



***Förderung fortschrittlicher Produktionsstandards für
ultraporöse Strukturen zur hochdichten
Wasserstoffspeicherung***

Politische Empfehlungen



Funded by
the European Union

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Zusammenfassung	3
3. Projektergebnisse	4
4. Beitrag zu den EU-Prioritäten	6
5. Zentrale Herausforderungen für den industriellen Einsatz	8
6. Überarbeitete Bewertung der Machbarkeit der DOE-Ziele	10
7. Politische Empfehlungen	11
8. Sozioökonomische Auswirkungen	15
9. Gewonnene Erkenntnisse	16
10. Schlussfolgerungen und Kernaussagen	17

1. Einleitung

Die Wasserstoffspeicherung ist eine strategische Priorität für die Europäische Union. Der europäische Grüne Deal legt das rechtsverbindliche Ziel fest, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen, und sauberer Wasserstoff wurde als einer der wichtigsten technologischen Wegbereiter für die Dekarbonisierung der Schwerindustrie, des Ferntransports und anderer schwer zu elektrifizierender Sektoren identifiziert.

Der im Mai 2022 verabschiedete REPowerEU-Plan hat diese Agenda weiter beschleunigt, indem er das Ziel festlegte, bis 2030 20 Millionen Tonnen erneuerbaren Wasserstoff zu erreichen (10 Millionen Tonnen Produktion innerhalb der Europäischen Union und 10 Millionen Tonnen Import). Dieses Ziel soll gleichzeitig die Abhängigkeit von importierten fossilen Brennstoffen verringern und die saubere Energiewende beschleunigen.

Die Europäische Wasserstoffstrategie, die derzeit überarbeitet wird und für die im zweiten Quartal 2026 eine öffentliche Konsultation erwartet wird, zielt darauf ab, eine umfassende Wasserstoff-Wertschöpfungskette zu entwickeln, die die Produktion von erneuerbarem Wasserstoff, die Transport- und Verteilinfrastruktur sowie Endanwendungen in Industrie, Verkehr und Gebäuden umfasst.

Das Netto-Null-Industrie-Gesetz, das im Juni 2024 in Kraft trat, stärkt die europäische Fertigungskapazität für saubere Technologien mit dem Ziel, dass die heimische Produktion bis 2030 mindestens 40 % des jährlichen Einsatzbedarfs der EU decken soll. Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Wasserstoffspeichertechnologien werden ausdrücklich als strategische Technologien anerkannt, die unter dieses Gesetz fallen.

Schließlich fördert der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, den die Europäische Kommission im Laufe des Jahres 2026 durch ein verbindliches Kreislaufwirtschaftsgesetz ersetzen will, die Verwertung von Abfällen und die Ressourceneffizienz mit dem Ziel, die Kreislaufmaterialnutzungsquote der EU bis 2030 auf rund 24 % zu verdoppeln.

Vor diesem politischen Hintergrund liefert das Horizon-Europe-Projekt **MAST3RBoost** technische Belege, die diese strategischen Prioritäten direkt unterstützen. Das Projekt hat nachhaltige ultraporöse Materialien für die Wasserstoffspeicherung aus abfallbasierten Ausgangsstoffen entwickelt, künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen auf die Materialforschung angewandt, die industrielle Hochskalierung dieser Prozesse demonstriert sowie einen leichten Wasserstoffspeichertank mittels additiver Fertigung entworfen, hergestellt und validiert.

Dieses Dokument überträgt diese Ergebnisse in politische Empfehlungen, die an die Europäische Kommission und die europäischen Gesetzgeber gerichtet sind.

2. Zusammenfassung

Das Horizon-Europe-Projekt **MAST3RBoost** hat gezeigt, dass ultraporöse Materialien – einschließlich Aktivkohlen und Metall-organischer Gerüste (MOFs) – erfolgreich aus

landwirtschaftlichen, agrar-lebensmittelbezogenen, kommunalen und bergbaulichen Abfallströmen hergestellt werden können. Diese Materialien erreichten Wasserstoffspeicherkapazitäten von bis zu **9,8 Gew.-%** unter kryogenen Bedingungen. Parallel dazu stellte das Projekt erfolgreich einen leichten Aluminium-Wasserstoffspeichertank her, unter Verwendung von **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**.

Diese Ergebnisse versetzen das Konsortium in eine starke Position, um zur bevorstehenden Überarbeitung der Europäischen Wasserstoffstrategie beizutragen. Ein rigoroser Vergleich mit den vom US-Energieministerium (DOE) festgelegten technischen Zielwerten zeigt jedoch, dass die erreichten gravimetrischen Speicherkapazitäten zwar das DOE-Endziel von **6,5 Gew.-%** übertreffen, diese Ergebnisse jedoch bei **-196 °C** erzielt wurden, weit unter dem vom DOE geforderten Betriebstemperaturbereich (**-40 °C bis 60 °C**). Künftige Arbeiten sollten daher die Validierung dieser Materialien unter repräsentativeren Betriebstemperaturen und realen Anwendungsbedingungen ausweiten.

Dieses Dokument überträgt die technischen Errungenschaften des Projekts in konkrete politische Empfehlungen für verschiedene Ebenen der europäischen Entscheidungsfindung und liefert zugleich eine überarbeitete und realistische Bewertung der Machbarkeit der DOE-Ziele für diese Familie von Wasserstoffspeichermaterialien.

3. Projektergebnisse

Die im Laufe des Projekts **MAST3RBoost** erzielten Ergebnisse zeigen das Potenzial von Wasserstoffspeichertechnologien auf Basis ultraporöser Materialien, um zu Europas Zielen der Dekarbonisierung, industriellen Wettbewerbsfähigkeit und strategischen Autonomie beizutragen. Über die erzielten wissenschaftlichen Fortschritte hinaus hat das Projekt wertvolles Wissen, Methoden und industrielle Fähigkeiten hervorgebracht, die eine solide Grundlage für künftige öffentliche Politiken und Normungstätigkeiten bilden.

Die wichtigsten Errungenschaften des Projekts lassen sich in vier komplementäre Bereiche einteilen.

◆ 3.1 Wissenschaftliche und technologische Fortschritte

MAST3RBoost hat eine neue Generation ultraporöser Wasserstoffspeichermaterialien entwickelt, einschließlich Aktivkohlen und Metall-organischer Gerüste (MOFs), die durch nachhaltige Verfahren aus landwirtschaftlichen, agrar-lebensmittelbezogenen, kommunalen und industriellen Abfallströmen hergestellt werden.

Zu den bedeutendsten Errungenschaften zählen die Entwicklung von Aktivkohlen mit spezifischen Oberflächen von bis zu 3.300 m²/g und Wasserstoffadsorptionskapazitäten von bis zu 9,8 Gew.-% unter kryogenen Bedingungen, zusammen mit neuen, aus abfallbasierten Ausgangsstoffen synthetisierten MOFs mit optimierten Eigenschaften für Wasserstoffspeicheranwendungen.

Das Projekt integrierte zudem Werkzeuge der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens, um die Materialforschung und -optimierung zu beschleunigen, indem FAIR-Datenbanken, Vorhersagemodelle und aktive Lernmethoden entwickelt wurden, wodurch der experimentelle Aufwand zur Identifizierung vielversprechender neuer Materialien erheblich reduziert wurde.

◆ 3.2 Industrielle Hochskalierung und Technologiedemonstration

Eine der wichtigsten Errungenschaften von MAST3RBoost war der Nachweis, dass die entwickelten Materialien über die Laborforschung hinausgehen können. Das Projekt validierte erfolgreich die Hochskalierung verschiedener ultraporöser Materialien von der Laborproduktion zur Fertigung im Pilotmaßstab und identifizierte dabei die wichtigsten Herausforderungen für ihren künftigen industriellen Einsatz.

Parallel dazu entwarf und fertigte das Projekt einen leichten Wasserstoffspeichertank auf Basis der **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**-Technologie, mit internen Beschichtungen, die speziell für den kryogenen Betrieb entwickelt wurden. Der Tank wurde strukturellen und Drucktests unterzogen, die wertvolle Informationen für seine künftige technologische Validierung und Qualifizierung lieferten.

◆ 3.3 Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

MAST3RBoost hat gezeigt, dass fortschrittliche Wasserstoffspeichermaterialien aus Sekundärrohstoffen hergestellt werden können, wodurch die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringert und gleichzeitig nachhaltigere industrielle Produktionsmodelle gefördert werden.

Die Verwendung von landwirtschaftlichen Rückständen, Agrar-Lebensmittelabfällen, Aluminiumverpackungen, PET-Flaschen und sauren Grubenwässern als Ausgangsstoffe stellt eine praktische Demonstration des Potenzials der Kreislaufwirtschaft für die Entwicklung fortschrittlicher Energietechnologien dar.

Darüber hinaus bewertete das Projekt die Umwelt-, Wirtschafts- und Sicherheitsauswirkungen der entwickelten Technologien mittels Ökobilanz (LCA), Lebenszykluskostenrechnung (LCC) und Risikobewertungsstudien, wodurch eine objektive Grundlage für künftige industrielle und regulatorische Entscheidungen geschaffen wurde.

◆ 3.4 Beitrag zur europäischen Wettbewerbsfähigkeit

Die Ergebnisse des Projekts stärken Europas Fähigkeit, eigene Wasserstoffspeichertechnologien zu entwickeln, indem sie fortschrittliche Materialforschung, künstliche Intelligenz, additive Fertigung, nachhaltige Materialien und skalierbare industrielle Prozesse integrieren.

Zusammen stärken diese Errungenschaften Europas Position in strategischen Sektoren im Zusammenhang mit sauberem Wasserstoff, indem sie den Aufbau neuer industrieller Fähigkeiten, widerstandsfähigerer Lieferketten und einer geringeren technologischen Abhängigkeit von Drittländern unterstützen.

Strategischer Bereich	Wichtigste Errungenschaften	Relevanz für EU-Politiken
Fortschrittliche Materialien	Entwicklung von Hochleistungs-Aktivkohlen und Metall-organischen Gerüsten (MOFs)	Stärkt die europäische Führungsrolle bei Wasserstoffspeichertechnologien
Künstliche Intelligenz	FAIR-Datenrepositorien, Vorhersagemodelle und aktive Lernmethoden	Beschleunigt die Digitalisierung von Forschung und Innovation

Industrielle Hochskalierung	Produktion im Pilotmaßstab und Materialverdichtung	Überbrückt die Kluft zwischen Forschung und industriellem Einsatz
Fortschrittliche Fertigung	Leichter Wasserstoffspeichertank, hergestellt mittels WAAM und kryogenen Beschichtungen	Stärkt die europäischen Fähigkeiten in der fortschrittlichen Fertigung
Kreislaufwirtschaft	Nutzung von Abfallströmen als Ausgangsstoffe	Unterstützt den Übergang zu einer kohlenstoffarmen, ressourceneffizienten Industrie

4. Beitrag zu den EU-Prioritäten

Die europäische Wasserstoffpolitik hat sich in den letzten Jahren erheblich weiterentwickelt und umfasst Ziele im Zusammenhang mit der industriellen Dekarbonisierung, der Stärkung der europäischen Fertigungskapazität, der Förderung der Kreislaufwirtschaft und der Beschleunigung der Digitalisierung industrieller Prozesse. Die von MAST3RBoost erzielten Ergebnisse liefern wertvolle technische Belege zur Unterstützung der Umsetzung dieser Politiken und können als Referenz für künftige Forschungs-, Innovations- und Industrialisierungsinitiativen dienen.

Diese Übereinstimmung zeigt, dass die Errungenschaften von MAST3RBoost weit über wissenschaftliche und technologische Fortschritte hinausgehen und Belege liefern, die künftige Entscheidungen zu Forschung, Innovation, Normung und industrieller Entwicklung innerhalb der Europäischen Union unterstützen können. Die in diesem Dokument vorgestellten politischen Empfehlungen basieren auf diesen Erkenntnissen und den während des Projekts gewonnenen Erfahrungen.

EU-Strategische Priorität	Beitrag von MAST3RBoost	Mehrwert für die öffentliche Politik
Europäischer Grüner Deal	Entwicklung nachhaltiger Wasserstoffspeichermaterialien aus abfallbasierten Ausgangsstoffen durch Herstellungsprozesse mit geringerer Umweltauswirkung.	Unterstützt die industrielle Dekarbonisierung und den Übergang zu einer klimaneutralen Wirtschaft.
REPowerEU	Entwicklung innovativer Wasserstoffspeicherlösungen, die zum Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft beitragen können.	Stärkt die Energiesicherheit und verringert die Abhängigkeit von importierten fossilen Brennstoffen.
Europäische Wasserstoffstrategie	Entwicklung und Validierung fortschrittlicher Materialien und adsorptionsbasierter Wasserstoffspeichersysteme.	Erweitert das Portfolio verfügbarer Wasserstoffspeichertechnologien für künftige Anwendungen.
Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft	Verwertung von landwirtschaftlichen, agrar-lebensmittelbezogenen, industriellen und bergbaulichen	Fördert zirkuläre und ressourceneffizientere Produktionsmodelle.

	Abfallströmen als Ausgangsstoffe für funktionale Materialien.	
Netto-Null-Industrie-Gesetz	Industrielle Hochskalierung fortschrittlicher Materialien und Fertigungskomponenten mittels Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).	Stärkt die europäische Fertigungskapazität bei strategischen Netto-Null-Technologien.
Europäische Strategie für Digitalisierung und Künstliche Intelligenz	Anwendung von künstlicher Intelligenz, maschinellem Lernen und FAIR-Daten zur Beschleunigung der Entwicklung neuer Materialien.	Zeigt das Potenzial von KI zur Beschleunigung industrieller Innovation.

◆ Wichtige Implikationen für die Entwicklung europäischer Politiken

Die Projektergebnisse zeigen, dass die Entwicklung fortschrittlicher Wasserstoffspeichertechnologien einen integrierten Ansatz erfordert, der Materialforschung, digitale Werkzeuge, fortschrittliche Fertigung, Nachhaltigkeit und Technologiedemonstration miteinander verbindet.

Die während des Projekts gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass der Übergang von der Forschung zur industriellen Anwendung nicht nur von wissenschaftlicher Exzellenz abhängt, sondern auch von der Verfügbarkeit von Testinfrastrukturen, einer wirksamen Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie sowie von Regulierungsrahmen, die die Markteinführung neuer Technologien erleichtern.

Darüber hinaus bestätigt das Projekt das Potenzial der Kreislaufwirtschaft als wichtigen Wegbereiter der Energiewende. Die Nutzung landwirtschaftlicher, agrar-lebensmittelbezogener, industrieller und bergbaulicher Abfallströme als Ausgangsstoffe für funktionale Materialien zeigt, dass innovative Lösungen entwickelt werden können, während die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringert und eine effizientere Nutzung verfügbarer Materialien gefördert wird.

Ein weiterer besonders relevanter Aspekt ist die Integration von künstlicher Intelligenz und maschinellem Lernen in den Materialentwicklungsprozess. Die Schaffung von Dateninfrastrukturen, Vorhersagemodellen und aktiven Lernmethoden zeigt das Potenzial dieser Technologien, Innovationen zu beschleunigen, experimentelle Prozesse zu optimieren und die Entwicklung fortschrittlicher Materialien für Energieanwendungen zu unterstützen.

Schließlich unterstreicht die während MAST3RBoost gewonnene Erfahrung die Bedeutung einer weiteren Stärkung von Technologiedemonstration, Validierung und Wissenstransfer. Die Entwicklung komplexer Lösungen, die neuartige Materialien, fortschrittliche Fertigungsprozesse und anspruchsvolle Betriebsbedingungen integrieren, erfordert angemessene Validierungszeiträume, spezialisierte Infrastrukturen und eine enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Akteuren des europäischen Innovationsökosystems.

Insgesamt bieten die Projektergebnisse eine solide wissenschaftliche und technische Grundlage, die künftige europäische Forschungs- und Innovationsinitiativen, Normungstätigkeiten und öffentliche Politiken unterstützen kann, die auf die Beschleunigung der Entwicklung und Einführung sichererer, nachhaltigerer und wettbewerbsfähigerer Wasserstoffspeichertechnologien abzielen.

Gleichzeitig hat die während des Projekts gewonnene Erfahrung es ermöglicht, mehrere wissenschaftliche, technologische und industrielle Herausforderungen zu identifizieren, die angegangen werden müssen, um den großflächigen Einsatz dieser Technologien zu erleichtern. Diese Herausforderungen werden im folgenden Abschnitt behandelt.

5. Zentrale Herausforderungen für den industriellen Einsatz

Trotz der bedeutenden während MAST3RBoost erzielten Fortschritte identifizierte das Konsortium mehrere Hindernisse, die die großflächige Entwicklung und den Einsatz fortschrittlicher Wasserstoffspeichertechnologien weiterhin einschränken. Die Identifizierung dieser Herausforderungen stellt eines der wertvollsten Ergebnisse des Projekts dar und liefert Belege, die künftige Forschungs-, Innovations-, Normungs- und Industriepolitiken leiten können.

Begrenzte Verfügbarkeit kryogener und Hochdruck-Testinfrastrukturen

Die Entwicklung und Validierung fortschrittlicher Wasserstoffspeichersysteme erfordert Testinfrastrukturen, die unter kombinierten Hochdruck- und kryogenen Bedingungen betrieben werden können. Die während des Projekts gewonnene Erfahrung zeigte die begrenzte Verfügbarkeit solcher Einrichtungen sowohl innerhalb des Konsortiums als auch in ganz Europa. Dies schränkte die Planung bestimmter experimenteller Tätigkeiten ein und verdeutlichte die Notwendigkeit, die europäischen Forschungskapazitäten in diesem Bereich durch künftige Initiativen zu stärken.

Darüber hinaus erfordert die Validierung komplexer Demonstratoren, die neuartige Materialien, fortschrittliche Fertigungsprozesse und Wasserstoffspeichersysteme integrieren, Inbetriebnahme-, Verifizierungs- und Testzeiträume, die die Dauer eines typischen Forschungsprojekts überschreiten können. Die gewonnene Erfahrung legt nahe, dass künftige europäische Programme Mechanismen in Betracht ziehen sollten, die es ermöglichen, diese Validierungsphasen zu verlängern, wann immer Sicherheitsanforderungen, die Verfügbarkeit von Infrastrukturen oder Herausforderungen bei der Systemintegration zusätzliche Zeit rechtfertigen.

Industrielle Hochskalierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Materialeistung

Die Hochskalierung der Produktion von Labormengen auf die Fertigung im Pilotmaßstab führte zu unerwarteten Schwankungen in der Materialeistung und der Erhaltung der Porenstruktur, was eine weitere Optimierung der Verdichtungs- und Granulationsprozesse erfordert.

Die Notwendigkeit größerer Datensätze zur Verbesserung von KI-Modellen

Die Anwendung künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens bei der Entdeckung neuer Materialien hat ein erhebliches Potenzial zur Beschleunigung der Wasserstoffspeicherforschung gezeigt. Die Vorhersagefähigkeit dieser Modelle hängt jedoch direkt vom Umfang, der Qualität und der Vielfalt der für das Training verfügbaren Daten ab.

Während MAST3RBoost wurde eine Datenbank charakterisierter ultraporöser Materialien erstellt, die die Entwicklung von Vorhersagemodellen ermöglichte und die Identifizierung vielversprechender Materialformulierungen unterstützte. Dennoch würde eine Erweiterung dieser Datensätze und ihre Integration mit Daten aus anderen europäischen Projekten die Robustheit und Vorhersagefähigkeit dieser Modelle erheblich verbessern.

Die Verfügbarkeit offener, interoperabler und harmonisierter europäischer Datenrepositorien würde die Vorhersageleistung erheblich verbessern, die Wiederverwendung von durch öffentlich finanzierte Forschung generiertem Wissen erleichtern und die Entwicklung neuer Materialien für Energieanwendungen beschleunigen.

Weitere Validierung unter realen Betriebsbedingungen erforderlich

Obwohl das Projekt bei der Entwicklung ultraporöser Materialien, Komponenten und integrierter Wasserstoffspeicherlösungen erhebliche Fortschritte gemacht hat, wird eine weitere Validierung unter Betriebsbedingungen, die reale Anwendungen widerspiegeln, weiterhin erforderlich sein.

Die im Rahmen von MAST3RBoost entwickelten Materialien zeigten herausragende Leistungen, wobei ultraporöse Kohlenstoffe Wasserstoffspeicherkapazitäten von bis zu **9,8 Gew.-%** unter kryogenen Bedingungen (**100 bar und -196 °C**) erreichten. Die meisten experimentellen Ergebnisse wurden jedoch unter diesen Testbedingungen erzielt, sodass es notwendig ist, die Validierung auf Temperaturbereiche und Betriebsbedingungen auszuweiten, die praktische Anwendungen in Verkehr, Industrie und stationärer Energiespeicherung genauer widerspiegeln.

Darüber hinaus verdeutlichte die während der Demonstratorentwicklung gewonnene Erfahrung die Komplexität der Integration und Validierung von Systemen, die neuartige Materialien, fortschrittliche Fertigungstechnologien und anspruchsvolle Betriebsbedingungen kombinieren. Die Verfügbarkeit spezialisierter Infrastrukturen, Sicherheitsanforderungen und die für den Abschluss von Inbetriebnahme- und Validierungstätigkeiten benötigte Zeit können unter bestimmten Umständen die Dauer von Standard-Forschungs- und Innovationsprojekten überschreiten.

In diesem Zusammenhang sollten künftige europäische F&I-Programme Mechanismen in Betracht ziehen, die es ermöglichen, Technologiedemonstrations- und Validierungstätigkeiten bei Bedarf fortzusetzen, um so einen wirksameren Übergang von der Forschung über die Demonstration bis hin zum industriellen Einsatz zu erleichtern.

Normungstätigkeiten sollten parallel zur Technologieentwicklung beginnen

Die während MAST3RBoost gewonnene Erfahrung zeigt, wie wichtig es ist, Normungstätigkeiten parallel zur Technologieentwicklung und nicht erst nach Projektabschluss einzuleiten.

Die Einführung innovativer Wasserstoffspeicherlösungen auf Basis fortschrittlicher Materialien, additiver Fertigung und funktionaler Beschichtungen erfordert, dass sich Qualifizierungs- und Normungsprozesse im gleichen Tempo wie die technologische Entwicklung weiterentwickeln.

Insbesondere die Entwicklung von Wasserstoffspeichertanks, die mittels **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)** hergestellt werden, zusammen mit der Anwendung speziell für kryogene Bedingungen entwickelter interner Beschichtungen, verdeutlicht die Notwendigkeit, weiterhin experimentelle Belege zu generieren, um die künftige Überarbeitung der Normen für Druckgeräte, Wasserstoffspeichersysteme und den Transport gefährlicher Güter zu unterstützen.

Die Förderung einer frühzeitigen Zusammenarbeit zwischen Forschungsprojekten, Industrie, Normungsgremien und Regulierungsbehörden wird die für künftige Qualifizierungs- und Zertifizierungsprozesse erforderliche Zeit verkürzen und die sichere und zuverlässige Markteinführung dieser neuen Technologien erleichtern.

6. Überarbeitete Bewertung der Machbarkeit der DOE-Ziele

Das **US-Energieministerium (DOE)** hat international anerkannte technische Zielwerte für Bordwasserstoffspeichersysteme in Leichtfahrzeugen festgelegt. Es ist wichtig zu betonen, dass sich diese Zielwerte auf das **vollständige Speichersystem** beziehen, einschließlich Speichertank, Speichermaterial, Ventile, Isolierung und Hilfskomponenten, und nicht nur auf das Speichermaterial allein. Folglich muss das Speichermaterial selbst eine deutlich höhere Leistung erbringen als das Gesamtsystem.

Parameter	DOE-Ziel 2025 (System)	DOE-Endziel (System)	MAST3RBoost- Ergebnis (Material)	Testbedingungen
Gravimetrische Kapazität	5,5 Gew.-%	≈ 6,5 Gew.-%	Bis zu 9,8 Gew.-% (ultraporöse Kohlenstoffe)	100 bar, -196 °C
Volumetrische Kapazität	40 g H ₂ /L	≈ 50 g H ₂ /L	Nicht auf Systemebene angegeben	—
Betriebstemperaturbereich	-40 °C bis 60 °C	-40 °C bis 60 °C	-196 °C (Testtemperatur)	Weit unter dem DOE- Betriebsbereich
Druck	<10 MPa (100 bar)	<10 MPa (100 bar)	100 bar (Material); Speichertank erfolgreich unter Druck getestet, einschließlich Bersttests bei 360 bar	Tests an Materialien und Komponenten durchgeführt

Die im Rahmen von MAST3RBoost entwickelten Materialien, insbesondere die ultraporösen Kohlenstoffe, die Wasserstoffaufnahmewerte von bis zu **9,8 Gew.-%** erreichten, übertreffen das DOE-Endziel für die gravimetrische Kapazität **auf Materialebene**. Diese Ergebnisse wurden jedoch unter kryogenen Bedingungen (**-196 °C**) erzielt, weit unter dem vom DOE festgelegten Betriebstemperaturbereich von **-40 °C bis 60 °C** für Anwendungen in Leichtfahrzeugen. Ebenso bleiben die Metall-organischen Gerüste (MOFs) des Konsortiums, mit Wasserstoffspeicherkapazitäten von bis zu **1,44 Gew.-%** bei **-196 °C** und **1 bar**, sowohl hinsichtlich der Betriebstemperatur als auch des Drucks deutlich unter den DOE-Zielen.

Eine ausgewogene Bewertung führt zu zwei sich ergänzenden Schlussfolgerungen.

Erstens **auf Materialebene** liefert das Projekt klare Belege dafür, dass abfallbasierte ultraporöse Kohlenstoffe durch Kryoadsorption gravimetrische Wasserstoffspeicherkapazitäten erreichen können, die das DOE-Endziel übertreffen.

Zweitens **auf Anwendungsebene** wurden die DOE-Ziele speziell für Bordwasserstoffspeichersysteme entwickelt, die bei oder nahe Umgebungstemperatur in Leichtfahrzeugen betrieben werden. Im Gegensatz dazu eignen sich die im Rahmen von MAST3RBoost entwickelten und bewerteten Materialien eher für **kryogene oder hybride**

kryokomprimierte Wasserstoffspeichersysteme, insbesondere für den Schwerlastverkehr, den maritimen Verkehr, den Schienenverkehr und stationäre industrielle Speicheranwendungen, bei denen die kryogene Infrastruktur bereits verfügbar ist oder deren Einsatz erwartet wird.

Folglich sollten die derzeit formulierten DOE-Ziele mit Vorsicht interpretiert werden, wenn sie mit auf Kryoadsorption basierenden Speichertechnologien verglichen werden. Obwohl sie einen international anerkannten Maßstab zur Bewertung von Wasserstoffspeichersystemen darstellen, wurden sie für Betriebsbedingungen und Anwendungsszenarien definiert, die sich wesentlich von denen unterscheiden, die im Rahmen von MAST3RBoost betrachtet wurden.

Künftige Vergleiche sollten daher Variablen wie die Betriebstemperatur ausdrücklich berücksichtigen, um sicherzustellen, dass die DOE-Ziele nicht als alleiniger Maßstab für die Bewertung des Potenzials dieser Klasse von Speichermaterialien herangezogen werden.

Dementsprechend sollte die Bewertung neuer Wasserstoffspeichertechnologien nicht nur die auf Materialebene erzielte Speicherleistung berücksichtigen, sondern auch die Betriebsbedingungen, den Technologiereifegrad (TRL) und die vorgesehene Endanwendung. Ein solcher Ansatz ermöglicht eine ausgewogenere Bewertung innovativer Speicherlösungen und erleichtert gleichzeitig ihre Integration in künftige europäische Forschungs-, Innovations- und Industrialisierungsstrategien.

7. Politische Empfehlungen

Jede Empfehlung ist um vier Elemente strukturiert: **Hintergrund, von MAST3RBoost generierte Belege, erwartete politische Wirkung und Zielakteure**, um ihre Bewertung und Integration in laufende europäische Gesetzgebungs- und Programmierungsprozesse zu erleichtern.

R1. Kryoadsorption als eigenständigen Wasserstoffspeicherpfad anerkennen

Hintergrund: Die laufende Weiterentwicklung des europäischen Wasserstoffpolitikrahmens, angetrieben durch die Europäische Wasserstoffstrategie, REPowerEU und die kommende Gesetzgebung zu Wasserstoffmärkten und -infrastruktur, bietet die Gelegenheit, die Anerkennung neuer Wasserstoffspeichertechnologien auszuweiten, die konventionelle komprimierte und verflüssigte Wasserstofflösungen ergänzen.

In diesem Zusammenhang besteht die Notwendigkeit, Bewertungskriterien zu entwickeln, die speziell an die Merkmale und Betriebsbedingungen dieser neuen Technologien angepasst sind.

Belege von MAST3RBoost: Die während MAST3RBoost erzielten Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten ultraporösen Materialien Wasserstoffspeicherkapazitäten von bis zu 9,8 Gew.-% unter kryogenen Bedingungen (100 bar und -196 °C) erreichen.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen das Potenzial kryoadsorptionsbasierter Speichertechnologien für spezifische Anwendungen und zeigen zugleich, dass ihre Bewertung ihre besonderen Betriebsbedingungen und unterschiedlichen technologischen Reifegrade im Vergleich zu anderen Wasserstoffspeicherlösungen berücksichtigen sollte.

Erwartete politische Wirkung: Die Anerkennung der Kryoadsorption als eigenständigen Wasserstoffspeicherpfad würde die Entwicklung geeigneterer Bewertungskriterien ermöglichen, dedizierte Technologie-Roadmaps unterstützen und zur Diversifizierung des europäischen

Wasserstoffspeicher-Ökosystems beitragen, indem Innovation gefördert und die mit neuen Technologien verbundenen Risiken verringert werden.

R2 Unterstützung für Pilotmaßstab- und industrielle Demonstrationstätigkeiten stärken

Hintergrund: Die Überbrückung der Kluft zwischen Laborforschung und industriellem Einsatz bleibt eine der größten Herausforderungen für neue Wasserstoffspeichertechnologien.

Mehrere europäische Initiativen haben das sogenannte "Tal des Todes" zwischen Forschung und Markteinführung als ein großes Innovationshindernis identifiziert, insbesondere für Technologien, die spezialisierte Infrastrukturen, komplexe Validierungsverfahren und erhebliche Kapitalinvestitionen erfordern.

Belege von MAST3RBoost: Das Projekt demonstrierte erfolgreich die Hochskalierung ultraporöser Materialien von der Laborproduktion zur Fertigung im Pilotmaßstab, einschließlich sowohl Aktivkohlen als auch Metall-organischer Gerüste (MOFs).

Darüber hinaus zeigte die während der Demonstratorentwicklung und Systemintegration gewonnene Erfahrung, dass die Validierung komplexer Technologien zusätzliche Zeit, spezialisierte Infrastrukturen und strenge Sicherheitsverfahren erfordert, die die Dauer herkömmlicher Forschungs- und Innovationsmaßnahmen überschreiten können.

Diese Erkenntnisse verdeutlichen eindeutig, wie wichtig es ist, die Phasen der Technologiedemonstration und -validierung zu stärken, um den wirksamen Transfer von Forschungsergebnissen in industrielle Anwendungen zu erleichtern.

Erwartete politische Wirkung: Eine verstärkte Unterstützung für Demonstrations- und Validierungstätigkeiten würde technologische Risiken verringern, den Wissenstransfer von der Forschung zur Industrie beschleunigen und die schnellere Markteinführung innovativer Wasserstoffspeichertechnologien in ganz Europa erleichtern.

R3. Europäische Testinfrastrukturen für fortschrittliche Wasserstoffspeichertechnologien stärken

Hintergrund: Der Zugang zu spezialisierten Testinfrastrukturen ist unerlässlich, um die Entwicklung und Validierung fortschrittlicher Wasserstoffspeichertechnologien zu beschleunigen.

Europas derzeitige Kapazität, Tests unter kombinierten kryogenen Bedingungen, hohen Drücken und integrierter Systembewertung durchzuführen, bleibt jedoch begrenzt, was ein erhebliches Hindernis für die Qualifizierung und Zertifizierung neuer Wasserstoffspeicherlösungen darstellt.

Belege von MAST3RBoost: Das Projekt zeigte eindeutig, dass die begrenzte Verfügbarkeit von Testeinrichtungen, die unter kombinierten Hochdruck- und kryogenen Bedingungen betrieben werden können, mehrere Validierungs- und Charakterisierungstätigkeiten einschränkte.

Ebenso verdeutlichte die Integration und Inbetriebnahme des Demonstrators die Komplexität der Validierung neuer Technologien, die hochspezialisierte Infrastrukturen und dedizierte Sicherheitsverfahren erfordern.

Erwartete politische Wirkung: Die Stärkung der europäischen Wasserstoff-Testinfrastrukturen würde die Qualifizierung und Zertifizierung neuer Wasserstoffspeichertechnologien

beschleunigen, die Validierungszeiten verkürzen, die Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Industrie fördern und Europas technologische Souveränität in einem für die Energiewende strategischen Sektor stärken.

Solche Infrastrukturen würden zudem die Generierung harmonisierter experimenteller Daten erleichtern, künftige Normungstätigkeiten unterstützen und die Entwicklung gemeinsamer Methoden zur Bewertung neuer Wasserstoffspeichertechnologien fördern.

R4. Den Einsatz künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens zur Beschleunigung der Entwicklung fortschrittlicher Materialien fördern

Hintergrund: Die Europäische Digitalstrategie, die Europäische Datenstrategie und das Gesetz über künstliche Intelligenz erkennen das transformative Potenzial künstlicher Intelligenz zur Beschleunigung von Forschung, Innovation und industrieller Wettbewerbsfähigkeit an. Im Bereich fortschrittlicher Materialien sind der Zugang zu hochwertigen Daten und die Entwicklung von Vorhersagemodellen wichtige Wegbereiter zur Verkürzung der Zeit und Kosten für die Entdeckung und Optimierung neuer Materialien.

Belege von MAST3RBoost: Während des Projekts wurde eine umfassende Datenbank charakterisierter ultraporöser Materialien entwickelt, und es wurden Techniken des maschinellen Lernens (ML) und des aktiven Lernens angewandt, um die Auswahl und Optimierung von Wasserstoffspeichermaterialien zu unterstützen.

Die gewonnene Erfahrung zeigte das erhebliche Potenzial dieser Werkzeuge zur Beschleunigung der Forschung und verdeutlichte zugleich die Notwendigkeit größerer, vielfältigerer und interoperabler Datensätze zur Verbesserung der Vorhersageleistung und Verallgemeinerbarkeit der entwickelten Modelle.

Erwartete politische Wirkung: Die Stärkung europäischer Dateninfrastrukturen und die Förderung der Anwendung von Techniken des maschinellen Lernens werden die Entdeckung fortschrittlicher Materialien beschleunigen, experimentelle Arbeitsabläufe optimieren und sowohl die Entwicklungszeit als auch die Kosten für Wasserstoffspeichertechnologien senken.

Darüber hinaus werden diese Maßnahmen die Wiederverwendung von durch europäische Forschungsprojekte generiertem Wissen erleichtern und Europas wissenschaftliche und industrielle Wettbewerbsfähigkeit stärken.

R5. Normungstätigkeiten von den frühesten Phasen der Technologieentwicklung an integrieren

Hintergrund: Neue Wasserstoffspeichertechnologien entwickeln sich schneller als die derzeitigen Normungs- und Zertifizierungsprozesse. Insbesondere erfordern Lösungen auf Basis fortschrittlicher Materialien und additiver Fertigung, dass sich bestehende Regulierungsrahmen parallel weiterentwickeln, um künftige Qualifizierung, Zertifizierung und Markteinführung zu erleichtern.

Belege von MAST3RBoost: Während des Projekts wurde ein leichter Wasserstoffspeichertank mittels Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)-Technologie entworfen und hergestellt, ergänzt durch speziell für kryogene Anwendungen entwickelte interne Beschichtungen.

Ein umfassendes Programm struktureller, zerstörungsfreier und Drucktests generierte wertvolle technische Belege zum Verhalten und zur Leistung dieser innovativen Komponenten.

Die während des gesamten Projekts gewonnene Erfahrung zeigte eindeutig, wie wichtig es ist, die verfügbaren experimentellen Belege zu erweitern und die Technologievalidierungs- und Qualifizierungstätigkeiten zu stärken, um die künftige Integration dieser Lösungen in europäische Normungsprozesse zu erleichtern.

Erwartete politische Wirkung: Die frühzeitige Integration von Normungstätigkeiten wird die für die Qualifizierung und Zertifizierung neuer Wasserstoffspeichertechnologien erforderliche Zeit verkürzen, ihre Markteinführung erleichtern und die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie bei der Entwicklung fortschrittlicher Wasserstoffspeicherlösungen stärken.

R6. Den Einsatz zirkulärer Rohstoffe für fortschrittliche Wasserstoffspeichermaterialien fördern

Hintergrund: Die Europäische Union fördert ein nachhaltigeres und widerstandsfähigeres Industriemodell durch Initiativen wie den Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft, das Gesetz über kritische Rohstoffe und das Netto-Null-Industrie-Gesetz.

Diese Initiativen zielen darauf ab, die Abhängigkeit von Primär- und importierten Rohstoffen zu verringern, Europas strategische Autonomie zu stärken und die Nutzung von Sekundärrohstoffen in wichtigen Industriesektoren zu fördern.

Belege von MAST3RBoost: Die im Rahmen von MAST3RBoost erzielten Ergebnisse zeigen die Machbarkeit der Herstellung fortschrittlicher Wasserstoffspeichermaterialien aus einer breiten Palette von Abfallströmen, einschließlich landwirtschaftlicher Rückstände (wie Pistazienschalen und Eukalyptussägemehl), Agrar-Lebensmittelabfällen, Aluminiumverpackungen, PET-Flaschen und sauren Grubenwässern.

Diese Materialien erzielten eine wettbewerbsfähige Wasserstoffspeicherleistung und zeigten, dass die Abfallverwertung gleichzeitig zur Kreislaufwirtschaft und zur Entwicklung fortschrittlicher Energietechnologien beitragen kann.

Erwartete politische Wirkung: Die Förderung der Nutzung zirkulärer Ausgangsstoffe wird Europas Abhängigkeit von Primär- und importierten Rohstoffen verringern, die strategische Autonomie bei fortschrittlichen Materialien stärken, den mit der Materialproduktion verbundenen ökologischen Fußabdruck verringern und den Übergang zu einer zirkulären, wettbewerbsfähigeren und klimaneutralen Wirtschaft beschleunigen.

R7. Europäische offene Datenräume für fortschrittliche Materialien fördern

Hintergrund: Die Verfügbarkeit offener, interoperabler und wiederverwendbarer Daten ist einer der Eckpfeiler der europäischen Forschungs- und Innovationspolitik.

Ein Großteil der von öffentlich finanzierten Forschungsprojekten generierten Informationen bleibt jedoch auf einzelne Konsortien fragmentiert, was die Wiederverwendung von Wissen einschränkt und das Potenzial digitaler Werkzeuge wie des maschinellen Lernens zur Beschleunigung der Entwicklung neuer Materialien verringert.

Belege von MAST3RBoost: Während des Projekts wurden wertvolle Datensätze zu ultraporösen Wasserstoffspeichermaterialien und zum Verhalten von mittels fortschrittlicher additiver Fertigungstechnologien (WAAM) hergestellten Komponenten generiert.

Diese Datensätze ermöglichten die Entwicklung von Modellen des maschinellen Lernens zur Unterstützung der Materialauswahl und -optimierung und zeigten die Bedeutung eines strukturierten Datenmanagements zur Beschleunigung der Forschung und Verbesserung der Vorhersagefähigkeiten.

Erwartete politische Wirkung: Die Schaffung interoperabler europäischer Datenräume würde die Wiederverwendung von durch öffentlich finanzierte Forschung generiertem Wissen erleichtern, die Entwicklung fortschrittlicher Materialien mithilfe von Techniken des maschinellen Lernens beschleunigen, Doppelarbeit bei experimentellen Anstrengungen verringern und Europas wissenschaftliche und industrielle Führungsrolle bei fortschrittlichen Materialien und Wasserstofftechnologien stärken.

8. Sozioökonomische Auswirkungen

Über seine wissenschaftlichen und technologischen Errungenschaften hinaus bringt MAST3RBoost erhebliche wirtschaftliche, industrielle, ökologische und gesellschaftliche Vorteile. Die Integration fortschrittlicher Materialien, der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft, innovativer Fertigungsprozesse und digitaler Technologien veranschaulicht die Art von Innovation, die erforderlich ist, um Europas Wettbewerbsfähigkeit zu stärken und gleichzeitig den Übergang zu einem nachhaltigeren und widerstandsfähigeren Energiesystem zu beschleunigen.

- **Abfallverwertung:** MAST3RBoost hat die Machbarkeit der Umwandlung landwirtschaftlicher, agrar-lebensmittelbezogener, industrieller und bergbaulicher Abfälle in hochwertige Ausgangsstoffe für die Herstellung fortschrittlicher Wasserstoffspeichermaterialien nachgewiesen. Dieser Ansatz trägt zur Abfallreduzierung bei, erhöht den wirtschaftlichen Wert bislang wenig genutzter Abfallströme und fördert zirkulärere und ressourceneffizientere industrielle Produktionsmodelle.
- **Verringerte Abhängigkeit von Primärrohstoffen:** Die Nutzung von Sekundärrohstoffen als Vorläufer für funktionale Materialien verringert die Abhängigkeit von Primär- und importierten Rohstoffen, stärkt die Widerstandsfähigkeit europäischer Lieferketten und verringert die Anfälligkeit der Industrie gegenüber Schwankungen auf den globalen Rohstoffmärkten.
- **Gesteigerte industrielle Wettbewerbsfähigkeit:** Das Projekt demonstrierte erfolgreich die Hochskalierung verschiedener ultraporöser Materialien vom Labor- zum Pilotmaßstab und generierte Wissen und industrielle Fähigkeiten, die die Entwicklung neuer europäischer Wertschöpfungsketten bei Wasserstoffspeichertechnologien unterstützen können. Diese Fortschritte erleichtern den Technologietransfer, verringern die mit der Einführung innovativer Lösungen verbundenen Risiken und stärken die Wettbewerbsposition der europäischen Industrie.
- **Unterstützung der strategischen Autonomie Europas:** Die Entwicklung von Wasserstoffspeichertechnologien auf Basis europäischer Ressourcen, Fachwissen und industrieller Fähigkeiten trägt zur Stärkung der strategischen Autonomie der EU in einem für die

Energiewende wesentlichen Sektor bei. Die Verfügbarkeit einheimischer technologischer Lösungen verringert die Abhängigkeit von externen Lieferanten und fördert widerstandsfähigere und diversifizierte Lieferketten.

- **Beitrag zu regionalen Innovationsökosystemen:** Die Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und Technologiezentren hat die Innovationskapazität in mehreren europäischen Regionen gestärkt, die Generierung spezialisierten Wissens gefördert und die Schaffung hochqualifizierter Arbeitsplätze in den Bereichen fortschrittliche Materialien, additive Fertigung, digitale Technologien und Abfallverwertung unterstützt.
- **Beitrag zur Energiewende:** Die im Rahmen von MAST3RBoost entwickelten Technologien erweitern das Portfolio verfügbarer Wasserstoffspeicherlösungen zur Unterstützung der Einführung flexiblerer und nachhaltigerer Energiesysteme. Obwohl eine weitere Validierung und Technologiereife noch erforderlich sind, hat das Projekt eine solide Grundlage für künftige industrielle Anwendungen und die Entwicklung europäischer Politiken zur Unterstützung sauberer Wasserstofftechnologien geschaffen.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Investitionen in Forschung und Innovation bei fortschrittlichen Wasserstoffspeichermaterialien Vorteile generieren, die weit über wissenschaftliche Exzellenz hinausgehen und zum Wirtschaftswachstum, zur industriellen Wettbewerbsfähigkeit, zur ökologischen Nachhaltigkeit und zur strategischen Autonomie Europas beitragen.

Diese Auswirkungen unterstreichen die Bedeutung einer fortgesetzten Unterstützung kollaborativer Forschungsinitiativen, die die Kluft zwischen wissenschaftlicher Entdeckung und industrieller Umsetzung überbrücken können.

9. Gewonnene Erkenntnisse

- **Hochskalierung:** Der Übergang von der Produktion im Labormaßstab zur Fertigung im Pilotmaßstab führte zu unvorhergesehenen Schwankungen in der Materialporosität und -leistung. Die Antizipation iterativer Optimierungszyklen für Verdichtungs- und Granulationsprozesse ist daher unerlässlich, um die Beeinträchtigung von Projektzeitplänen und der industriellen Skalierbarkeit zu vermeiden.
- **Künstliche Intelligenz:** Die Wirksamkeit von Modellen des maschinellen Lernens hängt direkt vom Umfang, der Qualität und der Vielfalt der verfügbaren Charakterisierungsdaten ab. Obwohl sich der während MAST3RBoost generierte Datensatz für die Entwicklung von Vorhersagemodellen als wertvoll erwies, reichen Datensätze mit rund 50 charakterisierten Materialien nicht aus, um das Potenzial künstlicher Intelligenz für die beschleunigte Materialentdeckung voll auszuschöpfen.
- **Testinfrastruktur:** Die begrenzte Verfügbarkeit europäischer Einrichtungen, die Hochdruck-Wasserstofftests mit kryogenen Betriebsbedingungen kombinieren können, erforderte erhebliche Anpassungen der experimentellen Pläne des Projekts. Diese Erfahrung verdeutlicht eine strukturelle Lücke, die weit über MAST3RBoost hinausgeht und das breitere europäische Wasserstoffforschungsökosystem betrifft.

- **Interne Beschichtungen:** Eine Designänderung des Wasserstoffspeichertanks von einer zweiteiligen Konfiguration zu einer monolithischen Struktur erforderte eine vollständige Neugestaltung der Strategie für die interne Beschichtung. Anstatt einen Rückschlag darzustellen, führte diese Herausforderung zur Entwicklung eines fortschrittlicheren "Out-of-the-Bath"-Beschichtungsprozesses mit starkem Potenzial für den Technologietransfer in andere Industriesektoren.
- **Industrielle Validierung:** Anfängliche Leckageprobleme und WIG-Schweißfehler, die während der Validierungsphase des Demonstrators festgestellt wurden, wurden erfolgreich durch die Neugestaltung von Dichtungsverbindungen und ausgewählten Abschnitten des Wärmetauschers behoben. Diese Erfahrung unterstreicht, wie wichtig es ist, ausreichend Zeit für Neugestaltungs- und Optimierungszyklen bei der Validierung additiv gefertigter Komponenten einzuplanen.

10. Schlussfolgerungen und Kernaussagen

1. MAST3RBoost zeigt das Potenzial fortschrittlicher, aus Abfallströmen gewonnener Materialien für Wasserstoffspeicheranwendungen und liefert klare Belege dafür, dass die Kreislaufwirtschaft die Entwicklung hochwertiger Energielösungen unterstützen und gleichzeitig die Abhängigkeit von Primärrohstoffen verringern kann.
2. Die entwickelten Materialien erreichten gravimetrische Wasserstoffspeicherkapazitäten, die die Referenzwerte des US-Energieministeriums (DOE) bei der Bewertung unter kryogenen Bedingungen übertrafen. Ihre am besten geeigneten Anwendungen werden daher im Schwerlastverkehr, im maritimen Verkehr, in Schienenverkehrssystemen und in der stationären industriellen Speicherung erwartet, statt in Leichtfahrzeugen bei Umgebungstemperatur.
3. Die Entwicklung des leichten Wasserstoffspeicher-Demonstrators mittels **Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)**-Technologie, zusammen mit den während des Projekts durchgeführten strukturellen und Drucktests, hat wertvolles technisches Wissen zur Unterstützung künftiger Qualifizierungs-, Validierungs- und Normungstätigkeiten für fortschrittliche Wasserstoffspeichertechnologien generiert.
4. Die während MAST3RBoost gewonnene Erfahrung hat mehrere vorrangige Bereiche identifiziert, die weitere Maßnahmen erfordern, einschließlich der Stärkung europäischer Testinfrastrukturen, der Entwicklung europäischer Datenräume für Anwendungen des maschinellen Lernens und der Integration von Normungstätigkeiten von den frühen Phasen der Technologieentwicklung an. Diese Prioritäten könnten wirksam durch bestehende europäische Instrumente wie **Horizon Europe**, die **Clean Hydrogen Partnership** und die europäischen Normungsorganisationen (**CEN** und **CENELEC**) angegangen werden.
5. Der nächste Schritt zur Beschleunigung des Einsatzes dieser Technologien besteht darin, Demonstration, Technologiewalidierung, Normung und industriellen Einsatz durch dedizierte Fördermechanismen, unterstützende Regulierungsrahmen und fortgesetzte Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen, Industrie und Behörden zu stärken.

*Insgesamt, **MAST3RBoost** liefert der Europäischen Kommission eine solide wissenschaftliche und technische Beweisgrundlage, die einen alternativen und ergänzenden Wasserstoffspeicherpfad*

neben den derzeit im europäischen Regulierungs- und Politikrahmen anerkannten Lösungen unterstützt.

Die während des Projekts gewonnene Erfahrung zeigt, dass diese Technologien ein erhebliches Potenzial haben, zu Europas Zielen der Energiewende und industriellen Wettbewerbsfähigkeit beizutragen. Ihr großflächiger Einsatz wird jedoch weiterhin Investitionen in Demonstrationstätigkeiten, Technologiewalidierung, Normung und die Entwicklung spezialisierter Infrastrukturen erfordern, die ihren Übergang zu kommerziellen und industriellen Anwendungen unterstützen können.

Die in diesem Dokument vorgestellten politischen Empfehlungen bieten einen praktischen Fahrplan zur Unterstützung dieses Prozesses und stärken die Rolle der europäischen Forschung und Innovation bei der Entwicklung sichererer, nachhaltigerer und wettbewerbsfähigerer Wasserstoffspeichertechnologien.