

Abschlussbericht – Teil I – Kurzbericht

Geschäftsbereich Energietechnologien

<p>ZE:</p> <p>Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden</p>	<p>Förderkennzeichen:</p> <p>03EI3026A</p>
---	---

Vorhabensbezeichnung:

POWERPASTE - Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation

Teilvorhabensbezeichnung:

Bedarfsgerechte Wasserstofferzeugung für mobile Einsatzzwecke

Berichtspflichtiger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden)

Projektleitung: Dr. Marcus Vogt

Autor: Dr. Marcus Vogt

Projektträger: Projektträger Jülich
Energie und Klima
Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien (ESI 3)

Forschungszentrum Jülich GmbH
52428 Jülich

Für den Inhalt dieser Veröffentlichung haften die Autoren.

1 Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben POWERPASTE zielte auf die Weiterentwicklung der am Fraunhofer IFAM patentierten, magnesiumhydridbasierten Wasserstoffspeicherpaste-Technologie. Zwei zentrale Ziele standen im Fokus: Einerseits sollte die Technologie zu einem Stromgenerator mit einem Technologiereifegrad (TRL) von 7 für leichte Elektrofahrzeuge weiterentwickelt werden, andererseits sollten die Skalierung und Optimierung der Herstellungsprozesse realisiert werden.

Nach erfolgreichem Nachweis auf TRL 6 (1-kW-System im Laboraufbau mit kommerziell verfügbarer Brennstoffzelle) sollte ein gewichtsoptimierter Wasserstoffgenerator entwickelt und in ein Leichtfahrzeug eingebaut werden. Über eine geeignete Schnittstelle sollte eine speziell für die POWERPASTE-Technologie entwickelte Brennstoffzelle von Vitesco angebunden werden. Diese Systemkonfiguration sollte anschließend unter realen Betriebsbedingungen demonstriert werden.

Für den entwickelten Stromgenerator wurde eine Dauerleistung von mindestens 750 W und eine Spitzenleistung von 1 kW definiert, bei einer Energiespeicherdichte der POWERPASTE-Kartuschen von ca. 1200 Wh/kg. Ziel des Vorhabens war es, erstmals einen Demonstrator (TRL 7) in ein Leichtfahrzeug zu integrieren und die technologische Basis für eine zukünftige Leistungssteigerung sowie Weiterentwicklung der Technologie zu schaffen.

2 Ablauf

Das Projekt wurde in acht Hauptarbeitspakete (AP1–AP8) gegliedert und lief im Zeitraum von November 2020 bis Dezember 2024. Die Laufzeit wurde im Zuge der COVID-19-Pandemie sowie durch Lieferengpässe im Bereich elektronischer Komponenten und Rohstoffe kostenneutral um 14 Monate verlängert.

Im Verlauf des Projekts wurden zunächst die Anforderungen und die Systemarchitektur festgelegt (AP1). Die Synthese und Handhabung von POWERPASTE wurden anschließend vom Labormaßstab auf größere Chargen übertragen, und es wurde ein Qualitätssicherungskonzept etabliert (AP2, AP3).

Im Arbeitspaket 4 (AP4) erfolgte die Entwicklung und Erprobung der Wasserstoffgeneratoren. Dazu gehörten unter anderem die Umsetzung eines Labordemonstrators (TRL6) und die anschließende Weiterentwicklung eines optimierten Reaktors für die nächste Ausbaustufe (TRL7).

Im Brennstoffzellenbereich (AP5) wurde zunächst ein kommerzielles 1 kW-Brennstoffzellensystem genutzt, später dann ein speziell angepasstes System von Vitesco angebunden.

Die Systemintegration (AP6) umfasste den Zusammenbau und die Inbetriebnahme des Gesamtsystems, einschließlich Wasserstoffgenerator, Brennstoffzelle, Kühlung, Bedienoberfläche und Kommunikationsschnittstellen, im Fahrzeug. Abschließende Tests und Demonstrationen erfolgten im Rahmen von AP7.

AP8 befasste sich mit logistischen Fragestellungen, logistischen Aspekten des Recyclings und der Auswahl geeigneter Kartuschenlösungen.

Das Projekt wurde von folgenden Partnern durchgeführt: Fraunhofer IFAM (Projektkoordination), EMEC Prototyping, AVA Maschinenbau, Vitesco Technologies, ZBT und die Universität Magdeburg. Die Ziele des Projekts wurden trotz der zeitlichen Verzögerungen innerhalb des vorgesehenen Ressourcenrahmens erreicht.

3 Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit

Die Produktion der POWERPASTE wurde erfolgreich vom Labor- auf einen Technikumsmaßstab übertragen und hinsichtlich Hydrolysekinetik und Lagerstabilität optimiert. Durch Implementierung einer spezifischen Qualitätssicherung konnte die Langzeitstabilität auf prognostizierte mindestens zwei Jahre erhöht werden.

Ein innovatives Verpackungs- und Kartuschenkonzept wurde entwickelt, um die feuchteempfindliche Paste sicher und dauerhaft inert zu lagern. Herausforderungen bei der Dosierung wurden erfolgreich gelöst.

Der Wasserstoffgenerator wurde zunächst auf TRL 6 realisiert. Aufgrund thermischer Herausforderungen wurde für den TRL7-Wasserstoffgenerator ein Reaktor entwickelt, der Wärme effektiver abführt und damit deutlich höhere Leistungen ermöglicht. Der final entwickelte TRL7-Wasserstoffgenerator wurde mit verbesserter Sensorik und Regelung ausgeführt. Elektronik und Software wurden iterativ optimiert, insbesondere hinsichtlich Robustheit, elektromagnetischer Verträglichkeit und Echtzeitsteuerung.

Die Systemintegration ins Demonstratorfahrzeug verlief erfolgreich im Dezember 2024. Im gekoppelten Betrieb mit der TRL7-Brennstoffzelle von Vitesco wurde eine Systemleistung von bis zu 300 W erzielt. Diese war vor allem durch niedrige Umgebungstemperaturen und damit verbundene Leistungsbegrenzungen der Brennstoffzelle limitiert; der POWERPASTE-Wasserstoffgenerator zeigte jedoch problemlos das Potenzial für deutlich höhere Leistungen (> 800 W).

Das Projekt POWERPASTE erzielte eine breite Sichtbarkeit und stieß auf großes Interesse der Industrie, insbesondere für höhere Leistungsbereiche. Aktuelle Folgevorhaben befassen sich bereits mit der Skalierung der Generatorleistung auf bis zu 50 kW sowie der Miniaturisierung für Drohnenanwendungen (bis zu 25 kg Startgewicht). Diese Aktivitäten unterstreichen das hohe Verwertungspotenzial der Technologie und die erfolgreichen Schritte zur Kommerzialisierung.

Abschlussbericht – Teil II – Eingehende Darstellung

Geschäftsbereich Energietechnologien

<p>ZE:</p> <p>Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden, Winterbergstraße 28, 01277 Dresden</p>	<p>Förderkennzeichen:</p> <p>03EI3026A</p>
---	---

Vorhabensbezeichnung:

POWERPASTE - Mobile Wasserstoffversorgung der nächsten Generation

Teilvorhabensbezeichnung:

Bedarfsgerechte Wasserstofferzeugung für mobile Einsatzzwecke

Berichtspflichtiger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM, Institutsteil Dresden)

Projektleitung: Dr. Marcus Vogt

Autor: Dr. Marcus Vogt

Projektträger: Projektträger Jülich
Energie und Klima
Sektorkopplung und Wasserstofftechnologien (ESI 3)

Forschungszentrum Jülich GmbH
52428 Jülich

Für den Inhalt dieser Veröffentlichung haften die Autoren.

Inhalt

1	Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen	3
	Übersicht Arbeitspakete und Projektstruktur.....	3
1.1	AP1: Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung.....	3
1.2	AP2: POWERPASTE.....	6
1.3	AP3: Abfüllung und Verpackung	8
1.4	AP4: Wasserstoffgeneratoren (TRL6 und TRL7)	10
1.5	AP5: Brennstoffzellen	11
1.6	AP6: Systemintegration	12
1.7	AP7: Feldtests	14
1.8	AP8: Logistik.....	15
2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	16
3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	17
4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	18
5	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	19

1 Eingehende Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen

Übersicht Arbeitspakete und Projektstruktur

Die Gesamtstruktur des Projekts gliederte sich in acht Arbeitspakete (AP1–AP8), die alle wesentlichen Entwicklungs-, Integrations- und unterstützenden Aufgabenbereiche abdeckten. Die zeitliche Planung und der Fortschritt der einzelnen Arbeitspakete wurden im Rahmen eines detaillierten Projektplans kontinuierlich überwacht und dokumentiert. Über den gesamten Projektzeitraum von November 2020 bis Dezember 2024 hinweg wurden die verschiedenen Aufgaben entsprechend ihrer thematischen Schwerpunkte gestartet, durchgeführt und abgeschlossen.

Die Verzahnung der Arbeitspakete wurde insbesondere im Bereich der Technologieentwicklung (AP2–AP4), der Systemintegration (AP6) und der nachfolgenden Feldtests (AP7) deutlich. Parallel dazu wurden begleitende Aufgaben wie Anwendungsanalyse (AP1) und logistische Themen (AP8) über die gesamte Laufzeit hinweg bearbeitet.

Meilensteine des Projekts

Der Projektfortschritt wurde durch drei zentrale Meilensteine strukturiert und überprüft:

- MS1: Erprobung eines ersten funktionsfähigen Stromgenerators auf Grundlage der POWERPASTE-Technologie und Validierung wesentlicher Systemkomponenten.
- MS2: Weiterentwicklung des Gesamtsystems auf einen höheren Reifegrad mit optimierten Schnittstellen und verbesserter Leistungsfähigkeit.
- MS3: Integration des entwickelten Systems in ein Leichtfahrzeug und erfolgreiche Feldvalidierung des Gesamtsystems.

Diese Meilensteine markierten die wichtigsten technologischen Zwischenschritte und dienten als verbindliche Orientierungspunkte für die technische Umsetzung und die Bewertung des Projektfortschritts. Sie ermöglichten die kontinuierliche Überführung der Entwicklungsergebnisse in die praktische Anwendung

1.1 AP1: Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung

Im Rahmen des AP1 erfolgte eine umfangreiche Anwendungsanalyse sowie die Festlegung konkreter Anforderungen und Konzepte zur Implementierung der POWERPASTE-Technologie in einem mobilen Stromgenerator. Diese ersten Schritte bildeten die wesentliche Grundlage für die späteren technischen Entwicklungen und Integrationserfolge.

Zunächst wurden in enger Zusammenarbeit innerhalb des Konsortiums (EMEC, Vitesco, IFAM) sorgfältig potenzielle Demonstrationsplattformen evaluiert und bewertet. Ziel war es, ein geeignetes Basisfahrzeug auszuwählen, das sich sowohl hinsichtlich technischer Anforderungen, Marktrelevanz als auch der Praxistauglichkeit für Demonstrationszwecke optimal eignete. Dabei wurden diverse elektrische Klein- und Leichtfahrzeuge hinsichtlich Leistung, Batteriesystem, mechanischer Spezifikationen, Handhabung sowie Kosten umfassend miteinander verglichen. Die finale Auswahl fiel schließlich auf das elektrische Leichtnutzfahrzeug Elektrofrosch MAX, das sich

aufgrund eines optimalen Preis-Leistungs-Verhältnisses, guter Verfügbarkeit und hoher Praxistauglichkeit besonders für das Vorhaben empfahl.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wichtigsten, im Konsortium evaluierten Fahrzeugoptionen sowie die wesentlichen Kriterien, die zur Auswahl des Elektrofrosch MAX geführt haben:

Fahrzeug	Preis	P _{max.}	V _{max.}	U _{Batt.}	EBatt.	Reichweite	Batt.-Art	Nutzraum	Zuladung	Kommentar/Auswahlkriterium
Goupil G2	unklar	5,1 kW	30 km/h	48 V	5,2–8,6 kWh	61–100 km	Li-FePO ₄	1250×1020×950	~450 kg	
ARI 458	12.000 EUR	7,5 kW	78 km/h	72 V	10 kWh	120–285 km	Li-Ion	1310×1160×950	450 kg	
ONO Pedelec	17.000 EUR	2 kW	25 km/h	48 V	2,8 kWh	80 km	Li-Ion	1600×800×1800	300 kg	Wenig Leistung, hohe Kosten
TRIPL	14.000 EUR	3,4 kW	45 km/h	72 V	7,2 kWh	100 km	Li-Ion	1250×900×710	200 kg	Kein Händler in Deutschland
BIO-Hybrid	10.000 EUR	1,5 kW	25 km/h	48 V	ca. 1 kWh	-	Li-Ion	1200×800×800	300 kg	Geringe Batteriekapazität
Renault Twizy Cargo	7.000 EUR	4,5 kW	45 km/h	60 V	6,1 kWh	90–120 km	Li-Ion	550×500×950	-	Wenig Nutzraum
Elektrofrosch MAX	4.600 EUR	2,5 kW	45 km/h	72 V	-	120 km	Blei-Gel	1070×900×1170	250 kg	Verfügbarkeit, optimale Kosten-Nutzen-Balance

Die Wahl fiel explizit auf den Elektrofrosch MAX, da dieses Fahrzeug sehr günstig verfügbar war, eine gute Reichweite bietet und über ausreichende mechanische Robustheit verfügt, um den Stromgenerator zuverlässig zu integrieren und zu testen.



Abbildung 1: Ausgewählte Demonstratorplattform Elektrofrosch MAX

Ausgehend von den definierten Anforderungen an das Gesamtsystem wurden im Rahmen von AP1 detaillierte Lastenhefte für die einzelnen Subsysteme entwickelt. Diese Lastenhefte enthielten technische Vorgaben und Spezifikationen, die als Grundlage für die konkrete Umsetzung der POWERPASTE-Technologie im mobilen Stromgenerator dienten. Die technischen Anforderungen und Schnittstellen wurden dabei zwischen mehreren Konsortialpartnern (EMEC, Vitesco, IFAM, ZBT) detailliert abgestimmt und dokumentiert. Daraus wurde ein technisches Gesamtkonzept entwickelt.

Im Zentrum des Gesamtkonzepts standen auch klar definierte technische Anforderungen an den Wasserstoffgenerator sowie an das von diesem bereitgestellte Wasserstoffgas. Die wichtigsten technischen Rahmenbedingungen und Spezifikationen für den Wasserstoff- und Stromgenerator wurden in einem Lastenheft festgelegt. Darüber hinaus wurden spezifische Anforderungen an die Eigenschaften des erzeugten Wasserstoffgases sowie wichtige Prozessparameter des Wasserstoffgenerators präzisiert.

Um thermische Schnittstellen optimal zu gestalten und insbesondere Kondensationsprobleme zu minimieren, wurde im Projekt ein gemeinsames Kühlkonzept für Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle vorgesehen.

Zusammenfassend bildeten die in AP1 entwickelten Spezifikationen und Lastenhefte die essenzielle Grundlage für sämtliche nachfolgenden Entwicklungsaktivitäten. Durch die kontinuierliche und enge Abstimmung zwischen den Konsortialpartnern wurden die festgelegten Ziele konsequent verfolgt und erfolgreich umgesetzt.

1.2 AP2: POWERPASTE

Das zentrale Ziel des Arbeitspakets 2 (AP2) war die Weiterentwicklung der patentierten POWERPASTE-Technologie, insbesondere im Hinblick auf ihre Eignung für den mobilen Einsatz sowie die Übertragung der Herstellungsverfahren vom Labor- in einen größeren Maßstab. Im Fokus stand, die technologischen Eigenschaften und die Langzeitstabilität der POWERPASTE weiter zu verbessern, um eine robuste und industrietaugliche Basis für spätere Anwendungen zu schaffen.

Herstellung und Optimierung im Labormaßstab

In der ersten Projektphase erfolgte die Herstellung und grundlegende Optimierung der POWERPASTE zunächst im Labormaßstab. Durch gezielte Anpassungen der Produktionsprozesse konnten wichtige Parameter hinsichtlich Handhabung, Reaktionsverhalten und Prozessstabilität gezielt verbessert werden. Ziel war eine zuverlässige, reproduzierbare Herstellung einer anwendungsgerechten Paste für den geplanten Einsatz im Wasserstoffgenerator.

Rheologische Optimierung

Neben dem reaktiven Verhalten wurden auch die physikalischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften der POWERPASTE weiterentwickelt. Die Untersuchungen des Fließverhaltens und die gezielte Optimierung der Rezeptur führten zu einer verbesserten Verarbeitbarkeit und erhöhten Dosiergenauigkeit – zentrale Anforderungen für den späteren Systemeinsatz.

Skalierung auf Technikumsmaßstab

Ab der zweiten Projektphase wurde die Herstellung der POWERPASTE erfolgreich auf einen größeren Produktionsmaßstab übertragen. Hierbei lag der Schwerpunkt auf der Überführung der zuvor entwickelten Produktionsparameter in den Technikumsbetrieb und der Sicherstellung einer konsistenten Produktqualität. Herausforderungen bei der Übertragung wurden im Rahmen iterativer Prozessanpassungen gelöst, sodass schließlich eine kontinuierliche und stabile Produktion erreicht werden konnte.

Qualitätssicherung und Feuchtmanagement

Zur Gewährleistung der Langzeitstabilität wurden umfangreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung eingeführt. Ein besonderes Augenmerk galt der Kontrolle und Minimierung unerwünschter Einflüsse während der Produktion und Lagerung. Die erreichte Produktqualität und Haltbarkeit der POWERPASTE entsprechen den Anforderungen für den geplanten Praxiseinsatz.

Recycling und Nachhaltigkeit

Parallel zur Herstellung wurde ein Konzept zur Wiederverwertung der im System entstehenden Reststoffe erarbeitet. Hierdurch konnten Wege aufgezeigt werden, wie die eingesetzten Materialien auch nach der Anwendung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden können. Erste Anwendungsversuche mit den zurückgewonnenen Materialien zeigten positive Perspektiven für verschiedene industrielle Einsatzbereiche.

Infrastrukturentwicklung und Ausblick

Zur Sicherstellung der kontinuierlichen Produktion wurde projektbegleitend die notwendige Infrastruktur erweitert. Neue Anlagen und Produktionssysteme wurden aufgebaut, um die POWERPASTE in der erforderlichen Qualität und Menge herstellen zu können. Verzögerungen bei der Inbetriebnahme einzelner Anlagen wurden durch die Nutzung bereits etablierter Produktionslinien kompensiert, sodass die Projektziele vollständig erreicht werden konnten.

1.3 AP3: Abfüllung und Verpackung

Im Arbeitspaket 3 (AP3) lag der Fokus auf der Entwicklung, Erprobung und Validierung geeigneter Abfüll- und Verpackungskonzepte für die POWERPASTE, um eine zuverlässige, sichere und anwendungsfreundliche Handhabung der Paste während ihres gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten. Zentrale Aspekte waren chemische Stabilität, Feuchteschutz, Dosiergenauigkeit und eine ausreichende Lagerfähigkeit sowohl im Produktionsprozess als auch in der späteren Anwendung.

Entwicklung und Optimierung der Kartuschenlösung

Zu Beginn des Projekts wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Verpackungs- und Kartuschensysteme analysiert. Nach mehreren Optimierungsschritten einigte sich das Konsortium auf die Nutzung industriell bewährter Kartuschen für die ersten Anwendungen. Ausschlaggebend hierfür waren Kriterien wie Materialbeständigkeit, Robustheit, Gewicht und die Eignung für eine reproduzierbare Fertigung.

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass die ursprünglichen Kartuschensysteme nicht in jedem Fall ausreichenden Schutz gegenüber Feuchtigkeit boten, was zu unerwünschten Veränderungen der Produkteigenschaften während der Lagerung führen konnte. Daraufhin wurden die Verpackungslösungen gezielt weiterentwickelt und hinsichtlich Dichtigkeit und Handling optimiert. Das Ergebnis war ein verbessertes Kartuschendesign, das die Anforderungen an Feuchteschutz und Dosierbarkeit im Praxiseinsatz zuverlässig erfüllte.

Für die weiteren Projektabschnitte, insbesondere für größere Systeme, wurde das Verpackungskonzept gemeinsam mit den Projektpartnern weiter skaliert und angepasst. Dazu wurde eine neue Kartuschenlösung für erhöhte Volumina entwickelt und erfolgreich getestet, die sich durch eine robuste Ausführung und eine hohe Zuverlässigkeit im Betrieb auszeichnet.

Optimierung des Abfüllprozesses

Im Zuge der Entwicklung wurden verschiedene Methoden zur Befüllung der Kartuschen erprobt, um eine konstante Dosiergenauigkeit sicherzustellen und die Prozessstabilität zu erhöhen. Dabei wurden die Abfüllprozesse kontinuierlich weiterentwickelt, sodass eine gleichbleibend hohe Produktqualität und Funktionssicherheit erreicht werden konnte.

Qualitätskontrolle und Feuchtemanagement

Ein besonderer Fokus lag auf der Sicherstellung einer möglichst feuchtefreien Produktion und Lagerung, da Feuchtigkeit die Produktqualität beeinträchtigen kann. Aus diesem Grund wurden systematische Qualitätskontrollen etabliert und alle relevanten Prozessschritte entsprechend angepasst, um ein hohes Maß an Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

Skalierung des Abfüllprozesses

Mit Fortschreiten des Projekts wurde die Abfülltechnik kontinuierlich weiterentwickelt und an die gestiegenen Anforderungen angepasst. Auch wenn die endgültige Automatisierung des Abfüllprozesses zum Projektende noch nicht vollständig abgeschlossen war, erwiesen sich die gewählten manuellen und halbautomatischen Verfahren als praxistauglich für die geplanten Anwendungen und Tests.

Lagerung, Alterungsverhalten und Stabilität der POWERPASTE

Langzeitversuche mit den optimierten Kartuschen zeigten eine hohe Stabilität und Lagerfähigkeit der POWERPASTE unter praxisnahen Bedingungen. Die neu entwickelten Verpackungslösungen bieten einen zuverlässigen Schutz vor äußeren Einflüssen und tragen wesentlich zur sicheren Handhabung der Produkte bei.

1.4 AP4: Wasserstoffgeneratoren (TRL6 und TRL7)

Die Arbeiten im Arbeitspaket 4 (AP4) konzentrierten sich auf die Konzeption, Entwicklung und Validierung von Wasserstoffgeneratoren auf zwei aufeinanderfolgenden Entwicklungsstufen (TRL6 und TRL7). Ziel war die Realisierung praxistauglicher Systeme zur Wasserstofferzeugung aus POWERPASTE, die den definierten Anforderungen hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Robustheit und Sicherheit entsprechen.

Entwicklung und Erprobung des TRL6-Wasserstoffgenerators

Im ersten Projektabschnitt wurde ein Demonstrator (TRL6) für die Wasserstofferzeugung entwickelt und aufgebaut. Das System wurde im Labor getestet, wobei die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des Wasserstoffgenerators für verschiedene Betriebsmodi umfassend evaluiert wurde. Während der Erprobung zeigte sich, dass eine gezielte Optimierung der Wärmeabfuhr erforderlich war, um einen zuverlässigen Dauerbetrieb auch bei höheren Leistungsanforderungen sicherzustellen. Durch konstruktive Weiterentwicklungen wurde die Wärmeableitung entscheidend verbessert und in nachfolgenden Tests bestätigt.

Elektronik und Steuerung

Parallel zur mechanischen Entwicklung erfolgte die Umsetzung einer speziell angepassten Steuerungs- und Elektroniklösung. Diese ermöglichte eine präzise Kontrolle aller relevanten Betriebsparameter sowie eine flexible Anbindung an verschiedene Test- und Messsysteme. Die Steuerungssoftware wurde kontinuierlich weiterentwickelt und im Projektverlauf an neue Anforderungen angepasst.

Weiterentwicklung zum TRL7-Wasserstoffgenerator

Auf Basis der im TRL6-Demonstrator gewonnenen Erfahrungen wurde der Wasserstoffgenerator für den nächsten Entwicklungsschritt (TRL7) umfassend weiterentwickelt. Das neue System zeichnete sich durch eine verbesserte Konstruktion und eine optimierte Systemintegration aus. Die Komponenten wurden in Hinblick auf Leistungsfähigkeit, Wartungsfreundlichkeit und Betriebssicherheit überarbeitet und für den Einsatz im Fahrzeugumfeld vorbereitet.

Systemtests und Validierung

Nach der Fertigstellung wurde das neue System zunächst einzeln, dann im Verbund mit weiteren Komponenten getestet. Laborversuche belegten die hohe Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Wasserstoffgenerators. Die Integration des Generators ins Fahrzeug und die anschließenden Funktionstests erfolgten erfolgreich. Die Systemstabilität, die Kommunikation mit anderen Subsystemen sowie das Verhalten im kombinierten Betrieb konnten unter realen Bedingungen bestätigt werden.

Fazit

Die technische Realisierbarkeit und Betriebssicherheit der Wasserstoffgeneratoren wurde auf beiden Entwicklungsstufen überzeugend demonstriert. Die erzielten Ergebnisse bilden eine belastbare Grundlage für zukünftige Anwendungen und Weiterentwicklungen der POWERPASTE-Technologie.

1.5 AP5: Brennstoffzellen

Die Entwicklungsarbeiten zu den Brennstoffzellensystemen erfolgten im Projektkonsortium schwerpunktmäßig bei den Partnern ZBT und Vitesco. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Kompatibilität der Brennstoffzelle mit dem feuchten Wasserstoff sicherzustellen, wie er bei der Umsetzung der POWERPASTE-Technologie entsteht.

Im Verlauf des Projekts wurde zunächst ein handelsübliches Brennstoffzellensystem eingesetzt. Parallel dazu arbeiteten die Partner an der Weiterentwicklung und Anpassung der Brennstoffzellentechnologie für die spezifischen Anforderungen der POWERPASTE-Anwendung. Hierbei standen insbesondere die Systemintegration, die Abstimmung der Schnittstellen und die Eignung für POWERPASTE im Vordergrund.

Obwohl die vollständige Umsetzung einer eigens entwickelten, speziell angepassten Brennstoffzelle im Projektzeitraum nicht abgeschlossen werden konnte, wurde ein alternatives, für die Feldtests geeignetes Brennstoffzellensystem erfolgreich integriert und betrieben. Die Kommunikation zwischen Wasserstoffgenerator und Brennstoffzellensystem erfolgte dabei zuverlässig und störungsfrei.

Im abschließenden Fahrbetrieb konnten die Funktionsfähigkeit und das Zusammenspiel der Systeme unter realen Bedingungen überzeugend nachgewiesen werden. Begrenzende Faktoren bei der erreichten Leistung resultierten aus äußeren Rahmenbedingungen, insbesondere niedrigen Umgebungstemperaturen.

Das Projekt demonstrierte insgesamt die erfolgreiche Integration und den praxistauglichen Betrieb eines Gesamtsystems aus Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle auf Basis der POWERPASTE-Technologie.

1.6 AP6: Systemintegration

Die Integration der entwickelten Subsysteme erfolgte zunächst im Labor anhand von Demonstratoren und wurde im späteren Projektverlauf auf das Gesamtfahrzeug übertragen. Im Fokus standen dabei die Einbindung des Wasserstoffgenerators, der Brennstoffzelle, der Steuerungs- und Leistungselektronik sowie des Kühlsystems zu einem funktionsfähigen Gesamtsystem.

Die Komponenten wurden systematisch zusammengeführt, erfolgreich in Betrieb genommen und in umfangreichen Tests validiert. Die Kommunikation zwischen den Subsystemen erfolgte dabei über eine standardisierte elektronische Schnittstelle. Im Zuge dieser Integrationsarbeiten konnten wichtige Erkenntnisse für die Optimierung und Weiterentwicklung des Gesamtsystems gewonnen werden.

Die abschließende Integration des Stromgenerators in das Demonstrationsfahrzeug wurde bei EMEC Prototyping durchgeführt. Im Rahmen des Fahrzeugumbaus wurden elektrische Komponenten und das Steuerungssystem auf den neuesten Stand gebracht. Erste Fahrversuche und Systemtests ermöglichten eine umfassende Überprüfung der Gesamtfunktionalität unter realen Bedingungen.

Die Zusammenarbeit aller beteiligten Partner ermöglichte eine effiziente und erfolgreiche Umsetzung der Systemintegration innerhalb eines kurzen Zeitraums.



Abbildung 2: Wasserstoffgenerator-Subsystem im Leichtfahrzeug mit POWERPASTE-Kartusche



Abbildung 3: Medienführungs-Seite im Leichtfahrzeug

1.7 AP7: Feldtests

Die abschließenden Feldtests fanden im Dezember 2024 statt und wurden unter realen Witterungs- und Einsatzbedingungen durchgeführt. Dabei wurden das Gesamtsystem und alle Subsysteme gemeinsam im Fahrzeug in Betrieb genommen und getestet. Trotz herausfordernder Rahmenbedingungen konnten alle wesentlichen Funktionen erfolgreich demonstriert werden.

Im Testverlauf wurden kleinere technische und kommunikative Herausforderungen gelöst, sodass die entwickelte Systemlösung ihre Praxistauglichkeit und grundsätzliche Funktionsfähigkeit im Verbundbetrieb unter Beweis stellen konnte. Die erfolgreiche Aufladung der Fahrzeugbatterie zeigte, dass das entwickelte System auch unter anspruchsvollen Bedingungen einsatzbereit ist.



Abbildung 4: Fahrttests mit dem modifizierten Elektrofrosch MAX.

1.8 AP8: Logistik

Im Rahmen von AP8 stand die Auswahl und Bewertung geeigneter Lösungen für Lagerung, Transport und Logistik im Fokus. Das Fraunhofer IFAM beteiligte sich an mehreren Abstimmungsrunden mit den beteiligten Partnern, um praktikable Lösungen für die Handhabung und den Transport der POWERPASTE zu identifizieren und weiterzuentwickeln. Wichtige Aspekte wie Verpackung, Lagerfähigkeit, Transportbedingungen sowie Fragen der Kreislaufwirtschaft wurden gemeinsam betrachtet und bewertet.

Detaillierte Ergebnisse und weiterführende Auswertungen der logistischen Aspekte und der Nachhaltigkeit sind im Abschlussbericht der Universität Magdeburg zusammengefasst.

2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt geleisteten Arbeiten waren notwendig und in vollem Umfang angemessen, um die angestrebten Entwicklungsziele zu erreichen. Bereits in der Anfangsphase des Projekts wurden in AP1 (Anwendungsanalyse & Konzepte zur Umsetzung) klare Anforderungen definiert und wichtige Grundsteine für das Gesamtsystem gelegt. Insbesondere die Spezifikationen hinsichtlich Leistung, Spannung und Kommunikation dienten als Orientierungspunkt für die weitere Entwicklung.

Die intensive Weiterentwicklung der POWERPASTE (AP2) war essenziell, um ein einsatzfähiges Produkt mit hoher Sicherheit und Zuverlässigkeit bereitzustellen. Ergänzt wurde dies durch umfangreiche Maßnahmen zur Qualitätssicherung sowie Optimierungskonzepte, die zu einer deutlichen Verbesserung der Lagerfähigkeit und Reproduzierbarkeit führten. Die Erarbeitung eines effizienten Recyclingprozesses im Labormaßstab bis zu einem weiterverwendbaren Produkt stärkt zusätzlich die Nachhaltigkeit der Technologie und trägt zur späteren Wirtschaftlichkeit bei.

Die Arbeiten im Bereich Abfüllung & Verpackung (AP3) waren notwendig, um eine sichere und praxistaugliche Lagerung der POWERPASTE zu gewährleisten. Insbesondere die iterative Optimierung von Kartuschendesigns und die sorgfältige Erprobung und Validierung verschiedener Konzepte waren für die Systemintegration unabdingbar.

Die Entwicklung der Wasserstoffgeneratoren (AP4) war die zentrale Herausforderung für das Fraunhofer IFAM. Aufgrund der thermischen Randbedingungen wurde mehrfach eine Anpassung des Reaktorkonzepts vorgenommen. Diese schrittweise Optimierung war notwendig, um eine ausreichende Wärmeabfuhrleistung sicherzustellen und den Generator auf höhere Leistungsbereiche vorzubereiten. Die erfolgreiche Weiterentwicklung von TRL6- zu TRL7-Wasserstoffgenerator, einschließlich umfangreicher Anpassungen an der Steuerplatine und der Software, dokumentiert die Angemessenheit der eingesetzten Ressourcen und Maßnahmen.

Die Entwicklung der speziell auf den Betrieb mit feuchtem Hydrolysewasserstoff abgestimmten Brennstoffzellen durch ZBT und Vitesco (AP5) erwies sich trotz umfangreicher Bemühungen am Ende als nicht vollständig skalierbar auf Stack-Ebene. Dennoch konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt und mit einem alternativen Brennstoffzellensystem von Vitesco erfolgreich umgesetzt werden. Dies zeigt, dass die Risiken der Technologieentwicklung realistisch eingeschätzt und effektiv gemanagt wurden.

Besondere Bedeutung kam der Systemintegration (AP6) und den abschließenden Feldtests zu. Durch die professionelle und effiziente Zusammenarbeit mit EMEC, insbesondere durch umfassende Umbauten am Demonstratorfahrzeug sowie der Integration aller Subsysteme, konnten wertvolle reale Betriebsdaten erhoben werden. Diese können in die Weiterentwicklung von Wasserstoffgenerator und Brennstoffzelle einbezogen werden und dazu dienen, die Praxistauglichkeit des Gesamtsystems auch unter herausfordernden Umweltbedingungen zu ermöglichen.

Die im AP8 geleisteten Arbeiten zu Logistik und Nachhaltigkeit ergänzten das Projekt sinnvoll. Die Einbringung von physikalischen, ökonomischen und logistischen Daten sowie der intensive Austausch mit den Partnern waren notwendig, um realistische Nutzungsszenarien zu entwickeln und das langfristige Potenzial der POWERPASTE-Technologie bewerten zu können.

Die erreichten Ergebnisse, insbesondere der abschließende, erfolgreiche Test des Gesamtsystems im Dezember 2024 unter realen Bedingungen, rechtfertigen in vollem Umfang den Einsatz der geleisteten Arbeit und der eingesetzten Ressourcen. Trotz technischer und logistischer Herausforderungen konnten alle wesentlichen Projektziele erreicht und wichtige Grundlagen für die zukünftige industrielle Nutzung der Technologie geschaffen werden.

3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Projekt POWERPASTE erreichten Ergebnisse weisen ein hohes Potenzial für eine kommerzielle Nutzung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen auf. Im Fokus stehen dabei insbesondere mobile Anwendungen, bei denen Gewicht, Volumen und Handhabung von Energiespeichern entscheidend sind.

Die entwickelte POWERPASTE-Technologie ermöglicht durch ihre hohe spezifische Energiedichte, einfachere Logistik sowie die gute Langzeitlagerfähigkeit eine deutliche Verbesserung gegenüber anderen Wasserstoffspeichern. Dies eröffnet insbesondere für leichte elektrische Fahrzeuge, portable Stromgeneratoren sowie zukünftig für Drohnenanwendungen klare Wettbewerbsvorteile.

Während des Projekts konnten bereits wichtige technologische Hürden überwunden werden, einschließlich der Skalierung der Herstellung und der technischen Umsetzung eines TRL7-fähigen Wasserstoffgenerators. Durch die erzielten Fortschritte bei der Produktion, der Abfüllung und dem Verpackungsprozess wurde zudem eine solide technologische Basis geschaffen, die eine spätere Überführung der Technologie in den industriellen Maßstab erlaubt.

Das Interesse an der POWERPASTE-Technologie ist nach wie vor sehr hoch, was sich insbesondere bei Messeauftritten und öffentlichen Präsentationen (z. B. Hannover Messe, Hydrogen Technology Expo) gezeigt hat. Zahlreiche Gespräche mit Industriepartnern belegen zudem das konkrete Marktpotenzial in unterschiedlichen Leistungsklassen. Besonders hervorzuheben ist das identifizierte Marktinteresse im Bereich von 25 bis 75 kW, sowie der wachsende Bedarf im Bereich schwererer mobiler Anwendungen wie Baumaschinen und landwirtschaftlicher Geräte.

Die erzielten Ergebnisse in der Systemintegration und insbesondere die reibungslose Kommunikation der Subsysteme sowie die erfolgreich umgesetzte Systemsteuerung ermöglichen eine direkte Übertragbarkeit der entwickelten Technologien auf weitere, leistungsstärkere oder auch miniaturisierte Systeme. Damit wurde die Grundlage geschaffen, die POWERPASTE-Technologie perspektivisch für ein breites Spektrum industrieller Anwendungen nutzbar zu machen.

Ein weiterer bedeutender Schritt ist ein seit November 2024 laufendes Förderprojekt zur Leistungsskalierung des POWERPASTE-Reaktors in Kooperation mit der TU Dresden und der HTW Dresden (EFRE-Projekt SmartPASTE). Dies eröffnet die Möglichkeit, die Technologie auf deutlich höhere Leistungsbereiche zu erweitern und somit neue Märkte zu erschließen.

Parallel dazu laufen bereits konkrete Gespräche mit potenziellen Lizenznehmern sowie mit möglichen Rohstofflieferanten, um sowohl die Herstellungskosten der POWERPASTE zu senken als auch eine großtechnische Produktion sicherzustellen. Auch die Diskussionen rund um das Recyclingkonzept versprechen langfristig eine nachhaltige und wirtschaftlich attraktive Kreislaufführung der eingesetzten Materialien.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse des Projekts POWERPASTE somit hervorragend geeignet, den technologischen und wirtschaftlichen Nutzen der entwickelten Wasserstoffspeichertechnologie nachhaltig und profitabel zu verwerten. Die realisierten Demonstratoren und das aufgebaute technische Know-how ermöglichen eine spätere Kommerzialisierung, wodurch eine hohe Wertschöpfung für alle beteiligten Partner zu erwarten ist.

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

Im Verlauf des Projekts POWERPASTE sind keine Entwicklungen bekannt geworden, die die technologische Alleinstellung der entwickelten Technologie in Frage stellen würden. Die POWERPASTE-Technologie ist in Schlüsselmärkten, darunter wichtige EU-Länder sowie die USA, umfassend patentiert. Daher besteht derzeit kein unmittelbares Risiko, dass andere Akteure die Technologie kurzfristig nachahmen können.

Über den Patentschutz hinaus stellt das während des Projekts aufgebaute Know-how eine weitere wesentliche Barriere für potenzielle Wettbewerber dar. Die POWERPASTE-Technologie erfordert ein umfassendes Verständnis der zugrundeliegenden chemischen, prozesstechnischen und logistischen Zusammenhänge. Trotz der damit verbundenen Herausforderungen bietet sie aufgrund der Verwendung kostengünstiger und verfügbarer Rohstoffe und Komponenten ein erhebliches wirtschaftliches Potenzial.

Im Verlauf des Projekts wurden internationale Entwicklungen im Bereich vergleichbarer Technologien beobachtet und Kontakte zu ausländischen Unternehmen initiiert. Der Austausch von Erfahrungen in einer noch frühen Phase der Entwicklung war für beide Seiten vorteilhaft, da er es ermöglicht hat, voneinander zu lernen und die jeweiligen Anwendungsbereiche und Alleinstellungsmerkmale klar abzugrenzen.

5 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Vorhabens wurden während der gesamten Projektlaufzeit umfangreich präsentiert und veröffentlicht. Nachfolgend werden die bereits erfolgten Veröffentlichungen und Präsentationen detailliert zusammengefasst sowie die geplanten Aktivitäten erläutert:

Bereits erfolgte Präsentationen und Veröffentlichungen

Im Rahmen diverser internationaler Fachmessen sowie öffentlichkeitswirksamer Veranstaltungen wurden die Entwicklungsergebnisse der POWERPASTE-Technologie einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Zu den wichtigsten Messepräsentationen zählen insbesondere:

- **Hannover Messe 2022**
Vorstellung der POWERPASTE-Technologie und des aktuellen Entwicklungsstands auf einem Gemeinschaftsstand des Fraunhofer-Instituts für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM). Video zur Präsentation: https://youtu.be/_34QDXK3bA0
- **Hydrogen Technology Expo 2022, Bremen**
Präsentation des Gesamtsystems sowie Diskussion der Anwendungspotenziale der POWERPASTE-Technologie in unterschiedlichen Mobilitäts- und Energieszenarien.
- **Hannover Messe 2023**
Erneute Präsentation mit Fokus auf die Weiterentwicklung und Skalierung der Technologie sowie erste Erkenntnisse aus den Tests und Optimierungen des Wasserstoffgenerators. Video zur Präsentation: <https://youtu.be/gTWwrmeulPg>

Darüber hinaus fand das Thema POWERPASTE auch breite mediale Resonanz, was sich in zahlreichen Beiträgen und Interviews in Fernsehen, Radio sowie Online- und Printmedien widerspiegelte, darunter beispielsweise:

- MDR-Fernsehen (regionaler TV-Beitrag)
- Diverse Fachartikel in technischen und wissenschaftlichen Magazinen sowie auf Fachportalen
- Online-Beitrag der Fraunhofer-Gesellschaft: <https://youtu.be/XyGQBWFRQgc>

Diese Veröffentlichungen und Präsentationen haben wesentlich dazu beigetragen, die Sichtbarkeit und das industrielle sowie wissenschaftliche Interesse an der POWERPASTE-Technologie deutlich zu erhöhen.

Geplante Veröffentlichungen

Aufgrund des zu schützenden Know-Hows und geplanter wurden bisher detaillierte wissenschaftliche Publikationen in peer-reviewed Fachzeitschriften bewusst zurückgestellt. Nach Abschluss der relevanten Patentanmeldungen sind jedoch auch hier gezielte Publikationen geplant.