

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Schlussbericht zu Nr. 8.2 BMBF – NKBF 98

für das Verbundvorhaben

**„EnStadt-ENaQ: Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst
Oldenburg“**

Teilvorhaben

„Detaillierte Auslegung, Design und Bau von H2-Speichermodulen“

Projektlaufzeit: 01.01.2018 – 31.12.2024

Förderkennzeichen: 03SBE111N

Argo-Anleg GmbH

Autoren: Jan Andreas

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Inhalt

1.	Kurzbericht.....	3
1.1.	Aufgabenstellung	3
1.2.	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde.....	7
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2.	Eingehende Darstellung.....	9
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	9
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	12
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	13
2.4.	Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	13
2.5.	Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	15
2.6.	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	15
2.7.	Abbildungsverzeichnis.....	15
2.8.	Literaturverzeichnis.....	15

1. Kurzbericht

1.1. Aufgabenstellung

Das Projekt ENaQ (Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg) [Laufzeit: 2018 – 2024] hatte die Entwicklung eines klimafreundlichen Wohnquartiers auf dem ehemaligen Militärgelände Fliegerhorst in Oldenburg zum Ziel. Das Projekt-Konsortium bestand aus 21¹ überwiegend regionalen Partnern aus den Bereichen Wissenschaft, Öffentliche Verwaltung und Wirtschaft. Das Gesamtprojekt gliederte sich in die drei Säulen (1) Physische Infrastruktur, (2) Ko-Kreation und (3) Digitale Plattform. Das Projekt folgte einem Reallabor-Ansatz.

Argo-Anleg GmbH war für die Planung, Entwicklung und Realisierung der Wasserstoffthematik zuständig. In folgenden Arbeitspaketen war Argo-Anleg involviert:

AP1-1: Konzeption und Planung der physischen Infrastruktur

- AS 1-1.2 Regeln für die datentechnische Anbindung von Energiesystemkomponenten und Konzeption der Anbindung der physischen Infrastruktur
- AS 1-1.6 Infrastruktur- und Planungsdocumentation

AP 2-1: Aufbau der physischen Infrastruktur

- AS 2-1.1: Normung/Standardisierung: Umsetzung von Standards und Normen in ingenieur-technische Lösungen und Diskussion von Normungslücken mit den Arbeitskreisen
- AS 2-1.4: Realisierung der Wärmeversorgungsnetze und Komponenten
- AS 2-1.5: Realisierung der Wasserstoffherzeugung und Verteilung
- AS 2-1.6: Realisierung der Methanversorgung (Netzbezug oder lokale Synthese)
- AS 2-1.9: Realisierung der Sensorik-, Daten- und Kommunikationsnetzwerke
- AS 2-1.11: Wasserstoffinfrastrukturumsetzung

AP: 3-1: Evaluation der physischen Infrastruktur

- AS 3-1.1: Normung / Standardisierung der datentechnischen Anbindung von Sensoren und physischer Infrastruktur

1.2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Oldenburg ist eine Großstadt (175.077 Einwohner*innen) in Nordwestdeutschland und gehört seit April 2005 zur europäischen Metropolregion Nordwest. Als Verwaltungs- und Universitätsstadt zieht Oldenburg viele Pendler*innen aus der Umgebung an. Insgesamt waren 87.523 Beschäftigte bei einer Bevölkerungszahl von 172.830 Personen im Jahr 2022 in Oldenburg beschäftigt. Dies ergibt eine Beschäftigtenquote von 60,2 %. Die drei größten Gruppen von Beschäftigten stellten in Oldenburg 2022 der Dienstleistungsbereich (67% Beschäftigte), der Handel, Gewerbe und Verkehr (21% Beschäftigte) sowie das produzierende Gewerbe (12% Beschäftigte) [1]. Oldenburgs Wirtschaft ist heute durch einen dynamischen Mittelstand und einen starken Dienstleistungssektor geprägt, etwa im Bereich der Banken und Versicherungen. Oldenburg gilt als Zentrum der Informationstechnologie. Dieser Bereich stellt, genau wie etwa der der Erneuerbaren Energien oder die Gesundheitswirtschaft, einen Schwerpunkt in der Arbeit der städtischen Wirtschaftsförderung dar.

Oldenburg hat in den letzten Jahren einen Anstieg der Bevölkerung erlebt (siehe Abbildung 1). Die Bevölkerungsstruktur setzte sich im Jahr 2019 wie folgt zusammen:

0-18 Jahre: 27.459

19-44 Jahre: 67.811

45-64 Jahre: 46.816

65-79 Jahre: 22.621

80-99 Jahre: 9.693

100-111 Jahre: 34

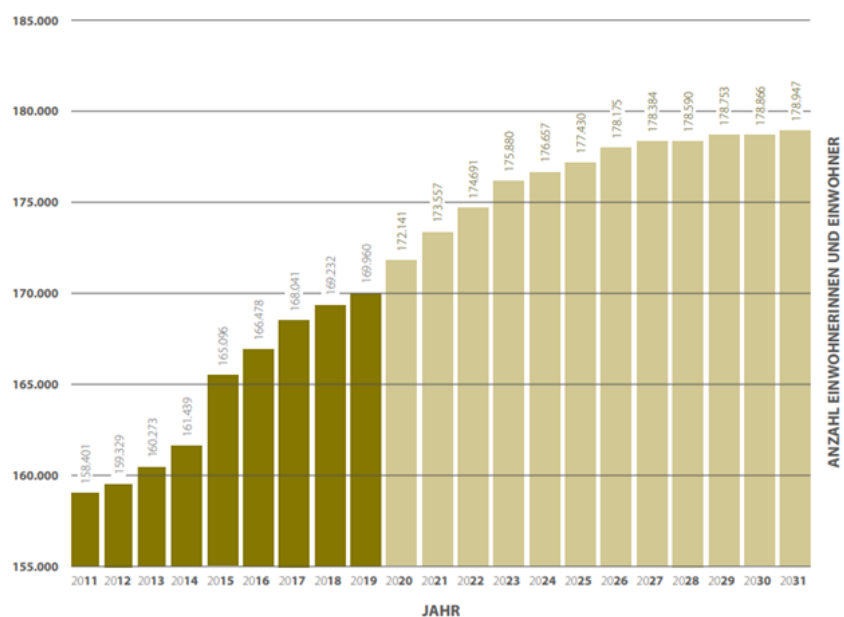


Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung der Stadt Oldenburg

Es ist anzunehmen, dass sich im Kontext des demographischen Wandels der Anteil der älteren Bevölkerungsgruppen erhöhen wird. Auch der Anteil der Menschen mit Migrationshintergrund steigt [2].

Oldenburgs Siedlungsstruktur ist geprägt von einer großen Zahl an Ein- und Zweifamilienhäusern mit Garten. Die wachsende Bevölkerung hat in den letzten Jahren zu einem Anstieg der Wohnkosten geführt.

Der zivile Flugplatz „Fliegerhorst“ wurde unter den Nationalsozialisten in den 1930er Jahren zum militärischen Fliegerhorst ausgebaut. Nach dem Zweiten Weltkrieg nutzten ihn erst die Alliierten,

später die Bundeswehr, als Militärgelände. 308 Hektar beträgt die Gesamtfläche des Fliegerhorstes, 192 davon liegen auf dem Gelände der Stadt Oldenburg. Die Entwicklung des Fliegerhostgeländes begann 2015, als die Stadt Oldenburg zur Entwicklung des neuen Stadtteils einen umfassenden Beteiligungsprozess initiierte [3]. Über Ideenkarten und eine Ausstellung, um die Leitsätze zu konkreten städtebaulichen Entwürfen zu fassen, organisierte die Stadt Oldenburg zwei Innovationscamps. Hier diskutierten die rund 100 Teilnehmerinnen und Teilnehmer unterschiedliche Pläne und Modelle für den neuen Stadtteil und einigten sich auf eine Variante [4]. 2016 beschloss der Rat einstimmig den Masterplan Fliegerhorst. Er baut auf den Ergebnissen der Bürgerbeteiligung auf und ist die Grundlage für konkrete Bebauungspläne, sowie für die weitere Entwicklung des neuen Stadtteils. Im Jahr 2017 wurde mit der Kampfmittelbeseitigung im ersten Baufeld am Mittelweg begonnen. Neben Blindgängern aus dem Zweiten Weltkrieg befinden sich auf dem gesamten Fliegerhorst Munitionsreste, die in der Nachkriegszeit von den Alliierten vergraben wurden. Im Jahr 2017 formierte sich ein Konsortium aus 21 vorwiegend lokalen Projektpartnern, welches einen Antrag für das Projekt *Energetisches Nachbarschaftsquartier Fliegerhorst Oldenburg* (ENaQ) entwickelte. Das Projekt wurde im Rahmen der Förderung von Forschung, Entwicklung und Demonstration auf dem Gebiet energieeffizienter Gebäude und Quartiere in der Förderinitiative »Solares Bauen – Energieeffiziente Stadt« beantragt und im Rahmen des sechsten Energieforschungsprogramms gemeinschaftlich von den Bundesministerien für Bildung und Forschung (BMBF) sowie Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert (Projektstart 2018). Das Projekt bezieht sich lediglich auf ein 3,8 ha großes Quartier Helleheide auf dem Fliegerhorst-Gelände. Seit 2019 werden die ersten Grundstücke auf dem Fliegerhorst-Gelände (nicht Helleheide) vermarktet. Insgesamt sollen ca. 1.000 Wohneinheiten auf dem Fliegerhorst entstehen, welche Wohnraum für 2.500 bis 3.000 Menschen bieten sollen (Stadt Oldenburg 2020). Verzögert durch die Kampfmittelsondierung und Corona-Pandemie, begann 2021 auch der Bau der ersten Gebäude im ENaQ Projektgebiet.

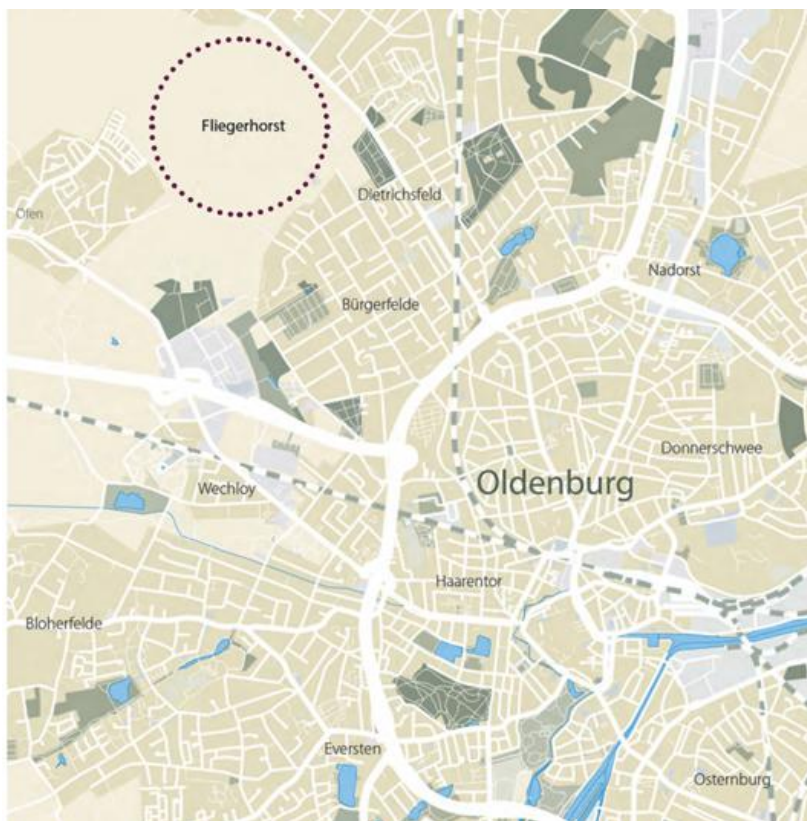


Abbildung 2: Lage des Fliegerhorstes in Oldenburg



Abbildung 3: Karte des ENaQ-Gebiets auf dem Fliegerhorst sowie Darstellung eines Zukunftsszenarios (Quelle: Stadt Oldenburg, Jens Gehrken)

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Erste Planungsphase: Wasserstoffinfrastruktur im Energiequartier

Im Rahmen des Projekts wurde zunächst die Planung einer Wasserstoffinfrastruktur im Energiequartier aufgenommen. Ziel war es, eine integrierte Lösung zu entwickeln, die die Erzeugung von Wasserstoff durch die Firma NPP sowie dessen Speicherung, Nutzung und Verteilung durch die Firma Argo-Anleg innerhalb des Quartiers miteinander verbindet. In dieser frühen Phase wurden unterschiedliche Konzepte zur Energieversorgung und -speicherung auf ihre Machbarkeit geprüft und eine geeignete räumliche Verortung ermittelt.

Planung der H₂-Anlage auf der Technikinsel

Als zentraler Standort für die geplante Wasserstofferzeugung wurde die sogenannte Technikinsel vorgesehen. Dort sollten die erforderlichen Anlagen für die Elektrolyse und auch für die mobile Zwischenlagerung errichtet werden. Diese Standortwahl versprach eine gute technische Anbindung an die Infrastruktur des Quartiers sowie eine räumliche Trennung von sensiblen Wohnbereichen.

Wirtschaftliche und technische Rahmenbedingungen

Im Verlauf der Projektentwicklung zeigten sich jedoch erhebliche wirtschaftliche und technische Hürden. Die betriebswirtschaftlichen Analysen machten deutlich, dass die Erzeugung von Wasserstoff direkt im Quartier langfristig nicht wirtschaftlich darstellbar wäre.

Ein weiterer zentraler Punkt war das Fehlen eines dauerhaften Überschusses an elektrischer Energie, der für die Wasserstoffproduktion im Quartier hätte genutzt werden können. Da keine nennenswerten Energiemengen zur Verfügung standen, konnte die Elektrolyse nicht in den ursprünglich geplanten Umfang integriert werden. Damit fehlte die Grundlage, um eine kontinuierliche und kosteneffiziente Wasserstofferzeugung zu gewährleisten.

Gesellschaftliche Akzeptanz

Neben den wirtschaftlichen und technischen Faktoren spielte auch die gesellschaftliche Akzeptanz eine entscheidende Rolle. Die Errichtung einer Anlage zur Erzeugung, Speicherung und Verteilung von hochentzündlichem Wasserstoff innerhalb eines Wohnquartiers erwies sich langfristig als nicht vermittelbar. Bedenken hinsichtlich Sicherheit, Emissionen und der Nähe zu Wohnbereichen führten dazu, dass eine Umsetzung in diesem Umfeld nicht realisierbar war.

Weiterentwicklung außerhalb des Quartiers

Aufgrund technischer, logistischer und regulatorischer Einschränkungen war eine Einbindung der Wasserstoffanlagen in die Infrastruktur des Quartiers nicht mehr realisierbar. Vor diesem Hintergrund verlagerte sich der Schwerpunkt der Projektarbeit auf externe Standorte.

Die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse wurde durch die Firma NPP am Standort Vechta fortgeführt. Parallel dazu erprobte die Firma Argo-Anleg ihre mobile Anlage zur Speicherung, Nutzung und Verteilung von Wasserstoff am Standort Wesel.

Dieser Ansatz ermöglichte es, die relevanten technologischen Fragestellungen sowie innovative Lösungsansätze in einem geeigneten Umfeld zu testen, ohne dabei die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen eines Wohnquartiers berücksichtigen zu müssen.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an dem angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt der Antragstellung im Jahr 2017 befand sich die Wasserstoffwirtschaft noch in einer frühen Entwicklungs- und Orientierungsphase. Zwar wurden erste Pilotprojekte in Industrie und Forschung durchgeführt, jedoch existierten noch keine etablierten Standards oder breit anwendbare Lösungen für die dezentrale Nutzung von Wasserstoff als Energieträger im kleinen Maßstab. Insbesondere für die Integration in urbane Quartierskonzepte lagen kaum praktische Erfahrungen vor.

Die bis dahin verfügbaren Technologien waren überwiegend auf großindustrielle Anwendungen ausgelegt, etwa in der chemischen Industrie oder für den Einsatz im Schwerlastverkehr. Für die Nutzung in einem Energiequartier fehlten hingegen Lösungen, die kompakt, wirtschaftlich tragfähig und zugleich sicher im unmittelbaren Wohnumfeld betrieben werden konnten. Auch Fragen der Sektorkopplung, also die Verbindung von Strom-, Wärme- und Mobilitätsanwendungen über Wasserstoff, waren wissenschaftlich noch wenig untersucht und technisch kaum erprobt.

Mit dem ENaQ-Projekt sollte diese Lücke adressiert werden. Ziel war es, eine multifunktionale Wasserstoffanlage zu konzipieren und zu validieren, die in der Lage ist, die unterschiedlichen energetischen Anforderungen eines Quartiers abzudecken. Dazu zählten die Nutzung von überschüssiger elektrischer Energie zur Elektrolyse, die Speicherung von verdichtetem Wasserstoff als Langzeitspeicher, die Rückverstromung bei Bedarfsspitzen sowie die Nutzung im Bereich der Wärmeversorgung und Mobilität.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Planung und Entwicklung der Wasserstoffinfrastruktur erfolgte in enger Kooperation mit verschiedenen Partnern, die jeweils spezifische fachliche Kompetenzen in das Projekt einbrachten.

Die Firma NPP übernahm die Verantwortung für die Planung und spätere Realisierung der Wasserstofferzeugung. Hierbei stand insbesondere die Konzeption und Auslegung der Elektrolyseanlage im Vordergrund. In enger Abstimmung wurden Fragen der Dimensionierung, der Integration in das Energieversorgungssystem sowie die technischen Schnittstellen zu den weiteren Anlagenkomponenten erarbeitet.

Die Firma Argo-Anleg war für die Speicherung, Distribution und Rückverstromung des erzeugten Wasserstoffs zuständig. Gemeinsam mit NPP wurden die notwendigen Prozessketten entwickelt und aufeinander abgestimmt. Dadurch konnte verfahrenstechnisch und softwareseitig ein durchgängiges Systemkonzept entstehen, das sowohl die Erzeugungsseite als auch die nachgelagerten Anwendungen berücksichtigt. Durch die digitale Vernetzung ist die Anlage in der Lage Prognosedaten, Lastprofile und Verfügbarkeiten zu berücksichtigen und zum energieoptimierten Betrieb des Quartiers beizutragen.

Die enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Unternehmen ermöglichte eine hohe fachliche Tiefe in der Planung. Gleichzeitig war sie notwendig, um die komplexen Schnittstellen zwischen Erzeugung, Speicherung, Nutzung und Verteilung von Wasserstoff sowie deren Einbettung in das Energiesystem des Quartiers ganzheitlich zu betrachten.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

AP1-1: Konzeption und Planung der physischen Infrastruktur

Im Rahmen des Arbeitspakets AP1-1 hat Anleg die gesamte Infrastrukturplanung aktiv begleitet und unterstützt.

Zur Infrastrukturplanung gehören zentrale Themenfelder wie Mobilität, Energieversorgung, Photovoltaikanlagen sowie das Wärmenetz. Ursprünglich war auch der Einsatz von Wasserstoff für die Wärme- und Stromversorgung vorgesehen. Da die Wasserstofftechnologie jedoch am Ende der Energiekette steht, war eine enge und kontinuierliche Abstimmung mit allen Projektpartnern erforderlich, um Schnittstellen und Abhängigkeiten frühzeitig zu berücksichtigen.

Im Zuge der Planung wurden Wasserstoffanlagen für die sogenannte Technikinsel detailliert ausgearbeitet und dimensioniert. Im weiteren Verlauf hat sich jedoch herausgestellt, dass der Betrieb von Wasserstoffanlagen unter energetischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht effizient realisierbar ist. Zudem wurde entschieden, die Technikinsel nicht für den Aufbau und Betrieb der Pilot-Wasserstoffanlagen aufgrund der Sicherheit im Wohnquartier zu nutzen.

Damit war eine grundlegende Anpassung der Infrastrukturkonzeption notwendig. Der Fokus verlagerte sich verstärkt auf alternative Lösungen im Bereich erneuerbare Energien und intelligente Netzanbindung, um sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems sicherzustellen.

AP 2-1: Aufbau der physischen Infrastruktur

Die ursprünglich geplante Wasserstoffinfrastruktur im ENaQ-Projekt setzte sich aus einem Elektrolyseur zur Erzeugung von Wasserstoff aus regenerativem Strom sowie einer mobilen Anlage zur Speicherung, Verdichtung und Verteilung von Wasserstoff zusammen. Ergänzend wurde überlegt, eine Wasserstoff-Brennwerttherme für die Wärmeversorgung eines Bestandsgebäudes zu integrieren. Ziel dieses Konzepts war es, eine flexible und dezentrale Energiebereitstellung auf Wasserstoffbasis zu ermöglichen und damit Schwankungen zwischen erneuerbarer Stromerzeugung und dem Wärme- und Strombedarf im Quartier auszugleichen. Damit wurde die Wasserstoffinfrastruktur als ein mögliches Bindeglied innerhalb der lokalen Energiewertschöpfungskette betrachtet.

Ein zentrales Element war der mobile Speicher, der als praktikabelste Lösung identifiziert wurde, da er eine flexible Nutzung an verschiedenen Standorten innerhalb und außerhalb des Quartiers erlaubt. Durch die Mobilität konnten sowohl Betriebs- als auch Demonstrationsszenarien abgedeckt werden. Zudem sollte das Handling bewusst einfach gestaltet werden, um den Bedienerkreis zu erweitern und die Einsatzmöglichkeiten zu erhöhen. Die Betriebsparameter wie Druck, Temperatur, Füllgrad und Effizienz wurden systematisch erfasst, in die Simulation des Gesamtsystems eingebunden und dienten als Grundlage für die Prognose von Leistungsdaten und Verbrauchsprofilen. Parallel prüfte EWE NETZ, inwiefern eine Versorgung eines Bestandsgebäudes mittels einer Wasserstoff-Brennwerttherme umsetzbar ist. Da das Gebäude aufgrund seines geringen Sanierungsstandes auf hohe Vorlauftemperaturen angewiesen ist, stellte Wasserstoff eine technisch interessante Option

dar. Leitungsverläufe und infrastrukturelle Anpassungen wurden schematisch dargestellt und bewertet.

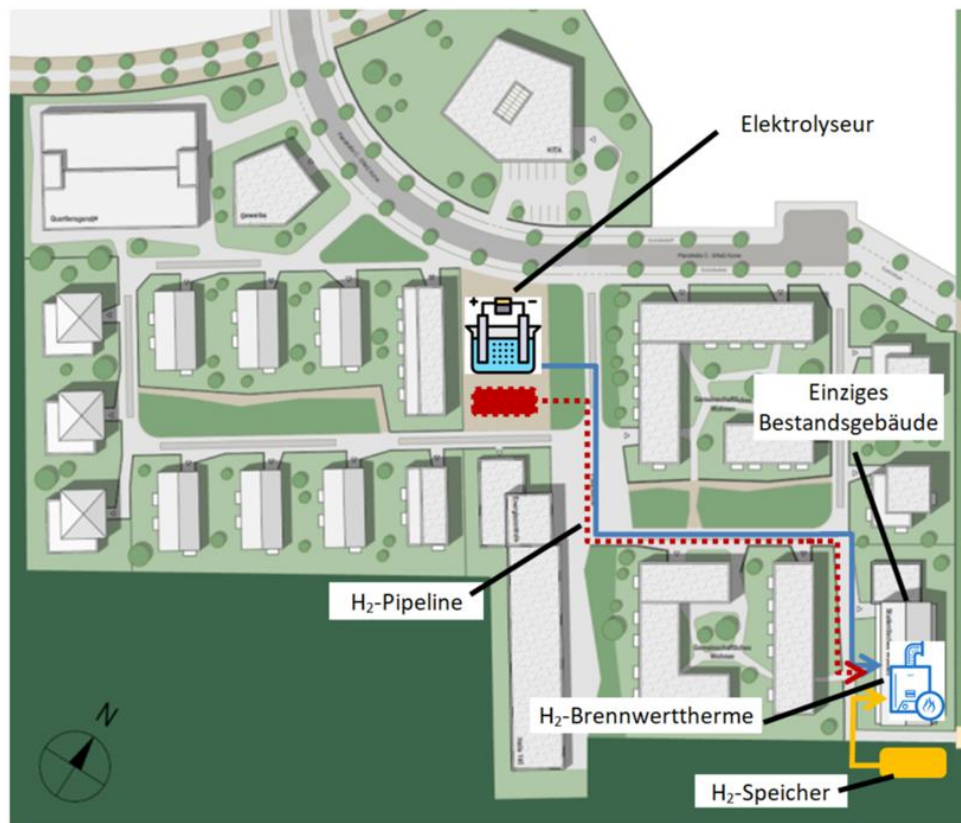


Abbildung 4: Planung H2-Pipeline

Im weiteren Projektverlauf wurde jedoch entschieden, die Technikinsel sowie eine langfristige Wasserstoffinfrastruktur nicht weiter zu verfolgen, da sie nicht mehr mit den Quartierszielen im Einklang standen. Die technologische Entwicklung wurde dennoch fortgeführt: Der von NPP entwickelte Elektrolyseur wurde in Vechta aufgebaut und getestet, während die mobile Wasserstoffanlage von Anleg in Wesel gefertigt und validiert wurde. Argo-Anleg nutzte sein unternehmenseigenes Testfeld, um die Bedingungen des Quartiers unter Realbedingungen zu simulieren und Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilgewerken zu verifizieren. Dadurch konnte die Machbarkeit und Funktionsfähigkeit der entwickelten Komponenten unabhängig vom realen Quartier nachgewiesen werden.

Die mobile Wasserstoffanlage wurde als multifunktionale Energieplattform konzipiert. Sie verfügt über modulare Ein- und Ausgangsschnittstellen, die mit Adaptern erweitert werden können, um die Kompatibilität zu unterschiedlichen Speicher- und Verteilkonzepten sicherzustellen. Ein elektrisch betriebener Kompressor ermöglicht die Verdichtung des zugeführten Wasserstoffs auf bis zu 500 bar, wodurch eine effiziente Speicherung größerer Mengen realisierbar ist. Über eine integrierte 350-bar-Füllkupplung kann gespeicherter Wasserstoff direkt für Mobilitätsanwendungen wie Brennstoffzellenfahrzeuge abgegeben werden. Ergänzend ist eine 5-kW-Brennstoffzelle integriert, die eine Rückverstromung des Wasserstoffs erlaubt. Der erzeugte Strom kann über eine handelsübliche 230-V-Schuko-Steckdose entnommen und damit dezentral als regenerativer Stromgenerator genutzt werden. Zusätzlich realisierte NPP stationäre Gewerke zur Speicherung und Verdichtung, wodurch die mobile Speichereinheit flexibel mit Wasserstoff versorgt und in unterschiedliche Infrastrukturszenarien eingebunden werden konnte.

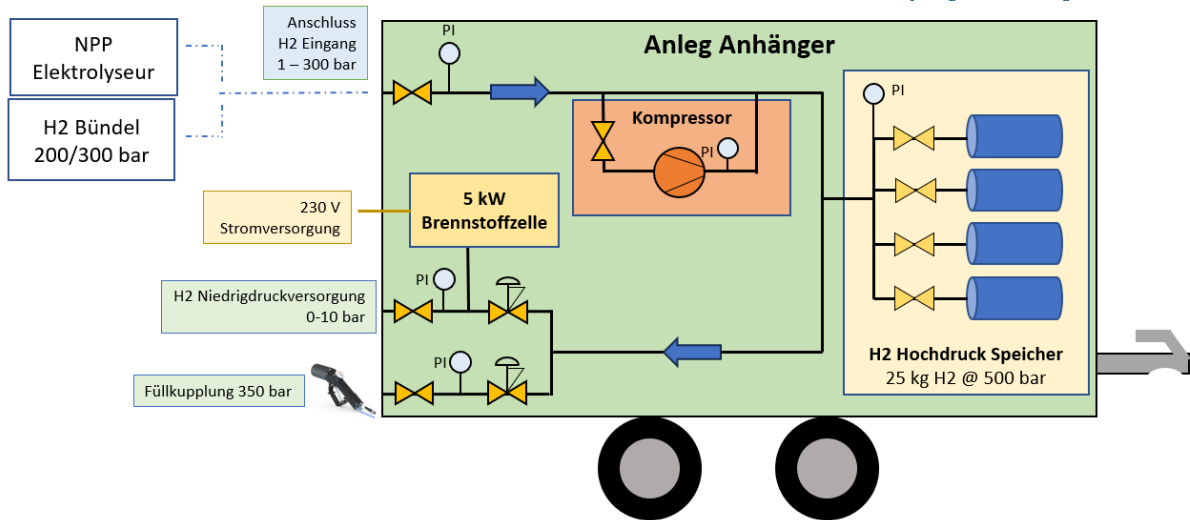


Abbildung 5: Argo-Anleg H2-Energieanhänger - Schematischer Aufbau

Die entwickelte Infrastruktur ermöglicht nicht nur die Untersuchung von Systemwirkungsgraden und Effizienzverlusten entlang der gesamten Prozesskette von Elektrolyse, Speicherung, Verdichtung und Rückverstromung, sondern auch die Analyse von Betriebsszenarien im Kontext schwankender erneuerbarer Energieerzeugung. Sie stellt darüber hinaus eine skalierbare Plattform für die Erprobung von Flexibilitätsoptionen, Lastverschiebungen und Versorgungsstrategien dar. Trotz der Entscheidung, keine langfristige Integration ins Quartier vorzunehmen, konnte durch die entwickelten und getesteten Komponenten ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung der Wasserstofftechnologie für dezentrale Energiesysteme geleistet und eine Grundlage für zukünftige Anwendungen in urbanen Energiesystemen geschaffen werden.



Abbildung 6: Aufstellung des H₂-Energieanhängers in der ENaQ Abschlussveranstaltung

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Größte Anteil der Kosten ist in Form von Personalkosten aufgetreten, der zur Abdeckung der Entwicklungsarbeit und zur Umsetzung des Aufbaus des Prototyps erforderlich war. An zweiter Stelle stehen die Abschreibungen auf vorhabenspezifische Anlagen, die zum größten Teil durch Hauptkomponenten der Anlage verursacht wurden.

Hierzu gehören die primären Funktionen des Typ4 Hochdruckspeichers, Kompressoren und der Brennstoffzelle, die zum Speichern, Verdichten und Rückverstromen des Wasserstoffs zuständig sind.

Aufgrund der Optimierung des Wasserstoff-Energieanhängers sind sonstige unmittelbaren Vorhabenkosten angefallen. Diese beinhalten die Programmierung des Kommunikations- und Steuerungssystems, das Engineering und die Simulationssupport. Die ausführliche Darstellung der Kosten ist dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten waren für die Erreichung der Projektziele notwendig, angemessen und in ihrem Umfang ausreichend. Ohne die gewährte Förderung wäre eine Durchführung der von Anleg übernommenen Aufgaben nicht möglich gewesen. Die erzielten Projektergebnisse sowie die im Verlauf erworbenen methodischen und fachlichen Kompetenzen verschaffen Anleg aufgrund ihrer hohen Praxisrelevanz einen direkten und nachhaltigen Nutzen.

2.4. Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen des ENaQ-Projekts wurde eine projektspezifische Prototyp-Anlage entwickelt. Eine unmittelbare wirtschaftliche Verwertung dieser Anlage ist nicht möglich, da die erarbeiteten Lösungen nicht direkt marktrelevant sind und die eingesetzte Anlage bereits deutliche Verschleißerscheinungen aufweist. Dennoch konnten durch die Realisierung wertvolle technische und organisatorische Erfahrungen gewonnen werden, die eine wichtige Grundlage für zukünftige Projekte und Weiterentwicklungen darstellen.

Besonders prägend war die Erkenntnis, dass sich einzelne Komponenten, die im Vorfeld als vielversprechend eingestuft wurden, nicht bewährt haben. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass die eingesetzten Kompressoren erhebliche Qualitätsmängel aufwiesen und die erforderlichen Zulassungsunterlagen nicht den regulatorischen Anforderungen entsprachen. Damit wurde deutlich, dass für kompakte elektrische Kompressoren derzeit keine verlässlichen Anbieter im europäischen Raum verfügbar sind. Diese Erkenntnisse sind für die weitere Projekt- und Produktentwicklung von hoher Relevanz, da sie zukünftige Investitionsentscheidungen unmittelbar beeinflussen.

Ein weiterer zentraler Beitrag liegt im Bereich der Zulassung mobiler Wasserstofflösungen. Hier konnte gezeigt werden, dass aktuell kaum anwendbare Normen für die Realisierung entsprechender Systeme existieren. Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen werden aktiv in einschlägige Normausschüsse und Fachgremien eingebracht, um die Basis für künftige normgerechte und technisch sichere Markteinführungen zu schaffen.

Darüber hinaus wurden im Projekt zwei Geschäftsmodelle konzipiert, die auf den entwickelten Systemansätzen basieren:

1. **Mobiler Wasserstoff-Energiespeicher**

Ziel dieses Ansatzes war es, mit überschüssiger elektrischer Energie grünen Wasserstoff zu produzieren und saisonal zu speichern. Bei Energiemangel kann mittels der Brennstoffzelle ortsunabhängig Strom produziert werden. Im ENaQ-Projekt konnte die technische Funktionalität dieses Konzepts erfolgreich validiert werden. Eine wirtschaftliche Umsetzung im kleinen Maßstab ist jedoch nicht gegeben, da die Investitions- und Betriebskosten in keinem Verhältnis zum potenziellen Nutzen stehen.

2. **Mobile Wasserstofftankstelle**

Der zweite Ansatz bezog sich auf die Entwicklung einer mobilen H₂-Tankstelle. Wasserstoff für den Mobilitätssektor erfordert hohe Qualitätsstandards sowie Drücke zwischen 350 und 700 bar. Die Errichtung stationärer Tankstellen ist mit erheblichen Investitionen in

Millionenhöhe verbunden, ohne dass die Rentabilität angesichts der geringen Fahrzeugzahlen derzeit absehbar wäre.

Eine mobile H₂-Tankstelle kann hier als flexible Lösung dienen, um bestehende Lücken in der Tankstelleninfrastruktur temporär zu schließen und einzelne wasserstoffbetriebene Fahrzeuge zu betanken. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität und der niedrigen Durchflussraten kompakter Kompressoren ist der Einsatz jedoch auf kleinere Anwendungen beschränkt, beispielsweise für Transporter, Pkw, Lastenräder oder ähnliche Fahrzeuge mit begrenztem Speicherbedarf.

Während zu Beginn des Projekts (2018) die Serienproduktion von H₂-Pkw noch erwartet wurde, verlagerte sich der Branchenschwerpunkt ab 2023 deutlich in Richtung Industrieanwendungen und schwere Mobilität (z. B. Lkw). Für diese Anforderungen ist der entwickelte mobile H₂-Anhängler unterdimensioniert und kann die notwendigen Speichermengen sowie Drücke nicht bereitstellen.

Die unmittelbare wirtschaftliche Verwertbarkeit der entwickelten Prototyp-Anlage ist nicht gegeben. Der eigentliche Nutzen des Projekts liegt in den gewonnenen Erkenntnissen, den erarbeiteten Methoden und der praxisnahen Validierung technischer Ansätze. Diese Erfahrungen fließen nicht nur in zukünftige Projekte der beteiligten Unternehmen ein, sondern leisten auch einen Beitrag zur Standardisierung und Normung im Bereich mobiler Wasserstofflösungen. Damit wird eine wichtige Grundlage geschaffen, um langfristig marktfähige Produkte und Geschäftsmodelle entwickeln zu können.

2.5. Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Laufe des Projekts wurden von Argo-Anleg keine Veröffentlichungen publiziert.

2.6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Laufe des Projekts wurden von Argo-Anleg keine Veröffentlichungen publiziert.

2.7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung der Stadt Oldenburg	4
Abbildung 2: Lage des Fliegerhorstes in Oldenburg.....	5
Abbildung 3: Karte des ENaQ-Gebiets auf dem Fliegerhorst sowie Darstellung eines Zukunftsszenarios (Quelle: Stadt Oldenburg, Jens Gehrken).....	6
Abbildung 4: Planung H2-Pipeline	10
Abbildung 5: Argo-Anleg H2-Energieanhänger - Schematischer Aufbau	11
Abbildung 6: Aufstellung H2-Energieanhänger in der ENaQ Abschlussveranstaltung.....	12

2.8. Literaturverzeichnis

- [1] Stadt Oldenburg (2022) Standortprofil Stadt Oldenburg: Zahlen, Daten und Fakten.
<https://www.oldenburg.de/startseite/wirtschaft/standortinformationen/standortprofil.html>
- [2] Cordes, C., Diekstatt-Heuser, K., Giordano, G., Haist, K., Herr, C., Hildebrandt, T., Horn, B., Janßen, U., Jordan, A., Jungkunz, S., Korallus, N., Köster, O., Kretschmer, M., Krogmann, J., Maas, C., Magers, W., Masurkewitz-Möller, J., Nuxoll, C., Oltmanns, K., Oltmer, F., Paech, N., Reibstein, L., Röseler, S., Rohr, J., Sachse, D., Stöter, J. und von der Gracht, H. (2020) Oldenburger Demographiestrategie. Mehr Mut. Gemeinsam. Der demographische Wandel als Chance. Stadt Oldenburg.
https://www.oldenburg.de/fileadmin/oldenburg/Benutzer/PDF/50/Demografie/Demografiestrategie/SO_Broschuere_DINA4_Final_WEB-neu.pdf
- [3] Stadt Oldenburg. Stabsstelle Fliegerhorst (2015). FLIEGERHORST OLDENBURG Dokumentation Teil A - Ideenphase und Planungsgrundlagen Teil B – Stadtwerkstatt
- [4] Stadt Oldenburg. Stabsstelle Fliegerhorst (2016) Fliegerhorst Oldenburg | Zukunftsplan 2030+ Dokumentation Masterplan.
https://www.oldenburg.de/fileadmin/oldenburg/Benutzer/PDF/11/115/Masterplan/Masterplan_Fliegerhorst.pdf