



wasserstoff schiene

HEIDEKRAUTBAHN

Leit- faden #1

Betriebsvorbereitungs-
phase 2022-2024

Erfahrungen im Rahmen des Projekts

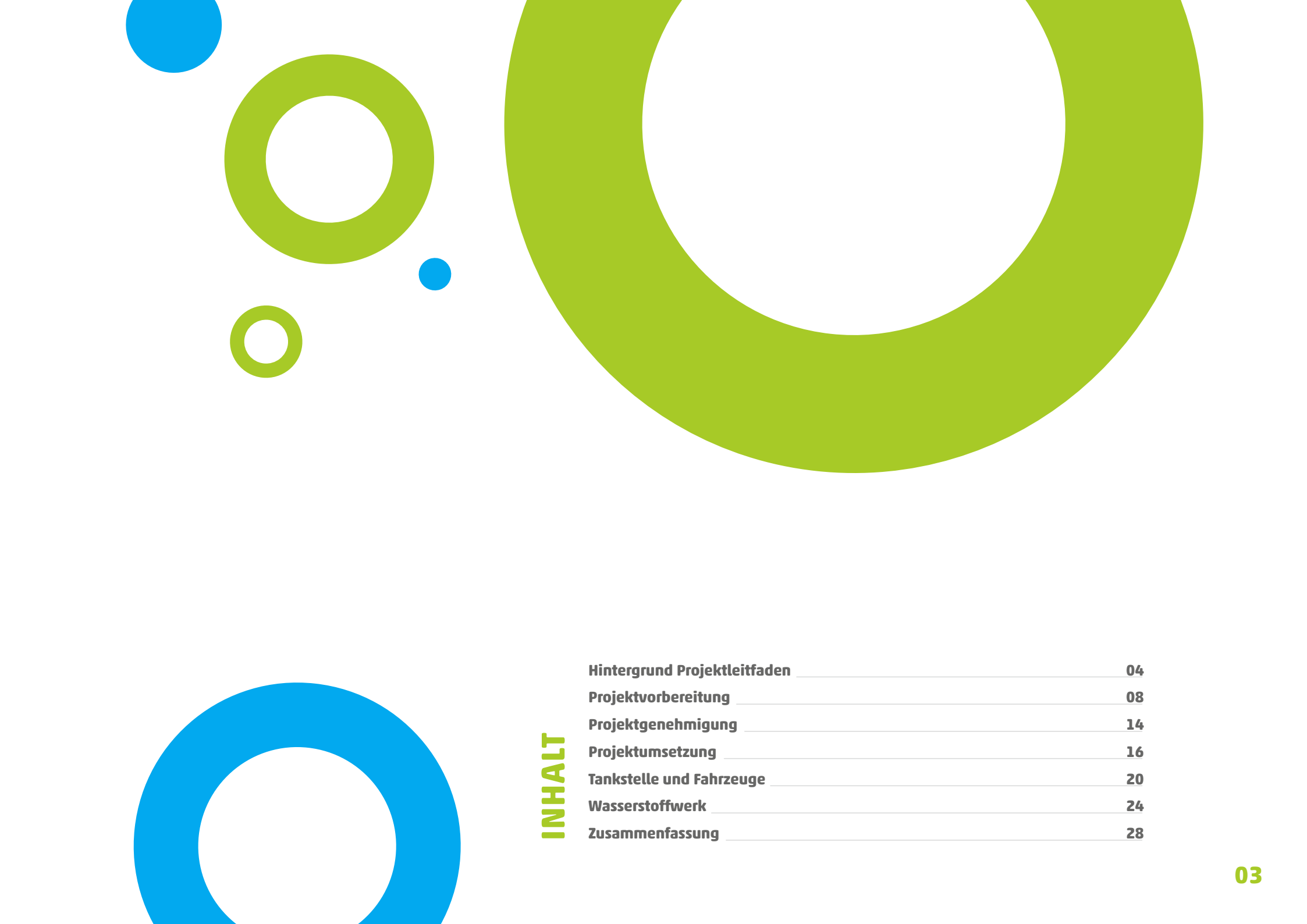
Einsatz von Wasserstoff-Brennstoff-
zellenantrieben im Nahverkehr des
Landkreises Barnim (H2BAR)

UNSERE MISSION

MOBILITÄTSPARTNER VON MORGEN

Auf der Heidekrautbahn verkehren in den Landkreisen Barnim und Oberhavel ab Ende 2024 wasserstoffbetriebene Brennstoffzellen-Hybridtriebzüge (eng. Hydrogen Electric Multiple Unit - HEMU). Die Fahrzeuge des von Siemens Mobility gebauten Typs Mireo Plus H werden ab 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 Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt und die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg begleitet. Das Projekt soll zeigen, dass mit Wasserstoff ein flexibler und gleichzeitig CO₂-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	16
Tankstelle und Fahrzeuge	20
Wasserstoffwerk	24
Zusammenfassung	28



HINTERGRUND PROJEKTL EITFADEN

Mit regional erzeugtem, grünem Wasserstoff aus erneuerbarer Wind- und Solarenergie werden ab Ende 2024 sieben Brennstoffzellen-Triebzüge auf der Heidekrautbahn (Regionalbahnlinie 27, RB 27) im Rahmen eines Forschungsvorhabens in den Landkreisen Barnim und Oberhavel in Betrieb genommen.* Wasserstoff als Energieträger ermöglicht einen lokal emissionsfreien Bahnbetrieb ohne den Neu- oder Ausbau von Oberleitungen. Mit Wasserstoff lassen sich Schwankungen bei der Erzeugung erneuerbarer Energien ausgleichen, um bei Dunkelflauten, wenn über mehrere Tage keine Sonne scheint und wenig Wind weht, Stromnetze zu stabilisieren. Die Wasserstoffzüge sollen mittelfristig mit Dieseltriebzügen vergleichbare Betriebskosten erreichen.

*Mit der Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks im Landkreis Oberhavel (bei Oranienburg).



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

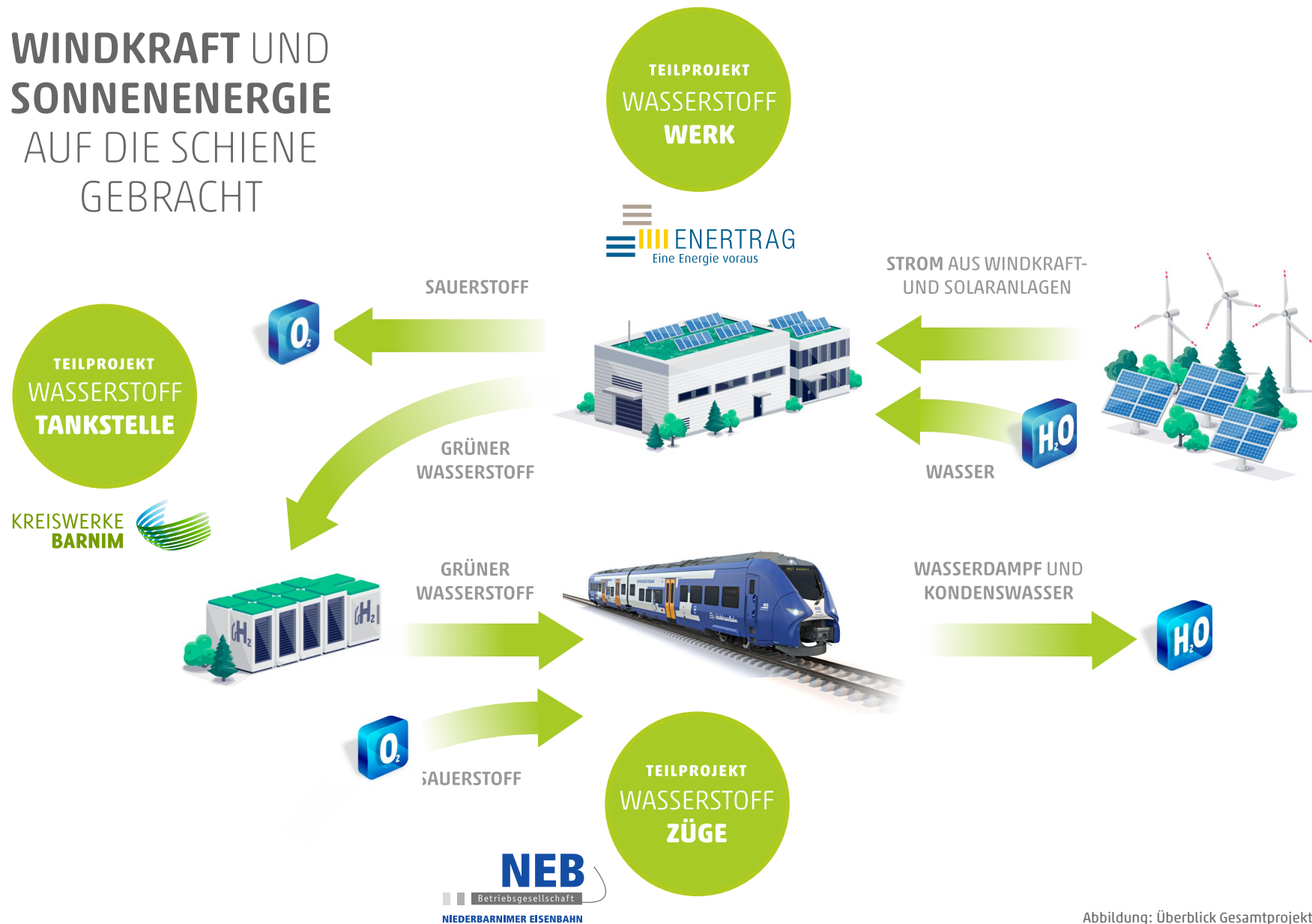


Abbildung: Überblick Gesamtprojekt

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 (NIP II). 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 2024 laufenden Betriebsvorbereitungsphase zusammen. Die Schwerpunkte adressieren zentrale Themenfelder wie die Projektvorbereitung, die Genehmigungsprozesse, das Projektmanagement, die Wasserstofftankstelle und Brennstoffzellen-Hybridtriebzüge sowie das Wasserstoffwerk für die Elektrolyse.



Wind- und Solarpark



Wissenschaftliche
**Begleit-
forschung**

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 einer Lieferkette. 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 Liefer Schwierigkeiten 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 geeigneter Transportbetrieb mit Tankfahrzeugen genutzt werden. Der Bau einer Wasserstoff-

pipeline 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 Tankfahrzeugen beliefert werden kann.

¹ Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser GmbH. RB33: evb setzt Zugbetrieb trotz eingeschränkter Wasserstoffversorgung 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 gesichert werden.

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 Probetrieb inklusive der benötigten Wasserstoffmenge frühzeitig geplant werden, damit hierfür ausreichend Wasserstoff verfügbar ist.



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 H₂-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 H₂-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 Erwartungen 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

Der Pilotcharakter des Projekts bringt besondere Herausforderungen mit sich, da es an Erfahrungen aus Referenzprojekten fehlt. Sowohl Genehmigungsbehörden als auch Projektpartner verfügen nur über begrenzte Vorerfahrungen mit Wasserstoffprojekten, was zu Unsicherheiten führt. Dies äußert sich in unklaren Anforderungen an Antragsunterlagen, mangelndem Wissen über relevante Normen und Regelwerke sowie in der Notwendigkeit, behördliche Vorgaben erst im Verlauf des Genehmigungsprozesses zu definieren oder nachträglich anzupassen.



Derzeit sind auf dem Markt nur wenige EPC²-Kontraktoren verfügbar, die eine gesamte Verantwortung für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme eines gesamten Wasserstoffwerks übernehmen können. Der Grund dafür ist, dass die EPC-Kontraktoren die mit dem gesamten Wasserstoffwerk zusammenhängenden intermediären Risiken erheblich schwerer steuern können³. Aufgrund dieser Herausforderungen wurden in der Ausschreibung für die Planung, den Bau und die Inbetriebnahme des gesamten Wasserstoffwerks keine Angebote 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 gezielte Koordinierung und Abstimmung der beteiligten Schnittstellen erforderlich.

Die parallele und iterative Bearbeitung der komplexen Schnittstellen zwischen den Losen erfolgte unter großem und zusätzlichem Aufwand zwischen den verschiedenen Loslieferanten. Dies führte zu Verzögerungen im 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. Der Grund hierfür war, dass sich die finalen Loslieferanten von denen im Basic-Engineering zu Grunde gelegten Liefere-

ranten unterschieden. Dieser Wechsel führte zu zahlreichen Anpassungen bei der finalen technischen Anlagenplanung. Dadurch mussten bereits getätigte Angaben revidiert werden. Ein solcher Prozess wird zu Verzögerungen bei der Erteilung der Baugenehmigung für das Wasserstoffwerk führen, was zu einer Verzögerung bei der Erteilung der Baugenehmigung für das Wasserstoffwerk führen wird, wodurch die termingerechte Inbetriebnahme des Wasserstoffwerks voraussichtlich nicht mehr erreicht werden kann.

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 Vor-

feld 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.

EPC-KONTRAKTOREN NICHT VERFÜGBAR (WASSERSTOFFWERK)

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

³ Pascucci, R. Denham Hydrogen Demonstration Project. ARENA Funding Milestone 1 and 2 - Lessons Learnt Report 2023. [Online] 2023. [Zitat vom: 03.05.2024.] <https://arena.gov.au/assets/2023/04/horizon-power-denham-hydrogen-demonstration-lessons-learnt-1-2.pdf>.



PROJEKT- UMSETZUNG

AUSREICHEND RESSOURCEN FÜR **DAS PROJEKTMANAGEMENT** EINPLANEN

Eine nicht ausreichende Koordination und Einbindung aller Industrie- und Forschungsprojektpartner zu Projektbeginn führte zu Verzögerungen, Missverständnissen und erhöhtem Aufwand auf Gesamtprojekt- 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 Integration neuartiger Technologien ist es wichtig, dass alle Projektpartner miteinbezogen werden (enge Abstimmung, regelmäßige Projekttreffen, Verantwortungsklä rung).

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.

WENIG ERFAHRUNG IN DER **KOMMER- ZIELLEN PROJEKT- ABWICKLUNG**

Zu Projektbeginn gab es im Wasserstoff-energiesektor wenige etablierte Lieferanten von Komponenten, Systemen sowie Gesamtprojektplaner. Gleichzeitig führte begrenztes Fachwissen im Bereich von Wasserstoffschienenprojekten zu langen Planungsprozessen. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass keine standardisierte Vorgehensweise für den Betrieb von Brennstoffzellen-Triebzügen mit grünem Wasserstoff verfügbar ist.

EMPFEHLUNGEN

Projektleiter und -planer sollten sich von Unternehmen beraten lassen, die bereits vergleichbare kommerzielle Wasserstoffprojekte ausgeführt haben. Sie erhalten dadurch Einblicke in die damit verbundenen Probleme und können frühe Fehler in der Planungsphase vermeiden.

Falls die Wasserstoffherstellung, die Zugtankstelleninfrastruktur und der Zugbetrieb im Projekt von unterschiedlichen Partnern wahrgenommen wird, ist es empfehlenswert, dass diese untereinander frühzeitig gegenseitige Lieferverträge für den Wasserstoff aushandeln und abschließen. Dadurch lassen sich spätere Verzögerungen im Projektablauf vermeiden.





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 H₂-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

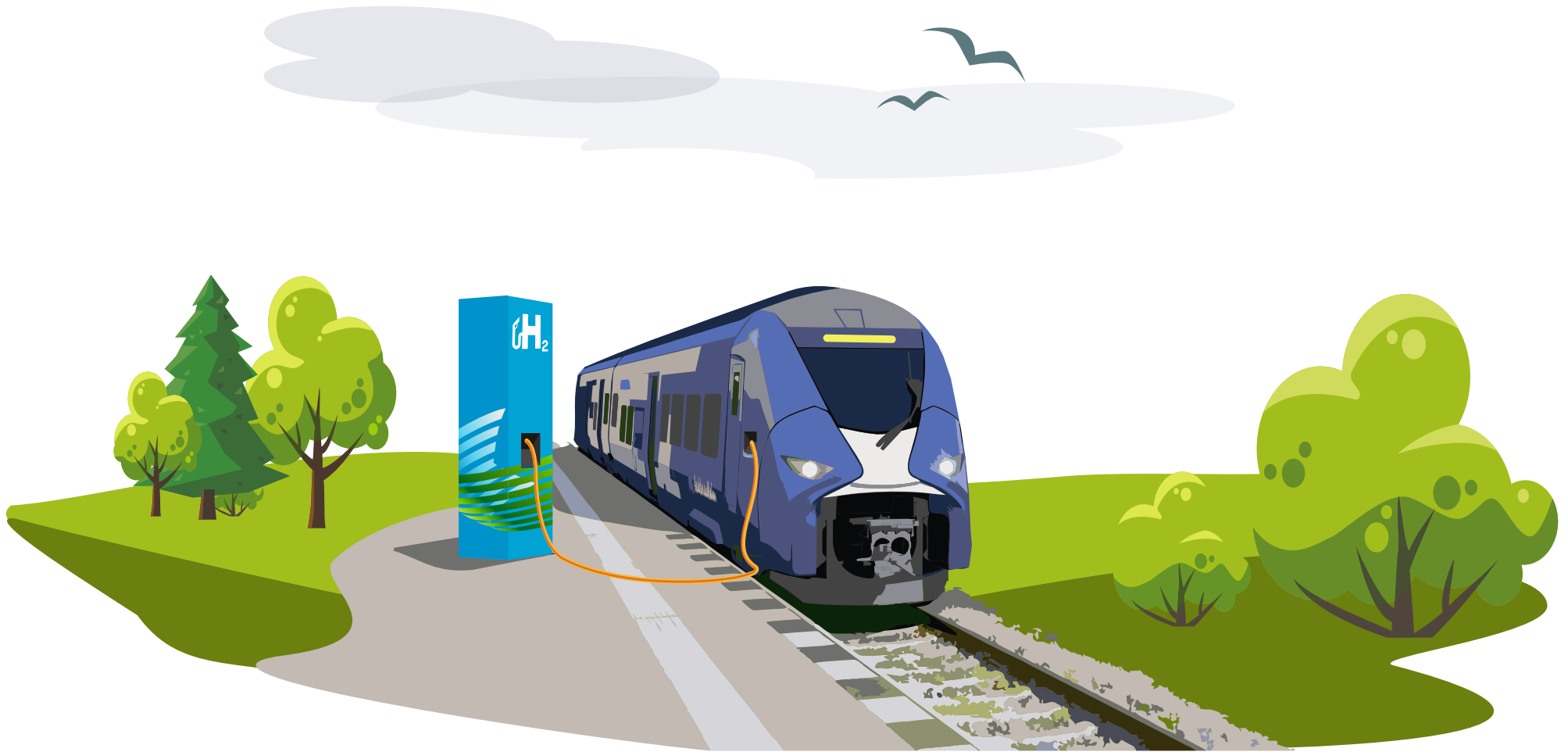
MESSDATENVERFÜGBARKEIT VERTRAGLICH ABSICHERN

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 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.





Richtung
Klosterfeld
Groß Schönebeck
Wensickendorf
Schwabenmagen
2

NEB
SIEMENS

563 005-2

NEB
WIEDERBAUEN EISENBH

563 005



Heidekrautbahn

563 005-2



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 2024 laufenden Betriebsvorbereitungsphase des Projekts Einsatz von Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieben im Nahverkehr des Landkreises Barnim (H2BAR) zusammen.



Thema	Hintergrund	Lessons learned
Externer Wasserstoffbezug versus projektinterne Wasserstofferzeugung	Aktuell ist aufgrund fehlender Marktverfügbarkeiten von grünem Wasserstoff eine konstante Wasserstofflieferung für den Zugbetrieb mit hohen Ausfallrisiken verbunden	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 Wasserstofflieferungsvertrages 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 Wasserstofflieferung sinnvoller sein
Ersatzbeschaffung / Back-up	Wasserstoffverfügbarkeit aktuell angespannt, insbesondere Trailer-Verfügbarkeit	Benötigte Wasserstoffmengen frühzeitig planen und zwischen den Projektpartnern abstimmen, um die Verfügbarkeit des Wasserstoffs sicherzustellen
Preissteigerungen Messstellen H₂-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

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Genehmigungsprozesse frühzeitig initiieren	Lange Bearbeitungszeiträume durch Genehmigungsbehörden	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 Teileinheiten 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 verschiedenen Industriepartnern, müssen ausreichend Personalressourcen für die Gesamtprojektsteuerung vorgesehen werden
Projektmanagement / Projektentwicklung	Wenig Erfahrung bei Lieferanten in der kommerziellen Projektentwicklung	Professionelle Gesamtprojektsteuerung und zusätzliche Teilprojektverantwortliche mit klaren Zuständigkeiten, Personen, Prozessen und Regeln definieren
Öffentlichkeitsarbeit und Akzeptanz	Fehlende Bürgerdialoge im fortgeschrittenen Projektverlauf	Regelmäßige Updates über Fortschritte und Sicherheitsmaßnahmen implementieren

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Messdatenverfügbarkeit vertraglich absichern	Betriebsdatenverfügbarkeit der Tankstellendaten 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

Thema	Hintergrund	Lessons learned
Elektrolyse-Zellstapel-Größe	Verfügbare elektrische Nennleistung pro Stack erschwert die Planung des gesamten Wasserstoffwerks, was zur Projektverzögerung führte	Ausreichend Zeit für die Planungsphase einplanen
Lieferantenauswahl	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 Anforderungen des finalen Lieferanten gegenüber den in den Planungsunterlagen getroffenen Annahmen ändern	Lieferantenauswahl Elektrolyseanlage idealerweise schon in der Phase der Erstellung der Genehmigungsunterlagen finalisieren

wasserstoff schiene

HEIDEKRAUTBAHN

GRÜNER
WASSERSTOFF
TREIBT UNS AN.

GEFÖRDERT DURCH



WISSENSCHAFTLICH BEGLEITET DURCH



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



WASSERSTOFFSCHIENE-HEIDEKRAUTBAHN.DE

EIN VERBUND- PROJEKT VON:



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.

Design

FORMAT Werbeagentur, Schwedt/Oder

Bildnachweis

shutterstock.com, NEB (Siemens), Torsten Stapel

Erscheinungsdatum

Dezember 2024

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.