wasserstoff schiene
HEIDEKRAUTBAHN



Leit-faden #1

Betriebsvorbereitungs-phase 2022-2026

UPDATE

Erfahrungen im Rahmen des Projekts

Einsatz von Wasserstoff-Brennstoff-zellenantrieben im Nahverkehr des Landkreises Barnim (H2BAR)

UNSERE MISSION

MOBILITÄTSPARTNER VON MORGEN

Auf der Heidekrautbahn verkehren in den Landkreisen Barnim und Oberhavel seit Ende 2024 wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Hybridtriebzüge (eng. Hydrogen Electric Multiple Unit – HEMU). Die Fahrzeuge des von Siemens Mobility gebauten Typs Mireo Plus H werden seit dem Fahrplanwechsel 2024 auf der Regionalbahnlinie 27 (RB 27) eingesetzt. Sie fahren klimafreundlich mit grünem Wasserstoff, der elektrolytisch aus regional erzeugter Wind- und Solarenergie gewonnen wird. Das Gesamtprojekt ist als öffentlich gefördertes Forschungsprojekt angelegt und wird wissenschaftlich durch das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. und die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg begleitet. Das Projekt soll zeigen, dass mit Wasserstoff ein flexibler und gleichzeitig CO_2-freier Bahnbetrieb möglich ist, ohne Stromnetze, -speicher und Lastmanagement auszubauen. Mittelfristig soll der Einsatz von Brennstoffzellen-Zügen ebenso wirtschaftlich sein, wie mit den bisherigen Zügen mit Dieselantrieb.

INHALT

Hintergrund Projektleitfaden 04
Projektvorbereitung 08
Projektgenehmigung 14
Projektumsetzung 18
Tankstelle und Fahrzeuge 22
Wasserstoffwerk 26
Zusammenfassung 36

HINTERGRUND
PROJEKTLEITFADEN

Ende 2024 wurden sieben Brennstoffzellen-Triebzüge auf der Heidekrautbahn (RB27) im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Landkreis Barnim in Betrieb genommen. Der für den Zugbetrieb im Landkreis Oberhavel regional erzeugte grüne Wasserstoff aus erneuerbarer Wind- und Solarenergie stand aufgrund von Verzögerungen bei der Genehmigung, dem Bau und der Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks nicht rechtzeitig zur Verfügung. Deshalb wurde der benötigte Wasserstoff aus anderen Quellen geliefert. Die Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks ist zum Ende des Jahres 2026 geplant. Wasserstoff als Energieträger ermöglicht einen lokal emissionsfreien Bahnbetrieb ohne den Neu- oder Ausbau von Oberleitungen. Durch seine Speicherfähigkeit kann Wasserstoff zudem Schwankungen in der Erzeugung erneuerbarer Energien ausgleichen und damit auch in längeren Phasen geringer Solar- und Windstromerzeugung einen zuverlässigen Fahrbetrieb unterstützen. Die Wasserstoffzüge sollen mittelfristig mit Dieseltriebzügen vergleichbare Betriebskosten erreichen.

An dem Projekt Wasserstoffschiene Heidekrautbahn beteiligt sind das Energieunternehmen ENERTRAG, das für die Erzeugung des Wasserstoffs verantwortlich ist, die Niederbarnimer Eisenbahn (NEB), die als Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) den Betrieb der Fahrzeuge durchführt, und die Kreiswerke Barnim, die für den Aufbau und Betrieb der Wasserstofftankstelle zuständig sind. (siehe Abbildung)

WINDKRAFT UND
SONNENENERGIE
AUF DIE SCHIENE
GEBRACHT

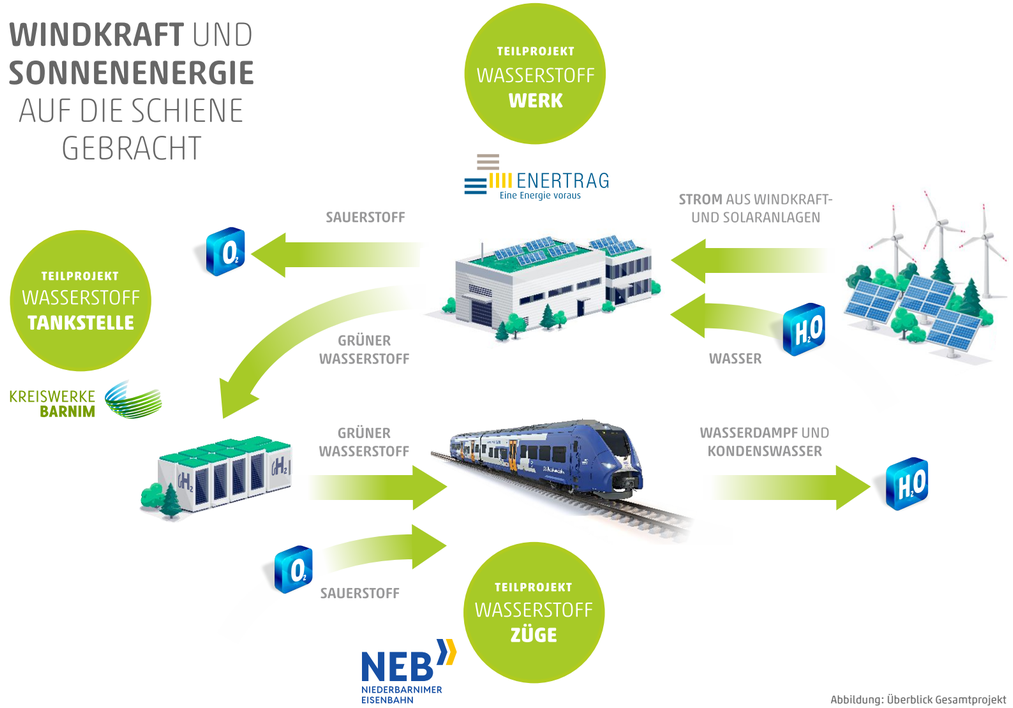


Abbildung: Überblick Gesamtprojekt

Die wissenschaftliche Unterstützung für das Wasserstoffwerk erfolgt durch das Wasserstoff-Forschungszentrum des Fachgebiets Thermische Energietechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU). Die BTU erstellt dafür ein Messstellenkonzept, mit dem sich ein Systemmodell des Wasserstoffwerks erstellen und validieren lässt. Mithilfe des Systemmodells können Optimierungspotentiale zur Betriebsweise des Wasserstoffwerks identifiziert werden.

Das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) ist in der wissenschaftlichen Begleitforschung unter anderem für die systematische Erfassung und Auswertung der Betriebs- und Messdaten der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Triebzüge sowie der Wasserstofftankstelle zuständig. Gleichzeitig werden Simulations- und Auswertungsmodelle entwickelt und mit den Betriebs- und Messdaten validiert, um technische und wirtschaftliche Zusammenhänge sowie Betriebsprozesse zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Die Bundesregierung unterstützt die investiven Vorhabenbestandteile finanziell im nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIPII). Die Koordination der investiven Bestandteile der Fördermaßnahme erfolgt durch die NOW GmbH. Die förderträgerbezogenen Aufgaben liegen in Verantwortung des Projektträgers Jülich. Die Begleitforschung wird vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie (MWAE) des Landes Brandenburg gefördert.

Erste Überlegungen zum emissionsfreien Fahrzeugbetrieb auf der Heidekrautbahn erfolgten bereits im Jahr 2017. Ende 2020 wurde schließlich der Kooperationsverbundvertrag der Industrie- und Forschungspartner unterzeichnet, parallel erhielt das Projekt die Förderzusage von Bund und Ländern.

Derzeit gibt es keine bereits etablierte, umfassend erprobte und dokumentierte Best-Practice-Lösung für den Betrieb von Brennstoffzellen-Triebzügen mit grünem Wasserstoff – was bedeutet, dass Pionierarbeit geleistet und entsprechende Prozesse etabliert werden müssen. Jede betriebliche Situation und jeder Standort sind individuell verschieden und die Akteure bewegen sich in einem wettbewerblichen Umfeld.

Dieser Leitfaden fasst die bisher gewonnenen Erkenntnisse (Lessons Learned) aus der von 2022 bis 2026 laufenden Betriebsvorbereitungsphase zusammen – ergänzt um die Themen rund um die Verzögerungen beim Aufbau des Wasserstoffwerks. Die Schwerpunkte adressieren zentrale Themenfelder wie die Projektvorbereitung, die Genehmigungsprozesse, das Projektmanagement, die Wasserstofftankstelle und Brennstoffzellen-Hybridtriebzüge sowie das Wasserstoffwerk für die Elektrolyse.

b-tu Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

TEILPROJEKT WASSERSTOFF **WERK**

ENERTRAG Eine Energie voraus



H_2-Erzeugung

Wind- und Solarpark

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

TEILPROJEKT WASSERSTOFF **TANKSTELLE**

TEILPROJEKT WASSERSTOFF **ZÜGE**

KREISWERKE BARNIM

NEB NIEDERBARNIMER EISENBAHN

H_2-Tankstelle

H_2-/Dieselzug



Wissenschaftliche Begleitforschung

PROJEKT-VORBEREITUNG

In der Projektbeantragungsphase musste die Entscheidung getroffen werden, ob der Wasserstoff für die Triebzüge in einem ggf. noch zu bauenden Wasserstoffwerk selbst erzeugt oder extern auf dem freien Markt eingekauft werden soll. Falls der Wasserstoff selbst produziert werden soll, müssen Partner in das Projekt eingebunden werden, die das erforderliche technische Know-how für den Bau und Betrieb des Wasserstoffwerks mitbringen. Den benötigten Wasserstoff projektintern zu erzeugen, verspricht eine höhere Preisstabilität und die Unabhängigkeit von vulnerablen Lieferketten. Grüner Wasserstoff ist derzeit auf dem freien Markt noch nicht in ausreichender Menge verfügbar. Neben der Infrastruktur zur klimaneutralen Wasserstofferzeugung sind auch zusätzliche Photovoltaik- und Windkraftkapazitäten notwendig.

EXTERNER WASSERSTOFF**BEZUG** **VERSUS** PROJEKT-INTERNE WASSERSTOFF-**ERZEUGUNG**

Zum heutigen Zeitpunkt ist der Einkauf von grünem Wasserstoff aufgrund fehlender Marktverfügbarkeit für den Zugbetreiber riskanter. Andererseits wäre dieser Ansatz jedoch flexibler als der, den Wasserstoff selbst zu erzeugen. Diese Flexibilität ist derzeit noch nicht möglich und wird sich voraussichtlich erst in den nächsten fünf Jahren mit dem Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft einstellen. Daher kann es momentan zu unvorhergesehenen Lieferengpässen kommen. Dies zeigen aktuelle Lieferschwierigkeiten von Wasserstoff bei der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH (evb) auf der Strecke von Cuxhaven nach Buxtehude. Die evb betreibt dort ebenfalls Wasserstoff-Triebzüge. Durch Lieferengpässe ist momentan nur ein Zugbetrieb mit den bisherigen Dieselfahrzeugen möglich.[1]

EMPFEHLUNGEN

Zu Beginn der Projektplanung sollte eine Kalkulation der für den geplanten Zugbetrieb jährlich benötigten Wasserstoffmengen erfolgen. Beim derzeitigen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist die eigene Herstellung von grünem Wasserstoff aus erneuerbaren Energien in einem Wasserstoffwerk die optimale Variante. Idealerweise sollte das Wasserstoffwerk in unmittelbarer Nähe der geplanten Zugtankstelleninfrastruktur liegen. Ist das jedoch nicht möglich, sollte für den Transport des Wasserstoffs entweder eine eigene Wasserstoffpipeline oder ein Trailerbetrieb genutzt werden. Der Bau einer Wasserstoffpipeline erscheint wirtschaftlich sinnvoll, wenn die Zugtankstelle weniger als zehn Kilometer entfernt ist und gleichzeitig ein langfristiger Wasserstoffliefervertrag über mindestens 15 bis 20 Jahre zwischen den beteiligten Projektpartnern abgeschlossen wird. Nicht sinnvoll erscheint, den erzeugten Wasserstoff durch eine vorhandene Wasserstoffpipeline eines überregionalen Wasserstoffnetzes zu transportieren: Der Wasserstoff könnte dadurch verunreinigt werden. Möglicherweise wird der Wasserstoff dann den hohen Anforderungen an die Qualität und Reinheit zum Betrieb der Wasserstoff-Brennstoffzellen-Hybridtriebzüge nicht gerecht. Durch Verunreinigungen sinkt der Wirkungsgrad der Brennstoffzellen und die Alterung der Zellen beschleunigt sich.

Sobald es künftig auf dem freien Markt ausreichende Mengen und genügend Lieferketten für grünen Wasserstoff gibt, ist der Zugbetreiber mit dem Einkauf dieses Wasserstoffs von externen Herstellern flexibler. Derzeit sollte bei der Variante der eigenen Herstellung des Wasserstoffs eine Rückfalllösung für einen zeitlich begrenzten oder totalen Ausfall der eigenen Wasserstoffversorgung berücksichtigt werden, um den Zugbetrieb sicherstellen zu können. Hierfür empfiehlt sich der Bau eines Wasserstoffspeichers, der ausreichend Kapazität für den Zugbetrieb über einen längeren Zeitraum von mehreren Tagen bereitstellt. Idealerweise werden die Kosten für eine Speicheranlage bereits beim Projektantrag mitberücksichtigt.

Soll der Zugbetrieb jedoch aus heutiger Sicht erst in fünf Jahren oder noch später beginnen, kann davon ausgegangen werden, dass dann bereits genügend grüner Wasserstoff auf dem freien Markt verfügbar sein wird, sodass für solche Projekte Zwischenspeicher als Backup-Lösung nicht mehr zwingend eingeplant werden müssten. Die Tankstelleninfrastruktur sollte dann jedoch flexibler ausgerichtet sein, sodass sie sowohl mit Wasserstoff aus einem eigenen Wasserstoffwerk als auch mit Wasserstoff von externen Erzeugern mit Trailern beliefert werden kann.

[1] Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH. RB33: evb setzt Zugbetrieb trotz eingeschränkter Wasserstoff-Versorgung fort. [Online] 10.09.2024. https://www.evb-elbe-weser.de/rb33-evb-setzt-zugbetrieb-trotz-eingeschraenkter-wasserstoff-versorgung-fort/

ERSATZ-BESCHAFFUNG/ **BACK-UP**

Wie bereits beschrieben, ist die Verfügbarkeit von Wasserstoff aktuell angespannt – verstärkt durch fehlende Transportkapazitäten mit geeigneten Wasserstofftrailern. Verzögerungen bei der Genehmigungs- sowie der Bau- und Betriebsphase des Wasserstoffwerks machten es erforderlich, kurzfristig eine teure Ersatzbeschaffung von Wasserstoff bis zur Fertigstellung des Wasserstoffwerks zu organisieren. Damit kann die Wasserstoffbelieferung ab September 2024 für den Probe- und ab Dezember 2024 für den Regelbetrieb der Brennstoffzellen-Triebzüge abgesichert werden.
Die aktuelle Verfügbarkeit von Wasserstoffquellen machte es notwendig, ein Bezugsportfolio aufzubauen. Dies war notwendig, um die nötige Versorgungsfähigkeit zu gewährleisten. Für die Absicherung sind längerfristige Verträge mit vorgegebenen Verfügbarkeiten und Mindestabnahmen notwendig. Der Bezug von Wasserstoff aus mehreren Quellen bedarf einer ausreichend großen Trailerflotte und erhöhten Personalaufwand zur logistischen Organisation.



EMPFEHLUNGEN

Die Projektpartner sollten frühzeitig die benötigten Wasserstoffmengen abstimmen, damit diese rechtzeitig lieferbar sind. Falls erhebliche zeitliche Verzögerungen in der Genehmigungs- und/oder der Bauphase des Wasserstoffwerks entstehen, sollten die betroffenen Projektpartner schnellstmöglich eine Ersatzbeschaffung der erforderlichen Wasserstoffmengen für den Betrieb der Brennstoffzellen-Triebzüge organisieren. Dadurch lassen sich die zusätzlichen Kosten minimieren.

Idealerweise sollten bereits in der Projektantragphase Mittel für eine mögliche Ersatzbeschaffung von Wasserstoff eingeplant werden. Dadurch lässt sich dieser bei Bedarf frühestmöglich auf dem Markt zu niedrigeren Preisen beschaffen. Ebenso sollte der Probebetrieb inklusive der benötigten Wasserstoffmenge frühzeitig geplant werden, damit hierfür ausreichend Wasserstoff verfügbar ist.

Die Einbindung von Logistikpartnern mit Erfahrungen im Gefahrguttransport und der Abwicklung wird empfohlen, um eine effiziente und sichere Logistik aufzubauen. Eine Liveüberwachung der Trailer, d. h. technische Daten und Standortdaten, ist in der Anlaufphase der Belieferung und Abwicklung zu empfehlen. Automatische Belade- und auch Entladestationen mit Datenerfassung können die Überwachung der Abläufe einfacher gestalten und den Aufwand bei Logistik- und Abrechnungsaufgaben reduzieren.

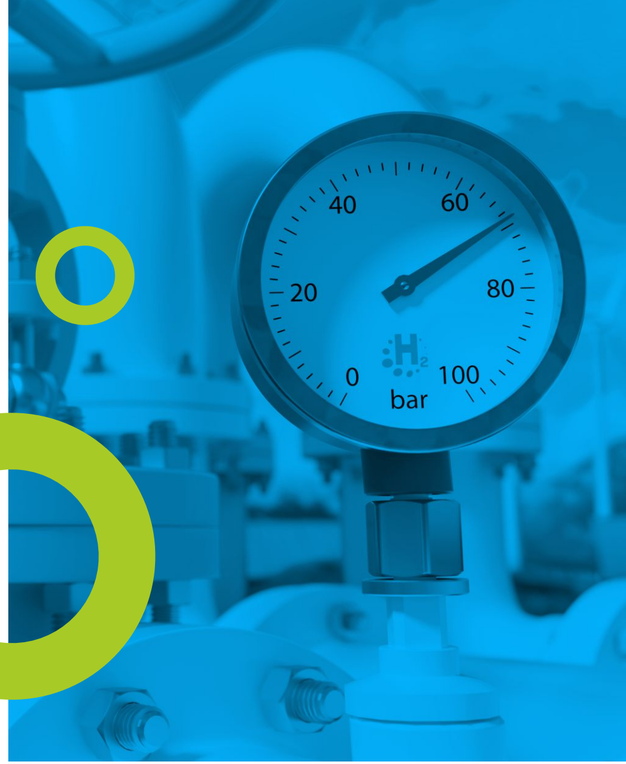
PREISSTEIGERUNG DER **MESSSTELLEN**

(MESSSTELLENKONZEPT WASSERSTOFFWERK)

Vor Projektbeginn wurden die Kosten für Modellierungsmessstellen und das Datenspeichersystem auf der Basis eigener Erfahrungen aus anderen Projekten geplant. Literatur- und Internetrecherchen sind ebenfalls eingeflossen. Durch Verzögerungen in der Genehmigungsphase des Wasserstoffwerks gab es hohe inflationsbedingte Preissteigerungen bei den Messstellenlieferanten, die das ursprünglich geplante Projektbudget überschritten. Dadurch können einige Messstellen nicht erworben werden, was dazu führt, dass Abstriche bei der Detailtiefe des ursprünglich geplanten Systemmodells gemacht werden müssen. Folglich lassen sich einige Annahmen des Modells nur noch durch physikalische Abschätzungen bestimmen.

EMPFEHLUNGEN

Bei einer zu erwartenden langen Projektvorbereitungsphase empfiehlt sich in die Planung des Kostenbudgets der Messstellen inflationsbedingte Preissteigerungen mit einzukalkulieren.



ERHEBUNG DER **ERFAHRUNGEN** ANDERER H_2-SCHIENEN-PROJEKTE

Der Erfahrungsaustausch mit Beteiligten aus vergleichbaren Schienen- und Wasserstoffprojekten war hilfreich, um Fehler in der Planungsphase zu vermeiden. Insbesondere Expertengespräche mit Aufgabenträgern und Eisenbahnverkehrsunternehmen zu früheren Erfahrungen mit Brennstoffzellen-Triebzügen und H_2-Betankungsanlagen waren für die erfolgreiche Planung wertvoll. Beispielsweise konnten durch eine frühzeitige Bedarfsplanung und die Beauftragung eines Stromanschlusses bei einem Netzbetreiber für die Errichtung von Elektranten zur Versorgung der Züge in der Nachtabstellung mit elektrischer Energie und für elektrische Verbraucher der Wasserstofftankstelle potenzielle Verzögerungen minimiert werden.

EMPFEHLUNGEN

Ein früher, transparenter Austausch sowie offene Gesprächsrunden über die Erwartungshaltungen aller Projektpartner sind essenziell, um eine gemeinsame Basis für das Projekt zu schaffen.

Durch die fünfjährige Projektvorlaufzeit, die kontinuierliche Marktbeobachtung sowie durch Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten, ließen sich gezielt Probleme vermeiden, die früher in ähnlichen Projekten entstanden waren. Dazu zählt auch eine frühzeitige Definition der Anforderungen mit entsprechender Ausschreibung.

Bei der Ausschreibung der Wasserstofftankstelle ist eine ergebnisoffene, funktionale Herangehensweise empfehlenswert. Es sollten lediglich Rahmenbedingungen, wie beispielsweise eine Betankungsmenge pro Zeit, vorgegeben und auf detaillierte Konzeptvorgaben verzichtet werden. Dies würde ansonsten die Zahl der möglichen Lösungen einschränken. Ebenfalls sollten konkrete Preisvorgaben vermieden werden.



PROJEKT-GENEHMIGUNG

GENEHMIGUNGSPROZESSE FRÜHZEITIG INITIIEREN,
ENGE ABSTIMMUNG MIT BEHÖRDEN

Im Rahmen der Genehmigungsplanung für das Wasserstoffwerk und zum Teil auch für die Wasserstofftankstelle zeigte sich, dass Wasserstoffprojekte aufgrund ihrer technologischen Entwicklung und ihres interdisziplinären Charakters besondere Anforderungen an die Projektentwicklung und Genehmigungsprozesse stellen. Zu Projektbeginn befanden sich zahlreiche technische, normative und regulatorische Rahmenbedingungen noch in einer frühen Entwicklungsphase.



Gleichzeitig wurden bestehende Regelwerke fortlaufend weiterentwickelt und konkretisiert. Dies führte dazu, dass Anforderungen an Genehmigungsunterlagen im Projektverlauf teilweise präzisiert oder ergänzt werden mussten. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Bearbeitung von Genehmigungsverfahren einen intensiven fachlichen Austausch zwischen Projektentwicklern, Fachplanern, Gutachtern, Herstellern und Behörden erfordert. Insbesondere bei innovativen Technologien kann es notwendig werden, technische Sachverhalte detailliert zu erläutern und projektspezifische Lösungen gemeinsam zu bewerten. Während der Projektentwicklung wurden technische Komponenten und Systemkonzepte kontinuierlich weiterentwickelt. Dies betraf beispielsweise Leistungsdaten einzelner Anlagenkomponenten sowie Auslegungsparameter von Neben- und Sicherheitssystemen. Die daraus resultierenden Anpassungen mussten in die Genehmigungsunterlagen eingearbeitet und mit den beteiligten Fachdisziplinen abgestimmt werden. Zusätzlich erfolgte die finale Auswahl einzelner Technologie- und Systemlieferanten teilweise erst nach Einreichung der Genehmigungsunterlagen. Die konkrete Ausgestaltung der später ausgewählten Systeme machte in einzelnen Bereichen eine Aktualisierung oder Präzisierung der Planungs- und Genehmigungsunterlagen erforderlich. Die notwendigen Abstimmungen zwischen Projektbeteiligten, Fachplanern und Genehmigungsbehörden führten insgesamt zu einem erhöhten Koordinationsaufwand. Dies verdeutlicht die Bedeutung einer ausreichenden zeitlichen Berücksichtigung von Genehmigungs- und Abstimmungsprozessen innerhalb des Gesamtprojektplans.

EMPFEHLUNGEN

Genehmigungsprozesse sollten frühzeitig initiiert und als eigenständiger, projektkritischer Arbeitsschwerpunkt betrachtet werden. Für die Erstellung und Fortschreibung der Genehmigungsunterlagen sollten ausreichende Zeitreserven eingeplant werden, um technische Weiterentwicklungen und notwendige Anpassungen berücksichtigen zu können.

Eine kontinuierliche und transparente Abstimmung zwischen Projektentwicklern, Fachplanern, Gutachtern, Lieferanten und Behörden trägt wesentlich zur Effizienz des Genehmigungsprozesses bei. Bereits bei der Standortauswahl sollten planungsrechtliche Rahmenbedingungen, Genehmigungsanforderungen sowie mögliche Abstände zu schutzwürdigen Nutzungen berücksichtigt werden.

Standorte in bereits erschlossenen Industrie- oder Gewerbegebieten können aufgrund vorhandener Infrastruktur und etablierter Genehmigungsstrukturen Vorteile bieten. Sofern möglich, sollte die Auswahl wesentlicher Technologie- und Systemlieferanten frühzeitig erfolgen, damit projektspezifische Anforderungen bereits in die Genehmigungsplanung integriert werden können.

Da sich Technologien und regulatorische Anforderungen im Wasserstoffsektor weiterhin dynamisch entwickeln, empfiehlt sich eine flexible Projektplanung mit ausreichenden Reserven für Anpassungen während der Genehmigungsphase. Ein strukturierter Änderungsprozess zwischen Planung, Beschaffung und Genehmigung unterstützt die Nachvollziehbarkeit technischer Anpassungen und erleichtert deren Integration in die Genehmigungsunterlagen.

Zum Zeitpunkt der Ausschreibung waren auf dem Markt nur wenige EPC[2]-Kontraktoren verfügbar, die eine gesamte Verantwortung für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme eines gesamten Wasserstoffwerks übernehmen können. Der Grund dafür war, dass die EPC-Kontraktoren die mit dem gesamten Wasserstoffwerk zusammenhängenden intermediären Risiken steuern und dass sie Vorbehalte zu diesem sehr spezifischen Forschungsprojekt zeigten. Aufgrund dieser Herausforderungen wurden in der Ausschreibung für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme des gesamten Wasserstoffwerks final keine Angebote im erforderlichen technischen und kommerziellen Umfang von EPC-Kontraktoren abgegeben. Daher war es notwendig, die Ausschreibung in mehrere Lose bzw. Teilpakete für die einzelnen Einheiten des Wasserstoffwerks aufzuteilen. Zwischen den komplexen Losen war eine starke Koordinierung und Erklärung der Schnittstellen erforderlich.

Die parallele und iterative Bearbeitung der komplexen Schnittstellen zwischen den Losen erfolgte unter großem und zusätzlichem Abstimmungsaufwand zwischen den verschiedenen Loslieferanten. Dies führte zu Verzögerungen im zeitlichen Projektablauf. Die Verantwortlichkeit für die Anlagenplanung der einzelnen Einheiten des Wasserstoffwerks wechselte zwischen dem Basic- und Detail-Engineering. Im Basic-Engineering wurden andere Anlagenkonzepte verwendet als im Detail-Engineering. Dieser Wechsel führte zu vielen Anpassungen in der finalen technischen Anlagenplanung, wodurch sich teilweise die in den Genehmigungsunterlagen auf Grundlage des Basic-Engineering gemachten Angaben änderten. Diese führte zu Verzögerungen bei der Genehmigungsphase, da die endgültigen Genehmigungsunterlagen angepasst werden mussten. Dadurch wurde auch die Baugenehmigung für das Wasserstoffwerk später als geplant erteilt, wodurch die termingerechte Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks nicht mehr erreicht werden konnte.

EPC-KONTRAKTOREN NICHT VERFÜGBAR (WASSERSTOFFWERK)

[2] Engineering, Procurement, Construction (Detail-Planung und Kontrolle, Beschaffungswesen, Ausführung der Bau- und Montagearbeiten)

EMPFEHLUNGEN

Es ist ratsam, ausreichend Zeit für die Fördermittelanträge, den Vergabeprozess, die Projektierung und die Genehmigungsphase einzuplanen.

Es ist empfehlenswert zusätzliche Personalressourcen einzuplanen, um die Abstimmung mit dem Fördermittelgeber sicherzustellen und die Auflagen aus den Fördermittelbescheiden zu erfüllen.

Insbesondere der Genehmigungsprozess und die entsprechende Berücksichtigung der Auflagen sollte frühzeitig initiiert werden. Dabei sind intensive Gespräche mit der zuständigen Genehmigungsbehörde im Vorfeld vorteilhaft. Die erhaltenen Hinweise sollten in die Erstellung der Antragsgenehmigungsunterlagen einfließen.

Ein regelmäßiger Informationsaustausch über kommerzielle Wasserstoffprojekte, beispielsweise in Workshops, bietet dem EPC-Kontraktor die Möglichkeit, sein Know-how bei der Planung und Abwicklung von Wasserstoffprojekten zu vertiefen und die damit verbundenen Herausforderungen zu erkennen.





PROJEKT-UMSETZUNG

INNOVATIVE PROJEKTE VERLANGEN EINEN **ERHÖHTEN RESSOURCENAUFWAND**

Eine nicht ausreichende Koordination und Einbindung aller Industrie- und Forschungsprojektpartner zu Projektbeginn führte zu Verzögerungen, Missverständnissen und erhöhtem Aufwand auf Gesamt- sowie auf Teilprojektebene. Zusätzlich erschwerte die notwendige Unterbeauftragung von Ingenieur- und Planungsbüros für die Vorbereitung der Ausschreibung und Vergabe der Wasserstofftankstelle die Kommunikation, da zusätzliche Schnittstellen entstanden sind, die den Abstimmungsaufwand erhöht haben. Insgesamt resultierte dies in einem komplexeren und zeitintensiveren Projektmanagement.

EMPFEHLUNGEN

Bei Forschungsprojekten mit neuartigen Technologien sind eine enge Abstimmung aller Projektpartner, regelmäßige Projekttreffen sowie eine klare Klärung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten entscheidend.

Mit der steigenden Anzahl von Projektpartnern und Unterauftragnehmern ist eine Berücksichtigung zusätzlicher Kommunikationsschnittstellen notwendig. Die Einrichtung von projektübergreifenden Plattformen zur Datenablage ermöglicht dafür einen effektiven Austausch.

Bei geförderten komplexen Innovationsvorhaben sollten in den Förderprogrammen ausreichend Ressourcen für Projektmanagement eingeplant und unterstützt werden.

NIEDRIGER ERFAHRUNGSSTAND IN DER **KOMMERZIELLEN ABWICKLUNG** VON PIONIERPROJEKTEN

Die nachfolgenden Erfahrungen spiegeln typische Rahmenbedingungen wider, die bei der Umsetzung früher kommerzieller Wasserstoffprojekte in einem sich noch entwickelnden Marktumfeld beobachtet wurden. Der Markt für großtechnische Wasserstoffprojekte befindet sich weiterhin in einer frühen Entwicklungsphase. Dadurch existieren für viele Leistungsbereiche noch begrenzte Markt- und Erfahrungswerte hinsichtlich Kostenstrukturen, Vertragsmodellen, Risikoverteilungen und kommerziellen Standards. Die Umsetzung von Wasserstoffprojekten erfordert häufig die Zusammenarbeit einer Vielzahl von Projektpartnern mit unterschiedlichen Rollen entlang der Wertschöpfungskette. Hieraus ergeben sich erhöhte Anforderungen an die vertragliche und kommerzielle Abstimmung zwischen den Beteiligten. Für verschiedene Technologien und Leistungen stehen bislang nur begrenzte Referenzprojekte zur Verfügung. Dies erschwert die Bewertung von Kosten, Terminplänen, Leistungsumfängen und projektspezifischen Risiken im Vergleich zu etablierten Industriebereichen. Bei innovativen Wasserstoffprojekten entwickeln sich technische, regulatorische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen teilweise parallel zur Projektumsetzung weiter. Dadurch entsteht ein erhöhter Bedarf an Flexibilität in der Vertrags- und Projektabwicklung.

Öffentlich geförderte Wasserstoffprojekte beinhalten zusätzliche Anforderungen an Mittelabrufe, Berichtswesen, Nachweisführung und Fördermittelmanagement. Diese Themen stellen einen wesentlichen Bestandteil der Projektabwicklung dar und sollten frühzeitig berücksichtigt werden. Die Umsetzung zeigte, dass kommerzielle Fragestellungen, Fördermittelanforderungen, Vertragsmanagement und Projektsteuerung bereits in frühen Projektphasen eine zentrale Rolle für den Projekterfolg spielen.

EMPFEHLUNGEN

Für Wasserstoffprojekte sollten ausreichend Zeit und Ressourcen für die kommerzielle Projektvorbereitung eingeplant werden, insbesondere für Vertragsgestaltung, Risikobewertung und Vergabestrategien.

Es empfiehlt sich, kommerzielle Rahmenbedingungen, Verantwortlichkeiten und Leistungsabgrenzungen zwischen den Projektpartnern möglichst frühzeitig vertraglich festzulegen.

Für innovative Projekte sollten Vertragsmodelle ausreichend Flexibilität bieten, um auf technologische Weiterentwicklungen und projektspezifische Anforderungen reagieren zu können.

Bei öffentlich geförderten Projekten empfiehlt sich die frühzeitige Einbindung von Fördermittelmanagement und Projektcontrolling, um Anforderungen aus Förderbescheiden, Berichtswesen und Nachweisführung effizient umzusetzen.

Standardisierte Prozesse für Änderungsmanagement, Freigaben, Kostenverfolgung und Vertragsmanagement können die Transparenz und Steuerbarkeit komplexer Projekte unterstützen.



Die Einführung neuer Technologien im Projekt Wasserstoffschiene Heidekrautbahn mit Erzeugung, Betankung und dem Einsatz von Brennstoffzellentriebzügen löst bei unterschiedlichen Interessengruppen (z.B. bei Anwohnern in der Nähe des H_2-Erzeugungswerks und der Betankungsanlage sowie Fahrgästen) Unsicherheiten und Fragen aus. Dazu zählen Bedenken hinsichtlich Sicherheit, Lärmschutz, Umweltaspekten, Zuverlässigkeit-, Technologievertrauen und Kosten. Ein offener und konstruktiver Umgang mit Ängsten und Fragestellungen legt den Grundstein für die Akzeptanz vergleichbarer Projekte in der Öffentlichkeit. Während der Planungsphase wurden Informationsveranstaltungen in verschiedenen Anliegergemeinden durchgeführt. Entsprechende Bürgerdialoge wurden im fortgeschrittenen Projektverlauf jedoch nicht rechtzeitig durchgeführt. Insbesondere die Anwohner in der Nähe des Wasserstoffwerkes und der Wasserstofftankstelle fühlten sich nicht ausreichend informiert.

ÖFFENTLICHKEITS-ARBEIT UND **AKZEPTANZ**

EMPFEHLUNGEN

Ein frühzeitiges Erkennen und gezieltes „Mitnehmen" verschiedener Interessengruppen ist essenziell, um Vertrauen auf- und Sorgen und Ängste abzubauen. Dazu zählt die Durchführung von Informationsveranstaltungen sowie regelmäßige Updates über Fortschritte und Sicherheitsmaßnahmen, speziell die gezielte und persönliche Ansprache bei Anwohnenden.

Darüber hinaus ist die Erstellung und regelmäßige Pflege einer Gesamtprojektwebseite sehr förderlich.

Die Einbindung aller Forschungs- und Industriepartner trägt dazu bei das Gesamtverständnis für den Außenstehenden zu erhöhen und auf übergreifende Fragestellungen reagieren zu können.

TANKSTELLE UND FAHRZEUGE

MESSDATENVERFÜGBARKEIT
VERTRAGLICH ABSICHERN

Die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Tankstellenbetriebsdaten wurde im Ausschreibungsprozess der Wasserstofftankstelle nicht berücksichtigt. Dies führte zu einem erheblichen zusätzlichen Aufwand und erforderte zahlreiche nachträgliche Abstimmungen zwischen den Projektbeteiligten. Demgegenüber wurde eine vorläufige zwischen dem DLR, der NEB und dem Fahrzeuglieferanten abgestimmte Fahrzeugmesswertetabelle als integrativer Bestandteil in den Fahrzeugliefervertrag aufgenommen. Dadurch wurde sichergestellt, dass die Fahrzeugdaten der Begleitforschung zur Verfügung gestellt werden.

EMPFEHLUNGEN

Eine klare und frühzeitige Definition der Schnittstellen sowie eine Regelung der Rollen, Aufgaben und Zuständigkeiten sind essenziell, um die Verfügbarkeit von Messdaten sicherzustellen.

Die Integration konkreter, verpflichtender Datenanforderungen an Zulieferer in den Ausschreibungsunterlagen und Lieferverträgen der technischen Anlagen und/oder Komponenten stellt die Datenverfügbarkeit für die Begleitforschung sicher.





BETANKUNGS-PROTOKOLLE NICHT AUSREICHEND NORMIERT

Sichere und zuverlässige Betankungsvorgänge bei sämtlichen zu erwartenden Umgebungstemperaturen erfordern einen beträchtlichen Nachweisführungsaufwand, da in der aktuellen Normenlage keine standardisierten Betankungsprotokolle für Schienenfahrzeuge existieren. Stattdessen werden in den Normen aktuell nur Grenzwerte für die wichtigsten sicherheitskritischen Parameter bei der Wasserstoffbetankung genannt. Hierbei ist vorgeschrieben, dass die Fahrzeugspeicher einen Füllstand von 100 % nicht überschreiten dürfen. Eine sich an die Überfüllung anschließende Erwärmung könnte zu einer Überschreitung des Maximaldrucks führen, was einem sicherheitskritischen Szenario entspricht. Dieses Überfüllen kann vor allem bei geringen Umgebungstemperaturen auftreten. Darüber hinaus ist vorgeschrieben, dass sich die Fahrzeugspeicher nicht über 85 °C erwärmen dürfen. Die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten dieses Grenzwertes sinkt, je geringer die Vorkühltemperatur gewählt wird. Die geringste Vorkühltemperatur in öffentlichen Wasserstofftankstellen beträgt aktuell –40 °C.

Die Wasserstoffspeicher besitzen während der Betankung im Allgemeinen keine homogene Temperaturverteilung. Stattdessen gibt es innerhalb der Speicher lokal Gastemperaturen, die deutlich unter oder über der Mitteltemperatur liegen („Hot Spots"). Die Bestimmung der maximalen lokalen Temperatur in diesen Hotspots erfordert CFD-Simulationen und eine aufwendige Validierung der Tanksysteme im Laborversuch. Im Rahmen des Validierungsprozesses muss sichergestellt werden, dass die maximalen lokalen Temperaturen den normativen Grenzwert von 85 °C nicht überschreiten. Die Kapazitäten für diese Validierungsversuche, sind aufgrund der hohen Spezialisierung bei den Prüforganisationen nur sehr begrenzt verfügbar.

Um Investitionen der Betankungsanlage und laufende Energiekosten im Betrieb zu reduzieren, wurde auf eine Vorkühlung des Wasserstoffs auf –40 °C verzichtet. Dies resultierte bei der Tankstelle in Basdorf in einer Verlängerung der erwarteten Betankungszeit von 20 auf 40 Minuten. Betrieblich optimiert wird die Betankung dadurch, dass parallel Vorgänge wie die Entsorgung von Brauchwasser und die Versorgung des Fahrzeugs mit Frischwasser durchgeführt werden. Möglich ist dies, da die Betankungsvorgänge nicht dauerhaft vom Triebfahrzeugführer gesteuert werden müssen. Insgesamt wurde somit in der Vorbereitung des Betankungsvorgangs auf der Heidekrautbahn darauf geachtet, einen möglichst automatisierten, zeit- und kosteneffizienten Betankungsvorgang zu etablieren.

EMPFEHLUNGEN

Die Schnittstelle zwischen Tankstelle und Fahrzeug, insbesondere im Hinblick auf die Betankungszeit, sollte in der Betriebsvorbereitungsphase frühzeitig bewertet werden, da die aktuelle Normenlage keine standardisierten Betankungsprotokolle für Schienenfahrzeuge bereitstellt. Die frühzeitige Ausarbeitung und Validierung eines spezifischen Betankungsprotokolls ist von zentraler Bedeutung.

Die intensive Abstimmung und Einbindung von Prüforganisationen sowie die frühzeitige Abfrage der sicherheits- und genehmigungsrelevanten Anforderungen an die Betankung und die Fahrzeuge sind essenziell.

Eine frühzeitige Abstimmung zwischen Fahrzeughersteller und -betreiber sowie eine gemeinsame Koordination mit Tankstellenherstellern und -betreibern zu Betankungsprotokollen und Betankungszeiten ist unerlässlich.

Sofern bereits in der Branche verfügbar, sollte auf standardisierte Betankungsprotokolle zurückgegriffen werden.

WASSER-STOFFWERK

FRÜHZEITIGE AUSWAHL DER **ANLAGENHERSTELLER**

Zwischen der Planungsphase des Wasserstoffwerks und der Einreichung der Genehmigungsunterlagen gab es aufgrund des technischen Fortschritts Verbesserungen bei der Nennleistung von Elektrolyse-Zellstapeln (engl. stacks). Die derzeitige elektrische Nennleistung eines Elektrolyseur-Stacks beträgt etwa 2,5 Megawatt. Bei einer wasserstofferzeugenden Großanlage ist daher eine modulare Bauweise, die aus mehreren Stacks besteht, erforderlich.[4]

Der finale Hersteller für das Wasserstoffwerk wurde erst nach Einreichung der Genehmigungsunterlagen ausgewählt. Gegenüber den ursprünglichen Annahmen in den Genehmigungsunterlagen ergaben sich bei dem finalen Hersteller technische Änderungsanforderungen beim Design des Wasserstoffwerks. Hierzu zählen neben den Elektrolyse-Stacks auch die peripheren Subsysteme zur Wasseraufbereitung, Wasserstoffreinigung, Wärmemanagement, Sicherheitseinrichtungen, etc. Durch diese Änderungen war ein intensiver Austausch zwischen dem Auftraggeber und dem ausgewählten Hersteller der Elektrolyseuranlage notwendig, um die Genehmigungsunterlagen entsprechend anzupassen, wodurch das Genehmigungsverfahren verzögert wurde.

[4] Zauner, A., et al. STORE&GO - Deliverable D7.7: Analysis on future technology options and on techno-economic optimization 2019. [Online] 2019. [Zitat vom: 31.05.2024.] https://erig.eu/wp-content/uploads/2023/02/2019-07-04_STOREandGO_D7.7_accepted.pdf.

EMPFEHLUNGEN

Die Projektplanungsphase und der Prozess der Ausschreibung erfordern ausreichend Zeit.

Bei der Wahl des Standorts für das Wasserstoffwerk sollte auf das dort geltende Bauplanungsrecht für Elektrolyseanlagen geachtet werden.

Der technische Fortschritt bei den Elektrolyseanlagen ist aktuell sehr groß. Die Auswahl des Lieferanten der Elektrolyseanlage sollte möglichst frühzeitig, idealerweise bei der Erstellung der Genehmigungsunterlagen für das Wasserstoffwerk, erfolgen. Ist dies nicht möglich, kann es sein, dass bei der späteren Auswahl der Lieferanten die bereits eingereichten Genehmigungsunterlagen zeitaufwändig an die Anforderung des ausgewählten Lieferanten angepasst werden müssen.

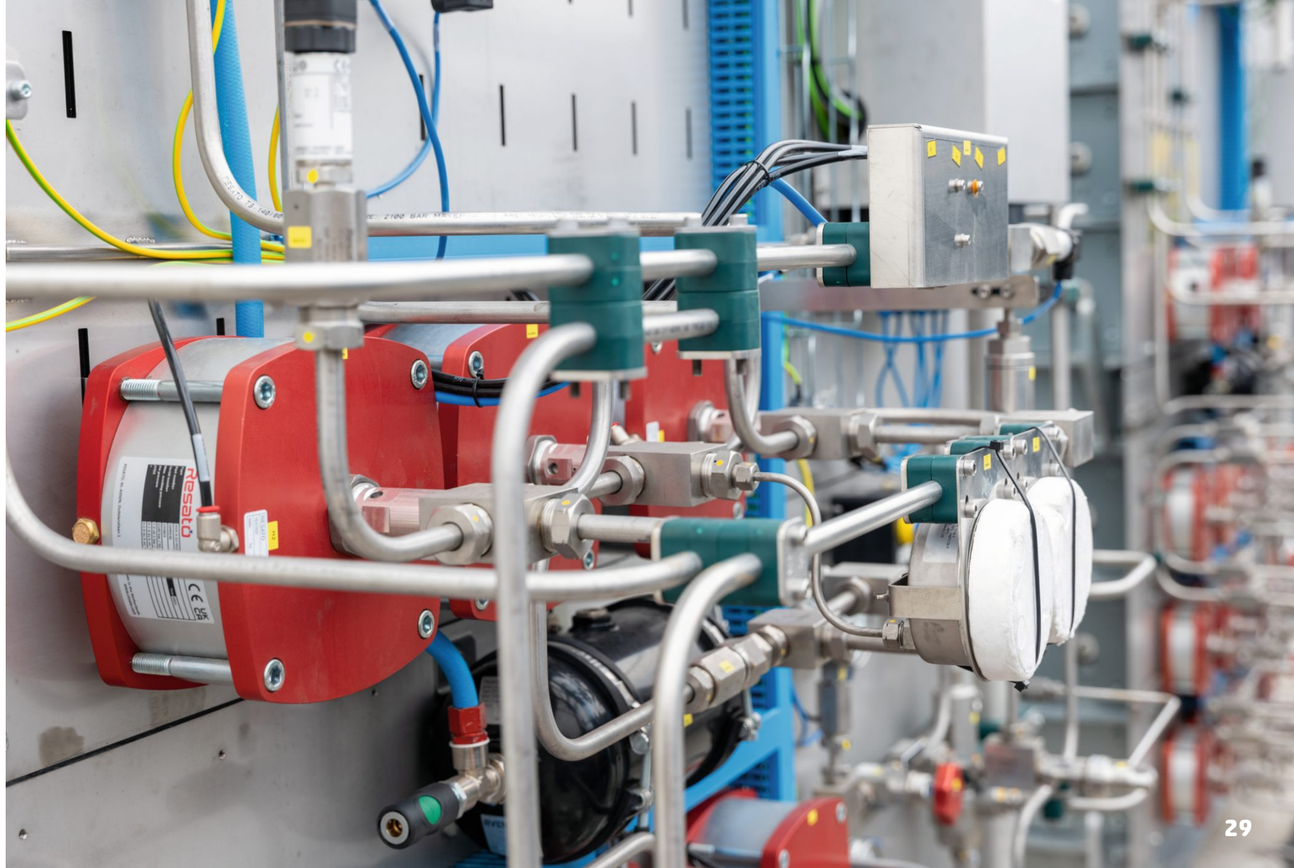


PLANUNG UND AUSFÜHRUNG

DES BAUS DES **WASSERSTOFFWERKS**

Die Planung und Ausführung des Baus des Wasserstoffwerks war durch die Errichtung einer neuartigen Industrieanlage mit umfangreichen Anforderungen an Hochbau, Tiefbau, Medieninfrastruktur und die Integration großtechnischer Wasserstofftechnologien geprägt. Die Bauausführung erfolgte dabei parallel zu verschiedenen technischen, infrastrukturellen und organisatorischen Projektaktivitäten, wie sie für innovative Industrieprojekte typisch sind.

Eine besondere Herausforderung bestand in der Koordination der unterschiedlichen Bau- und Infrastrukturmaßnahmen. Hierzu gehörten insbesondere die Herstellung von Gebäuden, Fundamenten, Verkehrsflächen, Medien- und Kabeltrassen sowie die Vorbereitung der Flächen für die spätere Installation der Anlagentechnik.





Da Wasserstoffprojekte derzeit noch durch eine hohe technologische Dynamik geprägt sind, wurden einzelne technische Randbedingungen während der Projektlaufzeit weiterentwickelt. Dies machte in einzelnen Bereichen Anpassungen der baulichen Planung erforderlich. Die parallele Bearbeitung von Planung, Beschaffung und Bau ermöglichte eine Beschleunigung der Projektumsetzung. Gleichzeitig erforderte dieser Ansatz eine kontinuierliche Abstimmung zwischen den beteiligten Fachdisziplinen, um technische und terminliche Anforderungen miteinander in Einklang zu bringen.

Während der Bauausführung hatten äußere Rahmenbedingungen wie Witterungseinflüsse und Baugrundverhältnisse Einfluss auf einzelne Bauaktivitäten. Insbesondere ein langer und kalter Winter sowie zeitweise erhöhte Grundwasserstände beeinflussten Tiefbauarbeiten, Kanalbauarbeiten und die Herstellung unterirdischer Infrastruktur. Die Umsetzung zeigte insgesamt, dass Wasserstoffprojekte aufgrund ihrer technischen Komplexität und der Vielzahl beteiligter Gewerke einen hohen Integrationsgrad zwischen Bau-, Infrastruktur- und Anlagenthemen erfordern. Positiv hervorzuheben war die Organisation des Projekts in objekt- und technologiebasierte Workstreams. Durch die Zuordnung klarer Verantwortlichkeiten für einzelne Anlagenbereiche und Technologien konnten technische Herausforderungen sowie Schnittstellen zwischen den Gewerken gezielter bearbeitet und koordiniert werden.

EMPFEHLUNGEN

Für zukünftige Wasserstoffprojekte empfiehlt sich eine möglichst frühzeitige und integrierte Planung von Hochbau, Tiefbau, Infrastruktur und Anlagentechnik, um Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Projektbestandteilen frühzeitig sichtbar zu machen.

Die parallele Durchführung von Planung, Beschaffung und Bau kann zur Verkürzung von Projektlaufzeiten beitragen und sollte durch geeignete Koordinations- und Änderungsprozesse begleitet werden.

Für Tiefbau- und Infrastrukturmaßnahmen empfiehlt es sich, standortspezifische Randbedingungen wie Baugrundverhältnisse, Grundwasserstände und saisonale Witterungseinflüsse frühzeitig in der Terminplanung zu berücksichtigen.

Für Projekte mit innovativen Technologien hat sich ein ausreichender zeitlicher Spielraum für die Konkretisierung technischer Anforderungen während der Planungs- und Bauphase als vorteilhaft erwiesen.



PLANUNG DER INBETRIEBNAHME

UND DES PROBEBETRIEBS DES **WASSERSTOFFWERKS**

Die Planung der Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks erfolgte stufenweise und orientierte sich an den sicherheitstechnischen, verfahrenstechnischen sowie elektrotechnischen Anforderungen der Gesamtanlage. Aufgrund der Vielzahl an Schnittstellen zwischen Elektrolyse, Verdichtung, Medienversorgung, EMSR-Technik, Sicherheitsfunktionen sowie den übergeordneten Leitsystemen wurde ein sequenzieller und abgestimmter Inbetriebnahmeablauf vorgesehen. Ziel war es, die einzelnen Systeme zunächst unabhängig voneinander zu prüfen und anschließend schrittweise in den Gesamtbetrieb zu überführen. Parallel zur technischen Inbetriebnahme wurden die erforderlichen behördlichen, sicherheitstechnischen sowie sachverständigen Prüfungen und Abnahmen in die Gesamtplanung integriert.

Die Prüfung startet mit einer kalten Inbetriebnahme. Diese umfasst insbesondere die mechanische Fertigstellungskontrolle (Mechanische Fertigstellung), Sicht- und Funktionsprüfungen der Komponenten, sowie die Prüfung der Sicherheits- und Verriegelungsfunktionen ohne Wasserstoffbetrieb. Bereits in dieser Phase erfolgen erste Prüfungen der Sicherheitsfunktionen, insbesondere der Not-Aus- und Nothalt-Ketten, der Gaswarnsysteme sowie der sicherheitsrelevanten Abschaltungen. Daran schließt sich die Inbetriebnahme der Steuerung an. Diese wird voraussichtlich mehrere Wochen in Anspruch nehmen und umfasst die schrittweise Integration aller Anlagenkomponenten in das zentrale Prozessleitsystem, die Parametrierung und Optimierung der Regelungsfunktionen sowie die Verifikation des automatisierten Anlagenbetriebs. Bestandteil dieser Phase sind ebenfalls umfassende



Tests der Sicherheitsfunktionen, insbesondere der Not-Aus- und Nothalt-Funktionen sowie die Verifikation der funktionalen Sicherheit im Zusammenspiel aller Gewerke. Aufgrund der hohen Anzahl an Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Lieferlosen und Gewerken stellt diese Phase einen wesentlichen Schwerpunkt der Gesamtinbetriebnahme dar.

Im Anschluss erfolgt die warme Inbetriebnahme. Diese umfasst die erstmalige Beaufschlagung der Anlage mit Betriebsmedien und die schrittweise Aktivierung der verfahrenstechnischen Prozesse unter Betriebsbedingungen. Parallel hierzu werden sicherheitsrelevante Abschaltungen, Gaswarnsysteme, Lüftungskonzepte, Not-Aus-Ketten und automatische Sicherheitsreaktionen unter realen Betriebsbedingungen überprüft. Parallel beziehungsweise unmittelbar anschließend erfolgen die erforderlichen Prüfungen und Abnahmen durch Sachverständige und zugelassene Überwachungsstellen. Hierzu zählen insbesondere Prüfungen der Druckanlagen und sicherheitsrelevanten Einrichtungen durch die ZÜS, Prüfungen gemäß §29a BImSchG, Prüfungen der Explosionsschutz- und Sicherheitsfunktionen sowie die erforderlichen behördlichen Abnahmen. Zusätzlich werden Performance- und Verfügbarkeitsnachweise (PVI) sowie die Dokumentation der sicherheitsrelevanten Funktionen und Schutzmaßnahmen überprüft. Die frühzeitige terminliche Einbindung der Sachverständigen sowie die Abstimmung der Prüfumfänge wurden dabei als wesentliche Voraussetzung für einen reibungslosen Inbetriebnahmeablauf berücksichtigt. Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme und Abnahme beginnt der Probebetrieb. Er dauert voraussichtlich mehrere Wochen bis wenige Monate und umfasst den kontinuierlichen Betrieb der Gesamtanlage unter realen Betriebsbedingungen. Ziel des Probebetriebs ist insbesondere die Verifikation der Betriebssicherheit, der Wasserstoffqualität, der Leistungsfähigkeit der Elektrolyse sowie des Zusammenspiels aller Teilanlagen im automatisierten Betrieb. Während der Planung und Vorbereitung der Inbetriebnahme zeigte sich insbesondere die hohe Komplexität der Schnittstellenkoordination zwischen den verschiedenen Anlagenlieferanten, Gewerken und Steuerungssystemen als Herausforderung. Zusätzlich führten teilweise parallellaufende Bau-, Montage- und Inbetriebnahmeaktivitäten zu erhöhtem Abstimmungsaufwand. Ebenfalls zeigte sich, dass die frühzeitige Koordination der erforderlichen Sachverständigenprüfungen und behördlichen Abnahmen wesentlich für die Einhaltung des Gesamtterminplans ist.

EMPFEHLUNGEN

Für zukünftige vergleichbare Projekte wird empfohlen, die Inbetriebnahmeplanung bereits frühzeitig parallel zur Ausführungsplanung zu entwickeln und die Schnittstellen zwischen den Gewerken detailliert zu definieren.

Eine frühzeitige gemeinsame Erstellung von Cause-&-Effect-Matrizen, Signal- und Schnittstellenlisten sowie abgestimmten Inbetriebnahmekonzepten aller Lieferanten kann die spätere Integration deutlich vereinfachen.

Die frühzeitige Einbindung von Sachverständigen, ZÜS, §29a-Sachverständigen sowie relevanten Behörden wird ebenfalls empfohlen, damit Prüfkonzepte, Dokumentationsanforderungen und Prüfumfänge bereits während der Ausführungs- und Inbetriebnahmeplanung abgestimmt werden können.

Für innovative Wasserstoffanlagen mit mehreren neuen Technologien wird zudem empfohlen, den Probebetrieb mit ausreichender Dauer vorzusehen, um Optimierungen unter realen Betriebsbedingungen durchführen und Betriebserfahrungen sammeln zu können.



Windkraft und Sonnenenergie auf die Schiene gebracht

wasserstoff schiene
HEIDEKRAUTBAHN

ZUSAMMEN-FASSUNG

Dieser Abschnitt fasst die bisher gewonnenen Erkenntnisse (Lessons Learned) aus der von 2022 bis 2026 laufenden Betriebsvorbereitungsphase des Projekts Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieben im Nahverkehr des Landkreises Barnim (H2BAR) zusammen – ergänzt um die Themen rund um die Verzögerungen beim Aufbau des Wasserstoffwerks.



PROJEKTVORBEREITUNG

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Externer Wasserstoffbezug versus projektinterne Wasserstofferzeugung	In der Projektvorbereitung wurde klar, dass die Marktverfügbarkeit von grünem Wasserstoff in Deutschland anfangs gering sein würde Aufgrund der daraus resultierenden Ausfallrisiken entschied man sich für ein eigenes Wasserstoffwerk	Bereits in der Projektplanungsphase die Entscheidung über die eigene Wasserstofflieferung oder der eigenen Wasserstofferzeugung treffen **Eine Entscheidung für die eigene Wasserstoffherstellung ist nur sinnvoll:** • bei Bau des Wasserstoffwerks in unmittelbarer Nähe der Zugtankstelle *oder* • bei Bau einer eigenen Wasserstoffpipeline bzw. Einrichtung eines Trailerbetriebs und bei Vorhandensein eines langfristigen Wasserstoffliefervertrages für den Zugbetrieb und bei Planung einer Backuplösung für den temporären Ausfall des Wasserstoffwerks Bei geplanter Aufnahme des Zugbetriebs in der mittelbaren Zukunft (in 5 Jahren oder später) kann die externe Wasserstofflieferung sinnvoller sein
Ersatzbeschaffung / Back-up	Wasserstoffverfügbarkeit und insbesondere Trailer-Verfügbarkeit in Deutschland zum Zeitpunkt der Betriebsaufnahme begrenzt Ausreichend große Trailerflotte, Abschluss langfristiger Verträge mit Lieferanten und erhöhter Personal- und Logistikaufwand für den verlässlichen Bezug von Wasserstoff aus mehreren Quellen erforderlich	Benötigte Wasserstoffmengen frühzeitig planen und zwischen den Projektpartnern abstimmen, um die Verfügbarkeit des Wasserstoffs sicherzustellen Nutzung von Logistikpartnern mit Erfahrungen im Gefahrguttransport und in der Abwicklung Liveüberwachung der Trailerflotte Automatische Belade- und Entladestationen mit Datenerfassung
Preissteigerungen Messstellen H_2-Werk	Preissteigerungen durch Projektverzögerungen	Inflationsbedingte Preissteigerungen mit einkalkulieren
Erfahrungstransfer von Dritten	Von Erfahrungen Dritter konnte profitiert werden, indem Fehler früherer Projekte nicht wiederholt wurden	Intensiver Austausch mit vergleichbaren H_2-Projekten vermeidet die Wiederholung von in anderen Projekten aufgetretenen Problemen

GENEHMIGUNG

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Genehmigungs-prozesse frühzeitig initiieren	Innovative Technologien erfordern einen längeren Zeitraum für den Genehmigungs-prozess, da sich die technischen, normativen und regulatorischen Rahmenbedingungen schneller ändern. Dies erfordert einen erhöhten Abstimmungsaufwand zwischen den Projekt-entwicklern, Fachplanern, Gutachtern, Herstellern und Genehmigungsbehörden. Im Rahmen dieses Prozesses kann eine Anpassung der Genehmigungs- und Planungsunterlagen notwendig sein.	Ausreichend Zeit für die Fördermittelanträge, den Vergabeprozess, die Projektierung und die Genehmigungsphase einplanen
Enge Abstimmung mit Zuwendungsgebern	Hoher Zeit- und Personalaufwand für die Abstimmung mit dem Fördermittelgeber und die Einhaltung der Auflagen	Frühzeitig zusätzlichen Zeit- und Personalaufwand für die Abstimmung mit Fördermittelgebern sowie für die Berücksichtigung der Auflagen aus den Fördermittelbescheiden kalkulieren
Wenige EPC-Kontraktoren (Wasserstoffwerk)	Aktuell sind auf dem Markt nur wenige EPC-Kontraktoren für den Bau eines Wasserstoffwerks verfügbar. Dadurch kann eine Aufteilung der Planung des Wasserstoffwerks in mehrere Teil-einheiten erforderlich sein	Ausreichend Zeit für den Vergabeprozess, das Basic- und Detail-Engineering im Rahmen des Genehmigungsprozesses einplanen Genehmigungsprozess frühzeitig initiieren Früh das Gespräch mit Genehmigungsbehörden suchen und erhaltene Hinweise zur Vorbereitung der Genehmigungsunterlagen berücksichtigen

PROJEKTUMSETZUNG

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Ressourcen Projektsteuerung	Erhöhter Aufwand für Steuerung Gesamtprojekt- sowie Teilprojekte	Bei komplexen Innovationsprojekten, wie diesem, mit verschie-denen Industriepartnern müssen ausreichend Personal-ressourcen für die Gesamtprojektsteuerung vorgesehen werden
Projektmanagement / Projektabwicklung	Wenig Erfahrung bei Lieferanten in der kommerziellen Projektabwicklung von großtechnischen Wasserstoffprojekten Erhöhter Abstimmungsaufwand zwischen den Beteiligten, insbesondere bei innovativen und öffentlich geförderten Wasserstoffprojekten	Ausreichend Zeit für die kommerzielle Projektvorbereitung einplanen Professionelle Gesamtprojektsteuerung und zusätzliche Teilprojektverantwortliche mit klaren Zuständigkeiten, Personen, Prozessen und Regeln frühzeitig definieren Bei innovativen und öffentlich geförderten Projekten zusätzliche Zeitpuffer einplanen, um flexibel auf techno-logische Weiterentwicklungen und erhöhten Aufwand des Fördermittelmanagements reagieren zu können
Öffentlichkeitsarbeit und Akzeptanz	Fehlende Bürgerdialoge im fortgeschrittenen Projektverlauf	Frühzeitige und regelmäßige Information der Öffentlichkeit über Projektfortschritte und Sicherheitsmaßnahmen

TANKSTELLE UND FAHRZEUGE

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Messdatenverfügbarkeit vertraglich absichern	Betriebsdatenverfügbarkeit der Tankstellen-daten wurde im Ausschreibungsprozess nicht berücksichtigt / kommuniziert	Verpflichtende Bereitstellung vorab definierter Messdaten muss in den Ausschreibungsunterlagen berücksichtigt werden
Auslegung Tankstelle: Lastenheftvorgabe	Detaillierte Konzeptvorgaben schränken den Lösungsraum ein	Möglichst funktionale Ausschreibung, um technischen Lösungsraum nicht einzuschränken und gleichzeitig breiten Bieterwettbewerb zu ermöglichen
Betankungsprotokolle	Betankungsprotokolle sind derzeit nicht ausreichend normiert	Wegen bisher nicht normierter Betankungsprozesse und Betankungsprotokolle ist eine frühe Vereinbarung zwischen Fahrzeughersteller, Fahrzeugeigner und -betreiber notwendig zu: • geplanten Betankungszeiten und -fenstern • dem Gefahrenübergang Tankstelle – Fahrzeug • der Schnittstelle Nozzle-Dispenser (Betankungstemperatur und -druck) • der Fahrzeugidentifikation Bei Verfügbarkeit sollte auf standardisierte Betankungsprotokolle zurückgegriffen werden Einbindung und frühzeitige Abfrage der sicherheits-/genehmigungsrelevanten Anforderungen mit Prüforganisationen

WASSERSTOFFWERK

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Elektrolyse-Zellstapel-Größe	Verfügbare elektrische Nennleistung pro Stack erschwert die Planung des gesamten Wasserstoff-werks, was zur Projektverzögerung führte	Ausreichend Zeit für die Planungsphase einplanen
Lieferanten-auswahl	Die finale Auswahl des Lieferanten des Wasserstoffwerks erst nach Einreichung der Genehmigungsunterlagen kann zu einer aufwendigen Überarbeitung der eingereichten Unterlagen führen, falls sich die technischen Anforde-rungen des finalen Lieferanten gegenüber den in den Planungsunterlagen getroffenen Annahmen ändern	Lieferantenauswahl Elektrolyseanlage idealerweise schon in der Phase der Erstellung der Genehmigungsunterlagen finalisieren
Planung und Ausführung des Baus des Wasserstoffwerks	Der Bau des Wasserstoffwerks als eine neuartige Industrieanlage war mit umfangreichen Anforderungen an Hoch- und Tiefbau, Medieninfrastruktur sowie die Integration der Wasserstofftechnologien gekennzeichnet Aufgrund von technologischen Weiterentwicklungen während der Projektlaufzeit waren Anpassungen bei der baulichen Planung erforderlich	Hoch- und Tiefbau, Infrastruktur sowie Anlagentechnik möglichst frühzeitig und integriert planen Für Projekte mit innovativen Technologien einen zusätzlichen Zeitpuffer für die Planungs- und Bauphase berücksichtigen Die parallele Bearbeitung von Planung, Beschaffung und Bau kann zu einer Verkürzung der Projektumsetzung führen Frühzeitig die standortspezifischen Tiefbau- und Infrastruktur-maßnahmen in die Gesamtprojektplanung integrieren
Planung der Inbetriebnahme und des Probe-betriebs des Wasserstoffwerks	Die Einzelsysteme Elektrolyse, Verdichtung, Medienversorgung, EMSR-Technik und übergeordnetes Leitsystem wurden zunächst unabhängig, danach schrittweise in die Gesamtanlage überprüft Die Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks gliederte sich in die Phasen kalte Inbetriebnahme, Inbetriebnahme der Steuerung, warme Inbetriebnahme, Prüfung und Abnahme durch Sachverständige und zugelassene Überwachungsstellen sowie Abnahmetests der Elektrolyse- und Verdichteranlage, im Anschluss startete der Probebetrieb	Zur Verringerung des Integrations- und Koordinierungs-aufwandes während der Inbetriebnahmephase sollte(n) die Inbetriebnahmeplanung parallel zur Ausführungsplanung entwickelt, die Inbetriebnahmekonzepte aller Lieferanten, die Einbindung von Sachverständigen und zugelassenen Überwachungsstellen frühzeitig abgestimmt werden.

wasserstoff schiene
HEIDEKRAUTBAHN



GRÜNER WASSERSTOFF TREIBT UNS AN

GEFÖRDERT DURCH

Bundesministerium für Verkehr

LAND BRANDENBURG
MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, ENERGIE, KLIMASCHUTZ UND EUROPA

WISSENSCHAFTLICH BEGLEITET DURCH

b-tu Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

WASSERSTOFFSCHIENE-HEIDEKRAUTBAHN.DE

EIN **VERBUND-PROJEKT** VON:

ENERTRAG
Eine Energie voraus

KREISWERKE BARNIM

NEB
NIEDERBARNIMER EISENBAHN

IMPRESSUM

Verfasser
Mathias Böhm, Steffen Wieser, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Fahrzeugkonzepte, Frank Gillung, Krunal Thummar, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU), Fachgebiet Thermische Energietechnik

Mit Beiträgen von: Christian Mehnert (KWB), Max Schenkluhn (ENERTRAG), Marcus Badow, David Reinhard Schenker (ENERTRAG).

Design
FORMAT Werbeagentur, Schwedt/Oder

Bildnachweis
shutterstock.com, NEB (Siemens), Torsten Stapel, Enertrag

Erscheinungsdatum
November 2026

Weiterführende Projektinformationen:
https://wasserstoffschiene-heidekrautbahn.de/

Anfragen unter:
info@wasserstoffschiene-heidekrautbahn.de

wasserstoff schiene
HEIDEKRAUTBAHN

Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (MWAE)
(Einzelmaßnahmen nach dem ZiFoG, Antragsnummer: 80259660 (DLR), 80259654 (BTU)),
Laufzeit: 08/2022 bis 12/2035; Projektlangtitel: Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieben
im Nahverkehr des Landkreises Barnim, betrieben mit 100% EE-Wasserstoff (H2BAR).

Teilprojekt BTU: Begleitforschung „Grüne Wasserstofferzeugung, Transport und Speicherung"
Teilprojekt DLR: Begleitforschung Fahrzeuge und Tankstelle.