

München, 31.03.2026

Verbundvorhaben IntegrH2ate Teilvorhaben 03HY127A

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil I: Kurzbericht

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Linde GmbH (im Folgendem Linde genannt)
Autorinnen/Autoren:	Dr. Thomas Emmert
Fördertitel:	IntegrH2ate/Raffinerieintegration für 100 MW Elektrolyseure unter Nutzung der Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff & hybrider Betriebsweise in Verbindung mit bestehenden konventionellen H ₂ Erzeugungsanlagen
Laufzeit:	01.01.2022 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY127A
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil I – Kurzbericht

Vorwort des Verbundkoordinators

Die erfolgreiche Umsetzung des Projektes IntegrH2ate innerhalb des Wasserstoff-Leitprojektes H2Giga ist das Ergebnis einer außergewöhnlich starken und interdisziplinären Zusammenarbeit. ExpertInnen aus Industrie und angewandter Forschung haben gemeinsam Lösungen entwickelt, die von der Grundlagenuntersuchung bis zur industriellen Umsetzung reichen. Besonders hervorzuheben ist die enge und vertrauensvolle Kooperation zwischen den Partnern Linde GmbH (Linde) und dem Fraunhofer IEG.

Während der Laufzeit des Projektes wurde ein wesentlicher technologischer Sprung erzielt, der die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseanlagen nachhaltig verbessert. Die entwickelten Konzepte, Modelle, Messmethoden, Automatisierungsansätze und Anlagenlösungen tragen direkt dazu bei, den industriellen Einsatz großskaliger Elektrolyseure wirtschaftlicher zu machen und den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu beschleunigen.

Der vorliegende Abschlussbericht fasst diese Fortschritte zusammen und zeigt, wie IntegrH2ate den Weg zu einer effizienten, sicheren und skalierbaren Wasserstoffproduktion bereitet.

Das Fraunhofer IEG entwickelte und validierte für die Nutzung der Abwärme ein detailliertes PEM Elektrolyse Modell, ein Gesamtmodell für die Kopplung und Systemeinbindung von Elektrolyseur und Wärmepumpe sowie eine modellprädiktive Regelungsstrategie dafür. Alle Modelle bilden die thermodynamischen und betrieblichen Eigenschaften des gekoppelten Elektrolyse-Wärmepumpen-Systems realitätsnah ab. Nach Aufnahme des regulären Betriebs der Versuchsanlage ist eine umfassende experimentelle Validierung vorgesehen.

Für die Nutzung von Elektrolyse Sauerstoff, zeigen die Untersuchungen des Fraunhofer IEGs, dass neben der chemischen Industrie die Zementherstellung, Abwasserbehandlung und medizinische Anwendungen zukünftig davon profitieren könnten. Sicherheitsanalysen zeigen, dass bei PEM-Elektrolyseuren aufgrund des Differenzdruckbetriebs spezifische Ausfallmodi auftreten können, die jedoch durch geeignete, von Linde patentierte Konzepte beherrschbar sind.

Das Fraunhofer IEG konnte erfolgreich die Versuchsanlage in Zittau im Testbetrieb in Betrieb nehmen. Die Erfahrungen aus Genehmigung, Aufbau und Inbetriebnahme der Versuchsanlage zeigen, dass komplexe Forschungsanlagen hohe Anforderungen an Planung, Dokumentation und Abstimmung mit Genehmigungsbehörden stellen.

Linde konnte belastbare technische Grundlagen für die industrielle Umsetzung von Groß Elektrolyse Anlagen bis in den Gigawatt Maßstab entwickeln. Zentrales Ergebnis ist ein skalierbares, modular aufgebautes Anlagenkonzept für PEM- und AEL-Elektrolyseure, das einen sicheren, wirtschaftlichen und lastflexiblen Betrieb unter realen Markt- und Netzbedingungen ermöglicht. Als Gesamtergebnis steht ein technologieübergreifendes Anlagenkonzept bis zu 1 GW zur Verfügung, das PEM- und AEL-Module kombiniert.

Ergänzend erzielte Linde wesentliche Fortschritte im Bereich der Anlagensicherheit durch umfangreiche Explosionstests unter realistischen Störfallszenarien. Die gewonnenen Mess- und Betriebsdaten lieferten belastbare Auslegungsparameter für den sicheren Betrieb großskaliger Anlagen.

Im Bereich Wasser erforschte Linde neue Konzepte zur Wasseraufbereitung und Konditionierung. Dabei wurde ein Remote Wasseranalyseboard, das ein 24/7-Online-Monitoring der Wasserqualität erlaubt, entwickelt und erprobt.

1. Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Linde ist als führender Technologieanbieter im Bereich Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette positioniert und verfügt über ausgeprägte Forschungs- und Entwicklungskompetenz zur Industrialisierung wasserstoffbasierter Energiesysteme. Der strategische Fokus der F&E-Aktivitäten liegt auf der Steigerung von Wirkungsgrad, Skalierbarkeit und Umweltverträglichkeit von Wasserstofftechnologien.

Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Energiepark Mainz“ wurde eine 6-MW-Elektrolyseanlage im industriellen Maßstab realisiert und erfolgreich betrieben. Die Anlage diente als Demonstrator für die sektorübergreifende Nutzung von Wasserstoff (Gasnetz, Industrie, Mobilität) und ermöglichte die praxisnahe Erprobung neuartiger Technologiekomponenten unter realen Betriebsbedingungen.

Die Investition von Linde in einen 24-MW-PEM-Elektrolyseur am Standort Leuna stellt einen wesentlichen Schritt zur Skalierung der PEM-Elektrolysetechnologie dar und adressiert zentrale Herausforderungen des industriellen Hochlaufs, insbesondere Betriebssicherheit, Effizienz und Integration erneuerbarer Energien.

Die F&E-Arbeiten werden durch die breite Anlagenbau- und Betriebsexpertise von Linde ergänzt. Mit rund 4.800 aktiven Patenten ist Linde ein Technologieunternehmen, das moderne Industrie-4.0-Methoden nutzt, um Anlagen im Design und Betrieb datenbasiert zu optimieren. Über das globale Remote Operation Center (ROC) werden Betriebsdaten kontinuierlich erfasst und direkt in die Weiterentwicklung der Technologien zurückgeführt.

Die beiden Referenzprojekte belegen die Fähigkeit von Linde, neue Produkte erfolgreich bis zu einem hohen Technologiereifegrad (Technology Readiness Level TRL) zu entwickeln und erfolgreich zu kommerzialisieren. Linde ist daher der zentrale Entwicklungspartner für Wasserstofftechnologien in Deutschland.

Allerdings liegt die großtechnische Umsetzung von Elektrolyseanlagen der Klasse 100MW und größer weit hinter den Zielen, die für einen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland erforderlich wären, zurück. Ein Hauptgrund für zögerliche Investitionsentscheidungen ist die schlechte Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseanlagen. Deshalb besteht dringender Bedarf einer Optimierung des OPEX/CAPEX von Groß-Elektrolyse-Anlagen, um damit die Wirtschaftlichkeit von Groß-Elektrolyse-Anlagen zu verbessern.

Die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Groß-Elektrolyse-Anlagen geschieht im Rahmen des Vorhabens IntegrH2ate in folgenden Forschungsschwerpunkten:

AP 1: Erforschung von Groß-Elektrolyse-Anlagen bis zu 1GW

AP 2: Aufreinigung und effektive Nutzung des Elektrolyseproduktes Sauerstoff

AP 3: Auskopplung und effektive Nutzung des Nebenproduktes Wärme

AP 4: Wasserkonditionierung

2. Ablauf des Vorhabens

Nr.	Name Meilenstein	Messgröße	Verantwortlich	Monat	Status
MS 1.1	Anforderungen	Definition der Anforderungen von Groß-Elektrolyse-Anlagen	Linde	18	Erreicht
MS 1.2	Auslegung Standardmodul	Auslegung CAPEX/OPEX optimiertes Standardmodul abgeschlossen	Linde	27	Erreicht
MS 1.3	Konzept Groß-Elektrolyse-Anlage	Konzept CAPEX/OPEX optimierten Groß-Elektrolyse-Anlage bis zu 1GW erstellt	Linde	36	Erreicht
MS 1.4	Auslegung Groß-Elektrolyse-Anlage	Auslegung CAPEX/OPEX optimierten Groß-Elektrolyse-Anlage bis zu 1GW abgeschlossen	Linde	45	Erreicht

3. Wesentliche Ergebnisse

Kernergebnis der Arbeiten ist die Entwicklung und Validierung von CAPEX- und OPEX-optimierten Standardmodulen. Für die PEM-Elektrolyse wurde ein 10-MW-Standardmodul bis zur dritten Evolutionsstufe entwickelt, für die AEL-Elektrolyse ein 5-MW-Modul bis zur ersten Evolutionsstufe. Diese Standardmodule bilden die Grundlage für eine reproduzierbare und skalierbare Anlagenplanung. Als Gesamtergebnis liegt ein technologieübergreifendes Anlagenkonzept bis zu einer Leistung von 1 GW vor, das PEM- und AEL-Module integriert.

Zur Erhöhung der Anlagensicherheit wurde ein Sauerstoffkreislauf (O₂ Recycle Loop) zum Explosionsschutz entwickelt, der für den Fall eines möglichen Wasserstoffübertritts auf die Anodenseite (O₂/H₂O) ausgelegt ist. Das Konzept wurde erfolgreich in einer 24MW Pilotanlage erprobt. Auf Basis dieser Ergebnisse und großskaligen Explosionstests erfolgte eine Optimierung hinsichtlich CAPEX und OPEX der Standardmodule und das Gesamtkonzept von Groß-Elektrolyse-Anlagen. Der O₂ Recycle Loops bildet die Grundlage für die wirtschaftliche Verwertung des Elektrolyse Sauerstoffes.

Die im Rahmen der Messkampagnen gewonnenen Daten wurden systematisch ausgewertet und zur Optimierung des Wasserreinigungskonzepts herangezogen. Dabei wurde sowohl die Freisetzung von Kontaminanten aus dem Stack in das System als auch deren Entfernung in der Wasseraufbereitung

untersucht. Dabei wurde ein Remote Wasseranalyseboard, das ein 24/7-Online-Monitoring der Wasserqualität von Elektrolyseanlagen erlaubt, entwickelt und erprobt.

4. Zusammenarbeit mit anderen (Forschungs-)Einrichtungen

Während des Vorhabens fand ein regelmäßiger Austausch mit weiteren Einrichtungen innerhalb und außerhalb von H2Giga statt.

- Kontinuierlicher fachlicher Austausch zwischen Linde und Fraunhofer IEG zum Verwertungspfad O₂ und Wärme.
- Präsentation von IntegrH2ate auf den Statuskonferenzen in Berlin/Frankfurt.
- Präsentation von IntegrH2ate auf Messen (Hannover Messe, Achema).
- Gezielte Teilnahme von Teammitgliedern an AG-, Transfer- und Querschnittsmeetings.

München, 31.03.2026

Verbundvorhaben IntegrH2ate; Teilvorhaben 03HY127A

Sachbericht zum Verwendungsnachweis - Teil II: Eingehende Darstellung

Stand:	31.03.2026
Einreichungsdatum TIB (Teil I+II):	31.03.2026
Partnerin/Partner:	Linde GmbH (im Folgendem Linde genannt)
Autorinnen/Autoren:	Dr. Thomas Emmert
Fördertitel:	IntegrH2ate/Raffinerieintegration für 100 MW Elektrolyseure unter Nutzung der Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff & hybrider Betriebsweise in Verbindung mit bestehenden konventionellen H ₂ Erzeugungsanlagen
Laufzeit:	01.01.2022 bis 31.12.2025
Förderkennzeichen:	03HY127A
Disclaimer:	Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Teil II. Eingehende Darstellung (wird veröffentlicht)

1. Eingehende Darstellung der durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse

Weitere Ergebnisse und Beantwortung der Forschungsfragen finden sich im nicht öffentlichen Teil III.

AP1: Entwicklung von bis zu 1000 MW Groß-Elektrolyse-Anlagen

Ziele:

- Definition der Anforderungen von Groß-Elektrolyse-Anlagen für den sicheren, lastflexiblen und wirtschaftlichen Betrieb
- Konzipierung eines CAPEX/OPEX optimierten Standardmodules (PEM, AEL und SOEC) durch die intelligente Zusammenführung/Kombination sowie die Neu- und Weiterentwicklung von Anlagenkomponenten.
- Auslegung im Bereich der Prozessführung, der Elektrik, der Konstruktion, des Aufstellungsplans, der Anlagensicherheit und des Betriebes eines CAPEX/OPEX optimierten Standardmodules.
- Konzipierung einer CAPEX/OPEX optimierten Groß-Elektrolyse-Anlage bis zu 1 GW, die PEM, AEL und SOEC-Standardmodule geschickt kombiniert.
- Auslegung im Bereich der Prozessführung, der Konstruktion, der Elektrik, des Aufstellungsplanes, der Anlagensicherheit und des Betriebes einer bis zu 1 GW Groß-Elektrolyse-Anlage.
- Durchführung von sicherheitstechnischen Begleitexperimenten und Versuchsreihen für die Spezifikation von Materialien und werkstoffspezifischen Komponenten und deren Qualifizierung für Groß-Elektrolyse-Anlage.
- Sicherheitstests von Elektrolyse Stacks unter realen Betriebsbedingungen.
- Messungen und Auswertung von Betriebsdaten von Elektrolyseanlagen die im Laufe von IntegrH2ate in Betrieb gehen (z.B. 24 MW Leuna).

Ergebnisse:

- Weiterentwicklung Definition und Detaillierung von Anforderungen an Groß-Elektrolyse-Anlagen (PEM und AEL) für den sicheren, wirtschaftlichen und lastflexiblen Betrieb, der mit volatilen Ökostrompreisen und Produktabnahmen der nachgeschalteten Prozesse gewährleistet sein muss. Hierbei wurde Fokus auf die Anforderungen der Stromnetzbetreiber bzgl. netzdienlichen Leistungen gelegt, um die Wirtschaftlichkeit von Groß-Elektrolyse-Anlagen zu verbessern.
- Weiterentwicklung von Design-Grundlagen (im Bereich der Prozessführung, Konstruktion, Aufstellungsplan, Anlagensicherheit und Betrieb) eines Low-CAPEX Standardmodules für PEM (10 MW, aktuelle Evolutionsstufe 3) and für AEL (5 MW aktuelle Evolutionsstufe 1). Das 10 MW PEM Standardmodul befindet sich aktuell in der dritten Evolutionsstufe und wurde in verschiedenen Aspekten weiter optimiert und detailliert. Erste Erkenntnisse aus dem Betrieb einer 24MW PEM Groß-Elektrolyse-Anlage sind in die Entwicklung eingeflossen (z.B. Anforderungen an die Spülung der Stacks, die Reinheit des Prozesskreises, Filter und Redundanzen sowie Rohrleitungsbauteile).
- Weiterentwicklung und Detaillierung von Design-Grundlagen (im Bereich der Prozessführung, Konstruktion, Aufstellungsplan, Anlagensicherheit und Betrieb) einer 100 MW Anlage. Durch die Verwendung eines optimierten Standardmodules der dritten Generation kann die Komplexität der Integration des Elektrolyseteils in die Gesamtanlage minimiert werden. Außerdem konnte mit der Inbetriebnahme einer 4MW Pilotanlage das Modulkonzept und die Implementierung einzelner gleichartiger Module in eine Gesamtanlage erfolgreich validiert werden.

- Sicherheitstests unter realen Bedingungen: Die Versuche für die Qualifizierung von einzelnen Anlagenkomponenten sowie der Werkstoffe und die Validierung von Sensorik sind abgeschlossen. Weiterführend wurden die Kern-Komponenten in Ihrer finalen Konfiguration Explosionstests unterzogen, um die Anlagensicherheit auch im Gesamtkomplex mit gegenseitigen Wechselwirkungen zu verifizieren.
- Messungen der Blasenverteilung in den 2-Phasenleitungen (Anoden & Kathodenseite) am Stack-Austritt der 4MW Pilotanlage durchgeführt.
- Messungen von Betriebsdaten in 24MW Groß-Elektrolyse-Anlage durchgeführt.
- Konzipierung und Auslegung einer technologieübergreifenden Groß-Elektrolyse-Anlage bis zu 1 GW durchgeführt.
- Untersuchung von Rohrleitungskomponenten unter Betriebsbedingungen (z.B. Rückschlagklappen in Zweiphasenströmung) durchgeführt.
- Optimierung der Separator-Auslegung unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Versuchen zur Abscheidung abgeschlossen.
- Auswertungen und Rückschlüsse auf Anlagendesign auf der Basis von Messungen der Blasenverteilung in den 2-Phasenleitungen (Anoden & Kathodenseite) am Stack-Austritt der 4MW Pilotanlage durchgeführt.
- Auswertungen und Rückschlüsse auf Anlagendesign auf der Basis der Messungen von Betriebsdaten in 24MW Groß-Elektrolyse-Anlage durchgeführt.

AP2: Nutzungspfade Sauerstoff

Ziele:

- Erforschung der Prozesswechselwirkungen und Prozessvoraussetzungen bei der Sauerstoffherstellung unter der Berücksichtigung aller notwendigen Teilsysteme
- Untersuchung effizienter Prozessschritte zur Aufreinigung und Konditionierung von „Abfallprodukt“ Sauerstoff“ der PEM-Elektrolyse
- Untersuchung des Einflusses des Elektrolyseurbetriebes auf die Reinheit und Qualität des Sauerstoffs
- Festlegung eines optimalen Prozesslayouts der Sauerstoffnutzung mit Hinsicht auf Produktreinheit, Druck, usw.

Ergebnisse:

- Entwicklung eines Sauerstoffkreislaufes zum Zweck des Anlagen-Explosionsschutzes für den Falle eines möglichen Übertritts von Wasserstoff auf die Anodenseite (O₂/ H₂O) abgeschlossen.
- Validierung des Konzeptes in 24MW Groß-Elektrolyse-Anlage abgeschlossen.
- Optimierung des CAPEX/OPEX des Sicherheitsfeatures und Implementierung in Standard Module/Groß Elektrolyse Konzept durchgeführt.
- Entwicklung eines optimalen Prozesslayouts zur wirtschaftlichen Gewinnung von prozessnutzbarem Sauerstoff mithilfe des Elektrolyseurs abgeschlossen.

AP3: Nutzungspfade Wärme

Ziele:

- Darstellung des charakteristischen thermodynamischen Betriebsverhaltens des Elektrolyseurs
- Definition von Betriebsweisen des Elektrolyseurs auf Grundlage von H₂-Bedarfsprofilen und Strompreisen/überschüssigem EE-Strom und Wärmebedarf am ausgewählten Standort

- Transferforschung von dem am Fraunhofer-IEG Standort aufgebauten Versuchsaufbau auf die Groß-Elektrolyse-Anlage
- Entwicklung eines optimalen Prozesslayouts zur Verwertung der Abwärme der Groß-Elektrolyse-Anlage

AP 3.1.1: Thermodynamisches Modell Elektrolyseur

- WP wird vom Fraunhofer IEG weiterbearbeitet (unter Betreuung durch Linde GmbH), siehe Zwischenbericht Fraunhofer IEG

AP 3.2.1: Definition Betriebsweisen

- WP wird vom Fraunhofer IEG weiterbearbeitet (unter Betreuung durch Linde GmbH), siehe Zwischenbericht Fraunhofer IEG

AP 3.4: Transferforschung auf Großanlagen

- WP wird vom Fraunhofer IEG weiterbearbeitet (unter Betreuung durch Linde GmbH), siehe Zwischenbericht Fraunhofer IEG

AP4: Water Conditioning

Ziele:

- Definition der Wasserqualität für den Einsatz in einer Groß-Elektrolyse-Anlage
- Untersuchung geeigneter Wasserreinigungsverfahren für die nötige Prozessqualität
- Erforschung geeigneter Wasserzuführsysteme für verschiedene Wasserarten (Meereswasser, demineralisiertes Wasser, Leitungswasser, Prozesswasser)
- Erforschung geeigneter Ionentauscher und Untersuchung der Ionenanreicherung im Prozesskreislauf
- Konzeptionierung und Erprobung eines optimalen Reinigungskonzeptes für den Elektrolysebetrieb
- Untersuchung der Abwasserströme (z.B. PFAS Konzentration)

AP 4.1 Wasserreinigung

Ergebnisse:

- Entwicklung einer vereinfachten und optimierten Design Spezifikation für die Wasseraufbereitung in PEM Systemen auf Basis von PEM Herstellervorgaben und Messergebnissen aus realen Groß-Elektrolyse-Anlagen während des Start-Ups (<170h) und im Routinebetrieb (>170 h) in Zusammenarbeit mit verschiedenen Ionenaustauscherherstellern sowie System Providern abgeschlossen.
- Untersuchung von Konzepten von membranbasierten Systemen (RO/EDI) bis hin zu verschiedenen Konfigurationen von Ionenaustauschern (MB, SBA+SAC, SBA+SAC+MB),
- Untersuchung von Konzepten mit und ohne Regeneration sowie ein von Konzepten mit und ohne UV-System zur Desinfektion oder TOC Kontrolle.

AP 4.2: Reinigungskonzept für Elektrolysebetrieb

Ergebnisse:

- Auswertung der Messkampagnen, Optimierung der Reinigungskonzeptes abgeschlossen.
- Untersuchung der Kontaminantenfreigabe in das System aus den Stack sowie durch Kontaminantenentfernung in der Wasseraufbereitung abschließen.
- Entwicklung Stoffmengenmodell, um die An- und Abreicherung von Kontaminanten vorherzusagen und um die zu reinigende Seitenstrommenge zu minimieren um damit den CAPEX/OPEX der Wasseraufbereitung zu optimieren.

2. Darstellung der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- Großskalige Explosionstests unter realen Bedingungen: Die Durchführung der Explosionstests war notwendig, um ein sicheres Anlagendesign zu gewährleisten. Wasserstoff-Sauerstoff Explosionen erfolgen in einem weiten Konzentrationsbereich detonativ. Für Explosionen, die detonativ erfolgen, gibt es weder Normen noch Vorschriften für die Bestimmung von Auslegungsdrücken für Anlagenkomponenten. Die Auslegungsdrücke konnten mithilfe der Explosionstests bestimmt werden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Größe und Ambition des Linde-Teilprojekts IntegrH2ate waren mit erheblichen technischen und wirtschaftlichen Risiken verbunden. Aufgrund der hohen Komplexität und der vielfältigen erforderlichen Fachkompetenzen konnten die geplanten Forschungsarbeiten nur im Rahmen eines Verbundprojekts umgesetzt werden. Ein wirtschaftlicher Erfolg war zwar möglich, jedoch nicht garantiert. Er hing maßgeblich von der erfolgreichen Umsetzung mehrerer technischer Meilensteine ab:

- Entwicklung eines 10MW PEM Standardmoduls
- Durchführung der großskaligen Explosionstests unter realen Bedingungen
- Design des O₂ Recycle Loop für den sicheren und stabilen Betrieb des Sauerstoffkreis

Die BMFTR-Förderung ermöglichte es, die unterschiedlichen Kompetenzen aus Industrie und Wissenschaft zu bündeln. Erst dadurch konnte ein Projekt dieser Größenordnung und Strahlkraft realisiert werden. Die Förderung schuf die Voraussetzung für einen umfassenden interdisziplinären Forschungsansatz und gewährleistete gleichzeitig die breite Zugänglichkeit der erzielten Ergebnisse.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Vorhaben erzielten Ergebnisse bilden eine zentrale Grundlage für die künftige technologische und wirtschaftliche Weiterentwicklung im Bereich der Wasserstofftechnologien. Während der Projektlaufzeit standen Forschung, Entwicklung und Validierung der neuen Ansätze im Vordergrund. Auf dieser Basis eröffnen sich nach Projektabschluss konkrete Perspektiven für die Verwertung in verschiedenen Geschäftsbereichen.

Wie während des Vorhabens kommuniziert, wurden während der Projektlaufzeit mehrere 100MW Großanlagen bei Linde in Auftrag gegeben. Dabei konnte ein Teil der erarbeiteten Forschungsergebnisse im Anlagendesign verwertet werden. Dennoch hat die Linde GmbH noch erheblich weiteren Entwicklungsaufwand betrieben, um die Projekte umzusetzen.

Der Markt für grüner Wasserstoff und für Elektrolyseanlagen befindet sich nach einer Hypephase jetzt in einer Phase der Konsolidierung und Beruhigung. Deswegen ist momentan mit einer nachhaltigen Etablierung eines Geschäfts und damit einer Verwertung für Linde in einem Zeitraum von 2 bis 5 Jahren nach Projektschluss zu rechnen. Um die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseanlagen noch weiter zu verbessern, bedarf es noch weiterer Entwicklungsarbeit.

Um die erwarteten Entwicklungen klar darzustellen, werden die Verwertungspotenziale nach kurz-, mittel- und langfristigen Zeithorizonten strukturiert:

Verwertung kurzfristig: 0-2 Jahre nach Projektabschluss

Verwertung mittelfristig: 2-5 Jahre nach Projektabschluss

Verwertung langfristig: 5-10 Jahre nach Projektabschluss

Schaffung neuer und Sicherung bestehender Märkte

Begründung: Der Ausbau der deutschen Wasserstoffwirtschaft eröffnet Linde neue attraktive Märkte und den Ausbau bestehender Aktivitäten in etablierten Märkten. Als wirtschaftliche Erfolgsaussichten sind bei Projekterfolg beispielhaft zu nennen:

- Ausbau des EPC-Geschäfts für Elektrolyseanlagen (mittelfristig)
- Ausbau der Marktposition in zukunftssträchtigen Märkten wie Verkehr/Mobilität und Industrie (z.B. Stahl, Raffinerien, Chemische Synthese etc.) (langfristig)

Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland

Begründung: Bei Projekterfolg erscheint der Ausbau der deutschen Wasserstoffwirtschaft realistisch, was zu einer Vermehrung der H₂-Aktivitäten bei Linde führen wird. Damit eng verbunden sind positive Arbeitsplatzeffekte für alle Linde Standorte in Deutschland (mittelfristig)

Steigerung von Ertrag und Umsatz

Begründung: Bei Projekterfolg sind positive Umsatzeffekte im Bereich Gas (H₂-Verkäufe für verschiedene Anwendungsfälle) und im EPC-Geschäft im Bereich Engineering für Elektrolyseure als realistisch zu sehen. (mittelfristig)

5. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es wurde sind keine Fortschritte bei anderen Stellen bekannt geworden.

6. Liste der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF

Autoren von Linde mit rot markiert

Datum	Art der Veröffentlichung	Titel, Quelle/Zitat (Journal, Konferenz)	Autoren
17.09.2024	Vortrag auf Konferenz	Status Update SineWave und IntegrH2ate (H2-giga Statuskonferenz 2024)	Clemens Schneider, Thomas Emmert
03.07.2025	Vortrag auf Konferenz	Skalierung und Effizienz - Optimierte Prozessintegration (H2-giga Abschlusskonferenz 2025)	Clemens Schneider; Jan-Peter Bohn
24.01.2025	Publikation	PEM Electrolyser for Green Ammonia (NH ₃)-Industrial pilot experience and requirements for technology development for full scale applications	Markus Dietzen , Aron Janos Toth, Reidar Tveit, Volker Göke , Javed Fastje