_{start}}}$$

$$b = \frac{1 - \left(\frac{r}{q}\right)^{T_{end}-T_{init}}}{q - r}$$

A_{init}	Kosten im ersten Investitionsjahr	T_{start}	Startjahr des Betrachtungszeitraumes
T_{init}	Jahr der ersten Kosten	T_{end}	Endjahr des Betrachtungszeitraumes

Restwerte/ Wiederverkaufswerte gehen optional in die Berechnung ein, können allerdings auch als einmalige Investition ohne Weiterverwendung gewertet werden.

Zusammengefasst ergeben sich folgende Verbesserungen und Erweiterungen für die Kostenberechnung im DBI-MAT gegenüber der Herangehensweise nach VDI 2067:

1. Unterscheidung zwischen Bezugsjahr und Projektstart
2. Optionale Betrachtung des Restwertes nach Projektabschluss

II.1.3.5 Berechnungsablauf

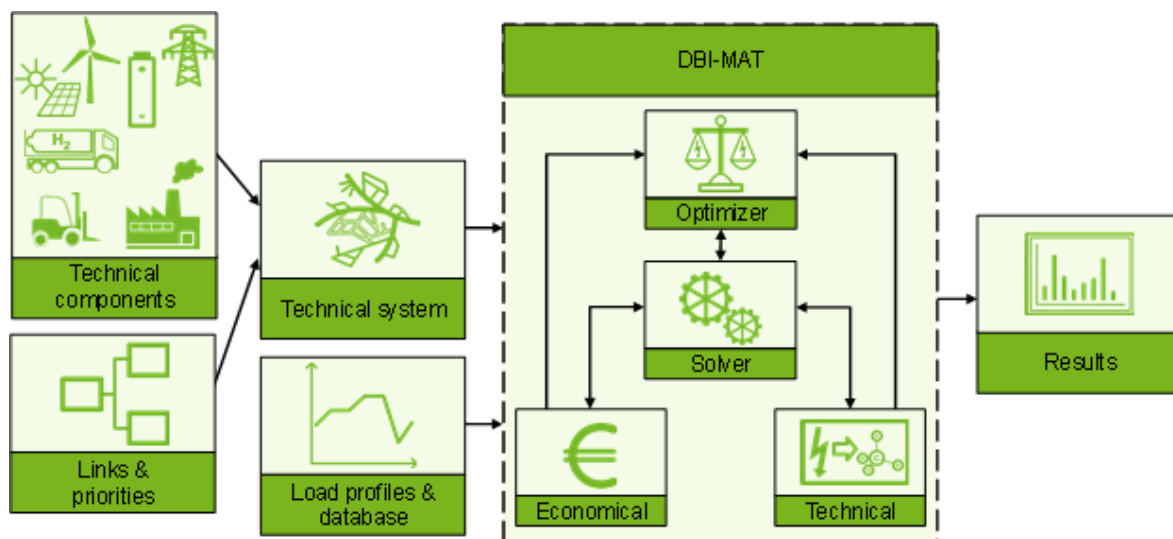


Abbildung 2: Schematischer Ablauf bei Verwendung des DBI-MAT-Tools.

Der Ablauf beim Erstellen eines Systemmodells und Analysieren eines lokalen Energiesystems mit dem DBI-MAT Tool wie folgt gestaffelt:

- 1) Definition/ Identifikation der beteiligten technischen Komponenten
- 2) Verbinden der Komponenten entsprechend der vorgesehenen Stoff- und Energieströme zu einem technischen System
- 3) Definition von Rahmenbedingungen
 - a. Lastprofile (Produktion, Bedarf, Betriebsweise, ...)
 - b. Technischer Rahmen (Betriebspunkte)
 - c. Ökonomischer Rahmen
- 4) Lösen der Stoff- und Energieströme im System, Betriebszeiten und Auslastungen der Komponenten für alle Zeitschritte
- 5) Ökonomische Berechnungen
 - a. Anhand der ermittelten Ressourcenbedarfe und Auslastung sowie
 - b. Anhand der Datenbasis zu Installationskosten und Rahmenbedingungen
- 6) anforderungsspezifische Optimierung anhand der Ergebnisse aus Schritten 4 und/oder 5
- 7) Ergebnisausgabe und Post-Processing
 - a. Interaktive Grafiken
 - b. Tabellen

Die notwendige Grundlage einer Berechnung mit dem DBI-MAT ist auf der linken Seite von Abbildung 2 zu sehen. Zunächst muss der Benutzer alle Komponenten definieren, die im Microgrid enthalten sind. Wenn diese Komponenten initialisiert sind, müssen weitere spezifische Parameter, bspw. die Speicherkapazität oder die installierte elektrische Leistung, an den Initialisierungsprozess übergeben werden, um die Komponente zu definieren. Nachdem alle Komponenten initialisiert sind, müssen deren Ein- und Ausgänge mit einer Bilanzgruppe verknüpft werden. Wenn spezielle Betriebsarten erforderlich sind, müssen die angeschlossenen Komponenten zusätzlich priorisiert werden. Die verknüpften und priorisierten Komponenten werden als technisches System bezeichnet.

Als Input für das technische System akzeptiert das Tool unter Anderem vordefinierte Lastgangprofile für einzelne Komponenten. Das Tool kann verschiedene Profillängen und Zeitauflösungen verarbeiten. Die Kombination aus Profillänge und Zeitauflösung beschreibt, welches Zeitfenster in welchem Detailgrad simuliert wird. Diese Profile können verschiedene Arten von Informationen enthalten und so bspw. einen festgelegten Elektrolyseurbetrieb beschreiben, wobei das Profil in diesem Fall die Last am elektrischen Eingang des Elektrolyseurs regelt. Ein weiterer Anwendungsfall wäre es in dieser Art die Ein- und Ausgangsströme an den Grenzen des lokalen Energiesystems zu beschränken. Dies ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Definition von Betriebsweisen.

II.1.3.6 Datenbank

Die für die technischen Berechnungen notwendigen Parameter, sowie die ökonomischen Kennzahlen für alle implementierten Komponenten waren für die Berechnungen im H₂-Index II noch in einer einzelnen Excel-Datei hinterlegt. Diese wurde nach jeder Aktualisierung der Datenbasis in ein MATLAB-eigenes Datenformat (.mat) importiert. Diese Datei konnte dann bei jeder Initialisierung des Programmes geladen werden und die Daten standen dem Nutzer über die Benutzeroberfläche zur Verfügung. Die Umwandlung war notwendig, da die Zugriffszeiten auf die umfangreiche Excel-Datei andernfalls die Bedienbarkeit des Programmes beeinträchtigt hätten.

Der Wechsel zur Programmiersprache Python machte in diesem Aspekt eine Verbesserung der Methoden möglich. Es wurde nach einer Lösung gesucht, welche wartungsfähig, leicht erweiterbar, übersichtlich, zentral und vollständig (mit Quellenangaben) ist.

Die Wahl fiel auf ein freies, relationales Datenbanksystem auf Grundlage von MySQL, welches am DBI gehostet werden konnte. Dadurch haben alle Mitarbeiter direkten Zugriff auf die Daten, Aktualisierungen sind sofort für jeden verwendbar und die Zugriffe können flexibel aus diversen Programmiersprachen getätigt werden.

Das DBI-MAT-Modell, welches am DBI verwendet wird, hat eine Verbindung zu dieser SQL-Datenbank. Die Datenbank enthält auch grundlegende Effizienzdaten, die zur Berechnung der Umwandlung von Massen- und Energieströmen verwendet werden. Zusätzlich enthält die Datenbank ökonomische Daten für verschiedene Komponenten, die für eine erste Kostennäherung verwendet werden können, wenn keine konkreten projektbezogenen Daten verfügbar sind.

Der öffentlich zugänglichen Open-Source-Variante des Programms liegt eine funktionale Basisversion dieses Datensatzes in Form einer SQLite Datei bei.

II.1.3.7 Erneuerbare Energiequellen

Die Datengrundlage des H₂-Index II beschränkte sich auf gemittelte Erzeugerprofile für Erneuerbare Energie aus PV und Windanlagen für 11 Regionen in Ostdeutschland. Diese wurden in einem der Teilarbeitspakete ermittelt und der Algorithmus stand zum Zeitpunkt der Umsetzung des DBI-MAT nicht mehr zur Verfügung. Daher wurden Alternativen entwickelt, um Produktionskennlinien für Energie aus Wind- und PV-Anlagen flexibel anhand standortspezifischer Wetterdaten abschätzen zu können.

II.1.3.7.1 *Typisches Wetterjahr*

Die Potenzialanalyse für EE-Strom im H₂-Index II orientierte sich an historischen Wetterdaten eines konkreten Wetterjahres. Für die Weiterentwicklung der Methodik wurde entschieden, im DBI-MAT typische Wetterdaten (TMY – Typical Meteorological Year) zu verwenden. Diese werden mit Hilfe einer Python-Bibliothek aus einer von der europäischen Kommission gehosteten Datenbank bezogen [6]. Über eine API können vorbereitete Einstrahlcharakteristiken geladen werden. Die Datensätze beinhalten stündliche Werte für folgende Parameter:

- Datum und Uhrzeit
- Globale horizontale Bestrahlungsstärke
- Direkte normale Bestrahlungsstärke
- Diffuse horizontale Bestrahlungsstärke
- Luftdruck
- Trockenkugeltemperatur (2m Temperatur)
- Windgeschwindigkeit (in 10 m)
- Windrichtung in Grad
- Relative Luftfeuchtigkeit
- Langwellige abwärts gerichtete Infrarotstrahlung

Der Datensatz wurde erstellt, indem für jeden Monat der "typischste" Monat aus dem gesamten verfügbaren Zeitraum ausgewählt wurde, z.B. 16 Jahre (2005-2020) für PVGIS-SARAH2. Die für die Auswahl des typischen Monats verwendeten Variablen sind die globale horizontale Bestrahlungsstärke, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit.

Zur Abfrage der Wetterdaten ist die Eingabe von Koordinaten notwendig. Zur Vereinfachung der Handhabung wurde im DBI-MAT zusätzlich eine Geocoding-Bibliothek [7] verwendet, welche diese Koordinaten aus Ortsnamen generieren kann.

II.1.3.7.2 *Umsetzung Vorhersagemodell Windenergie*

Die für die Stromerzeugung zur Verfügung stehenden Windgeschwindigkeiten W_{hub} auf Höhe des Windrades h_{hub} werden ermittelt nach:

$$W_{hub} = W_{mess} \cdot \left(\frac{h_{hub}}{h_{mess}} \right)^k$$

w_{mess} sind dabei die gemessenen bzw. die bezogenen Windgeschwindigkeiten. Diese Windgeschwindigkeiten werden auf einer vordefinierten Höhe h_{mess} über dem Boden gemessen bzw. angegeben. In den vorliegenden Daten sind das 10 m. Der dimensionslose Faktor k bezeichnet die Oberflächenrauheit der umgebenden Landschaft. Dieser Wert liegt bspw. für freie Wasserflächen bei $k = 0.0$ und für dünn bebaute Agrarflächen bei $k = 0.245$ [8].

Die Kenngrößen von Windkraftanlagen können wie folgt beschrieben werden: Die minimale Windgeschwindigkeit, ab der eine Windkraftanlage beginnt, elektrische Energie zu generieren, wird als w_{cut_in} bezeichnet. w_{cut_out} hingegen bezeichnet die maximale Windgeschwindigkeit, ab der die Windkraftanlage aus Sicherheitsgründen vollständig heruntergefahren wird. w_{rated} ist die Windgeschwindigkeit, bei der die Windkraftanlage ihre maximale Leistung erzeugt. Zwischen w_{rated} und w_{cut_out} werden die Rotorblätter so eingestellt, dass die Anlage nicht zu schnell läuft.

$$w_{in} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } w_{mess} < w_{cut_in} \\ 0, & \text{wenn } w_{mess} \geq w_{cut_out} \\ w_{rated}, & \text{wenn } w_{mess} \geq w_{rated} \\ w_{mess}, & \text{sonst} \end{cases}$$

Unter der Annahme, dass immer die theoretisch maximale Leistungsentnahme erzielt wird, ergibt sich für die Windgeschwindigkeit w_{out} hinter dem Windrad nach Betz [9, 10].

$$w_{out} = \frac{2}{3} * w_{in}$$

Die entzogene Windenergie E_{WKA} errechnet sich dann aus einer Ableitung von Kontinuitätsgleichung und Bernoulli für Strömungsmaschinen.

$$E_{WKA} = 0.25 \cdot A_{rotor} \cdot \rho_{Luft} \cdot (w_{in}^2 - w_{out}^2) \cdot (w_{in} + w_{out})$$

Ein weiterer, allerdings vernachlässigter Einflussfaktor ist die Differenz in der Luftdichte zwischen dem Messpunkt und der Nabenhöhe des Windrads, die von Umgebungsdruck und Luftfeuchtigkeit abhängig ist. In diesem Fall kann der Einfluss der Luftdichte vernachlässigt werden, da folgende Beziehungen gelten:

$$E \sim w^3, E \sim D^2, E \sim \rho, \text{ mit } D = \text{Rotordurchmesser}$$

Dieser Ansatz wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Veröffentlichung an den Kenndaten eines WKA-Projektes aus der Praxis in Puglia, Italien, überprüft [11].

II.1.3.7.3 Umsetzung Vorhersagemodell PV

Für die flexible Modellierung der Erzeugungskurven von PV-Anlagen wurde auf die bestehende Open-Source-Bibliothek PVLib [12] zurückgegriffen. In dieser sind die notwendigen technischen Parameter von Solarmodulen und Wechselrichtern hinterlegt sowie eine Modellierung der Einstrahlungsverhältnisse auf Basis der Wetterdaten aus Abschnitt II.1.3.7.1. Diese Funktionalitäten wurden in den Methoden des DBI-MAT verwendet, das Ergebnis ist eine flexible Methodensammlung zur Optimierung der Ausrichtung und des Neigungswinkels anhand von Koordinaten oder der Angabe eines Ortsnamens.

II.1.3.8 Erweiterung der technischen Modelle

II.1.3.8.1 *Modularisierung der Elektrolyse*

Für großtechnische Systeme kann es von wirtschaftlichem Interesse sein, eine Kombination aus Elektrolyseanlagen oder eine Mehrzahl an einzelnen Elektrolyse-Stacks zu installieren.

Die Kombination verschiedener Elektrolysearten besitzt einen hohen Innovationsgrad. Dementsprechend gibt es in der Literatur bisher kaum Untersuchungen für den kombinierten Einsatz verschiedener Elektrolysearten. In diesem Projekt wurden unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien, Betriebsregeln für derartige Elektrolysesysteme erarbeitet, wobei diese einen möglichst gewinnbringenden Einsatz der Elektrolyseure gewährleisten sollen. Unter diesen Gesichtspunkten wurde auch das Simulationsprogramm DBI-MAT erweitert. Weiterhin wurden Funktionen in das Programm integriert, welche die Erstellung einer auslastungsabhängigen Wirkungsgradkennlinie für Elektrolyseure aus den Polarisationskurven der Stacks ermöglichen. Die Güte von Elektrolysestacks wird in der Regel durch I/U-Kennlinien, sogenannte Polarisationskurven, angegeben. Diese sind in der Literatur und in Herstellerangaben deutlich häufiger zu finden als die bisher verwendeten Gesamtwirkungsgrade der kompletten Anlage.

Der Elektrolysewirkungsgrad ergibt sich dann durch die Kombination der einzelnen Stackwirkungsgrade. Dieser ist in Abbildung 3 für einen typischen alkalischen und einen typischen PEM-Elektrolyseur dargestellt.

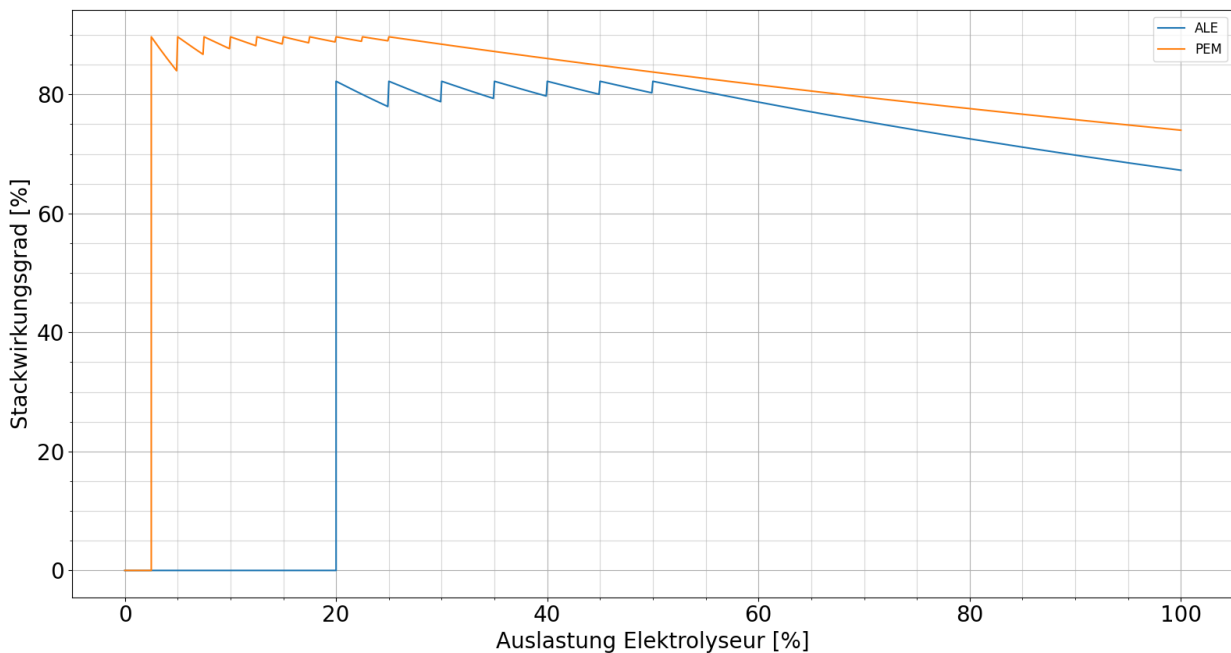


Abbildung 3: Kennlinie lastabhängiger Elektrolysewirkungsgrad für PEM- und alkalische Elektrolyse (ALE) [5].

Bei der Recherche typischer Polarisationskurven für PEM- und alkalische Elektrolysestacks, wurde Wert daraufgelegt, dass die Polarisationskurven charakteristisch für kommerzielle Anlagen sind. In vielen Veröffentlichungen werden Stacks unter Laborbedingungen untersucht. Dabei handelt es sich

häufig um neuartige Versuchsstände oder technische Optimierungen bestehender Stacks, die bisher nicht in kommerziellen Anlagen verwendet worden sind.

II.1.3.8.2 SOEC Elektrolyseur

Im Zuge einer Veröffentlichung mit den Partnern aus den italienischen und dänischen Teilprojekten war es notwendig, ein Modell für SOEC-Elektrolyseure (Solid Oxide Electrolyzer Cell – Festoxid Elektrolyse) zu erstellen [13].

Das bestehende Elektrolysemodell wurde zu diesem Zweck erweitert. Das Modell fundiert auf einem theoretischen Ansatz aus der Elektrochemie über die Gibbs'sche Energie. Daraus ermittelt man die Energiebedarfe für den SOEC analytisch, basierend auf der Stochastik der chemischen Elemente und in Abhängigkeit von der Temperatur des Dampfes.

Zur Berechnung der mittleren spezifischen Wärmekapazität von verschiedenen Fluiden, in Abhängigkeit von deren Temperatur, wurde eine Herangehensweise aus [14] adaptiert.

$$cp_m(T_1, T_0, a, b, c, d, e) = \frac{\left((T_1 - T_0) \cdot a + (T_1^2 - T_0^2) \cdot \frac{b}{2} + (T_1^3 - T_0^3) \cdot \frac{c}{3} + (T_1^4 - T_0^4) \cdot \frac{d}{4} + (T_1^5 - T_0^5) \cdot \frac{e}{5} \right)}{T_1 - T_0}$$

Die Faktoren a, b, c, d, e , sind Tabellenwerte und abhängig vom Fluid und dem Temperaturbereich. T_0 ist die Ausgangstemperatur des Fluids, standardgemäß die Normtemperatur von 298.15 K bzw. 20 °C. Diese Gleichung gilt für einen Temperaturbereich von 100 °C bis 3000 °C. Mit ihr wird die mittlere spezifische Wärmekapazität für die Fluide Wasserdampf, Wasserstoff und Sauerstoff berechnet, welche nachfolgend mit cp_{m,H_2O} , cp_{m,H_2} und cp_{m,O_2} benannt sind.

Die Entropie S berechnet sich für diese Fluide identisch wie folgt:

$$S_{Fluid} = S_{0,Fluid} + m_{Fluid} \cdot cp_{Fluid} \cdot \log\left(\frac{T_1}{T_0}\right) - m_{Fluid} \cdot R_{Fluid} \cdot \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right)$$

Mit der Masse des Fluids m_{Fluid} , der spezifischen Gaskonstante R_{Fluid} , dem Standarddruck p_0 in bar, dem Ausgangsdruck p_1 in bar, sowie der Ausgangstemperatur T_1 in Kelvin

Für die Berechnung der Enthalpie H wird eine Näherung auf der Basis von Tabellenwerten erstellt [14].

$$H = f(T_1), \quad \text{mit } T_1 \in [298.15 \text{ K}, 1000 \text{ K}]$$

Die Gibbs-Energie G , der elektrische Energiebedarf berechnet sich daraufhin wie folgt.

$$G = H - T_1(S_{H_2O} - (S_{H_2} + S_{O_2})) \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

Aus diesen Zusammenhängen wird ebenso der Gesamtenergiebedarf, die Enthalpie, (Thermisch + Elektrisch) sowie der reine Thermische Energiebedarf (Enthalpie) abgeleitet.

Überprüft wurde der Ansatz anhand eines Datenblattes eines SOEC-Elektrolyseurs und in Kommunikation mit dem Hersteller [15].

II.1.3.8.3 Methanisierung

Vom Projektpartner EBI konnten Kennzahlen für die Effizienz, Investitionskosten und Betriebskosten für eine Anlage zur biologischen Methanisierung geliefert werden, welche in die Datenbank überführt wurden.

Diese Methanisierung ist als Konverter in der Komponentenbibliothek des DBI-MAT hinterlegt und greift auf die entsprechenden Kennzahlen in der Datenbank zu. In erster Näherung kann die Methanisierung für die Zwecke des DBI-MAT mit einem einfachen Wirkungsgrad abgebildet werden. Eine detaillierte technische Modellierung war nicht notwendig. Die gelieferten Kennzahlen wurden in detaillierten technischen Simulationen der Projektpartner ermittelt. Die technischen Details, mit denen diese Kennzahlen simuliert wurden, finden sich auf der Veröffentlichung des EBI auf der Seite des SuperP2G-Tools [16].

II.1.3.9 Mögliche Anwendungen und Ergebnisse

Das Tool DBI-MAT erzeugt zwei Arten von Ausgaben in Form von Python typischen Datenstrukturen [17]. Die erste beinhaltet die technische Lösung für den Massen- und Energiefluss im System. Sie enthält alle ausgetauschten Ströme in Form einer Tabelle von Profilen für alle Energie- und Massenströme zwischen den Komponenten zu jedem Zeitschritt. Darin enthalten sind auch für jeden Zeitschritt die wichtigsten Statusparameter der Komponenten, wie z.B. den Speicherfüllstand oder die Belastung des Elektrolyseurs.

Die zweite wesentliche Ausgabe beinhaltet die wirtschaftlichen Ergebnisse, die aus einer zweiten, optionalen Berechnung resultieren. Diese Ausgabe ist ebenfalls eine tabellenartige Datenstruktur mit wirtschaftlichen Parametern. Sie enthält die Investitionskosten für alle Neuinvestitionen, die im System vorgesehen sind. Die Daten enthalten auch die aus diesen Investitionskosten resultierenden Annuitäten, die Lebensdauer und den Zinssatz. Diese Komponenten besitzen ebenfalls Betriebskosten, die sich beispielsweise aus der Wartung ergeben. Das gesamte Mikronetz kann Betriebskosten oder Einnahmen enthalten, die sich aus dem Kauf oder Verkauf von Gütern über die Systemgrenze berechnen. Diese Kosten oder Erlöse sind ebenfalls Teil der Datenausgabe.

Abbildung 4: Lokales Multi-Sektoriell Energie-System, Beispielanwendung und Demonstration der Fähigkeiten des DBI-MAT. Abbildung 4 zeigt ein Beispielsystem, in welchem unterschiedliche Stoff- und Energieströme in einem lokalen System interagieren. Mit Hilfe des DBI-MAT können zahlreiche Fragestellungen beantwortet werden, von der technischen Auslegung der Komponenten hin zur ökonomischen Bewertung von Betriebszenarien und Ausbaustufen.

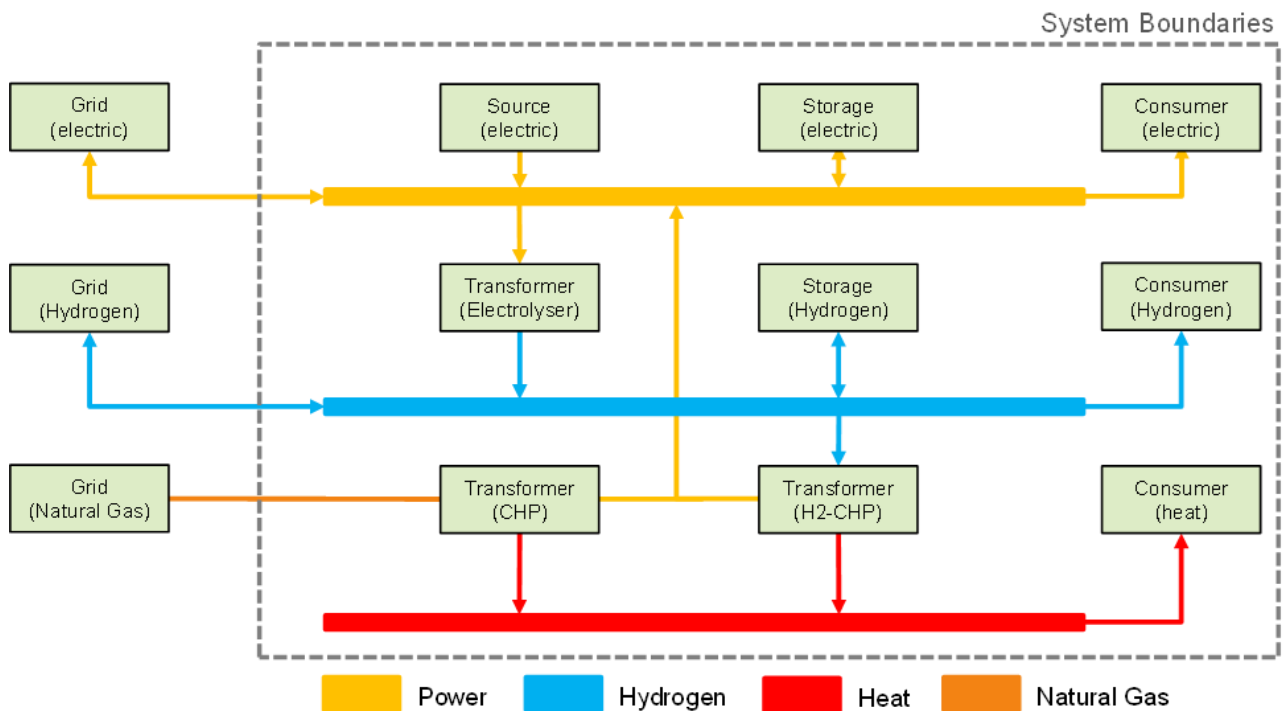


Abbildung 4: Lokales Multi-Sektorieller Energiesystem, Beispielanwendung und Demonstration der Fähigkeiten des DBI-MAT.

Neben der Betrachtung einer einzelnen Konfiguration des Systems gibt es die Möglichkeit zur Optimierung. Durch die freie Wahl der Optimierungsalgorithmen und -ziele können beliebige Optimierungsdaten bereitgestellt werden. Abbildung 5 zeigt eine beispielhafte Ausgabe, die mit DBI-MAT und einem Gittersuch-Optimierungsansatz erzeugt wurde.

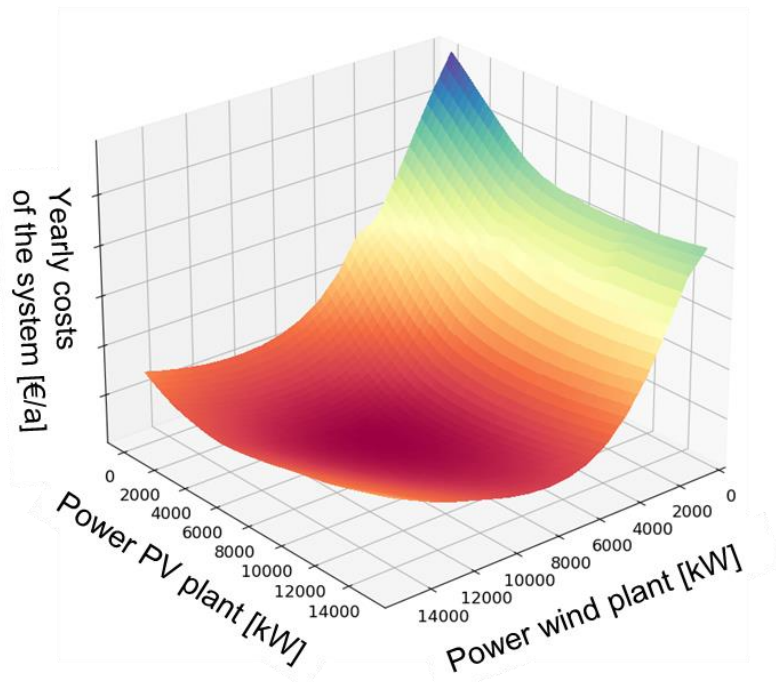


Abbildung 5: Parameteroptimierung mit dem DBI-MAT.

Das Programm unterstützt den involvierten Benutzer ebenfalls bei der Fehlersuche durch standardisierte Warnungen und Fehlermeldungen in der Programmierumgebung. Darüber hinaus wird ein Logfile mit diesen Meldungen ausgegeben und kann für die Auswertung von Eingaben und Lösungen verwendet werden.

Die numerischen Ergebnisse können in typischen Datenstrukturen (.csv, json, npm, ...) gespeichert werden, welche entweder in andere Dateiformate exportiert oder direkt für weitere Analysen oder Visualisierungen in Python verwendet werden können.

Weitere Einblicke in die Funktionsweise des Programmes sowie Details über mögliche Beispiele für Anwendungsfälle und deren Ergebnisse sind im SuperP2G-Tool unter <https://superp2g.external.dbi-gruppe.de/value-chains/DBI> zu finden.

II.1.4 H2- Index III

Als öffentlich zugängliches, benutzerfreundliches Berechnungsprogramm für die Analyse und Optimierung von Power-to-Gas-Systemen, sollte der H₂-Index II im Laufe des Projektes SuperP2G einem internationalen Publikum zugänglich gemacht werden. Im Laufe der Entwicklung wurde der komplette Berechnungshintergrund überarbeitet und durch das DBI-MAT ersetzt sowie die Benutzeroberfläche überarbeitet. Im Vergleich zum H₂-Index II wurden außerdem vereinfachte Eingabemöglichkeiten überall dort geschaffen, wo bisherige Nutzer entsprechendes Feedback gegeben haben. Desweiteren wurden auch Erweiterungen im Funktionsumfang umgesetzt, welche die Regionalisierung der Standorte dieser Power-to-Gas-Systeme auf internationalem Gebiet ermöglichen.

II.1.4.1 Anpassungen der Benutzeroberfläche

Basierend auf dem User-Input aus dem HYPOS-Workshop, wurde zunächst die Benutzeroberfläche des H₂-Index II intuitiver gestaltet. Dies betraf vor allem die komplexe Eingabemaske für die Kostenelemente der Komponenten. Die Eingabe wurde auf die in Abschnitt II.1.3.4 genannten Kostenelemente begrenzt und somit die Option entfernt, einzelne Komponenten aus Subkomponenten zusammenzustellen. Die Skalierungsabhängigkeit von spezifischen Installationskosten wurde ebenfalls aus der Benutzeroberfläche gelöscht. Nutzer, welche über derartige Informationen verfügen, können diese für die Optimierung von Systemkonstellationen interessanten Datensätze jedoch in der mitgelieferten SQLite Datenbank anpassen.

II.1.4.2 Flexibilisierung des EE-Potenzials

Nachdem im Laufe der Entwicklung des DBI-MAT detaillierte Modelle von PV- und Windkraftanlagen entstanden, wurde im H₂-Index III für diese technischen Elemente eine Oberfläche geschaffen, um dem Nutzer regionale Erzeugerpotentiale als Grundlage der Berechnungen anbieten zu können. Dazu wurde die bereits implementierte Bibliothek zur Geokodierung von Ortsnamen verwendet. Die

Methoden des DBI-MAT liefern dann die Erzeugerpotentiale als normierte Zeitreihen in stündlicher Auflösung. Diese werden anhand der eingegebene Anlagengröße skaliert.

Die Benutzeroberfläche ist in Abbildung 6 dargestellt, zwei Methoden für die Lokalisierung der Potentiale sind möglich.

- 1) Eingabe des Ortsnamens
- 2) Lokalisieren auf der Karte (per Mausklick)

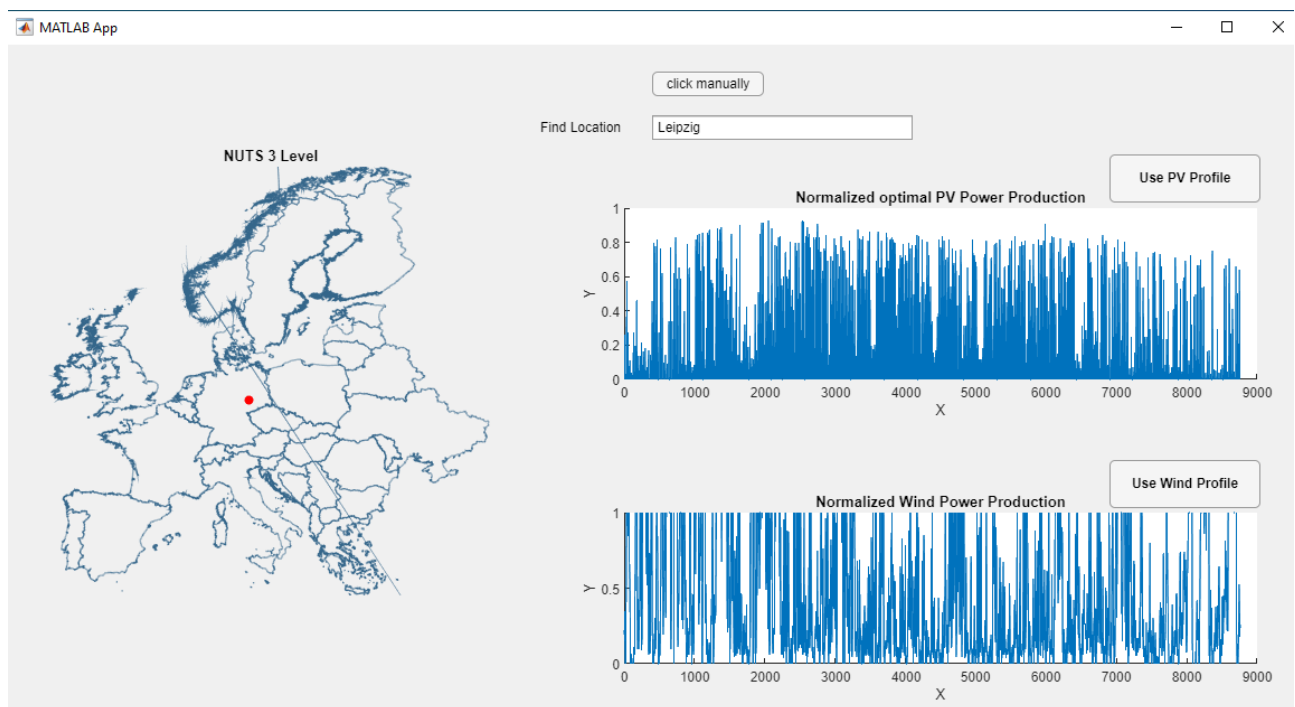


Abbildung 6: User Interface des H₂-Index III zur Ermittlung regionaler Potentiale erneuerbarer Energieträger

II.1.4.3 Wertschöpfungsketten

Mit Einführung des H₂-Index III wurden neue Wertschöpfungsketten definiert und in Python-Modelle umgesetzt, die die Fähigkeiten des Programms repräsentativ abbilden. Während die Wertschöpfungsketten in H₂-Index II noch auf die Berechnung von vordefinierten Komplettsystemen optimiert waren, stehen dem Anwender nun vier grundlegende Wertschöpfungsketten zur Verfügung. In diese Wertschöpfungsketten aufgeteilt, sind alle Funktionen und technischen Komponenten des Programmes für die Nutzer zugänglich.

Dazu gehören:

- Einbindung erneuerbarer Energiequelle (PV, Wind)
- Anbindung an das Stromnetz (Kostenstruktur, Energiemarkt)
- Zugang zu verschiedenen Elektrolysetechnologien (PEM, Alkalisch, SOEC)
- Wasserstoffspeicher (Obertrage, Untertage)
- Methanisierung (biologische Methanisierung)
- Transportmodellierung (Pipeline, Trailer)
- Abnehmer (Mengen, Profile)

Bei der Implementierung war es notwendig, jegliche Eingabe in die Benutzeroberfläche mit dem Python-Backend zu verknüpfen. Für eine Ausgabe der Ergebnisse jeder Berechnung sind ebenfalls Zugriffe auf spezifische Datenstrukturen des Python-Teils notwendig. Alle Funktionalitäten wurden daher schon während der Entwicklung mit automatisierten Testroutinen geprüft, um im fortlaufenden Entwicklungsprozess sicherstellen zu können, dass sie unverändert ist und korrekt ablaufen.

II.1.4.4 Veröffentlichung des Tools:

Das veröffentlichte Programmpaket besteht aus drei Eckpfeilern:

- User Interface; geschrieben in MATLAB und kompiliert zu einer .exe Datei
- Instanz des DBI-MAT; abgestimmt auf die Kopplung mit dem User Interface des H₂ Index III
- Datenbasis als MySQL Datei

Erklärung:

Für die Auslieferung wird die in Abschnitt II.1.3.6 beschriebene Datenbank in ein transferierbares Datenformat überführt (SQLite). Diese Datei enthält technische Parameter wie bspw. die Wirkungsgrade verschiedener Umwandlungsprozesse und wirtschaftliche Parameter wie z.B. die spezifischen Investitionskosten für einen Technologietyp.

II.1.5 SuperP2G Toolbox

II.1.5.1 Initiale Entwicklungsidee

Die Arbeiten an einem gemeinsamen Verständnis für das zu entwickelnde „SuperP2G Tool“ begannen mit der Initialen Präsentation zum Kick Off Meeting in Leipzig am 11.12.2019. Im Austausch mit allen Partnern wurden wichtige Eckpunkte analysiert:

- Welche Daten liegen vor?
- Welche Schnittstellen können identifiziert werden?
- Welche Anforderungen haben die zukünftigen Nutzer an die Ergebnisse?

Im Laufe des Bearbeitungszeitraumes des Projekts hat sich das gemeinsame Verständnis von diesem Tool weiterentwickelt. Der aus dem regelmäßigen Austausch entstandene ursprüngliche Ansatz ist in Abbildung 7 dargestellt.

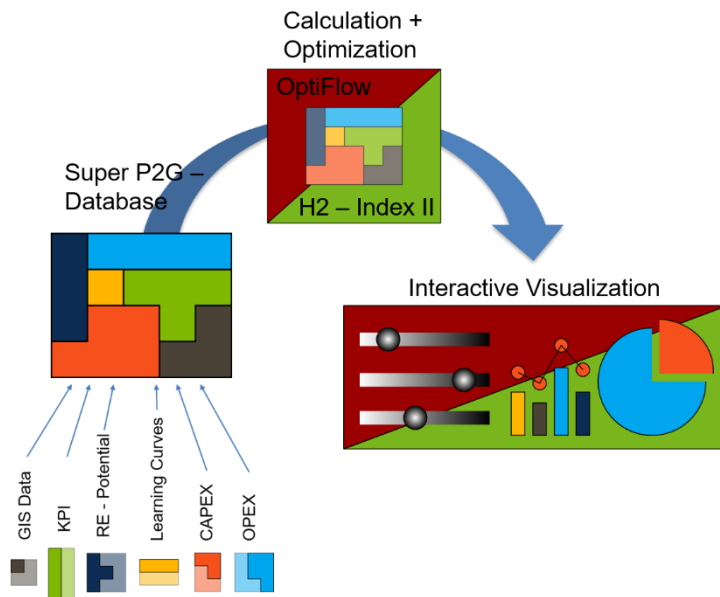


Abbildung 7: Ursprünglich geplante Struktur für das SuperP2G Tool in AP6.

Drei Hauptbereiche sollten getrennt erarbeitet werden:

- 1) Datengrundlage und Vorhersagemodellierung
- 2) Berechnungstool als Ergebnis der Verknüpfung von OptiFlow (DTU) und dem H2-Index II (DBI)
- 3) Interaktive Datenvisualisierung

Zu 1) Die Partner arbeiten in ihren jeweiligen Fachbereichen weiter daran, ihre Datengrundlage, eigenen Modelle und bestehenden Werkzeuge zu verbessern und zu erweitern.

Zu 2) In der gemeinsamen Anstrengung von DBI und DTU entsteht nach dem ursprünglichen Plan ein Berechnungswerkzeug, um dieses Know-how auf die aktuellen Fragestellungen im Themengebiet Power-to-Gas anzuwenden.

Zu 3) Schlussendlich war geplant, die Ergebnisse möglichst interaktiv und nachvollziehbar öffentlich zugänglich zu machen. Ein Dokument mit der Beschreibung des Ansatzes und den abgestimmten Anwendungsfällen (Lastenheft) wurde im Konsortium verteilt und diskutiert.

Es wurden Anwendungsfälle für die zu entwickelnde Software identifiziert, auf die gezielt hingearbeitet werden sollte. Es handelt sich um zwei Fälle:

- 1) Abbildung einer lokalen Power-to-Gas-Anlage: Hier wird die Anlage von Greenlab Skive („Need Owner“ für den dänischen Projektpartner) modelliert. Anhand des Modells sollen Optimierungspotentiale für Anlagendimensionierung und -betrieb analysiert werden.
- 2) Fragestellung der italienischen Partner: Anhand von regional aufgelösten Informationen soll der Standort für eine zentrale Power-to-Gas-Anlage in der Region Puglia gefunden werden.

Damit werden zwei Hauptthemen – dezentrale Prozessoptimierung und Standortwahl zentraler P2G Anlagen – bearbeitet und sollten zukünftig mit dem SuperP2G Programm erfassbar sein.

Auf diesem Wege gab es einige Herausforderungen:

- Greenlab Skive: Die Informationen über die Ausgestaltung des Anlagenkonzeptes an den Partner DTU waren lückenhaft und unbeständig. Die Planung von Zusammensetzung und

Betrieb der Anlage war bis zum Projektende nicht klar strukturiert, wodurch sich eine Vorhersage und Optimierung von Betriebsszenarien erschwerte. Von Seiten der DTU wurde sich daraufhin auf technischere Details der einzelnen Komponenten und Betriebsarten der Elektrolyse umorientiert. Eine Abbildung der geplanten Anlagen als Gesamtsystem wurde schlussendlich nicht abgeschlossen.

- Puglia: Das DBI-MAT ist in der Lage anhand bestehender Bedarfe (Strom und/oder H₂) und vorliegender Ressourcen (Strom aus EE) eine technisch passende Anlage auszulegen und im Rahmen von Planungsüberlegungen (Überdimensionierung einer Elektrolyse, Vorkehrungen für weitere zukünftige Abnehmer o.Ä.) Aussagen zu wirtschaftlichen Einflussgrößen zu treffen. Die überregionale Eingliederung einer solchen Anlage in bestehende oder zukünftige Transportketten (Stromverfügbarkeit, Anbindung an Energiemarkt, Transport zu weiteren H₂-Abnehmern) sollte mit dem Tool der DTU (OptiFlow) geschehen. Die Übersetzung des Programms der DTU war geplant, wurde aber mit einer erheblichen Verzögerung auf Anfang 2021 kommuniziert und schlussendlich verworfen.

Aufgrund des abzusehenden Entwicklungsrückstandes wurde das Bild vom gemeinsam entwickelten „SuperP2G Tool“ im Berichtszeitraum maßgeblich angepasst. Das Teilprojekt der dänischen Partner, die Entwicklung eines Open Source Tools aus Algorithmen des bestehenden Programmes OptiFlow, wurde verworfen. Stattdessen konzentrierten sich die Partner im Folgenden in ihren Arbeiten auf die bestehende Open Source Software „SPINE“. Das bedeutet allerdings auch, dass eine Kombination der beiden Programme H₂-Index II und OptiFlow zu einem gemeinsamen Werkzeug nicht mehr umgesetzt werden konnte. Stattdessen verschob sich nun der Fokus auf die interaktive Präsentation der individuell erzeugten Ergebnisse um den Stakeholdern einen strukturierten Überblick über die einzelne Themenfelder zu geben.

Es ergaben sich folgende Überlegungen:

- Die wichtigsten Inhalte bleiben erhalten und werden in der Form von Szenarienanalysen und Parametersensitivitäten einem breiten Publikum präsentiert.
- Die Zielgruppe erhält Zugang zu den wichtigsten Informationen online.
- Die Funktionalität von OptiFlow wird in Form der Software SPINE mit einer Open-Source Lizenz öffentlich verfügbar sein.
- Die Ergebnisse sind nicht mehr auf die Berechnungen mit „dem“ SuperP2G Tool beschränkt. Projektpartner können sich mit ihren spezifischen Teilvorhaben an den Inhalten beteiligen.

II.1.5.2 Finale Aufgabenstellung/ Lastenheft

Das finale Tool soll die Stakeholder dabei unterstützen, einen Einblick in die Auswirkungen der Installation von P2G-Lösungen in Bezug auf ihre spezifischen Bedürfnisse zu erhalten, wobei die folgenden Parameter besonders berücksichtigt werden sollen:

- Standort
- Größe
- Technologie
- Energie-Integration

- Netzinfrastruktur
- Betriebliche Zielsetzungen
- Operative Beschränkungen
- Entscheidungsebenen
- Quellen und Unsicherheiten (technologische Fähigkeiten und -Verfügbarkeit)
- Vorhersagen und Märkte

Damit ergeben sich die folgende Kernanforderungen an das SuperP2GTool:

Angestrebt wird eine Hauptseite, die die Verbindungen der Fachgebiete der Konsortialpartner visualisiert. Die Ziele des Projekts und der Inhalt der einzelnen Themenbereiche sollen hervorgehoben werden, um potenzielle Nutzer zu den gewünschten Inhalten zu führen. Zu diesem Zweck wird eine interaktive Datenvisualisierung mit zusätzlichen Textelementen erstellt. Von einer Übersichtsseite soll auf detailliertere "Fokus-Seiten" weitergeleitet werden, welche tiefer in die Ansätze und Ergebnisse der wissenschaftlichen Forschungsinhalte der Partner eintauchen.

Diese Anforderungen wurden in einem Lastenheft formuliert und externe Programmierer gefunden, welche bei der Umsetzung unterstützen konnten.

II.1.5.3 Umsetzung/ Ergebnis



Abbildung 8: Design der Start-Oberfläche des Webtools

Das Design, zu sehen in Abbildung 8, wurde auf Basis der unterschiedlichen Schwerpunkte der Projektpartner mit Hilfe des DBI-internen Marketing-Teams und den externen Web-Designern entwickelt und umgesetzt. Hinter jedem der Web-Elemente (Quadrate) verbergen sich Links zu den

Fokus-Seiten der Projektpartner, dargestellt am Beispiel für die Ebene „Processes & Technologies“ in Abbildung 9.

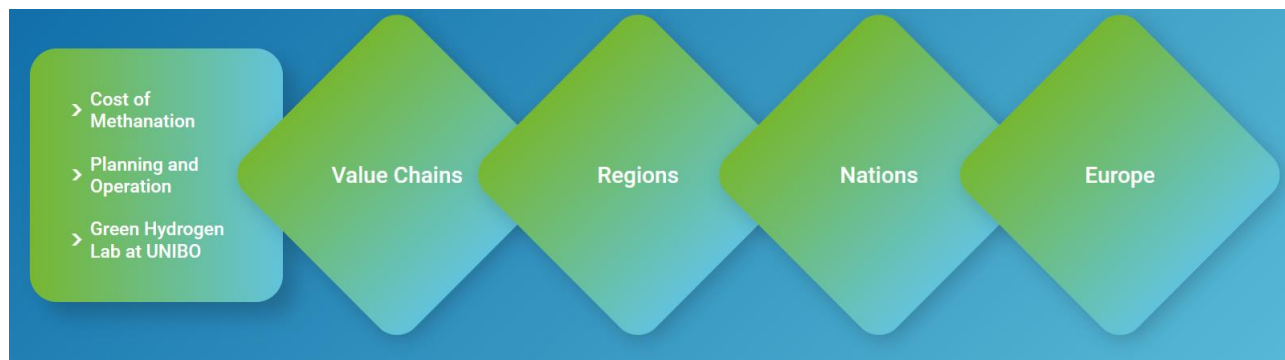


Abbildung 9: Zugang zu Links auf die Fokus-Seiten am Beispiel der Ebene „Processes & Technologies“

Die Fokus-Seiten sind nach Art und Inhalt an wissenschaftliche Poster angelehnt, auf denen die Aufgabenstellung, Methoden, Umsetzung und Ergebnisse präsentiert werden. Die Konsortialpartner haben während der Umsetzung außerdem großen Wert daraufgelegt, ihre eigenen Inhalte in möglichst interaktiv erfahrbarer Form zu präsentieren. Bei der Planung und Umsetzung dieser Vorgaben unterstützte das DBI in Kooperation mit den extern beauftragten Entwicklern. Die Inhalte wurden von den Partnern in Form von Textbausteinen und Grafiken sowie den interaktiven Elementen übersendet und vom DBI in das von den Entwicklern gestellte Framework überführt.



Abbildung 10: Prinzipielles Konzept der „Fokus-Seiten“ im Stil wissenschaftlicher Poster.

Abschließend folgte das Korrekturlesen von Inhalten und das UX-Testing, damit ist die „User Experience“ gemeint, also das Nutzererlebnis. Getestet wurden eine Vielzahl von Kombinationen aus verwendeten Browsern (z.B. Firefox, Edge, Internet Explorer, Chrome), verschiedenen Displayformaten (z.B. 16:9, 4:3, 16:10, 10:16, 3:4, 9:16) und unterschiedlichen Endgeräten wie Smartphone und Laptop. Ziel der Tests war es zunächst zu überprüfen, ob die Webanwendung in allen Kombinationen technisch funktionsfähig ist.

Nach Abschluss des ersten Tests wurde die Visualisierung der Inhalte überprüft. Dazu gehörte die Darstellung von Bildern und interaktiven Elementen in Relation zu einer dynamisch anpassbaren Anzeigefläche. Dazu gehört aber auch die Formatierung von Text und Funktionalitäten wie „Touch Control“, bei der z.B. auf dem Smartphone oder Laptop über das Touchpad mit zwei Fingern zum Startmenü „gewischt“ werden kann.

II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Rahmen des Projektes SuperP2G wurden die, gemäß der angepassten Arbeitsziele vorgesehenen Arbeiten durchgeführt. Für die Personalkosten konnte dabei das geplante und laut Zuwendungsbescheid genehmigte Budget eingehalten werden.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aus Sicht des Gesamtverbundes waren die durchgeführten Arbeiten notwendig, um das im vorliegenden Schlussbericht dargestellte Ergebnis zu erreichen.

II.4 Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das Projekt SuperP2G befasst sich mit der gesamten Thematik von Power-to-Gas in integrierten regionalen Energiesystemen, übergreifend über alle drei, vom Call geforderten Schichten des EU-Forschungsmodells. Es liefert der Öffentlichkeit frei zugängliche Werkzeuge in Form von Open-Source Software, welche anschließend für die Planung von Power-to-Gas Systemen verwendet werden können.

Ein Ziel besteht aus der Kommunikation der aggregierten Ergebnisse zum Potenzial von P2G in jedem Land der Projektpartner. Diese Ergebnisse haben eher politische Relevanz für die Regionalplanung. Die entsprechenden Interessensgruppen wurden schon im Verlauf des Projektes einbezogen.

Als Forschungsprojekt ist die wissenschaftliche Gemeinschaft ein wichtiger Profiteur, da der aktuelle Stand der Wissenschaft durch alle Teile des Projekts weiter vorangetrieben werden soll.

Diese Ziele werden erreicht durch die Veröffentlichung der Ergebnisse und die Bereitstellung der entwickelten Werkzeuge über eine zentrale Projekthomepage, welche auf nationaler Ebene über die Partner sowie auf europäischer Ebene von dem Unterauftragnehmer ERIG verbreitet werden kann.

II.5 Fortschritte auf dem Vorhabengebiet bei anderen Stellen während der Vorhabendurchführung

Im Verlauf des Vorhabens wurde kontinuierlich die Entwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse und Forschungsergebnisse verfolgt, um stets auf dem neuesten Stand zu bleiben, was sich insbesondere in der Anpassung der Zielstellung für das SuperP2G Tool widerspiegelt.

II.6 Veröffentlichungen des Ergebnisses

Zentraler Bestandteil der Kommunikationsstrategie ist die Projekthomepage und die sogenannten Standard-Kommunikationspakete. Sie bestehen aus Präsentationen in Lang- und Kurzfassung für das gesamte SuperP2G-Projekt sowie für jedes nationale Projekt. Die Strategie sieht auch gedruckte Medien wie Flyer und Broschüren vor. Das Paket konzentriert sich auf die Verbreitung der gebündelten Ergebnisse des Projekts in erster Linie an die Stakeholder in Industrie und Politik. Diese Aufgaben übernahm ERIG für das Konsortium in dem kontinuierlich, aktuelle Veröffentlichungen und Nachrichten über den Projektstand auf der Homepage aktualisiert wurden. Das Projekt wurde außerdem von ERIG auf internationalen Veranstaltungen vorgestellt.

Liste der Veröffentlichungen:

DBI-MAT Tool:

- open source <https://github.com/Deutsches-Brennstoffinstitut/DBI-MAT>

H₂-Index III

- closed source <https://github.com/Deutsches-Brennstoffinstitut/H2-Index-III>

Superp2G Tool

- Webseite <https://superp2g.external.dbi-gruppe.de/>

Wissenschaftliche Veröffentlichungen:

- „Techno-economic optimization and system integration of power-to-gas at different geographical scale in Europe” [18]

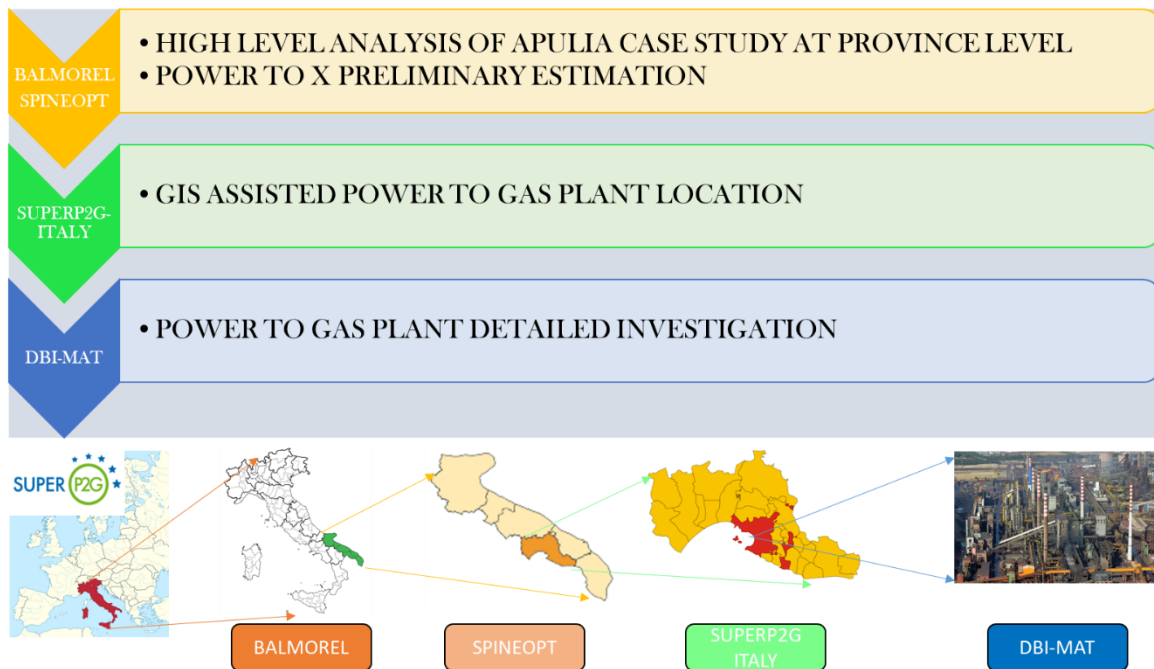


Abbildung 11: Der vorgeschlagene Ansatz für die Anwendung von drei SuperP2G-Tools in einer Fallstudie für die Region Apulien

Manuskripte

- Techno-economic optimization of Power to Hydrogen plants to the railway sector: an Italian case study. (Work in Progress)
- Techno-economic optimization and system integration of power-to-gas at different geographical scales: an Italian case study (Manuscript Number: ECM-D-23-005266, Energy Conversion & Management) [11]

III Literaturverzeichnis

- [1] Store&Go Projekt Homepage. <https://www.storeandgo.info/index.html>, abgerufen am: 21.07.2023
- [2] Münster, M., Morthorst, P. E., Stryg, M., Aryal, N., Kofoed, M. V. W., Jensen, T. K., Ahlgren, E., Buchholz, S. u. Pisinger, D.: Final FutureGas report (2020)
- [3] The OptiFlow Model Structure, Ravn, H., 2017
- [4] Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen der Kostenberechnung. VDI 2067, Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2012
- [5] Heckner, M.: Wirtschaftliche Analyse des Wasserstoff-Pilotprojektes „Energiepark Bad Lauchstädt“ auf Grundlage mathematischer Modellierung, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig Masters Thesis. Leipzig 2022
- [6] Huld, T., Müller, R. u. Gambardella, A.: A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. Solar Energy 86 (2012) 6, S. 1803–1815
- [7] geopy. 2022
- [8] Barani Design Technologies s.r.o.: ESTIMATE WIND SPEED ABOVE YOUR ANEMOMETER. <http://www.wind101.net/wind-height/index.htm>, abgerufen am: 15.08.2023
- [9] Aliyev, E., Filiz, V., Khan, M. M., Lee, Y. J., Abetz, C. u. Abetz, V.: Structural Characterization of Graphene Oxide: Surface Functional Groups and Fractionated Oxidative Debris. Nanomaterials (Basel, Switzerland) 9 (2019) 8
- [10] Betz, A.: Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnützung des Windes durch Windmotoren. Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen (1920)
- [11] Guzzini, A., Brunaccini, G., Fischer, F., Rosendal, M. B., Aloisio, D., Munster, M., Pellegrini, M., Pampa, M., Borrelli, L., Saccani, C., Sergi, F. u. Bramstoft, R.: Techno-economic optimization and system integration of power-to-gas at different geographical scales: an Italian case study
- [12] Holmgren, F. W., W. Hansen, C. u. A. Mikofski, M.: pvlib python. A python package for modeling solar energy systems 3(29), 884,. JOSS 2018
- [13] Guzzini, A., Pellegrini, M., Saccani, C., Münster, M., Rosendal, M., Borrelli, L., Bramstoft, R., Sergi, F., Brunaccini, G., Aloisio, D., Ferraro, M., Pampa, M., Fisher, F. u. Verrone, A.: Techno-economic optimization and system integration of power-to-gas at different geographical scale in Europe. 2022
- [14] Cerbe, G. u. Wilhelms, G.: Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG 2021
- [15] Sunfire GmbH: Hylink-Model SOEC - Solid Oxide Cell Electrolyzer Datasheet. <https://www.energy-xprt.com/downloads/sunfire-hylink-model-soec-solid-oxide-cell-electrolyzer-datasheet-1091054>, abgerufen am: 15.08.2023
- [16] SuperP2G Web Tool. <https://superp2g.external.dbi-gruppe.de/processes-and-technologies/EBI>, abgerufen am: 19.07.2023
- [17] The pandas development team: pandas-dev/pandas: Pandas. Zenodo 2020
- [18] Guzzini, A., Pellegrini, M., Saccani, C., Marie, M., Rosendal, M. B., Lorenzo, B., Rasmus, B., Francesco, S., Giovanni, B., Marco, F. u. others: Techno-economic optimization and system integration of power-to-gas at different geographical scale in Europe. 17th conference on sustainable development of energy, water and environment systems-book of abstracts. 2022, S. 210