

Forschungsbericht BWPLUS

**Durchführbarkeitsuntersuchung zu Pilotlade- und Tankinfrastruktur für Langstrecken Lkw
(VorPiLaTes)**

von

Dr. Anna-Lena Klingler¹, Lars Mauch¹, Christopher Voglstätter², Stefan Aschbrenner², Priv.-Doz. Dr.
Patrick Plötz³, Walter Holderried⁴

¹Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
Förderkennzeichen: L752219

²Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Förderkennzeichen: L7522121

³Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Förderkennzeichen: L7522120

⁴e-mobil BW GmbH
Assoziierter Partner ohne Förderung

Laufzeit: 14.06.2022 – 30.11.2022

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung
(BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert

Dezember 2022

Inhalt:

1. Problemstellung und Zielsetzung
2. Kurzbeschreibung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Forschungsergebnisse
3. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?
4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

1. Problemstellung und Zielsetzung

Die CO₂-Flottengrenzwerte der Europäischen Union für schwere Nutzfahrzeuge und der Klimaschutzplan der Bundesregierung erfordern eine erhebliche Reduktion der CO₂-Emissionen von Lkw bis 2030. Hierbei bringen die Fahrprofile im Bereich des Langstreckentransports mit schweren Lkw besondere Herausforderungen hinsichtlich der Energieversorgung und der Standortwahl für Tank- und Ladeinfrastruktur mit sich.

Um dieser Komplexität zu begegnen, möchte das Land Baden-Württemberg vorangehen und eine Pilotinfrastruktur für die Erprobung sowie den Betrieb von Langstecken-Lkw mit batterieelektrischem Antrieb (BEV-Lkw), sowie mit Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie (H₂-BZ-Lkw) schaffen.

Ziel des Projektes „PiLaTes – Vorprojekt“ ist daher zunächst eine Durchführbarkeitsuntersuchung für die Realisierung einer Pilotlade- und Wasserstofftankstelle in Baden-Württemberg. Zunächst soll hierfür der aktuelle Stand der Technik, der Stand der Normentwicklung sowie die aktuelle und zukünftige Marktverfügbarkeit von Hochleistungsschnelllade- und Tankstelleninfrastruktur für den Lkw-Fernverkehr ermittelt werden. Zudem sollen der Platzbedarf für die geplante Pilotinfrastruktur analysiert werden und eine erste Kostenschätzung erfolgen. Schließlich sollen Kriterien für mögliche Standorte entwickelt und ein geeigneter Standort für die Pilotinfrastruktur identifiziert werden.

Folgende Fragen sollen dabei geklärt werden:

- Welche technischen und administrativen Herausforderungen bestehen?
- Welche Kriterien müssen mögliche Standorte für die geplante Infrastruktur erfüllen?
- Welche Standorte kommen für die Umsetzung der Pilotinfrastruktur in Frage?
- Mit welchem Fahrzeugaufkommen ist für den Standort zu rechnen? Welcher Energie- bzw. Leistungsbedarf ergibt sich daraus?
- Welche Kosten sind zu erwarten?

Bei der Bearbeitung der genannten Fragestellungen soll stets das Gesamtvorhaben im Blick behalten werden und insbesondere, wo immer möglich, der zukünftig flächendeckende Ausbau von Lade- und Wasserstofftankstelleninfrastruktur unterstützt werden.

2. Kurzbeschreibung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Forschungsergebnisse

Im Folgenden werden die zentralen Arbeiten und Ergebnisse des Projektes VorPiLaTes aufgeführt und kurz erläutert. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag auf der Identifikation eines geeigneten Standorts für die spätere Umsetzung der Infrastruktur sowie den unterstützenden Tätigkeiten.

Stand der Wissenschaft und Technik

Technologische Reife und Praxistauglichkeit

Zur technologischen Reife und damit auch zur Praxistauglichkeit einer kombinierten Hochleistungs-Ladestation (MCS) und Wasserstofftankstelle an einen Standort können zum aktuellen Zeitpunkt keine konkreten Aussagen getroffen werden, da es sich um eine Pilotanlage (erste Ihrer Art) handeln würde. Eine getrennte Betrachtung der Technologiereife für Hochleistungs-Ladestationen oder Wasserstoff-tankstellen für Druck- und Flüssigbetankung lässt jedoch wiederum einige Aussagen zu.

Hochleistungsladen mit CCS und MCS

Beim Hochleistungsladen sollten bzgl. Technologischer Reife und Praxistauglichkeit zwischen dem bestehenden CCS-Standard (bis einschl. 350 kW) und dem in Entwicklung befindlichen MCS (350 – 1200 kW) unterschieden werden.

Schnellladen mit bis zu 350 kW ist breit kommerziell verfügbar und über 1,000 CCS-Ladepunkte sind in Europa installiert (Plötz 2022).¹ Die Technologie ist demnach TRL 9 und breit kommerziell im Einsatz. Bzgl. der Praxistauglichkeit ist zu beachten, dass viele der existierenden öffentlichen Ladepunkte für Pkw ausgelegt sind, ist teilweise unklar wie gut die existierenden öffentlichen Ladepunkte durch Lkw genutzt werden können.

Beim MCS wird der Standard in einer ersten offiziellen Version für das Jahr 2023 oder spätestens 2024 erwartet. Es gab bereits Prototypen und Tests in Laborumgebungen. Erste Demonstrationsprojekte laufen derzeit (vgl. <https://www.hochleistungsladen-lkw.de/hola-de/index.php>) und eine Erprobung in realistischer Umgebung ist für dieses oder nächstes Jahr in mehreren Projekten in Europa geplant. Insgesamt ist daher von TRL 7 – 8 auszugehen. Bzgl. Praxistauglichkeit wird der Standard genau so ausgelegt, dass er den Anforderungen der Logistikpraxis entspricht.

Wasserstofftankstellen für Druck- und Flüssigbetankung

Technologiereife und Praxistauglichkeit muss für Wasserstofftankstellen sehr differenziert betrachtet werden. Es existiert bereits ein öffentliches Pkw-H₂-Tankstellennetzwerk mit mehr als 150 Stationen allein in Deutschland, welche ausschließlich CGH₂ (Druck-)Betankungen erlauben. Viele davon sind seit langen Jahren in Betrieb. Ausgehend von dieser langjährigen Installations- und Betriebserfahrung wurden die Komponenten und H₂-Tankstelle weiterentwickelt und die Kosten gesenkt. Die Technologische Reife von H₂-Tankstellen im Pkw-Bereich (700 bar, max. Absatzmengen pro Fahrzeug von 5-8 kg) ist als hoch einzuschätzen (TRL 9) und die Praxistauglichkeit gegeben. Aufgrund der geringeren technischen Anforderungen gilt Ähnliches auch für mittlere bis schwere Nutzfahrzeuge (z.B. Busse, Lkw), die mit bis zu 40 kg H₂ bei geringem Druck von 350 bar aufzutanken sind. Hierbei nur mit der

¹ Plötz, P. Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. Nat Electron 5, 8–10 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>

Einschränkung, dass lediglich wenige Tankstellen zwecks fehlenden Bedarfs und Fahrzeugen dafür ausgelegt wurden. Zur CGH2-Betankung von den von einigen Fahrzeugherstellern angekündigten schweren H₂-Lkw für den Langstreckenverkehr (700 bar, hohe Absatzmengen pro Fahrzeug von 10-100 kg, kurze Tankzeiten) existieren allerdings bisher kaum Erfahrungen (nur wenige ausreichend dimensionierte Tankstellen, Betankungsprotokolle und Teilkomponenten noch in der Entwicklung). Daraus ergibt sich, dass die technologische Reife und Praxistauglichkeit solcher H₂-Tankstellen noch erprobt werden muss (TRL 7-8). Dieses gilt verstärkt auch für Tankstellenlösungen mit direkter H₂-Flüssigbetankung von schweren Langstrecken-Lkw. Es existieren bisher nur Erfahrungen mit der Anlieferung von tiefkalten, flüssigen H₂ an vereinzelt Tankstellen. Hierbei finden Fahrzeugbetankungen aber bisher trotzdem in Form von CGH2 statt. Tanksysteme für direkte Flüssigbetankungen ins Fahrzeug sind aktuell in der Entwicklung und deren technologische Reife in Bezug auf die Anforderungen von Langstrecken-Lkw hat Prototypencharakter.

Normung von Lkw-Wasserstofftankstellen

Im Folgenden wird ein Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand bei der Normung von Lkw-Wasserstofftankstellen und die Anforderungen an einen entsprechenden Betankungsvorgang (Betankungsprotokolle) gegeben.

Tab. 1: Liste der aktuell relevanten Normen, welche im weitesten Sinne mit Sicherheitsbestimmungen und Leistungsanforderungen umfassen:

Norm	Titel	Ausgabe
SAE J2601-2	Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Heavy Duty Vehicles (Fokus hier sind Stadtbusse)	2014-09
SAE J2601-1	Fueling Protocol for Gaseous Hydrogen Powered Light Duty Vehicles (PKW)	
ISO 19880-1	Gaseous hydrogen -Fuelling stations Part 1: General requirements	2020-03
ISO 13984	Liquid hydrogen - Land vehicle fuelling system interface	1999-03
ISO 13985	Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks	2006
ISO 17268	Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices	2020

Tab. 2: Liste an relevanten Normen in der Entwicklung (und daher leider noch nicht verfügbar):

Norm	Titel	Beginn
ISO/CD 19885-1	Gasförmiger Wasserstoff - Betankungsprotokolle für mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge - Teil 1: Auslegung und Entwicklungsverfahren für Betankungsprotokolle	2021-02-08
ISO/AWI 19885-2	Gasförmiger Wasserstoff - Betankungsprotokolle für mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge - Teil 2: Definition der Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und dem Kontrollsystem der Abgabereinrichtung	2021-02-08
ISO/AWI 19885-3	Gasförmige Wasserstoff - Betankungsprotokolle für mit Wasserstoff betriebene Fahrzeuge - Teil 3: Wasserstoffbetankungsprotokolle für hohe Durchflussraten für Schwerlast-Straßenfahrzeuge	2021-02-08

Gasförmige Tankstellen:

Busse und mittelschwere Lkws, deren Fahrzeugtanks üblicherweise aufgrund des vorhandenen Platzes im Fahrzeug und der notwendigen Reichweiten nur mit 350 bar befüllt werden, folgen den Anforderungen aus der SAE J2601-2 Norm. Dabei spielt meist die Dauer und Häufigkeit (Anzahl back-to-back) der Betankungen keine kritische Rolle, somit das Befüllen mit normaler ($< 60\text{g/s}$) und langsamer ($< 30\text{ g/s}$) Geschwindigkeit ausreicht. Die Anforderungen an die dafür einzusetzende Tankstelleninfrastruktur wird allgemein in der ISO 19880-1 definiert. In HDV-Fahrzeugen, bei denen ein Brennstoffzellensystem z.B. nur als Range Extender eingesetzt wird, erfolgen Betankungen auch heute mit bis zu 70 MPa gasförmigen H_2 . Dabei handelt es sich aber in der Regel um zwei voneinander getrennte Pkw-Tanks in den Fahrzeugen, die somit in bestehenden H_2 -Tankstellen für Pkw unter Berücksichtigung der dafür existierenden Protokolle befüllt werden können (nach SAE J2601-1), deren Speicherkapazität und damit Reichweite aber limitiert ist.

Auf der Grundlage bestehender Betankungsprotokolle und des aktuellen Stands der Technik für die Betankung mit komprimiertem (gasförmigem) H_2 wurden **im Projekt PRHYDE** verschiedene Konzepte für Wasserstoffbetankungsprotokolle für große Tanksysteme mit 35, 50 und 70 MPa Nennbetriebsdruck entwickelt. Die dort erzielten Ergebnisse sollen eine wertvolle Orientierungshilfe für die Gestaltung von zukünftigen Schwerlast- H_2 -Tankstellen sein, aber auch die Voraussetzung für die Einführung einer standardisierten, kosteneffizienten Wasserstoffinfrastruktur und bilden einen Input für die aktuell laufenden Standardisierungsprozess der ISO/AWI 19885-3 Wasserstoffbetankungsprotokolle für hohe Durchflussraten ($> 60\text{g/s}$) für Schwerlast-Straßenfahrzeuge. Die bisherigen Betankungsprotokolle für PKW berücksichtigen hohe Sicherheitsfaktoren und sind daher eher konservativ konzipiert. Hier liegt u.a. ein Ansatzpunkt der Weiterentwicklungsstrategie des Betankungsprotokolls, indem eine optimierte Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankstelle Leistungsreserven zur Betankung auf beiden Seiten heben kann. Auch entsprechende Hardware für Betankungen auf 70 MPa mit $> 60\text{ g/s}$, wie zum Beispiel Dispenser Pistole (Nozzle), sind aktuell in der Entwicklung (von zwei Industriegruppen + ISO 17268), um die Vorgaben aus dem entstehenden Protokoll dann auch technisch umsetzen zu können. Sowohl die

entwickelten Konzepte als auch die Anforderungen aus den Protokollen müssen für den Praxiseinsatz erst noch erprobt werden.

Flüssig-H₂ Tankstellen:

Für die Auslegung und die Installation von Betankungs- und Abgabesystemen für flüssigen Wasserstoff (LH₂) gilt aktuell die ISO 13984. Diese Norm beschreibt das System, das für die Abgabe von LH₂ direkt in ein Fahrzeug vorgesehen ist, einschließlich der Handhabung von kalten gasförmigen H₂ aus Fahrzeugtank, und anderen Systemteilen vor dem LH₂ Speichertank der Tankstelle. Die Ausführung von LH₂- Fahrzeugtanks wird in der ISO 13985 geregelt, welche mit der ISO 13984 abgestimmt ist.

Es wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen für den zukünftigen Einsatz von sich der Entwicklung befindlichen Technologien, wie sLH₂ oder cryo-compressed H₂, es nötig machen existierende Normen anzupassen oder zu erweitern. Die Notwendigkeit zur Normung und Standardisierung von weiterentwickelten LH₂ Tankstellen und on-board Fahrzeugtanks sind aktuell noch nicht bekannt.

Standortidentifikation

Ziel der Arbeiten zur Standortidentifikation war die Identifikation eines oder mehrerer möglicher Standorte für die Errichtung der geplanten Lade- und Tankinfrastruktur. Die Infrastrukturen für Lade- und Tankvorgänge sollen dabei am selben Standort errichtet werden. Es wurde dafür zunächst eine erste Liste mit Anforderungskriterien für die Bewertung möglicher Standorte erstellt. Die Liste umfasst 15 Kriterien der Kategorien „Gebiet“, „Energie“, „Platz“ und „Rahmenbedingungen“ (siehe Abb. 1).

<p>Gebiet</p> <ul style="list-style-type: none"> • Günstige Distanz zu IVECO/Nikola • Günstige Distanz zu Daimler Trucks • Erreichbarkeit von beiden Autobahnseiten 	<p>Energie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distanz zu Mittelspannungsnetz/Umspannwerk • Ggf. Möglichkeit zur Pufferspeicherung
<p>Platz</p> <ul style="list-style-type: none"> • Platz für Transformator/ Ladesäule • Distanz zwischen Transformator und Ladesäule • Platz für Dispenser/ Verdichter/Speicher • Distanz zwischen Verdichter/Speicher und Dispenser • Zugänglichkeit und Stellplätze für Lkw 	<p>Rahmenbedingungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Zeitaufwand für Realisierung • Kosten für Realisierung • Eigentümer des Grundstücks

Abb. 1: *Initiale Standortkriterien unterschieden nach "Gebiet", "Energie", "Platz" und "Rahmenbedingungen".*

Im Rahmen von online Workshops mit den assoziierten Partnern des Projektes und nochmals fokussiert mit den Infrastrukturbetreibern wurde diese Kriterienliste präzisiert und konkretisiert. So wurden für einen ersten Schritt, um möglichst viele Standortkandidaten zu gewinnen, die folgenden zentralen Kriterien entwickelt:

- Gebiet: unmittelbare Nähe der Autobahn (max. 10 min Umweg insgesamt)
- Platz: mindestens 3,000 bis 5,000 m²
- Rahmenbedingungen: Umsetzbarkeit innerhalb vorgegebenem Zeitrahmen

Für das Gebiet wurde die unmittelbare Nähe der Autobahn gewählt, da insbesondere beim Hochleistungsschnellladen die der Lkw-Fernverkehr auf der Durchreise als Kundengruppe identifiziert wurde. Hier ist bekannt, dass nur sehr kleine Umwege, idealerweise unter 10 min, von den Kunden akzeptiert werden. Ferner wurde hier die Präferenz der Autobahnen A5 oder A8 festgehalten. Die genannten Autobahnen weisen die meisten Verkehre in der Zielgruppe Langstecken-Fernverkehr auf und sind daher vielversprechende Standorte.

Die oben erarbeiteten Kriterien wurden auch bei der Suche nach Standorten genutzt. Instrumente der Standortsuche von Seiten der Fraunhofer-Institute waren die Ansprache von vorhandenen Kontakten, die Ansprache von Multiplikatoren, wie beispielsweise den Wirtschaftsförderungen. Darüber hinaus wurde mit Kartenmaterial eine digitale Analyse von Standorten durchgeführt und die entsprechenden Flächenbesitzer identifiziert und kontaktiert. Darüber hinaus wurde in einer Pressemitteilung auf das Projekt und die laufende Standortsuche aufmerksam gemacht.

Als vielversprechend hatte sich insgesamt die Ansprache vorhandener Kontakte und Multiplikatoren erwiesen. Hier konnten neben direkten Standortvorschlägen auch weitere wichtige Hinweise erzielt werden.

Insgesamt wurden die folgenden Standortkandidaten ermittelt und teilweise sehr intensiv weiterverfolgt:

Tab. 3: Liste mit Standortkandidaten mit Angabe der Adresse, angrenzender Autobahn und Geokoordinaten.

#	Name/Standort	Adresse	Autobahn	lat	lon
1	Shell Autohof Ettenheim-West	Hauptstraße 199-203, 77966 Kappel-Grafenhausen	A5 - 57a	48.28123631815353	7.776741177077753
2	Gewerbegebiet Darmsheim	Am Buchental 3, 71069 Sindelfingen	A81	48.700230482729246	8.947769297336501
2	Gewerbegebiet Neunheim	Neunheim, 73479 Ellwangen	A7	48.953242474862	10.171614772399042
4	Waldhausen/Aalen	Aalen	A7	48.8209621621569	10.214838454533803
5	Oberakfingen/Aalen	Aalen	A7	48.8838509	10.1321413
6	Heidenheim	Heidenheim	A7	48.67760459135011	10.24092416784081
7	Möckmühl	Baierklinge 2, 74219 Möckmühl	A81	49.298368506823735	9.378093843742139
8	Neuenstadt am Kocher	Robert-Bosch-Straße 5, 74196 Neuenstadt am Kocher	A81	49.23348116210598	9.35697860721348
9	Flughafen Stuttgart	Flughafenstraße 32, 70629 Stuttgart	A8	48.68148989469366	9.201633434750036
10	Bächle Logistik	Auf Herdenen 24, 78052 Villingen-Schwenningen	A81	48.07984968136503	8.508626135001053
11	SVG	Hedelfingerstraße 17, 70327 Stuttgart	--	48.769695491441674	9.247253456021616
12	AVIA-Tankstelle (Großmarkt)	Neckarwiesenstraße 7	B10/B14	48.78155394050794	9.229685508696408
13	Wasengelände	Mercedesstraße 40, 70372 Stuttgart	B10/B14	48.79544906412793	9.219453842960013
14	Autobahn-Ohr Tenningen	NaN	A5	48.11622844649428	7.788258823063721
15	Karlsruhe Erlachsee	Erlachseeweg 10, 76227 Karlsruhe	A5/B3	48.985655288154796	8.447580268182705
16	Autohof Bremgarten	A5, 79258 Hartheim am Rhein	A5	47.90859655935847	7.592168132357133
17	Spedition Gschwander	Carl-Benz-Straße 4, 79331 Teningen	A5	48.10562346025413	7.7866305890667045
18	Fischer Group Achern	Im Gewerbegebiet 7, 77855 Achern	A5	48.636430239542214	8.039760506425722
19	Shell Offenburg	Schutterwälder Str. 2, 77656 Offenburg	B33	48.464593794822	7.931162796028383
20	Shell Binzen	Bundesstraße 3, 79589 Binzen	A98/B3	47.625278222542356	7.608189516754377
21	Messe Stuttgart	Messepiazza 1, 70771 Leinfelden-Echterdingen	A8/B27	48.6965313114947	9.18514505820244

Viele der Standortkandidaten konnten nach ersten Gesprächen mit den Flächenbesitzern oder Bewertungen nach den vorab definierten Kriterien ausgeschlossen werden. Als vielversprechend zeigte sich insbesondere die Standorte #1 – Shell-Autohof Ettenheim-West, #2 Cobis und #21 Messe Stuttgart. Hier wurden mit den Flächenbesitzern intensivere Abstimmungen geführt. Allerdings gibt es bei allen drei Standorten auch noch Schwierigkeiten zu denen Lösungen gefunden werden müssen. Im Folgenden sind Steckbriefe der drei Standorte mit den wesentlichen Rahmenbedingungen dargestellt.



»Gewerbegebiet Darmsheim«

Gewerbegebiet bei Böblingen/Stuttgart

- ✓ Pilot-Infrastruktur würde sich gut einfügen in das Entwicklungskonzept der Fläche als nachhaltiger Industriepark
- ✓ Parkfläche verfügbar
- ✓ 5 min zur Auffahrt der A81
- ✓ Mögliche Ankerkunden vor Ort
- ✗ Autobahn A81 wird für Fernstreckenverkehr weniger genutzt
- ✗ Keine Raststätte oder Sanitäreinrichtungen

Abb. 2: Steckbrief des möglichen Standorts »Gewerbegebiet Darmsheim« (Kartenmaterial: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)



»Stuttgart Flughafen / Messe «

Lkw Parkplatz bei der Messe Stuttgart

- ✓ Pilot-Infrastruktur würde sich gut einfügen in das Elektrifizierungskonzept des Betreibers
- ✓ Parkfläche verfügbar
- ✓ 5 min zur Auffahrt der A8
- ✓ Sanitäre Einrichtungen vorhanden
- ✗ Verfügbare Fläche ist beschränkt und wird mit den Lkw für den Messebetrieb geteilt
- ✗ Voraussichtlich hohe Pacht

Abb. 3: Steckbrief des möglichen Standorts »Stuttgart Flughafen / Messe« (Kartenmaterial: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)



Abb. 4: Steckbrief des möglichen Standorts »Shell-Autohof Ettenheim-West« (Kartenmaterial: © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

Da sich vor allem in der Anfangsphase des Projekts die Standortidentifikation als schwierig gestaltet hatte und der Zeitdruck hoch war, wurde parallel vom Fraunhofer ISE zur Unterstützung der Arbeiten eine GIS-basierte Karte erstellt. Dieses einfache Tool basiert auf Vorarbeiten im Bereich der Identifikation von Elektrolysestandorten. Es bildet dabei mögliche H₂-Tankstellenstandorte entlang der A5 und A8 ab, welche aus Sicht der Infrastruktur, die oben genannten Kriterien erfüllen. Diese Karte sollte Vorschläge für weitere Standorte liefern und als wissenschaftliche Bewertungsgrundlage bzw. zur Verifizierung der Standortgüte für schon vorhandene Standorte dienen.

Tab. 4: Eingabeparameter für HRS Standortsuche innerhalb des Tools

Layer	Wert
Nähe zu Autobahnausfahrt (Umkreis) entlang der TENT-Korridore	1500 m
Nähe zu Bundes- / Land- / Kreisstraßen	200 m
Nähe zu Mittel- und Hochspannungsleitungen	2000 m
FFH und Naturschutzgebiete	Ausgenommen inkl. 150 m Abstand
Platzierung nur in Industriegebieten (nach CLC)	CLC Klasse 121

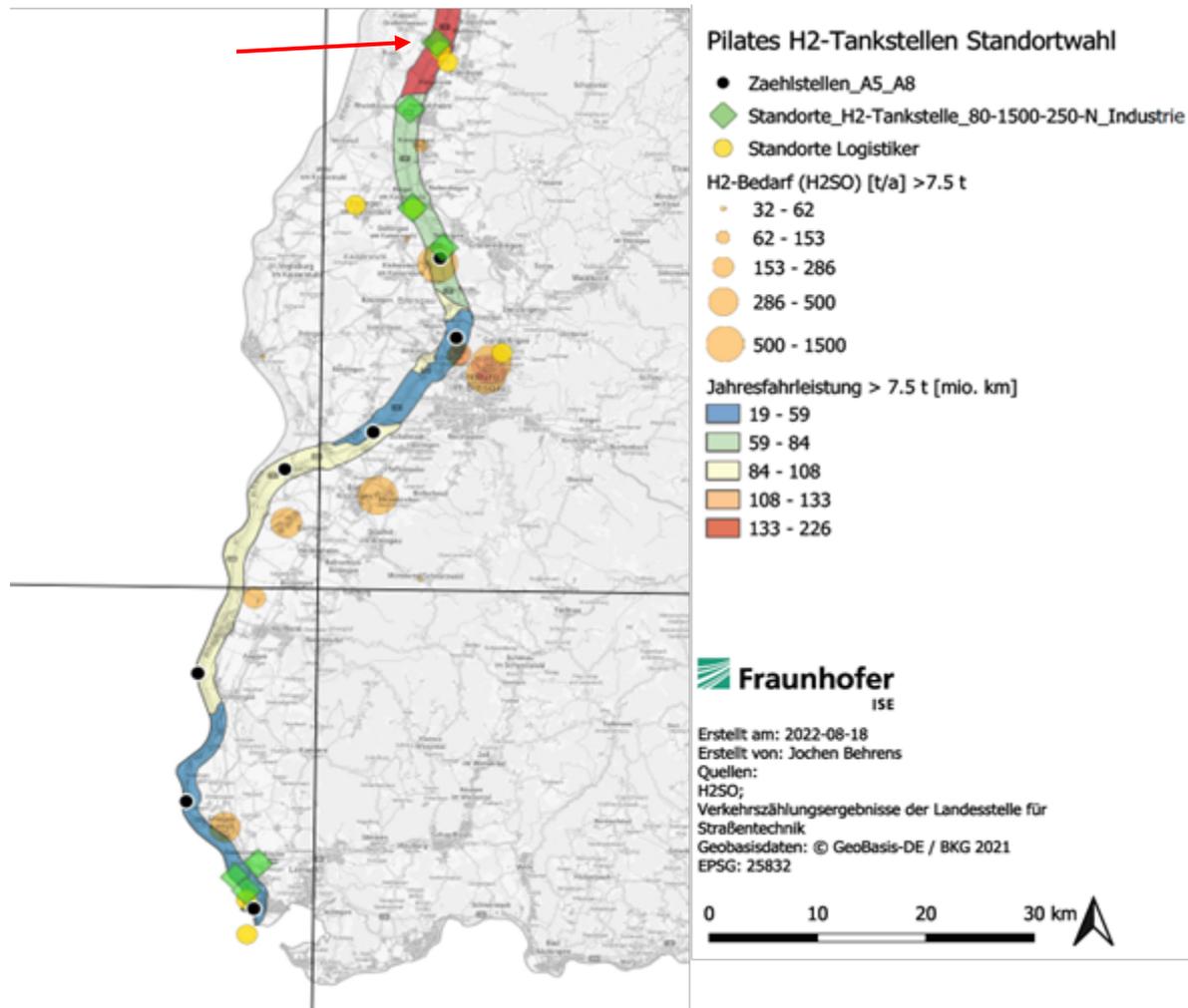


Abb. 5: Beispielhafter Ausschnitt der Ergebnisdarstellung aus ISE Standortanalysetool für einen Abschnitt an der Autobahn 5, mit den möglichen Standorten für eine HRS (grüne Rauten), den Zählstellen (schwarze Punkte) und (färblich hinterlegt) Jahresfahrleistung für LKW > 7,5 t [mio. km] ^{1,2,3}.

Ein Ergebnis aus dieser GIS-Analyse ist zum Beispiel, dass der Standort #1 Autohof Ettenheim, alle Standortkriterien aus infrastruktureller Sicht erfüllt (siehe grüne Raute markiert mit rotem Pfeil in obiger Abbildung).

Insgesamt zeigte sich als aussichtsreichster Standortkandidat damit nach aktuellem Stand des Projektes der Standort bei Ettenheim-West.

Für diesen Standort wurde eine erste Grobplanung der möglichen Infrastruktur erstellt (siehe Abb. 5).

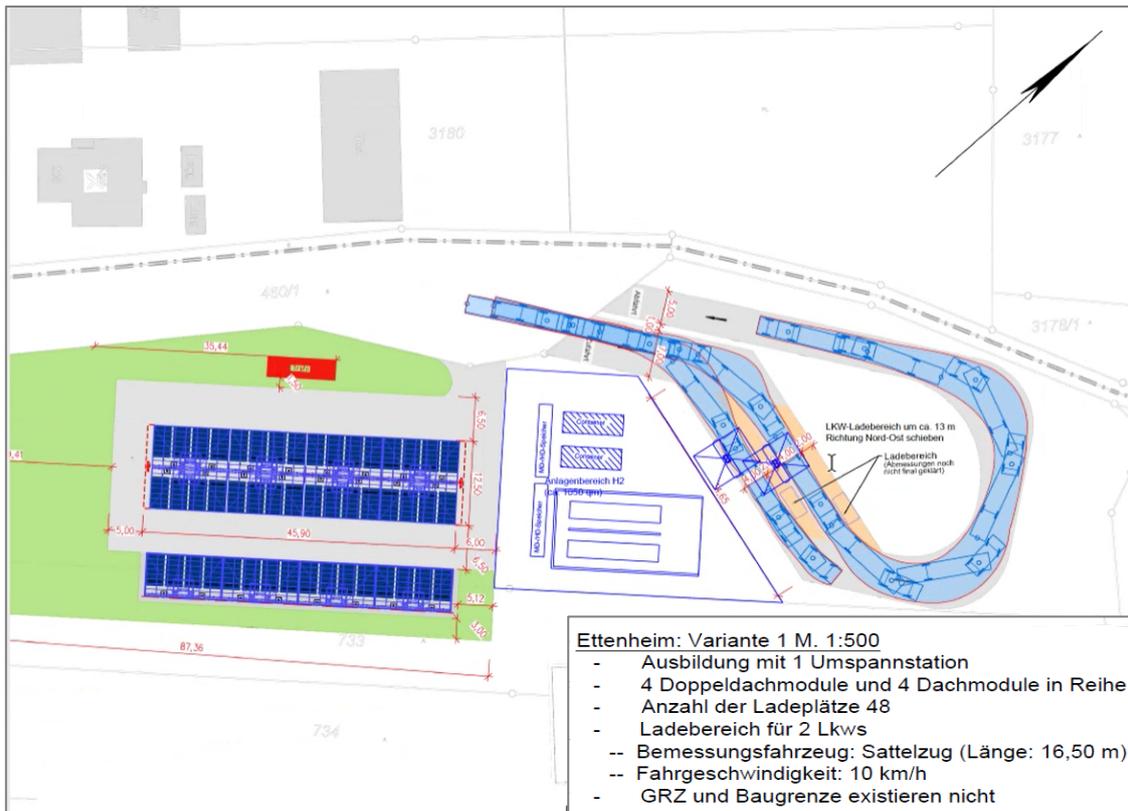


Abb. 6: Grobplanung Infrastruktur am Standort Shell-Autohof Ettenheim-West inkl. Schleppkurven.

Der geplante Standort müsste den bisherigen Erkenntnissen nach folgende Eigenschaften haben:

- 4 MCS-Lader
- 2 H₂-Zapfsäulen
- Mind. 8 Lkw-Stellplätze
- CCS für Übernachtladen
- H₂ flüssig & gasförmig anbieten (mind. je 1 Zapfsäule)
- Diskriminierungsfreie Bezahlmöglichkeit
- 24/7 verfügbar und zugänglich sowie öffentlich für alle Marken und Logistiker zugänglich (ggf. Priorisierung von Projektpartner aber kein Ausschluss anderer)

Wissenschaftliche Begleitung

Eine wissenschaftliche Begleitung zum Aufbau einer Pilotlade- und Tankstelleninfrastruktur wäre den gewonnen Erkenntnissen nach sinnvoll.

Dabei sollte die Machbarkeit für ein Messkonzept zum technischen Monitoring der zukünftigen Infra-struktur untersucht werden. Dies könnte als Zwischenschritte die Abstimmung der über das Monitoring zu beantwortenden Forschungsfragen, sowie der Monitoring-Ziele mit den assoziierten Partnern und den Grobentwurf eines Monitoring-Konzepts beinhalten.

Ein begleitendes technisches Monitoring könnte prinzipiell zur Beantwortung einiger offener Forschungsfragen beitragen:

- Analyse / Identifizierung von technischem Verbesserungs- und Optimierungspotenzial sowie technischen Schwachstellen / technischem Handlungsbedarf
- Analyse und Einhaltung der bis dahin verfügbaren und eingesetzten Betankungsprotokolle (erster Einsatz im Feld!?), Verbesserungspotenziale, Belastungstests, etc.

Um diese Fragen zu adressieren, könnte das Monitoring und das darunter liegende Messkonzept entsprechend für diese Zwecke angepasst sein. Daher wird hier im Folgenden ein erster Grobentwurf eines möglichen Monitoring-Konzepts erläutert und dessen Machbarkeit beurteilt.

Grobentwurf eines Messkonzepts:

Ein geeignetes Messkonzept sollte sowohl die Anlagen als auch die Komponentenebene umfassen und generell mit einer gewissen „Intelligenz“ ausgestattet sein. Letzteres kann bedeuten, dass Messsignale nicht nur aufgenommen, sondern auch verknüpft und ausgewertet werden. Ziel ist es ein Datenfundament für die zielgerichtete Weiterentwicklung der Anlage und deren Komponenten zu schaffen und möglichst umfassend Daten über Ausfälle / Ausfallursachen zu sammeln.

Tab. 5: Anforderungen an ein Messkonzept und mögliche Ansätze zur Realisierung

Was soll gemessen werden?	Warum soll es gemessen werden?	Ansätze zur Realisierung
Langzeitbetrieb	<p>Beantwortung von Fragen zur Tankstellenperformance, u.a. die Folgenden: Laufen die Betankungsvorgänge immer entsprechend dem Standard ab? Wie ist die Effizienz der Anlage? Wie ist das Zusammenspiel der Komponenten? Wie ist die Langzeitstabilität / Effizienz der Komponenten? Welche positiven / negativen Effekte hat der kombinierte Betrieb LH2/CGH2? Wo sind Optimierungspotenziale?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Der Messwert jedes verbauten Sensors (Druck, Temperatur, Durchfluss etc.) sollte generell permanent geloggt werden • Fernzugriff auf Daten wäre sehr hilfreich • Langzeitanalyse des Anlagenverhaltens
Belastungstest	<p>Test des Anlagenverhaltens, unter für die Anlage stressigen Betriebszuständen ==> Schwachstellen erkennen</p>	
Ausfallhäufigkeit und Ursachen	<p>Identifikation von technischen Schwachstellen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoring der Sensoren und Auswertung der Zuverlässigkeit • Monitoring der SPS-Fehlermeldungen • Anlagenbuch
Fehlerbehebungs-dauer	<p>Planbarkeit der Verfügbarkeit der Tankstelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Datenerfassung und Auswertung

Standardmäßig sind heutige Tankstellen für CGH2 mit einer Vielzahl an Sensoren und einer Steuerung ausgestattet, um den Betankungsvorgang überwachen zu können und entsprechende Sicherheitsbestimmungen (siehe SAE-Normen) einzuhalten:

- Drucksensoren (z.B. Verdichter, Dispenser, Regelventile)
- Temperatursensoren (z.B. nach Verdichtung, im Dispenser)
- Durchflusssensoren (z.B. im Dispenser)

Daher muss ein Messkonzept so ausgeführt sein, dass dieses auf der meist schon vorhandenen Sensorik, Datenerfassung und Auswertung der Hersteller und/oder Betreiber der Tankstelle aufbaut, und diese ggf. erweitert oder ergänzt. Potenziell kritische Punkte und Komponenten einer kombinierten Tankstelle für gasförmigen und Flüssig-H₂ sind in folgender Tabelle erfasst und sollten insbesondere im Messkonzept berücksichtigt werden.

Tab. 6: Kritische Punkte eines zukünftigen Messkonzept und mögliche Ansätze zur Messung

	Kritische Punkte/Komponenten	Ideen für Messansatz
CGH₂	Verdichterstufen (insbesondere im Hochdruckbereich)	<ul style="list-style-type: none"> • Druck vorher/nachher • Vibrationsmessungen (via Ultraschall) • Leckagestrommessung • Gastemperatur vorher/nachher • Auswertung der Partikelfilter
	Kühlaggregate falls zutreffend (z.B. CO ₂ -Kühlung)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Energieverbrauchsmessung
	Robuste Datenkommunikation zwischen Tankstelle und Fahrzeug zur Analyse neuer Betankungsprotokolle für HDV	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von finaler Gestaltung der Betankungsprotokolle und entsprechender Hardware
LH₂	Kühlung	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur • Außentemperatur • Regelmäßige zerstörungsfreie Leckagetest via radiographischen oder Ultraschallmessungen
	Boil-off	<ul style="list-style-type: none"> • Druckmessung
	Kavitation der Pumpe	<ul style="list-style-type: none"> • Durchfluss • Vibrationsmessungen (via Ultraschall) • Drehzahlmessung? um Schlupf/Kavitation zu messen
Dispenser	Betankung	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitlich hochauflösende Druck, Temperatur und Durchflussmessung • Differenzdruck über relevante Komponenten (bspw. Regasifizierung)

Eine Ausarbeitung des Messkonzepts benötigt ein finalisiertes Tankstellenkonzept, das seitens der Industriepartner noch nicht vorliegt und erst im PiLaTes Hauptprojekt finalisiert werden wird. Daher kann das Messkonzept nicht über einen Grobentwurf im Rahmen des Vorprojektes hinaus gehen.

Weiterhin besteht eine gewisse Unsicherheit, hinsichtlich neuer Protokolle für höhere Durchflüsse und inwiefern sich deren Anforderungen an eine Betankung von Langstrecken-HDV's auf die Messsensorik auswirken könnte. Insbesondere die empfohlene verbesserte Kommunikation zwischen BZ-Fahrzeug

und H₂-Tankstelle und geringerer Sicherheitspuffer bei Tanktemperaturen muss, sobald dahingehend Klarheit herrscht, in einem Messkonzept berücksichtigt werden.

Die Machbarkeit des hier grob skizzierten, vorgeschlagen Konzepts und der Ideen lässt sich ohne Kenntnis des finalisiertem Tankstellen-Konzept für die Betankungsanlage nur innerhalb gewisser Grenzen abschätzen. Aus den Erfahrungen mit Messkonzepten im Elektrolysebereich und an eigener gasförmiger H₂-Tankstelle lässt sich aber ableiten, dass die meisten erwähnten Punkte realisierbar sein sollten.

Neben der Erstellung Messkonzepts wurde im Rahme der wissenschaftlichen Begleitung Überlegungen zu weiteren Standorten für Lkw-Schnellladen angestellt.

Heatmap

Im Rahmen des Projektes wurden die gegenwärtigen Halteorte von Lkw zu analysiert und anhand dieser Erkenntnisse mögliche Standorte für den Aufbau von Ladeinfrastruktur für batterieelektrische Lkw bewertet. Dazu wurden mithilfe von Geografischen Informationssystemen (GIS) Daten über das Vorliegen verschiedener Standortmerkmale an den geografischen Koordinaten von realen Lkw-Halteorten aggregiert. Anschließend wurden diese Koordinaten und die Besucherzahlen der Lkw-Halteorte anhand einer GIS-basierten, multi-kriteriellen Entscheidungsanalyse und mithilfe einer Archetypenanalyse untersucht.²

Die Auswertung der Daten zeigt, dass Lkw heutzutage häufig an Standorten mit Gewerbe- und Industriegebieten, Parkplätzen, WCs, Restaurants oder Werkstätten halten. Gleichzeitig wird sichtbar, dass nicht das Vorliegen einzelner, sondern die Kombination verschiedener Standortmerkmale ausschlaggebend ist: Über 70 % aller Halteorte und Stopps liegen an einem von drei Archetypen-Clustern bestehend aus einer Kombination von Gewerbe- und Industriegebieten, Parkplätzen mit weiteren Services sowie Rastanlagen entlang des TEN-T Netzes. Zur Berücksichtigung bestehender Verhaltensmuster empfiehlt sich der Aufbau von Ladeinfrastruktur an diesen drei Clustern.¹

Es wurden zum 246 bestehende öffentliche Lkw-Rastanlagen in Baden-Württemberg anhand der vorliegenden Standortmerkmale bezüglich ihrer Eignung für zukünftige Lkw-Infrastruktur bewertet. Das Ergebnis ist eine Interaktive Karten, in der Standorte mit hoher Eignung gelb und mit niedriger Eignung blau sind.¹

² Auer, J. (2022): Gegenwärtige LKW-Halteorte und Eignung zukünftiger Ladeinfrastrukturstandorte für batterieelektrische LKW in Deutschland - Eine Untersuchung mittels GIS-basierter MCDA und Archetypenanalyse. Masterarbeit, Fraunhofer ISI und KIT 2022.

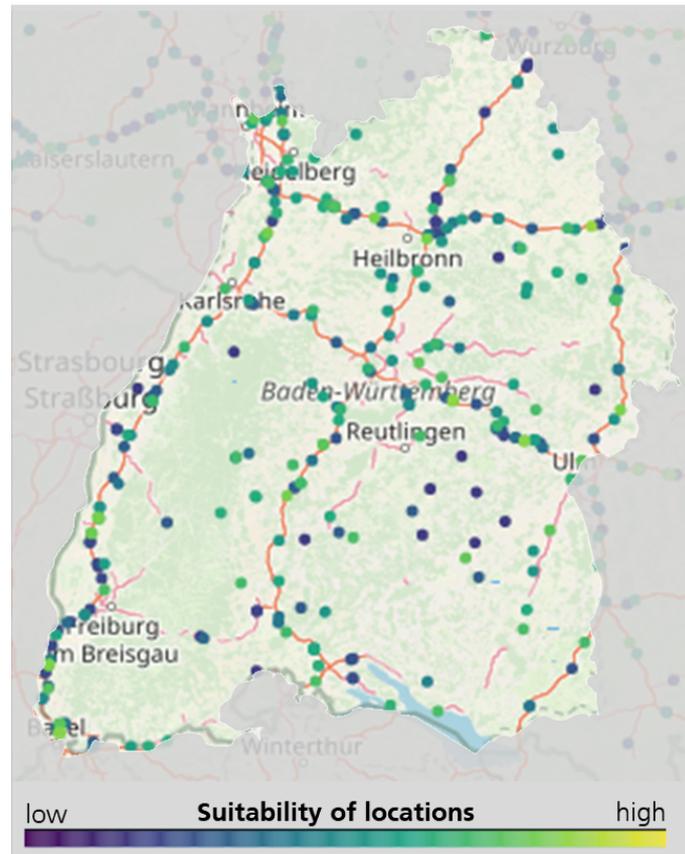


Abb. 7: Überblick über die 246 analysierten öffentlichen Lkw-Rastplätze. Standorte mit hoher Eignung sind gelb und mit niedriger Eignung blau dargestellt.

Zu den begleitenden Arbeiten zählt außerdem die Öffentlichkeitsarbeit zur Unterstützung der Standortidentifikation. So wurde beispielsweise eine Pressemitteilung veröffentlicht, die auf die Standortsuche im Rahmen des Projektes hinweist. Die Pressemitteilung wurde u.A. vom wichtigen Branchendienst »eltrive.net« aufgegriffen und unterstützte die Verbreitung des Projektvorhabens. Es folgten entsprechende Kontaktaufnahmen mit sachdienlichen Hinweisen zu möglichen Standorten und anderen Projektvorhaben im Themenfeld.

3. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Die aktuellen CO₂-Grenzwerte der EU schreiben vor, dass Neu-Fahrzeuge im Lkw-Bereich ab 2025 durchschnittlich 15 Prozent weniger Kohlendioxid ausstoßen sollen als in diesem Jahr. Bis zum Jahr 2030 sollen es 30 Prozent weniger sein. Um diese Ziele zu erreichen, braucht es alternative Antriebskonzepte für Lkw und entsprechende Infrastruktur. Und nicht nur neue Infrastruktur wird benötigt, sondern sie muss auch schon in wenigen Jahren zur Verfügung stehen, um den Lkw-Fernverkehr umzustellen. Insgesamt lässt sich aus den Arbeiten im Rahmen von »VorPiLaTes« die wichtige Erkenntnis ableiten, dass die Identifikation und Erschließung von Flächen für den Aufbau von Lade- und Wasserstoff-

Tankstelleninfrastruktur einen kritischen Aspekt zur Erreichung der oben genannten Ziele darstellen. Denn es werden aller Voraussicht nach zusätzliche Flächen zu den bestehenden Tankstellen und Autohöfen benötigt, da sich die aktuelle Auslastung der Infrastruktur für den konventionellen Betrieb von Diesel-Lkw vorerst nicht oder nur in geringem Umfang verringern wird. Im Falle der im Rahmen von »PiLaTes« angedachten Forschungsinfrastruktur erhöhen die folgenden Punkte den Flächenbedarf u.U. noch zusätzlich:

- Der genaue Flächenbedarf und die genaue Flächenform können aktuell noch nicht verlässlich abgeschätzt werden, da diese Tankstelle die Erste ihrer Art wird. Die Erfahrung zeigt, dass daher mehr Fläche eingeplant werden muss, um im Projektverlauf auf unvorhergesehene Schwierigkeiten wie bspw. Sicherheitsauflagen oder abweichende Komponentengrößen reagieren zu können.
- Aktuell können Möglichkeiten der Platzoptimierung einer kombinierten Tankstelle noch nicht abgeschätzt werden (u.a. erhoffte Ergebnisse des Forschungsvorhabens), daher muss derzeit mit 2 – 3 unabhängigen Tankanlagen inklusive Schleppkurven der Lkw geplant werden
- Die leichte Zugänglichkeit, Wartbarkeit und vor allem Austauschbarkeit aller Komponenten wie Verrohrungen und Verkabelungen muss sichergestellt sein, da erfahrungsgemäß bei Erstanlagen der Austausch von Komponenten aufgrund technischer Probleme häufig auftritt. Daher muss zum jetzigen Zeitpunkt von größeren Abständen zwischen den Einzel-Komponenten ausgegangen werden und ein Versenken von Komponenten im Boden ist nicht sinnvoll.
- Für einige der Forschungsinhalte (bspw. Belastungstests der Tankanlagen – v.a. im Wasserstoffbereich) ist es notwendig, dass eine größere Anzahl Lkw vor Ort parken kann.

Eine weitere Erkenntnis im Rahmen des Projektes ist der hohe Zeitbedarf, der benötigt wird, bevor eine identifizierte Fläche für den Bau einer Lade- und Tankstelleninfrastruktur genutzt werden kann. Selbst wenn an einem möglichen Standort eine gute Ausgangssituation hinsichtlich Infrastruktur (Stromananschluss, verkehrstechnische Lage, interessierten Nutzern, Erschließung, etc.) vorhanden ist, können langwierige Vertragsverhandlungen mit einer hier im Süden häufig sehr zersplitterten Flächenbesitzerstruktur, das Warten auf ablaufende Pachtverträge, frische Erschließung von Flächen, Aktivierung von potenziellen Nutzern oder ähnlichem die Nutzung verzögern. Darüber hinaus ist nicht jede Fläche bereits als Gewerbefläche ausgewiesen, so dass möglicherweise langwierige Erschließungsanträge notwendig werden (vgl. Standort Ettenheim-West). Aus diesen Erkenntnissen kann als zentrale Handlungsempfehlung abgeleitet werden, dass es notwendig ist, frühzeitig den zu erwartenden Flächenbedarf abzuschätzen und die Identifikation und Erschließungsprozesse für solche Flächen zu beschleunigen.

Neben diesen allgemeinen Erkenntnissen zum Flächenbedarf ist ein zentrales Ergebnis der Arbeiten im Rahmen von »VorPiLaTes« die Identifikation des aussichtsreichen Standortkandidaten »Shell-Autohof Ettenheim-West«.

4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Neben den oben genannten Aktivitäten sehen die Fraunhofer-Institute vor, die im Projekt »VorPiLaTes« gewonnenen Erkenntnisse in laufende und geplanten Projektaktivitäten einzubringen.

So sollen die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zum großflächigen Ausbau von Infrastruktur in die Entwicklung einer Datenplattform zur Organisation batterieelektrischer Lkw einfließen. Diese Plattform soll im Rahmen des Projekts »TruckConnect« durch das Fraunhofer IAO zusammen mit dem Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement der Universität Stuttgart entwickelt werden, um so den großflächigen Infrastrukturausbau von Lade- und Tankinfrastruktur durch intelligente Datenservices zu beschleunigen. Parallel wird das Fraunhofer ISI die Ergebnisse in den laufenden Innovationscluster »Hochleistungsladen im Lkw-Fernverkehr« (HoLa) auf Bundesebene einbringen.

Das Messkonzept für die H₂-Tankstellen soll auch in weiteren Projekten zum Einsatz kommen, um die Performance und Schwachpunkte verschiedener Tankstellenkonzepte überwachen zu können.

Weiterhin werden die Erkenntnisse im Rahmen von Lehrtätigkeiten und der Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten aufgegriffen. Ebenso werden die Fragestellungen im Rahmen einer Promotion an der Universität Stuttgart wissenschaftlich vertieft.

Zur Dissemination der Projekterkenntnisse ist geplant, die Ergebnisse im Rahmen von Fachvorträgen einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. So wurden beispielsweise erste Resultate auf der »Fachkonferenz Strategiedialog Automobilwirtschaft BW in Brüssel« vorgestellt.