

ENTWICKLUNGSSTRATEGIE FÜR DAS HYDROGEN CENTER

IN DER GRENZÜBERSCHREITENDEN REGION INTERREG SLOWENIEN UND ÖSTERREICH

VOM INNOVATIONSUMFELD ZUM INNOVATIONS-ÖKOSystem

Juli 2022

Auftraggeber:

Industrie- und Handelskammer Štajerska

Auftragnehmer: Institut CENTER ARI

Doz. Dr. Gregor Dolanc, Dr. Vladimir Jovan

In Zusammenarbeit mit:

Industrie- und Handelskammer Štajerska: Dr. Dragica Marinič

Projekt H₂GreenTECH

Website: <https://www.h2greentech.eu/>

Projekttitel: Stärkung der grenzüberschreitenden F&I-Kapazitäten im Bereich bahnbrechender Wasserstofftechnologien durch die Entwicklung von Synergien zwischen Unternehmen, F&E-Zentren und Hochschulen.

Projektpartner

Institut für Chemie, Slowenien

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Sport, Slowenien

Industrie- und Handelskammer Štajerska, Slowenien

TU Graz, Österreich

FH Kärnten, Österreich

Forschung Burgenland, Österreich

HYDROGEN CENTER

Website: <https://b2b.h2greentech.eu/>

Kontakt: hydrogencenter@stajerskagz.si

Besonderer Dank gilt Dr. Peter Raimann von der Österreichischen Energieagentur für seine Mitarbeit bei der Aufbereitung der Daten für Österreich.

ABKÜRZUNGEN

AT	Österreich
B2B	Business to Business
CO NOT	Exzellenzzentrum für kohlenstoffarme Technologien
FCH JU	Das gemeinsame Unternehmen „Brennstoffzellen und Wasserstoff“
kWh	Kilowattstunde
MWh	Megawattstunde
GWh	Gigawattstunde
TWh	Terawattstunde
H ₂	Wasserstoff
IJS	Institut Jožef Stefan, Slowenien
KI	Institut für Chemie, Slowenien
MORS	Verteidigungsministerium der Republik Slowenien
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
NEPN	Nationaler Energie- und Klimaplan
OVE	Erneuerbare Energiequellen
RCVT	Entwicklungszentrum für Wasserstofftechnologie, Slowenien
F&E	Forschung und Entwicklung
SI	Slowenien
SGZ	Industrie- und Handelskammer Štajerska
TU Graz	Technische Universität Graz
UL FS	Universität Ljubljana, Fakultät für Maschinenbau
UM FKKT	Universität Maribor, Fakultät für Chemie und chemische Technologie
UNG	Universität Nova Gorica

Inhalt

1	EINFÜHRUNG	5
2	REGIONALES WASSERSTOFFZENTRUM UND ENTWICKLUNGSSTRATEGIE 2025	6
2.1	REGIONALER RAHMEN FÜR WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN	6
2.2	VOLUMENVERGRÖßERUNG UND INNOVATIONSANSATZ	7
3	DIE ROLLE VON WASSERSTOFF	8
4	ÜBERBLICK ÜBER FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGSAKTIVITÄTEN UND DEMONSTRATIONSPROJEKTE 13	
5	BILDUNGSAKTIVITÄTEN IM ZUSAMMENHANG MIT WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN	27
6	VERWENDUNGSMÖGLICHKEITEN VON GRÜNEM WASSERSTOFF	29
7	MÖGLICHKEITEN ZUR ERZEUGUNG VON GRÜNEM WASSERSTOFF	32
8	PRODUKTIONSKOSTEN VON GRÜNEM WASSERSTOFF	35
9	WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN FÜR DEN AUSGLEICH DES STROMSYSTEMS.....	37
10	UMWELTVORTEILE VON GRÜNEM WASSERSTOFF.....	40
11	OPTIONEN ZUR VERRINGERUNG DER ABHÄNGIGKEIT VON DER EINFUHR FOSSILER BRENNSTOFFE	44
12	GESETZGEBUNG.....	47
13	KOOPERATION ZWISCHEN SEKTOREN	49
14	WERTSCHÖPFUNGSKETTE FÜR DIE PRODUKTION VON AUSRÜSTUNG UND DIENSTLEISTUNGEN	52
15	OPTIONEN FÜR EIN UPGRADE DES PROJEKTS H2GREENTECH	53
16	QUELLENANGABEN	55

1 Einführung

Um die Zusammenarbeit und Vernetzung zu vertiefen und die kritische Masse an Kapazitäten im Bereich Wasserstoff und Wasserstofftechnologien zu stärken, wurde im Rahmen des Projekts H2GreenTECH Interreg SI-AT ein nachhaltiges regionales Forschungs- und Industrietzwerk in Form des HYDROGEN CENTERS gegründet. An dem Projekt H2GreenTECH sind Partner aus Slowenien und Österreich (Kärnten, Steiermark und Burgenland) beteiligt. Ziel ist die Stärkung der regionalen Zusammenarbeit sowie der Forschung und Innovation im Bereich Wasserstofftechnologien durch die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Forschungs- und Entwicklungszentren (F&E) und Hochschuleinrichtungen.

Hydrogen Center als One-Stop-Shop und B2B-Plattform: Verbesserung des Zugangs zu und der Nutzung von Wasserstoff-Forschungsinfrastruktur in Slowenien und Österreich in Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, Forschenden, Studierenden und Dozenten.

Angesichts des weltweit steigenden Energieverbrauchs ist es notwendig, neue Alternativen zu fossilen Brennstoffen zu entwickeln und zu nutzen. Der erwartete Anstieg der Treibhausgasemissionen und die starke Abhängigkeit von fossilen Energiequellen sind gute Gründe, auf neue Alternativen umzusteigen und die Industrie zu Investitionen in andere Technologien zu bewegen. In diesem Zusammenhang erfährt der Wasserstoff in Europa und weltweit neue Aufmerksamkeit. Wasserstoff kann als Rohstoff, Kraftstoff oder als Energieträger und -speicher verwendet werden und hat viele potenzielle Anwendungsbereiche in Industrie, Verkehr, Energie und Bauwesen [4], [5]. Die wichtigste Eigenschaft von Wasserstoff ist, dass er kein CO₂ freisetzt und daher die Atmosphäre nicht verschmutzt. Wasserstoff ist eine der Lösungen für die Dekarbonisierung von Industrieprozessen und anderen Wirtschaftssektoren.

2 Regionales Wasserstoffzentrum und Entwicklungsstrategie 2025

Die Entwicklungsstrategie des Wasserstoffzentrums bis 2025 und darüber hinaus ist entscheidend für den Erfolg der Mitglieder des regionalen Netzwerks des Hydrogen Centers als nachhaltiges Ergebnis des H2GreenTECH-Projekts im grenzüberschreitenden Gebiet Interreg Slowenien-Österreich. Die Entwicklungsstrategie zielt darauf ab, die regionalen Innovationskapazitäten zu stärken, die Vernetzung und Zusammenarbeit in Forschung und Entwicklung zu fördern und grüne und saubere Technologien in die Wirtschaft zu bringen. Auf diese Weise werden wir zur Steigerung der grenzüberschreitenden Wettbewerbsfähigkeit und zur Entwicklung innovativer und dynamischer Unternehmen im Bereich des grünen Wasserstoffs und der Wasserstofftechnologien beitragen.

Wasserstoff- (H₂) und Brennstoffzellentechnologien sind Schlüsseltechnologien für eine wettbewerbsfähige kohlenstoffarme Gesellschaft und gleichzeitig für eine kohlenstoffarme Region. Diese Technologien sind eine unmittelbare Antwort auf die gesellschaftlichen Herausforderungen, die in der EU-Strategie 2020, dem Green Deal der EU und der EU-Wasserstoffstrategie genannt werden.

Die bisher vorliegenden Daten zeigen, dass das größte Innovationspotenzial in den KMUs liegt, während die Produktion der entwickelten Lösungen in großen Unternehmen stattfindet. Die gemeinsame Aufgabe der Mitglieder des Hydrogen Centers besteht daher darin, Innovationen in kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) zu fördern, die im grenzüberschreitenden Raum vorherrschen.

Dies sind neue Herausforderungen für das regionale Hydrogen Center und seine Mitglieder, die gemeinsam über ihre Entwicklungsausrichtung, Umsetzung, Überwachung und Bewertung der Innovationspolitik und Innovationen in der Region im Bereich grüner Wasserstoff und Wasserstofftechnologien nachdenken müssen.

Die Entwicklungsstrategie für das Hydrogen Center berücksichtigt unter anderem die Ausgangspunkte des Plans für Wasserstofftechnologien in Slowenien und Österreich [1] sowie des slowenischen Nationalen Energie- und Klimaplan [2] und des österreichischen Nationalen Energie- und Klimaplan [3]. Für Österreich haben wir auch die neue Wasserstoffstrategie, die im Juni 2022 verabschiedet wurde, berücksichtigt (Slowenien hat noch keine eigene Strategie), sowie weitere Dokumente, die für F&E, Produktion und Nutzung von grünem Wasserstoff und Wasserstofftechnologien relevant sind.

2.1 Regionaler Rahmen für Wasserstofftechnologien

Die grenzüberschreitende Region verfügt über eine starke Forschungs- und Entwicklungstätigkeit und eine starke Wirtschaft, aber die Entwicklung von Wasserstoff und Wasserstofftechnologien befindet sich mehr oder weniger in einem frühen Stadium.

Der Plan für Wasserstofftechnologien in Slowenien und Österreich im Rahmen des Projekts H2GreenTECH präsentiert die Ansichten eines breiten Spektrums von Interessengruppen aus Regierung und Industrie sowie von Nichtregierungsorganisationen und akademischen Einrichtungen

zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit bei der Entwicklung von Wasserstofftechnologien bis 2025 und darüber hinaus.

Die Mitglieder des Hydrogen Centers sind sich bewusst, dass Forschung und Entwicklung sowie der Transfer von Wasserstoff und Wasserstofftechnologien in den Wirtschaftssektor in der grenzüberschreitenden Region von zentraler Bedeutung sind, insbesondere im Hinblick auf Innovationen und erhöhte Wettbewerbsfähigkeit sowie als Beitrag zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft.

2.2 Volumenvergrößerung und Innovationsansatz

Die grenzüberschreitende Region hat das Potenzial, mit innovativen Leistungen bei der Entwicklung von grünem Wasserstoff und Wasserstofftechnologien eine führende Position einzunehmen. Ziel des grenzüberschreitenden Netzwerks des Hydrogen Centers als One-Stop-Shop und B2B-Plattform ist daher, die Projektzusammenarbeit und die Suche nach gemeinsamen innovativen Lösungen intensiv zu vernetzen und zu fördern.

Die Arbeit des Centers wird sich auf technologische Innovationen im Kontext der regionalen Innovationspolitik und auf die Möglichkeiten der gesellschaftlichen Innovation konzentrieren. Ausgehend von seiner Mitgliedschaft wird das Hydrogen Center nach einem viergliedrigen Helix-Modell arbeiten.

3 Die Rolle von Wasserstoff

Wasserstoff ist ein vielversprechender Energieträger, aber die Art und Weise, wie die Produktion heute erfolgt (meist durch Dampfreformierung von Erdgas), steht nicht mit den langfristigen Klima- und Energiezielen im Einklang. Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser mithilfe von erneuerbaren Energiequellen (Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft) erzeugt wird, hat den zusätzlichen Vorteil, dass er ohne CO₂-Emissionen produziert wird, weshalb er auch als „grüner Wasserstoff“ bezeichnet wird [6]. Er kann daher einen wichtigen Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emissionen und der lokalen Umweltverschmutzung leisten und dazu beitragen, die Energieunabhängigkeit zu gewährleisten und die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, wie in Abbildung 1 dargestellt.

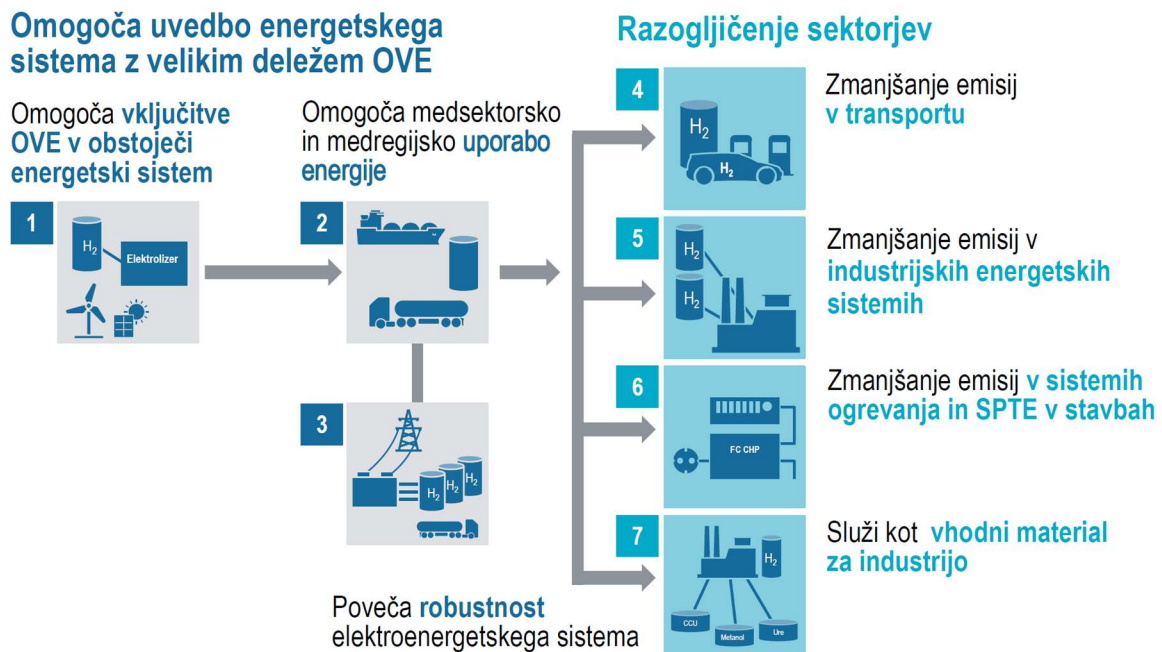


Abbildung 1: Potenzial der Implementierung von Wasserstofftechnologien [4]

In den letzten Jahren haben eine Reihe von EU-Ländern und einige andere Länder (China, USA, Vereinigtes Königreich usw.) ihre eigenen Wasserstoffstrategien verabschiedet und bereits Maßnahmen ergriffen, die die Rolle des Wasserstoffs bei verschiedenen Anwendungen stärken. All diese Faktoren werden die weltweite Nachfrage nach Wasserstoff von rund 80 Millionen Tonnen pro Jahr im Jahr 2020 auf mehr als 183 Millionen Tonnen pro Jahr im Jahr 2050 ansteigen lassen. Die Prognose des Wasserstoffverbrauchs ist in Abbildung 2 dargestellt.

Heute beläuft sich die jährliche Gesamtwasserstoffproduktion in der EU auf rund 8 Millionen Tonnen H₂, wobei die EU-Industrie inzwischen einen Anteil von über 90 % am Wasserstoffmarkt hält. Die wichtigsten industriellen Verbraucher sind:

- 63 % chemische Industrie,
- 30 % Raffinerie,
- 6 % Metallverarbeitung,
- 1 % andere.

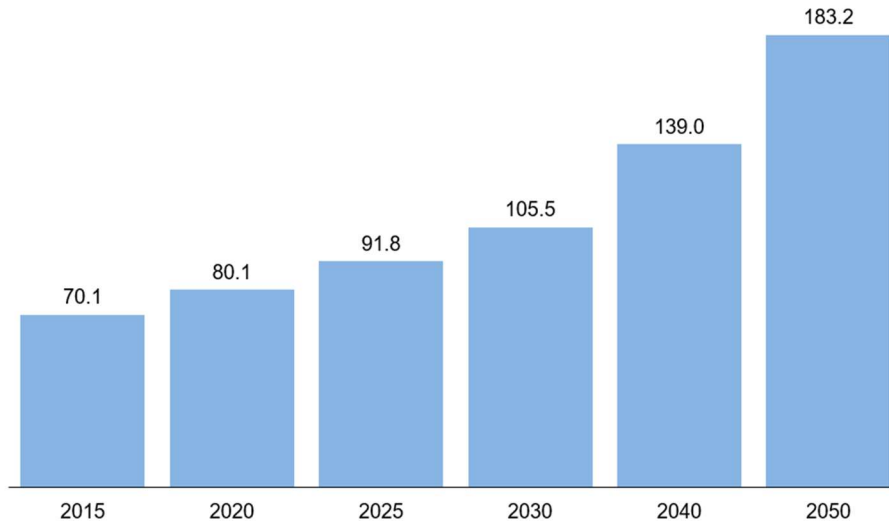


Abbildung 2: Prognose der weltweiten Wasserstoffnachfrage in Millionen Tonnen pro Jahr [7]

Die Einführung von Wasserstoff als Energieträger ist jedoch nicht nur eine technologische Herausforderung, sondern erfordert auch die Koordinierung und Konvergenz der Ziele einer Reihe politischer und sozioökonomischer Faktoren. Politischer Wille, günstigere Rechtsvorschriften und eine angemessene finanzielle Unterstützung sind die Instrumente, die zur Förderung der Nutzung von grünem Wasserstoff erforderlich sind. Grüner Wasserstoff hat zwar viele Vorteile, gleichzeitig sind aber auch politische Initiativen erforderlich, um die Produktionskosten zu senken und Markthindernisse zu beseitigen.

Es sind systematische Initiativen erforderlich, insbesondere solche, die:

- die lokalen Emissionen reduzieren;
- die globalen Treibhausgasemissionen reduzieren;
- die Energiesicherheit durch die Nutzung lokaler und alternativer Energiequellen erhöhen;
- neue technologische Bereiche entwickeln und damit neue Arbeitsplätze schaffen.

Neben den politischen Entscheidungen wird die Fähigkeit der Industrie, die Kosten für die Herstellung und den Einsatz der Bausteine von Wasserstofftechnologien weiter zu senken, für die Zukunft der

Wasserstoffwirtschaft von entscheidender Bedeutung sein, da dies eine Voraussetzung für die Massenproduktion der erforderlichen Ausrüstung ist.

Schließlich wird eine kurze SWOT-Analyse der Wasserstofftechnologien präsentiert:

STÄRKEN (STRENGTH – S)

- Praktisch unerschöpfliche Vorräte an (gebundenem) Wasserstoff in der Natur (siehe nachstehende Schwächen)
- Hohes Entwicklungspotenzial für neue Technologien
- Große Auswirkungen auf die Erhaltung der Umwelt, insbesondere die Dekarbonisierung
- Verringerung der Abhängigkeit von konventionellen Energielieferanten
- Wasserstoff ist ein geeigneter Treibstoff für alle Arten von Fahrzeugen
- Wasserstoffspeicheroptionen für verschiedene Zwecke
- Die Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen macht deren Nutzung flexibler
- Flexibilität bei der Art der Verteilung und Speicherung von Wasserstoff
- Beibehaltung der bestehenden Tank- und Konsumgewohnheiten

SCHWÄCHEN (WEAKNESSES – W)

- Zur Erzeugung von elementarem Wasserstoff ist Energieaufwand erforderlich
- Relativ hohe Investitionskosten
- Unzureichende Reife der Schlüsseltechnologien
- Mangelhafte oder unvollständige Infrastruktur für Speicherung, Transport und Verteilung von Wasserstoff
- Geringe Effizienz der Wasserstoffversorgungskette
- Vorherige Investitionen in die Infrastruktur sind erforderlich
- Mangel an erfahrenen Arbeitskräften

CHANCEN (OPPORTUNITIES – O)

- Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen
- Möglichkeit, staatliche Subventionen zu erhalten
- Soziale Akzeptanz für den Übergang auf eine kohlenstoffarme Umwelt
- Möglichkeiten für eine engere Zusammenarbeit zwischen den Sektoren Energie, Industrie und Transport
- Führende Energiespeichertechnologien
- Festlegung einheitlicher internationaler Normen für Wasserstofftechnologien
- Verringerung von Emissionen und anderen negativen Auswirkungen auf die Umwelt
- Möglichkeit einer Wasserstoffproduktion in großem Maßstab
- Dezentralisierung von Wasserstoffproduktion, -speicherung und -transport

RISIKEN (THREATS – T)

- Defizit des Volumens der erforderlichen Investitionsmittel
- Wettbewerb mit anderen Methoden zur Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energie
- Unbestätigtes/unbekanntes Marktpotenzial
- Bindung an den gewählten Lieferanten/Ausrüster
- Mangel an Lieferanten für wichtige Ausrüstung.

4 Überblick über Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten und Demonstrationsprojekte

Projekttitel	Dauer	Projektpartner	Projektbeschreibung	Finanzierung
Internationale F&I-Projekte				
Überwachung der Degradation von Hochtemperaturelektrolyseuren zur Verlängerung ihrer Lebensdauer	2018-20	IJS	Bewertung der Lebensdauer von SOFC-Elektrolyseuren	Bilaterales Projekt SLO–CEA 2018–2020
Entwicklung einer innovativen Hilfsenergiequelle für militärische Anwendungen auf der Grundlage von Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen und Reformierungstechnologie für militärische logistische Kraftstoffe – IAPUNIT	2019-20	IJS KI TU Graz	Entwicklung eines innovativen Hilfstriebwerks für militärische Anwendungen	Projekt EDA – Europäische Verteidigungsagentur
Fortschrittliche elektrochemische Charakterisierung der intrinsischen Eigenschaften und Verbesserung der modernsten Reaktions-Elektrokatalysatoren für die Sauerstoffreduktion ohne CRM mit SECM und schwebender Elektrode	2019-21	KI	Im Rahmen des Projekts wird die Synthese neuer kostengünstiger, effizienter und stabiler Katalysatoren auf der Grundlage funktionalisierter Nanokohlenstoffmaterialien für den Einsatz in Niedertemperatur-Brennstoffzellenkathoden vorgeschlagen	ARRS: NC-0006

Hochaktive Kathode mit extrem niedrigem PGM-Gehalt und MEA-Integration für die Synthese von PEMFC-Zellen	2019-21	KI	Erforschung des Potenzials neuer, aktiverer Elektrokatalysatoren in der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) für die Kommerzialisierung dieser Technologie	ARRS-CEA NC-0007
Zustandsbeobachtung und Lebensdauerbewertung von Festoxidbrennstoffzellen und Elektrolyseuren	2018-19		Entwicklung neuer Algorithmen für die Zustandsbewertung von SOFC-Brennstoffzellen	Bilaterales Projekt BI-AT/18-19-010
Optimierung von Brennstoffzellenkatalysatoren bei der Integration mit der Reformierung	2020-2024	KI	Entwicklung eines integrierten Brennstoffzellen-Prototyps auf der Grundlage hocheffizienter Elektrokatalysatoren (platinbasiert und platinfrei) auf Graphen-basierten Trägern.	NATO SPS Programme
Auf dem Weg zu nanostrukturierten Elektrokatalysatoren mit Top-Stabilität	2020-24	KI	Das Projekt untersucht die Veränderungen in der atomaren Struktur von Elektrokatalysator-Nanopartikeln, wenn diese in Niedertemperatur-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren eingesetzt werden.	ERC-STG – Starting Grant

Strategie zur Wiederherstellung des Wirkungsgrads und fortschrittliches Management für einen effizienten Brennstoffzellenbetrieb	2018-21	TU Graz	Das Projekt befasst sich mit der Entwicklung von beständigen PEM-Brennstoffzellen und hat folgende definierte Ziele: Identifizierung von schadensarmen Prozessen beim Antrieb und bei der Abschaltung von PEM-Brennstoffzellen und Entwicklung neuer Kontrollverfahren für deren dynamischen Betrieb.	BMK Mobilität der Zukunft
FC-Core	2021-22	TU Graz	Das FC-Core-Projekt betrifft die Entwicklung, Patentierung und Demonstration von Prototypen für einen Brennstoffzellenstapel.	Zukunftsfonds Steiermark
MEA auf Graphenoxidbasis für Ethanol-Brennstoffzellen	2019-21	TU Graz UL UM	Entwicklung neuer Anoden- und Kathodenkatalysatoren, die unedle Metalle enthalten, und neuer Anionenaustauschmembranen auf der Grundlage nachhaltiger und wirtschaftlicher Materialien für den Einsatz in alkalischen Brennstoffzellen.	FWF

Edelmetallfreie Elektrokatalysatoren für regenerative alkalische Brennstoffzellen	2019-20	TU Graz	Ziel des Projekts ist die Synthese und Charakterisierung kostengünstiger Materialien zur Unterstützung der Reaktionen der Wasserstoffentwicklungsreaktion (HER) und der Sauerstoffreduktionsreaktion (ORR) in zwei Geräten: der Brennstoffzelle und dem Elektrolyseur	#
FluMaBack – Verbesserung der Komponenten für Brennstoffzellen-Notstromsysteme	2012-15	IJS UL FS	Entwicklung und Verbesserung verschiedener BoP-Komponenten für PEM-Brennstoffzellen	FP7
DIAMOND – Brennstoffzellen-SOFC-Systemmanagement mit Diagnostik	2014-17	IJS	Anwendung der elektrochemischen Impedanzspektroskopie zur Abschätzung der Restlebensdauer eines SOFC-Systems	FP7
MEAPower – Kompositmaterialien für langzeitstabile stationäre PEM-Brennstoffzellen mit erhöhter Leistungsdichte	2015-18	TU Graz AVL UL FS	Im Rahmen des Projekts wurde eine kostengünstige Membran-Elektroden-Einheit – MEA (<€ 0,60 / cm ²) entwickelt und im Labor hergestellt, die unter realistischen Betriebsbedingungen eine Lebensdauer von 80.000 Stunden erreichen kann.	BMK Klima- und Energiefonds
SOH4PEM – Bewerter des technischen Zustands für PEM-Brennstoffzellen	2016-19	TU Graz UL FS	Entwicklung eines Geräts zur Bewertung des aktuellen technischen Zustands einer Brennstoffzelle für Kraftfahrzeuge	BMK Klima- und Energiefonds

INSIGHT – Implementierung von diagnostischen Überwachungsinstrumenten mithilfe der Signalanalyse zur Verlängerung der Lebensdauer von realen SOFC-Systemen	2017-19	IJS	Entwicklung einer Diagnosesoftware zur Vorhersage der Lebensdauer von SOFC-Systemen	FP7
MEMPHYS – Membranreinigung von Wasserstoffsystemen	2017-19	IJS	Entwicklung einer elektrochemischen Kompressoreinheit (bis 1000 bar)	Horizon 2020
RUBY – Ein robustes und zuverlässiges allgemeines Instrument für das Management stationärer Brennstoffzellen zur Verbesserung ihrer Leistung und Lebensdauer	2020-23	IJS	Entwicklung eines Instruments zur Bewertung der Nachhaltigkeit von stationären Brennstoffzelleneinheiten	Horizon 2020
REACTT – Zuverlässige fortschrittliche Diagnose- und Überwachungsinstrumente zur Verlängerung der Lebensdauer von SOFC-Brennstoffzellen	2021-23	IJS AVL	Im Rahmen des REACTT-Projekts wird eine HW-Plattform für die optimale Kontrolle, Zustandsüberwachung und Bewertung der Restlebensdauer von Systemen für die Festoxidelektrolyse (SOE) und die reversible Festoxidzelle (rSOC) entwickelt.	Horizon 2020
SOFC5-60 – Entwicklung einer hocheffizienten 5-kWel-SOFC-Kraft-Wärme-Kopplungsanlage für den Strom- und Wärmeenergiebedarf von Gebäuden und Kleinbetrieben	2017-21	Forschung Burgenland	Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Verwendung von 5-kWel-SOFC-KWK (Festoxid-Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplung) für Anwendungen in Wohn- und Nichtwohngebäuden.	#

Vollständig integriertes reversibles Festoxidzellensystem	2019-21	Forschung Burgenland	Entwicklung eines reversiblen Festoxid-Brennstoffzellen-Systems (rSOC)	#
„Chemical Looping“ zur effizienten Nutzung von Biomasse	2020-24	TU Graz KI	Erforschung von „Chemical-Looping“-Technologien für die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung aus Bioenergie (BECCS). Ziel ist die Auswahl vielversprechender Technologien für die dezentrale Produktion von erneuerbarer Wärme, Strom und Wasserstoff aus Biomasse mit negativen CO ₂ -Emissionen.	BMK COMET-Modul
Best4Hy – Nachhaltige Lösungen für das Recycling von Altgeräten der Wasserstofftechnologie	2021-23	UL FS	Entwicklung, Ausarbeitung und Bewertung von Recyclingverfahren für kritische Materialien, Seltenerdelemente sowie Kobalt und Nickel als zwei wichtige Materialien für die Herstellung von Wasserstofftechnologien	Horizon 2020

eGHOST – Erstellung von Leitlinien für die umweltgerechte Gestaltung von Wasserstoffsystemen und -technologien	2021-23	UL FS	Das Projekt befasst sich mit der ökologischen (Neu-)Gestaltung von Technologien zur Herstellung von Anlagen der Wasserstofftechnologie. Der Hauptteil des Projekts wird sich auf den ökologischen Entwurf konzentrieren, wobei die beiden anderen Säulen der nachhaltigen Entwicklung – die soziale und die wirtschaftliche – einbezogen werden.	Horizon 2020
MORELife – Optimierung von Material, Betriebsstrategie und Zuverlässigkeit für lebenslange Verbesserungen bei schweren Lkw	2021-24	AVL Mebius UL FS	Entwicklung einer innovativen Methodologie zur Bestimmung und Identifizierung von Degradationsmechanismen auf der Grundlage experimenteller Daten aus der Praxis, die die Verbesserung alter und die Entwicklung neuer, spezifischerer beschleunigter Stresstests (AST) zur Bewertung und Entwicklung fortgeschrittener Degradationsmodelle ermöglichen wird	Horizon 2020

ELUVAT – Entwicklung eines innovativen leichten Elektro-Geländewagens für Verteidigungszwecke auf der Grundlage von Elektromotoren in Rädern	2022-23	GDELS-Mowag AVL List AVL Schrick AVL SLO ELAPHE UL FS	Im Rahmen des Projekts werden verschiedene elektrifizierte Fahrzeugantriebssysteme (elektrischer Hybridantrieb, batterieelektrischer Antrieb und Brennstoffzellen-Hybridantrieb) virtuell untersucht.	#
H2GreenTECH	2020–2022	KI TU Graz Industrie- und Handelskammer Štajerska FH Kärnten Forschung Burgenland	Stärkung der regionalen Zusammenarbeit im Bereich Wasserstofftechnologien durch grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen Unternehmen, F&E-Zentren und Hochschulen.	Interreg V SI-AT
Nationale F&I-Projekte				
SOFC4City – Nutzung der Abwärme von SOFC-Brennstoffzellen für Gebäude und Industrie	2015-16	Forschung Burgenland Österreichische Energieagentur Vaillant	Potenzielle Anwendung von SOFC-Brennstoffzellen für die Energieversorgung (Wärme und Strom) in städtischen Gebieten.	#
Prognose des Verbrauchszustands von elektrochemischen Energiesystemen	2016-19	IJS	Entwicklung eines Verfahrens zur Überwachung des Zustands von elektrochemischen Energiesystemen	Slowenische Forschungsagentur, Mitfinanzierer: Domel d.o.o.

Vom Modell zum realen Elektrokatalysator	2018-20	KI IJS	Hauptziel des vorgeschlagenen Grundlagenforschungsprojekts ist die Entwicklung eines Katalysators auf Übergangsmetallbasis, der aktive Zentren enthält, die für die direkte Umwandlung von CO ₂ und H ₂ in Methanol geeignet sind.	Slowenische Forschungsagentur: Z1-9165
Optimierungssteuerung eines Wasserstoff-Energie-Konverters in Verbindung mit einem Wasserkraftwerk	2019-22	IJS	Anwendung und Leitung eines P2G-Systems zur Wasserstoffherzeugung in einem Wasserkraftwerk	Slowenische Forschungsagentur, Mitfinanzierer: HESS d.o.o.
Entwicklung und Vorstellung von Schlüsseltechnologien für kostengünstige Elektrofahrzeugplattformen	2017-20	TU Graz	Das Projekt KEYTECH4EV untersuchte mehrere industrielle Fahrzeugantriebe mit PEM-Brennstoffzellen, um die am besten geeignete Konfiguration zu finden und ihre Lebensdauer unter realistischen Bedingungen vorherzusagen	BMK Klima- und Energiefonds
RESHUB – Unterstützung für nachhaltige Energie und Mobilität im slowenischen Verteidigungssektor	2021-22	MORS UL FS	Das Projekt konzentriert sich auf die Unterstützung und Versorgung slowenischer Kasernen mit nachhaltigen Ressourcen und Mobilität. Ziel des Projekts ist die Analyse des Energiebedarfs militärischer Einrichtungen und des Potenzials für die Eigenversorgung mit Strom und Wasserstoff als Antriebskraftstoff	Projekt in Vorbereitung

Industrielle Projekte unter Vertrag				
TESTLAB – Labor für Wasserstofftechnologien	2014-16	IJS	Containerlabor für die Demonstration und Validierung von Wasserstofftechnologien. Es umfasst 1 kW PEM-Brennstoffzellen, verschiedene Arten von H ₂ -Speichern, einen Elektrolyseur, Solarzellen sowie elektrische und thermische Konverter oder Lagerräume.	Verteidigungsministerium der Republik Slowenien
Machbarkeitsstudie für die Installation eines P2G-Systems im Wasserkraftwerk Brežice	2020	IJS	Strom und Wasserstoff-KWK im Wasserkraftwerk und Abschätzung der finanziellen Auswirkungen	HESS d.o.o, Vertrag U4-KE-E2-48/19
Auswahl geeigneter Anlagen zur Energiespeicherung, die den flexiblen Betrieb der Drau-Kraftwerke gewährleisten	2019		Machbarkeitsstudie über die Anlagen zur Energiespeicherung, die den flexiblen Betrieb der Drau-Kraftwerke gewährleisten	Dravske elektrarne d.o.o., Maribor
Bestimmung der erforderlichen Leistung und Speicherkapazität zur Bereitstellung einer Reserve für die automatische Frequenzwiederherstellung bei HSE d.o.o.	2019		Schätzung der Leistung und der Energiespeicherkapazität, die erforderlich sind, um eine angemessene Reserve für die automatische Frequenzwiederherstellung zu schaffen	Dravske elektrarne Maribor d.o.o.

Einheitliche Methodik zur Bewertung von Lösungen im fortgeschrittenen Vertriebssystem	2020		Empfehlungen für die Bewertung von Lösungen im fortgeschrittenen Vertriebssystem	Sloweniens Verteilernetzbetreiber
Einführung des Energieflexibilitätsmarktes in Slowenien: Analyse der Situation und Ausgangspunkte	2020		Analyse der Situation und Empfehlungen für die Einführung des Energieflexibilitätsmarktes in Slowenien	Energieagentur der Republik Slowenien
Demonstrationsprojekte				
HyMIV – PEM-Brennstoffzellen-basierte Hilfsenergieversorgung für ein militärisches Sonderfahrzeug	2010	JSI	Ein auf PEM-Brennstoffzellen basierender 7-kW-Stromgenerator wurde als Hilfsenergieversorgung für elektronische Geräte in einem Militärfahrzeug installiert.	MORS
30 KW PEM FC APU	2014	Genera	Installation eines unterbrechungsfreien Stromversorgungssystems von 30 KW in einer Militäranlage	MORS
Installation der 1. Wasserstofftankstelle	2013	CO NOT	Die erste Wasserstofftankstelle wurde in Lesce bei Bled installiert	Petrol d.d., CO NOT
GCCOGEN – Demonstrationsprototyp eines Brennstoffzellen-KWK-Systems	2014-16	JSI	Installation eines 8 KW PEM-Brennstoffzellensystems zur Strom- und Warmwasserversorgung in einem mobilen Militär-Wohncontainer	MORS

SustainHuts – Nachhaltige Berghütten in Europa	2016-21	RCVT UL FS	Energetische Nachrüstung von neun Berghütten in vier europäischen Ländern (Spanien, Italien, Rumänien und Slowenien) zur Verringerung der Schadstoffemissionen	LIFE-Programme
Optimierung der Energieumwandlung zur Reduzierung des Anteils fossiler Brennstoffe durch Wasserstoff beim industriellen Schmelzen von Glasgemengen	2017-20	NIC, UL FS	Im Rahmen des Projekts wurde eine innovative technologische Lösung für die Verwendung von Wasserstoff in einem wasserstoffbasierten Glasofen entwickelt, installiert und ihre Funktionsfähigkeit demonstriert, wodurch die Kohlenstoffemissionen pro Einheit des mit sauberem, kohlenstoffarmem Wasserstoffgas hergestellten Glases reduziert wurden.	#
Installation der 2. Wasserstofftankstelle	2021	Ecubes technologies Salonit Anhovo	In Anhovo, Slowenien, wurde die zweite Wasserstofftankstelle installiert.	#
Laufende Biogasnutzung zur dezentralisierten Wasserstoffherzeugung	2020-21	TU Graz	Das Projekt demonstriert und validiert technisch-wirtschaftlich das Potenzial des „Chemical-Looping“-Prozesses mit fester Schicht für die Erzeugung von Wasserstoff aus Biogas	#

SENERGY NETS – Steigerung der Synergien zwischen verschiedenen ENERGIE-NETZWERKEN	2022-26	Energetika Ljubljana UL FS	Demonstration der technischen und wirtschaftlichen Tragfähigkeit von Multi-Energie-Systemen zur Dekarbonisierung der Sektoren Heizung/Kühlung, Energie und Gas durch lokale erneuerbare Energiequellen	#
---	---------	-------------------------------	--	---

5 Bildungsaktivitäten im Zusammenhang mit Wasserstofftechnologien

Slowenische Hochschuleinrichtungen bieten derzeit auf allen drei Ebenen des Studienprogramms eine Reihe von Fächern an, die sich mit der Entwicklung und Anwendung von Wasserstofftechnologien befassen.

Fakultät	Fach
Fakultät für Elektrotechnik, Universität Ljubljana	Energie und Umwelt
	Alternative Stromquellen und Energiemärkte
	Nachhaltige Elektrizitätsversorgung
	Energie
Fakultät für Maschinenbau, Universität Ljubljana	Energien und Umwelt
	Energiemaschinen und -geräte
	Nachhaltige Stromquellen
	Elektromobilität
	Energie in der Kreislaufwirtschaft
	Chemische Energieträger
Fakultät für Chemie und chemische Technologie, Universität Ljubljana	Chemie für eine nachhaltige Entwicklung
	Elektrochemie
	Angewandte Elektrochemie
Internationale Postgraduiertenschule Jožef Stefan, Ljubljana	Brennstoffzellen
	Erneuerbare Energiequellen
Fakultät für Elektrotechnik, Computerwissenschaften und Informatik, Universität Maribor	Energieumwandlung
	Energieumwandlung und Stromnetze
Fakultät für Chemie und Chemische Technologie, Universität Maribor	Energiemanagement
Fakultät für Maschinenbau, Universität Maribor	Kraftstoffe für eine nachhaltige Entwicklung
Fakultät für Umweltwissenschaften, Universität Nova Gorica	Funktionelle Materialien
	Fortschrittliche funktionelle Materialien
ECUBES TEHNOLOGIJE d.o.o. Fakultät für Logistik, Universität Maribor	H2STUDENT

Die am Projekt beteiligten österreichischen Partner/Universitäten bieten auch verschiedene Ausbildungsprogramme und Kurse auf allen drei Ebenen des Studienprogramms an, die sich mit der Entwicklung und Anwendung von Wasserstofftechnologien befassen.

Fakultät	Fach
Fachhochschule Burgenland	Einsatz von Technologie und Management
	Nachhaltige Energiesysteme
	Energie- und Umweltmanagement
	Brennstoffzellen-Labor
Technische Universität Graz	Fortgeschrittenes Studium der PEM-Brennstoffzellen
	Energiespeicherung und -umwandlung
	Wasserstoffproduktion und -speicherung
	Brennstoffzellen und Energiespeicherung
	Labor für erneuerbare Energien
Laborkurs in technischer Chemie	
FH Kärnten	Die nächste Generation für grüne Energie begeistern und vorbereiten – ein Bildungskonzept

Weitere Informationen zu den Bildungsangeboten der H2GreenTech-Partner (Kurse, Vorlesungen, Laborkurse, Workshops, Sommerschulen, sonstige Veranstaltungen) finden Sie im Dokument [10].

6 Verwendungsmöglichkeiten von grünem Wasserstoff

Schon vor der Idee, Wasserstoff als Energiespeicher und -übertragungsmedium zu nutzen, wurde Wasserstoff für eine Vielzahl von industriellen Zwecken eingesetzt – als Rohstoff, der in Materialien und Produkten verarbeitet wird, und als Mittel zur Verarbeitung von Materialien auf vielfältige Weise. Der überwiegende Teil des verwendeten Wasserstoffs ist „grauer“ Wasserstoff, der durch Dampfreformierung aus Erdgas hergestellt wird und CO₂ emittiert. Die Gebiete, in denen Wasserstoff bereits genutzt wird, sind in der Tabelle aufgeführt und finden sich sowohl in Österreich als auch in Slowenien:

Tabelle 1: Derzeitige Verwendung von Wasserstoff

Industriegebiet	Zweck
Chemische Industrie	Rohstoff für die Herstellung von Ammoniak, Wasserstoffperoxid, Düngemitteln und mehr
Elektronikindustrie	Abschrecken, Tempern, Lithographie, Epitaxie oder Dünnschichtüberzug, Einbau in Materialien von elektronischen Bauteilen
Petrochemische Industrie	Beseitigung von Schwefelverbindungen aus Kohlenwasserstoffen bei der Herstellung von Erdölprodukten
Eisen- und Stahlindustrie	Kältemittel oder Mittel mit hoher Wärmeleitfähigkeit oder Schutzatmosphäre
Elektrizitätserzeugung	Kühlung von Turbinengeneratoren

Grüner Wasserstoff kann daher grauen Wasserstoff bei den in der obigen Tabelle aufgeführten Anwendungen ersetzen. Die Verwendung von Wasserstoff für energetische Zwecke erweitert jedoch die Möglichkeiten von grünem Wasserstoff erheblich, wie die folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 2: Künftige Verwendung von Wasserstoff

Energiespeicher und Übertragungsmedium	<p>Umwandlung und Speicherung von Strom in Wasserstoff, wobei der Wasserstoff durch Elektrolyse von Wasser erzeugt wird und für die Elektrolyse Ökostrom verwendet wird. Der gespeicherte Wasserstoff kann später auf vielfältige Weise genutzt werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kraftstoff für die Wärmeerzeugung (in der Vergangenheit wurde er wegen seines hohen Preises pro kWh im Vergleich zu Erdgas vor der Krise selten zum Heizen verwendet) • Transport- oder Mobilitätskraftstoff (für brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge und Geräte wie Gabelstapler, Kleintransporter, Busse, erste Exemplare für Personenkraftwagen)
--	---

	<ul style="list-style-type: none"> • Rückumwandlung in Strom • industrielle Verwendung gemäß der obigen Tabelle
--	---

Derzeitige Verwendung von Wasserstoff

Österreich produziert derzeit 140.000 Tonnen Wasserstoff und Slowenien 2.400 Tonnen pro Jahr. In beiden Ländern wird fast der gesamte Wasserstoff durch Dampfreformierung von Erdgas erzeugt. Wie bereits erwähnt, entstehen bei dieser Art der Wasserstofferzeugung CO₂-Emissionen aus dem Erdgas, das als Rohstoff für den Reformierungsprozess und als Energiequelle für die Erzeugung der für den Prozess erforderlichen Wärmeenergie verwendet wird. Der durch den Reformierungsprozess erzeugte Wasserstoff wird aufgrund seiner CO₂-Emissionen als „grauer Wasserstoff“ bezeichnet.

In Slowenien werden pro Jahr etwa 1.200 t (48 GWh) Wasserstoff zur Herstellung von Wasserstoffperoxid verwendet. Die ungewisse Erdgasversorgung und die steigenden Preise führen dazu, dass grüner Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser hergestellt wird, kostenmäßig wettbewerbsfähig und wirtschaftlich wird. Der Übergang der Wasserstofferzeugung von der Erdgasreformierung auf die Produktion durch Elektrolyse stellt daher ein großes Potenzial für die Nutzung von grünem Wasserstoff in Slowenien dar. Die verbleibenden 1.200 t/Jahr werden für verschiedene andere Zwecke verwendet, z. B. für die Eisen- und Stahlindustrie, die Sauerstoffentfernung aus verschiedenen Prozessen und die Wärmeerzeugung in bestimmten Herstellungsverfahren. Der derzeitige Wasserstoffverbrauch in Österreich liegt bei 140.000 t (5,6 TWh) pro Jahr, wobei der Wasserstoff in der Eisen- und Stahlindustrie sowie in der chemischen Industrie verwendet wird.

Künftige Verwendung von Wasserstoff

Die Verwendung von Wasserstoff zur Erzeugung von Hochtemperaturwärme in der Eisen- und Stahl-, Zement-, Ziegel- und Glasindustrie hat großes Potenzial. So werden beispielsweise Glasöfen derzeit mit Erdgas und Strom betrieben, und es besteht der Wunsch, einen Teil des Erdgases durch Wasserstoff zu ersetzen. Es wurden bereits Demonstrationsprojekte für die Verwendung von Wasserstoff durchgeführt. Der Wärmeverbrauch des Glasofens liegt im Bereich von 20 MW. Die Erzeugung von 10 % (2 MW) der Wärmeenergie mit Wasserstoff bedeutet einen Wasserstoffverbrauch von 1.500 t/Jahr (60 GWh/Jahr).

Ein weiteres vielversprechendes Potenzial für Österreich und Slowenien ist der Einsatz von Wasserstoff in den Bereichen Transport und Mobilität. Im Prinzip kann Wasserstoff in allen Transportarten (Pkw, Lkw, Busse und Bahn) eingesetzt werden. Die Verwendung für Pkw und Lkw ist nach wie vor problematisch, da es an einer umfangreichen Infrastruktur an Tankstellen mit Wasserstoff und an einer großen Auswahl an Pkw und Lkw mit Wasserstoffbrennstoffzellen-Antrieb fehlt. Die ideale Anwendung für Mobilität ist der Stadtbus:

- Die gesamte Flotte der Stadtbuse nutzt einen einzigen Standort als Tankstelle, sodass keine große Tankstelleninfrastruktur erforderlich ist,
- aus wirtschaftlichen Gründen sollten Busse so viel wie möglich in Bewegung gehalten werden, und längere Stopps, z. B. zum Aufladen der Batterien, sind unerwünscht,

- die täglich von Stadtbussen zurückgelegte Strecke übersteigt die Reichweite der Batterien, sodass ein Batterieantrieb für Stadtbusse nicht ideal ist,
- Busse mit Wasserstoff-Brennstoffzellen produzieren keine Emissionen und viel weniger Lärm als Busse mit Verbrennungsmotor
- Treibstoffe (Diesel) werden durch Umwelt- und Energiesteuern stark belastet, was zu einem Endpreis von 150 €/MWh führt, ein Preis, bei dem Wasserstoff bereits wettbewerbsfähig wird (siehe Kapitel 8), wenn man davon ausgeht, dass er nicht durch diese Steuern, sondern nur durch die Mehrwertsteuer belastet würde.

Der Einsatz von Wasserstoff in Stadtbussen könnte schon heute technisch und wirtschaftlich machbar sein und einen Durchbruch bei der Nutzung von Wasserstofftechnologien bedeuten. Grob geschätzt verbraucht ein Bus bei einem typischen Fahrzyklus 30 kg Wasserstoff pro Tag, was einer Menge von 10 Tonnen Wasserstoff pro Jahr entspricht. Eine Flotte von 100 Stadtbussen verbraucht also 1.000 Tonnen Wasserstoff pro Jahr.

Ein weiteres Mobilitätspotenzial ist der Eisenbahnverkehr, insbesondere auf nicht elektrifizierten Strecken (in Slowenien gibt es etwa 600 km solcher Strecken, also 50 % aller Strecken). Auf nicht elektrifizierten Strecken werden Diesellokomotiven eingesetzt, die Emissionen und Lärm verursachen, was durch den Einsatz von wasserstoffbetriebenen Lokomotiven, entweder über Brennstoffzellen oder Gasturbinengeneratoren, gelöst werden könnte.

In der nachstehenden Tabelle wird der Verbrauch von Erdgas und Wasserstoff in Österreich und Slowenien verglichen. Es werden auch grobe Schätzungen des Wasserstoffverbrauchs im Jahr 2040 angeführt.

Tabelle 3: Aktueller Wasserstoffbedarf

	Österreich	Slowenien
ANZAHL DER EINWOHNER	8,9 Mio.	2,1 Mio.
ERDGAS derzeitiger Jahresverbrauch	100 TWh	10,2 TWh
WASSERSTOFF derzeitiger Jahresverbrauch	140.000 t (5,6 TWh)	2.400 t (96 GWh)
WASSERSTOFF derzeitiger jährlicher Pro-Kopf-Verbrauch	15,7 kg	1,2 kg
WASSERSTOFF Jahresverbrauch im Jahr 2040	67-75 TWh (1.775.000 t)	1,14 TWh (28.500 t)
WASSERSTOFF jährlicher Pro-Kopf-Verbrauch im Jahr 2040	199,4 kg	13,6 kg

Quellen: [8], [13]

7 Möglichkeiten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff

Die wichtigste Methode zur Herstellung von grünem Wasserstoff ist die Elektrolyse von Wasser, wobei Ökostrom für die Elektrolyse verwendet wird, der aus drei Hauptquellen stammt: Solarkraftwerke, Windkraftwerke und Wasserkraftwerke. Wird für die Elektrolyse Strom aus dem Netz aus gemischten Quellen, einschließlich Wärmekraftwerken, verwendet, entsteht gelber Wasserstoff, da bei der Stromerzeugung für die Elektrolyse CO₂ entsteht. Ohne primäre Quellen des Ökostroms ist eine grüne Wasserstoffproduktion also nicht möglich. Das Potenzial für die Erzeugung von grünem Wasserstoff ist daher direkt mit dem Potenzial für die Erzeugung von Ökostrom verbunden. Grüner Wasserstoff kann aus dem Überschuss bestehender Ökostromquellen oder aus neu installierten Ökostromquellen erzeugt werden. Wenn Wasserstoff aus bestehenden (bereits gepachteten oder reservierten) Ökostromquellen erzeugt würde, müssten die bisherigen Ökostromverbraucher auf weniger umweltfreundliche Quellen (Wärmekraftwerke) umsteigen. Daher würde auf nationaler Ebene keine Verringerung der CO₂-Emissionen und anderer negativer Umweltauswirkungen erreicht werden.

In diesem Kapitel geht es vor allem um die Frage, welches Potenzial für den Bau neuer Ökostromquellen, d. h. neuer Solar-, Wind- und Wasserkraftwerke, besteht. Die Antwort ist in nachstehender Tabelle zu finden:

Tabelle 4: Derzeitige und geplante Quellen für Ökostrom

Quellen für Ökostrom		Österreich	Slowenien
Wasserkraftwerke	Bestehende	38,4 TWh/Jahr	4,95 TWh/Jahr
	Potenzial für neue	11 TWh/Jahr	1 TWh/Jahr
Windkraftwerke	Bestehende	6,6 TWh/Jahr	Vernachlässigbar
	Potenzial für neue	5,4-15,8 TWh/Jahr	Nicht bekannt
Solarkraftwerke	Bestehende	1,27 TWh/Jahr	0,29 TWh/Jahr
	Potenzial für neue	48 TWh/Jahr	7,28 TWh/Jahr

Es zeigt sich, dass das Potenzial für neue Wasserkraftwerke in beiden Ländern begrenzt ist. Der Grund dafür ist, dass das Wasserkraftpotenzial sowohl in Österreich als auch in Slowenien bereits gut ausgeschöpft ist. Es ist geplant, eine zusätzliche Jahresproduktion von 11 TWh in Österreich und 1 TWh in Slowenien zu installieren. In Slowenien ist der Bau von zehn neuen Kraftwerken an der Save mit einer jährlichen Gesamtproduktion von etwa 1000 GWh geplant, Quelle: <https://www.genenergija.si/investiramo-in-razvijamo/srednjesavske-elektrarne>.

Windkraftwerke sind eine weitere Option. Österreich ist in dieser Hinsicht sehr ehrgeizig und plant die Installation zusätzlicher Windkraftwerke mit einer Produktionskapazität 5,4-15,8 TWh pro Jahr. Die slowenische Öffentlichkeit ist sehr zurückhaltend, was die Einführung von Windkraftwerken im Land betrifft, und es wird daher nicht erwartet, dass die Zahl der Windkraftwerke in naher Zukunft zunimmt.

Solarkraftwerke sind eine sehr attraktive Option. In beiden Ländern können sie auf Dächern von Gebäuden, auf Parkplätzen und auf degradierten Flächen installiert werden. In Slowenien zum Beispiel

beträgt die gesamte Dachfläche 270 Millionen m² [9]. Bei typischen Sonnentagen in der Region Österreich-Slowenien erzeugt ein PV-Paneel mit einer Spitzenleistung von 125 W/m² 135 kWh/m² Strom pro Jahr. Das Produkt aus der gesamten Dachfläche und der von einem PV-Paneel mit einer Fläche von 1 m² erzeugten Energie auf Jahresbasis entspricht der gesamten in einem Jahr in Slowenien erzeugten Energie (36,4 TWh). Allerdings ist es eine sehr unrealistische Annahme, alle Dächer mit PV-Paneelen zu bedecken. Bei einer Nutzung von 20 % der Dachflächen könnte jährlich 7,28 TWh Strom erzeugt werden, der zur Dekarbonisierung verschiedener Prozesse und Sektoren verwendet werden könnte, entweder durch direkte Elektrifizierung oder durch Wasserstofftechnologien.

Bei der Bewertung der Möglichkeiten zur Herstellung von grünem Wasserstoff muss auch der Kostenaspekt berücksichtigt werden, denn wir wollen Wasserstoff zu möglichst geringen Kosten herstellen. Aus Kapitel 8 geht hervor, dass die Kosten für die Herstellung von grünem Wasserstoff auf zwei Arten gesenkt werden können:

- Gewährleistung eines möglichst niedrigen Preises für den Ökostrom, der den Elektrolyseprozess antreibt
- hohe Auslastung des Elektrolyseurs (Minimierung der Intervalle, in denen der Elektrolyseur nicht läuft)

Wie aus Kapitel 8 hervorgeht, wirkt sich der Preis des Ökostroms, der für die Elektrolyse verwendet wird, direkt auf den endgültigen Produktionspreis von Wasserstoff aus. Der Strompreis setzt sich im Allgemeinen aus folgenden Komponenten zusammen: dem Energiepreis, dem Preis für die Übertragung, den Abgaben und den Steuern. In Slowenien machen der Übertragungspreis, Abgaben und Steuern mehr als 50 % der gesamten Stromrechnung aus, während der Strompreis selbst täglichen Schwankungen und Börsenspekulationen unterworfen ist. Unter diesem Gesichtspunkt ist es sinnvoll, die Elektrolyse direkt an das Solarkraftwerk anzuschließen, wodurch Kosten für die Energieübertragung und Abgaben vermieden werden. In diesem Fall ist die Auslastung des Elektrolyseurs jedoch gering, da der Strom aus dem Solarkraftwerk nur für eine begrenzte Zeit des Tages zur Verfügung steht. Die optimale Lösung ist eine Kombination aus direkter Stromversorgung aus dem Solarkraftwerk, wenn die Sonneneinstrahlung ausreichend ist (tagsüber), und Stromversorgung aus dem Versorgungsnetz, wenn die Sonneneinstrahlung unzureichend ist und es Spitzenwerte an billiger Energie gibt (nachts). Die Situation wird in Abbildung 3 erläutert. Dies führt zu einer hohen Auslastung des Elektrolyseurs und gleichzeitig zu einem niedrigen durchschnittlichen Strompreis, wodurch die Produktionskosten für Wasserstoff minimiert werden können.

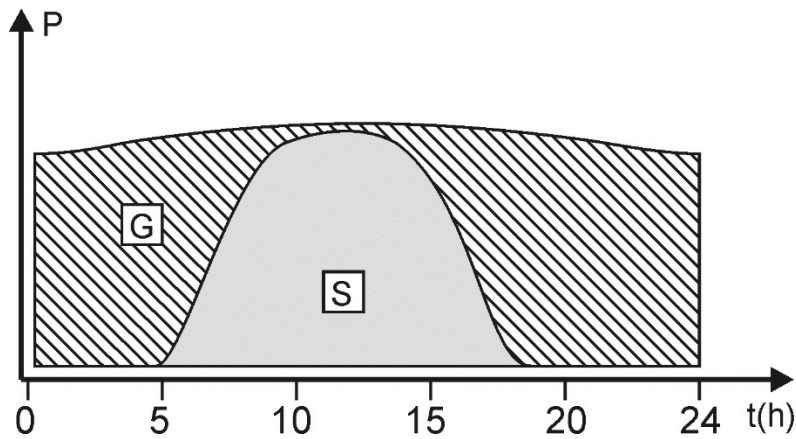


Abbildung 3: Beispiel für die Herstellung von grünem Wasserstoff während des Tages (S-Stromenergie aus PV, G-Stromenergie aus dem Versorgungsnetz)

8 Produktionskosten von grünem Wasserstoff

Der Produktionspreis von Wasserstoff hat einen entscheidenden Einfluss auf seine Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den bestehenden Kraft- und Rohstoffen. Der Selbstkostenpreis von Wasserstoff setzt sich aus drei Hauptkomponenten zusammen:

PC1	Die Preiskomponente, die sich aus den Investitionskosten (CAPEX) für die Ausrüstung (Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher und zugehörige Ausrüstung) ergibt. Der Beitrag dieser Komponente zum Wasserstoffpreis hängt stark von der Auslastung der Ausrüstung und ihrer Lebensdauer ab.
PC2	Die Preiskomponente, die sich aus den Betriebskosten (OPEX) ableitet, wie z. B. Arbeitskosten, Kosten für die Wartung der Ausrüstung und Kosten für die während des Betriebs verbrauchten Materialien.
PC3	Die Preiskomponente, die sich aus dem Preis des für die Wasserstoffherstellung verwendeten Stroms ergibt. Der Elektrolyseur ist der Hauptverbraucher (typischerweise 55 kWh/kg H ₂), aber auch andere Komponenten haben einen gewissen Stromverbrauch (schätzungsweise 5 kWh/kg H ₂).

Nehmen wir an, es handelt sich um ein Wasserstofferzeugungssystem mit einem 1-MW-Elektrolyseur:

CAPEX: Investition (Projektdokumentation, Elektrolyseur, Hochdruck-Wasserstoffspeicher, Hilfskomponenten, elektrischer Anschluss, Bau- und Installationsarbeiten, Kontrollsystem)	2.500.000 €
OPEX: Schätzungsweise als Pauschalsatz von 5 % der Investitionsausgaben pro Jahr	125.000 €/Jahr
Tatsächliche Auslastung der verfügbaren Produktionskapazität des Systems	80 %
Erwartete Lebensdauer des Systems	15 Jahre
Produktionskapazität des Systems bei voller Leistung	20 kg H ₂ / h
Systemverbrauch bei voller Leistung	55 kWh / kg H ₂

Preiskomponente PC1

Die Preiskomponente PC1 wird als Quotient aus den CAPEX-Kosten und der Gesamtmasse des während der Lebensdauer des Systems hergestellten Wasserstoffs berechnet:

$$PC1(\text{€/kg}) = \frac{CAPEX}{m_{TOT}}$$

Die Masse des während der Lebensdauer des Systems hergestellten Wasserstoffs:

$$m_{TOT} = 20 \text{ kg/h} * 24 \text{ h/Tag} * 365 \text{ Tage/Jahr} * 15 \text{ Jahre} * 80 \% = 2.102.400 \text{ kg}$$

Daraus ergibt sich die Preiskomponente PC1:

$$PC1 = \frac{2.500.000 \text{ €}}{2.102.400 \text{ kg}} = 1,19 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Preiskomponente PC2

Die Preiskomponente PC2 wird als Quotient aus den OPEX-Kosten und der Gesamtmasse des während der Lebensdauer des Systems hergestellten Wasserstoffs berechnet:

$$PC2 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \frac{OPEX}{m_{TOT}} = \frac{15 * 125.000 \text{ €}}{2.102.400 \text{ kg}} = 0,89 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

Preiskomponente PC3

Die Komponente PC3 stellt die Stromkosten für die Produktion von grünem Wasserstoff dar und ist direkt abhängig vom Strompreis (€/MWh) und dem Systemverbrauch (55 kWh/kg H₂):

$$PC3 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) = \text{Strompreis} \left(\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) * 0,001 * \text{Stromverbrauch des Systems} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right)$$

Gesamtpreis von Wasserstoff

Der Gesamtproduktionspreis ist die Summe aller drei Komponenten (PC1+PC2+PC3) und wird in €/kg H₂ angegeben.

Unter Berücksichtigung des Energiewerts von Wasserstoff (HHV = 39,39 kWh/kg) kann der Preis von Wasserstoff in €/MWh ausgedrückt werden, was für Anwendungen, bei denen Wasserstoff als Energiequelle genutzt wird, von Bedeutung ist.

$$PC3 \left(\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) = PC3 \left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right) * \left(HHV_{H_2} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \right) \right)^{-1} * 1000$$

Tabelle 5: Wasserstoffpreis in Abhängigkeit vom Strompreis

Beispiel	Preis der elektrischen Energie (€/MWh)	PC1 CAPEX (€/kg)	PC2 OPEX (€/kg)	PC3 Elektrizität (€/kg)	Gesamtpreis von Wasserstoff (€/kg)	Gesamtpreis von Wasserstoff (€/MWh)
1	30	1,19	0,89	1,65	3,73	94,69
2	60	1,19	0,89	3,30	5,38	136,58
3	120	1,19	0,89	6,60	8,68	220,36
4	180	1,19	0,89	9,90	11,98	304,14

Mehrwertsteuer (VAT) und andere Abgaben werden nicht berücksichtigt.

Anmerkungen

- Durch die Kofinanzierung oder Ermäßigung beim Kauf und bei der Installation von Ausrüstungen (CAPEX) kann der Gesamtpreis von Wasserstoff gesenkt werden, mit einem maximalen Senkungspotenzial von 1,19 €/kg, was der Preiskomponente PC1 entspricht.
- Um den Wasserstoffpreis weiter zu senken, sollten Kofinanzierungen der Betriebskosten (OPEX) und des Strompreises für die Wasserstofferzeugung eingeführt werden.

9 Wasserstofftechnologien für den Ausgleich des Stromsystems

Der Netzbetreiber des Stromsystems sorgt dafür, dass die Stromerzeugung jederzeit dem Verbrauch entspricht. Der Netzbetreiber bestimmt die Leistungsabgabe der einzelnen Kraftwerke auf der Grundlage des prognostizierten künftigen Verbrauchs. Trotz der Besorgnis um die Konformität gibt es immer noch Unterschiede zwischen Produktion und Verbrauch, und zwar aus folgenden Gründen:

- Abweichung der Produktion einzelner Kraftwerke vom Plan aufgrund technischer Probleme,
- Abweichung des Verbrauchs der großen Verbraucher aufgrund von Ausfällen aus verschiedenen Gründen,
- Abhängigkeit der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen (Solar-, Wind- und Wasserkraftwerke) von der Jahreszeit, der Tageszeit und dem Wetter und daraus resultierende Unfähigkeit, mit der tatsächlichen Stromnachfrage Schritt zu halten.

Der Netzbetreiber behebt die Abweichungen unter anderem durch Systemdienstleistungen, zu denen die Primär-, Sekundär- und Tertiärregelung gehören:

- Die Primärregelung ist die Regelung der Frequenz der Wechselspannung, die von Kraftwerken durchgeführt wird und während der gesamten Lebensdauer jedes Kraftwerks automatisch erfolgt.
- Die Sekundärregelung dient dem Ausgleich großer Abweichungen zwischen Erzeugung und Verbrauch, wird vom Netzbetreiber ausgelöst und von zuvor ausgewählten Auftragnehmern durchgeführt. Diese müssen dann auf Anforderung oder Signal des Netzbetreibers die Erzeugungskapazität erhöhen oder die Abnahme verringern, wenn es sich um eine positive Regelung handelt. Bei negativer Regelung müssen sie die Abnahme erhöhen oder die Produktion reduzieren. Die vorgeschriebene Reaktionszeit auf eine Anforderung des Netzbetreibers liegt im Bereich von Sekunden, die Dauer beträgt bis zu 15 Minuten. Der Bedarf für ganz Slowenien beträgt 60 MW für die positive Sekundärregelung und 60 MW für die negative Sekundärregelung. Die Zahlung an die Auftragnehmer setzt sich aus zwei Posten zusammen: einer Bereitschaftszahlung und einer Zahlung für den tatsächlich gelieferten Strom (Börsenpreis zuzüglich eines bestimmten Faktors).
- Die Tertiärregelung wird eingesetzt, um lang andauernde Kraftwerksausfälle zu kompensieren. Die Aktivierung erfolgt nicht automatisch, sondern manuell. Die maximale positive Leistung ist gleich der Leistung des größten Kraftwerks. Die maximale negative Leistung ist gleich der Leistung des größten Verbrauchers (Pumpspeicherkraftwerk Avče). Ähnlich wie bei der Sekundärregelung werden die Auftragnehmer für ihre Verfügbarkeit und für den tatsächlich gelieferten Strom bezahlt.

Ein Elektrolyseur, der Wasserstoff für den Endverbrauch (z. B. für den Betrieb von Stadtbussen) produziert und aus dem Netz versorgt wird, könnte in die Sekundärregelung einbezogen werden. Unter normalen Bedingungen, wenn kein Aktivierungsbedarf besteht, arbeitet der Elektrolyseur mit seiner Nennbetriebsleistung. Wenn eine positive Regelung und damit eine zusätzliche Einspeisung ins Netz erforderlich ist, wird die Wasserstoffproduktion und damit die elektrische Leistung des Elektrolyseurs reduziert, was den gleichen Effekt hat wie eine zusätzliche Einspeisung ins Netz. Die Rentabilität des Elektrolyseurs kann erhöht werden, indem er in die Sekundärregelung einbezogen wird:

- Jedes MW an reservierter Leistung bringt zusätzliche jährliche Einnahmen
- Der tatsächlich gelieferte Strom führt zu zusätzlichen Einnahmen, wenn die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\begin{array}{l} \text{Preis der ins Netz} \\ \text{eingespeisten} \\ \text{elektrischen} \\ \text{Energie} \\ \text{(€/kWh)} \end{array} > \begin{array}{l} \text{Wasserstoff-Verkaufspreis (€/kg H}_2\text{) / Elektrolyseur-Verbrauch} \\ \text{(kWh/kg H}_2\text{) – Preis des aus dem Netz verbrauchten Stroms} \\ \text{(€/kWh)} \end{array}$$

Die nachstehende Tabelle zeigt den Gewinn aus der Wasserstoffproduktion nach 15 Betriebsjahren. Die linke Spalte stellt die Situation dar, in der der Elektrolyseur in die Sekundärregelung einbezogen ist, wobei 90 % des Stroms zur Erzeugung von Wasserstoff verwendet werden und 10 % die Aktivierung der Sekundärregelung darstellen. Die rechte Spalte stellt die Situation dar, in der der Elektrolyseur nicht in die Sekundärregelung einbezogen ist und unabhängig funktioniert, wobei der gesamte Strom zur Erzeugung von Wasserstoff verwendet wird.

Tabelle 6: Auswirkungen der Teilnahme an der Sekundärregelung

Parametri	90 % energije za proizvodnjo vodika, 10 % za sekundarno regulacijo	100 % energije za proizvodnjo vodika, brez nudenja sekundarne regulacije	Enota
CAPEX investicija	2.500.000,00	2.500.000,00	EUR
OPEX kot % od CAPEX na leto	5,00	5,00	%
OPEX na leto	125.000,00	125.000,00	EUR
Električna poraba elektrolizerja	0,0550	0,0550	MWh/kg H2
Cena elektrike (elektrika za proizvodnjo vodika)	100,00	100,00	EUR/MWh
Cena elektrike (elektrika dobavljena času sek. reg.)	250,00	250,00	EUR/MWh
Prodajna cena vodika	10,00	10,00	EUR/kg
Povprečna električna moč proizvodnje vodika	0,90	1,00	MW
Povprečna električna sekundne regulacije	0,10	0,00	MW
Moč rezervirana za sekundarno regulacijo	1,00	0,00	MW
Dohodek iz sekundarns regulacijs (za pripravljenost)	183.000,00	0,00	EUR/(MW*leto)
Doba opazovanja	15,00	15,00	leto
Vmesni rezultati			
Količina proizvedenega vodika	2.150.181,82	2.389.090,91	kg
Energija proizvodnje vodika	118.260,00	131.400,00	MWh
Energija sekundarne regulacije	13.140,00	0,00	MWh
Stroški			
Strošek - CAPEX	2.500.000,00	2.500.000,00	EUR
Strošek - OPEX	1.875.000,00	1.875.000,00	EUR
Strošek elektrike za proizvodnjo vodika	11.826.000,00	13.140.000,00	EUR
Skupaj	16.201.000,00	17.515.000,00	EUR
Prihodki			
Prihodek od prodaje vodika	21.501.818,18	23.890.909,09	EUR
Prihodek od dobave elektrike v času sekundarne regulacije	3.285.000,00	0,00	EUR
Prihodek od pavšala za sekundarno regulacijo	2.745.000,00	0,00	EUR
Skupaj	27.531.818,18	23.890.909,09	EUR
Dobiček=Prihodki-Stroški	11.330.818,18	6.375.909,09	EUR

Eine weitere Möglichkeit, sich am Ausgleich des Stromsystems zu beteiligen, ist die Speicherung der elektrischen Energie. In Zeiten hoher Erzeugung aus erneuerbaren Energien (Sommertage mit gutem Wetter) werden Spitzenmengen an billigem Strom erzeugt, die gespeichert und in Zeiten mit höherem Verbrauch, geringerer Erzeugung und höheren Strompreisen genutzt werden können. Dies geschieht durch Pumpspeicherkraftwerke, die Energie in Form von potenzieller Wasserenergie speichern. Das Problem ist jedoch, dass diese Art der Speicherung einen großen Platzbedarf bedeutet und die Speicherkapazität begrenzt ist. Als Alternative bieten sich Batterien an, die jedoch nur für die kurzfristige Speicherung kleiner Energiemengen geeignet sind. Auch Wasserstofftechnologien sind potenziell nützlich. Der erzeugte Überschuss an elektrischer Energie wird durch Elektrolyse des Wassers in Wasserstoff umgewandelt, der gespeichert wird. In Zeiten des Defizits kann der gespeicherte Wasserstoff mithilfe von Brennstoffzellen oder Gasturbinengeneratoren wieder in Strom umgewandelt oder für andere Zwecke verwendet werden.

Die Speicherung von Energie in Wasserstoff ist keine ideale Energiespeicherungstechnologie. Der Gesamtwirkungsgrad des „Lade-Entlade-Zyklus“ liegt bei etwa 35 %, d. h., wenn 1 MWh Strom in den

Speicher eingespeist und gespeichert wird, gibt der Speicher 0,35 MWh Strom zurück. Die nächste Herausforderung ist die Wasserstoffspeicherung. Wasserstoff enthält zwar eine hohe Energie pro Masseneinheit (39,39 kWh/kg), aber seine extrem niedrige spezifische Masse bedeutet, dass er viel Platz im Speicher beansprucht, was durch Komprimierung auf einen hohen Druck (50-300 bar) verringert werden kann. Ein hoher Speicherdruck erfordert jedoch eine hohe mechanische Festigkeit des Tanks, und die Komprimierung verbraucht Energie, was sich negativ auf den endgültigen Wirkungsgrad der Speicherung auswirkt.

Die Speicherkapazität (die Menge der gespeicherten MWh) wird durch Vergrößerung des Tankvolumens oder durch Erhöhung der Anzahl der Tanks erhöht. Während die Vervielfachung der Speicherkapazität auch die Kosten für den Tank vervielfacht, bleiben die Kosten für die Konverter (Elektrolyseur und Brennstoffzelle) gleich. Daher steigt der Preis für die Speicherung in Abhängigkeit von der Kapazität langsamer als bei Batterien, bei denen das Verhältnis zwischen Kapazität und Preis ungefähr linear ist.

Wasserstofftechnologien eignen sich daher aufgrund ihrer Energiespeicherkapazitäten für den Ausgleich des Stromsystems, was in der wissenschaftlichen und fachlichen Literatur bestätigt wird. Aufgrund des geringen Wirkungsgrads des Lade-Entlade-Zyklus ist die Speicherung in Wasserstoff nur dann wirtschaftlich sinnvoll, wenn die Strompreisdifferenz sehr groß ist.

10 U

11

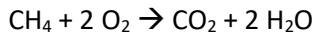
12

13

14 mweltvorteile von grünem Wasserstoff

Im Einklang mit dem Green Deal der EU und den Vorschlägen im Rahmen des Pakets „Fit für 55“ hat sich die EU das Ziel gesetzt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Als Zwischenschritt zur Klimaneutralität hat sich die EU verpflichtet, die Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % zu senken. In der EU-Wasserstoffstrategie wird Wasserstoff als der Energieträger für eine klimaneutrale Wirtschaft bezeichnet. Grüner Wasserstoff, der aus erneuerbaren Stromquellen stammt, kann fossile Brennstoffe wie Erdgas, Heizöl und Kohle schrittweise und teilweise ersetzen. Der Ausstieg aus der Nutzung fossiler Brennstoffe hat unmittelbare Vorteile für die Umwelt, vor allem durch die Verringerung der Emissionen von CO₂ und anderen schädlichen Verbindungen, die hauptsächlich bei der Nutzung von Kohle und Heizöl entstehen, wie CO, Schwefelverbindungen, NO_x, Partikel und viele andere Schadstoffe. In diesem Kapitel geht es um das Potenzial zur Verringerung der CO₂-Emissionen. Um das Potenzial für Emissionsminderungen zu bewerten, führen wir zunächst grundlegende

Zusammenhänge und Daten an. Die Massenbilanz der Verbrennung von Erdgas, die durch Methan (CH₄) approximiert wird, ist durch die folgende Beziehung gegeben:



Aus dieser Beziehung ergibt sich, dass 1 Mol CH₄ 1 Mol CO₂ erzeugt. Die Molmassen für CH₄ und CO₂ sind: M_{CH₄} = 16,04 g/mol in M_{CO₂} = 44,01 g/mol. Der obere und untere Energiewert von Erdgas bzw. Methan (CH₄) beträgt:

HHV _{CH₄} : 15,4 kWh/kg	55,5 MJ/kg	39,8 MJ/m ³
LHV _{CH₄} : 13,9 kWh/kg	50,0 MJ/kg	35,8 MJ/m ³

Der Energiewert von Wasserstoff beträgt:

HHV _{H₂} : 39,39 kWh/kg	141,80 MJ/kg	12,7 MJ/m ³
LHV _{H₂} : 33,32 kWh/kg	119,96 MJ/kg	10,8 MJ/m ³

Wir interessieren uns für die CO₂-Emissionen, die bei der Verbrennung einer Methanmenge entstehen, die 1 MWh an Energie entspricht. Zunächst wird die Masse des Methans für 1 MWh berechnet, wobei der Energiewert LHV_{CH₄} = 13,9 kWh/kg berücksichtigt wird:

$$m_{\text{CH}_4} = \text{Energie (kWh)} / \text{LHV}_{\text{CH}_4} \text{ (kWh/kg)} = 1000 \text{ kWh} / 13,9 \text{ kWh/kg} = 71,94 \text{ kg}$$

Aus der Masse wird die Menge (Anzahl der Mole) des Methans berechnet:

$$n_{\text{CH}_4} = m_{\text{CH}_4} \text{ (kg)} \times (1000 \text{ g/kg}) / M_{\text{CH}_4} \text{ (g/mol)} = 71,94 \times 10^3 \text{ g} / 16,4 \text{ g/mol} = 4386,73 \text{ mol}$$

Wie bereits erwähnt, ist die Anzahl der Mole von CO₂, die bei der Verbrennung von Methan entstehen, gleich der Anzahl der Mole von Methan (n_{CH₄} = n_{CO₂} = 4386,73 mol). Schließlich wird die Masse der CO₂-Emissionen aus der Anzahl der Mole und der molaren Masse berechnet:

$$m_{\text{CO}_2} = n_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CO}_2} = 4386,73 \text{ mol} \times 44,01 \text{ g/mol} \times 0,001 \text{ kg/g} = 193,06 \text{ kg}$$

Im Folgenden finden Sie die wichtigsten Erkenntnisse:

- Bei der Verbrennung von 1 MWh Methan entstehen 193 kg CO₂.
- Bei der Verbrennung von 1 kg Methan entstehen 2,68 kg CO₂.
- Die Energiewerte von Methan und Wasserstoff zeigen, dass 1 kg Methan durch 0,39 kg Wasserstoff ersetzt werden kann.

Die CO₂-Emissionen für Heizöl und Kohle werden auf ähnliche Weise berechnet.

Die folgende Tabelle zeigt den jährlichen Verbrauch an fossiler Energie in Österreich und Slowenien, die in Zukunft durch direkte Elektrifizierung, erneuerbare Kraftstoffe und Wasserstoff ersetzt werden könnte.

Tabelle 7: Struktur und Mengen des derzeitigen Verbrauchs fossiler Energiequellen für Österreich und Slowenien:

Gelieferte Energie	Österreich	Slowenien	
Kohle	27,59	12,22	TWh
Erdgas	84,89	8,55	TWh
Erdölprodukte	124,28	21,98	TWh

Im Folgenden werden die CO₂-Emissionsminderungspotenziale anhand konkreter Beispiele behandelt:

Beispiel 1: Ersetzen von Erdgas durch grünen Wasserstoff (Einspeisung von Wasserstoff in das Gasnetz)

Der jährliche Erdgasverbrauch in Slowenien (Stand 2020) beträgt ca. 10,2 TWh oder 675.000 Tonnen/Jahr, was 1,85 Mio. Tonnen CO₂/Jahr oder etwa 11 % der gesamten CO₂-Emissionen in Slowenien ausmacht. Bei den Erdgasverbrauchern handelt es sich überwiegend um Nicht-Haushaltsnutzer (Industrie, Energie, Heizung usw.). Wenn grüner Wasserstoff in das Gasnetz eingespeist wird, um 5 % des Erdgasmassenstroms zu ersetzen, während der Energiefluss beibehalten wird, sinken die CO₂-Emissionen aus der Erdgasverbrennung um 5 %. Um den Energiefluss bei einer Verringerung des Erdgasmassenstroms um 5 % aufrechtzuerhalten, benötigen wir eine tägliche Produktion von grünem Wasserstoff von etwa 40 Tonnen/Tag. Um Wasserstoff hinzuzufügen, muss eine Wasserstoff-Mischkontrollstation in das Gasnetz eingebaut werden. Bei höheren Wasserstoffanteilen im Gasnetz kann es erforderlich sein, die Mess- und Regelsysteme bei den Gasendverbrauchern zu ändern.

Der industrielle Energiesektor kann von Erdgas auf grünen Wasserstoff umgestellt werden. In diesem Fall ist ein Elektrolyseur (oder mehrere Elektrolyseure) mit der entsprechenden Kapazität und der dazugehörigen Ausrüstung für die Konditionierung, Komprimierung, Speicherung und Verteilung des grünen Wasserstoffs erforderlich.

Durch die Einspeisung von bis zu 5 % Wasserstoff in das Gasnetz können die CO₂-Emissionen um bis zu 93.000 Tonnen/Jahr reduziert werden.

Beispiel 2: Ersetzen von fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl, Gas) in der verarbeitenden Industrie durch grünen Wasserstoff

Der Energieverbrauch in der slowenischen Industrie ist hoch. Im Jahr 2020 verbrauchte die Industrie 14,6 TWh an Energie. Wenn Strom und fossile Brennstoffe die beiden Hauptenergieträger in der Industrie sind und sich jeweils die Hälfte teilen, dann entfallen auf fossile Brennstoffe etwa 7 TWh der verbrauchten Energie – rund 500.000 Tonnen fossile Brennstoffe. Wenn 10 % der fossilen Brennstoffe durch grünen Wasserstoff ersetzt würden, könnte die slowenische Industrie ihre CO₂-Emissionen um rund 150.000 Tonnen pro Jahr reduzieren.

Beispiel 3: Verwendung von grünem Wasserstoff im Transport

Der Transport ist der größte Verbraucher fossiler Brennstoffe in Slowenien mit einem jährlichen Energieverbrauch von rund 18,5 TWh – rund 1,5 Mio. Tonnen. Der Ersatz von 10 % der Fahrzeuge der Flotte (hauptsächlich Stadt- und Vorortbusse und Lastkraftwagen) durch Wasserstofffahrzeuge würde die verkehrsbedingten CO₂-Emissionen um rund 480.000 Tonnen pro Jahr verringern.

Beispiel 4: Grüner Wasserstoff für die industrielle Nutzung in Österreich

Die industriellen CO₂-Emissionen in Österreich werden auf 28,4 Millionen Tonnen im Jahr 2020 geschätzt [15]. Die Hauptverursacher sind die Eisen- und Stahlindustrie mit 11,3 Millionen Tonnen CO₂, andere Industrien (energiebedingte Emissionen) mit 9,2 Millionen Tonnen CO₂, die Mineralien-Industrie (z. B. Zement) mit 2,9 Millionen Tonnen CO₂ und Raffinerien mit 2,8 Millionen Tonnen CO₂. Die Ersetzung von Erdgas oder grauem Wasserstoff durch grünen Wasserstoff im Umfang von 10 % kann somit zu einer Verringerung der industriellen CO₂-Emissionen um 2,8 Millionen Tonnen pro Jahr beitragen.

Beispiel 5: Nutzung von grünem Wasserstoff für den Transport in Österreich

Im Transportsektor soll der Schwerlastverkehr mit einem Mix aus neuen Technologien aufgerüstet werden, von denen 55 % auf Wasserstoff basieren werden [16]. Heute liegt der Anteil fossiler Brennstoffe am Energieverbrauch im Verkehr in Österreich bei 36,1 %. Die Emissionen von leichten Fahrzeugen beliefen sich auf 14,9 Millionen Tonnen CO₂ und die von schweren Fahrzeugen auf rund 8,7 Millionen Tonnen CO₂. Die Ersetzung von 10 % der Transportkapazität durch Wasserstofffahrzeuge würde zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen um 2.360.000 Tonnen pro Jahr beitragen.

15 Optionen zur Verringerung der Abhängigkeit von der Einfuhr fossiler Brennstoffe

Europäische Länder, darunter Österreich und Slowenien, sind in hohem Maße von ausländischen Energiequellen abhängig, vor allem von fossilen Brennstoffen (Kohle, Erdölprodukte und Erdgas). Der Ersatz dieser Quellen durch grünen Wasserstoff verringert die Abhängigkeit von Importen ausländischer Anbieter und reduziert gleichzeitig die CO₂-Belastung der Umwelt, wie aus Kapitel 10 hervorgeht.

Tabelle 8: Struktur und Mengen der Energiequellen für Österreich und Slowenien:

Gelieferte Energie	Österreich	Slowenien	
Kohle	27,59	12,22	TWh
Erdgas	84,89	8,55	TWh
Kernenergie	0,00	19,25	TWh
Wasserkraft	42,00	4,93	TWh
Wind- und Solarenergie	11,14	0,67	TWh
Biokraftstoffe und Abfälle	73,36	8,83	TWh
Erdölprodukte	124,28	21,98	TWh
INSGESAMT	363,26	76,44	TWh

Quelle <https://www.iea.org/countries>

Ersetzung durch Wasserstoff	Österreich	Slowenien	
Kohle	10%	10%	
Erdgas	10%	10%	
Erdölprodukte	10%	10%	

Wasserstoffbedarf	Österreich	Slowenien	
Wasserstoff (Energie)	23,68	4,28	TWh
Wasserstoff (Masse)	430.477,27	77.734,85	t
Elektrolyse - Auslastung	0,80	0,80	
Elektrolyse - installierte Leistung	3378,46	610,08	MW

Tabelle 8 zeigt die Situation, in der ein Teil (10 %) der fossilen Energieträger durch grünen Wasserstoff ersetzt wird, der aus grünem, erneuerbarem Strom erzeugt wird. Die Tabelle zeigt, dass 430.000 Tonnen Wasserstoff in Österreich und 78.000 Tonnen Wasserstoff in Slowenien benötigt würden, um 10 % der Energie aus fossilen Brennstoffen zu ersetzen. Dies erfordert die Installation von 3,4 GW Elektrolyseuren in Österreich und 0,61 GW Elektrolyseuren in Slowenien, wobei eine Auslastung von 80 % angenommen wird.

Der für den Betrieb der Elektrolyseure benötigte Strom muss aus neu errichteten erneuerbaren Energiequellen (Solar-, Wind- und Wasserkraftwerke) stammen. Die Tabelle in Kapitel 7 zeigt, dass die geplanten neuen Energiequellen (Sonne, Wasser und Wind) in beiden Ländern ausreichen, um 10 % der Energie aus fossilen Quellen zu ersetzen.

16 Gesetzgebung

Für eine effiziente und schnelle Einführung verschiedener Arten von Wasserstoffsystemen sind transparente und effiziente Rechtsvorschriften und Sicherheitsbestimmungen erforderlich. Die Genehmigungsverfahren müssen klar und einfach, in relativ kurzer Zeit und vorzugsweise an einer Stelle durchzuführen sein. Zugleich muss die Betriebssicherheit von Wasserstoffsystemen gewährleistet sein.

Zu diesem Zweck sollten im Voraus Probenahmeverfahren für verschiedene Kategorien von Wasserstoffsystemen vorbereitet werden, wie z. B.:

- Elektrolyseure,
- Brennstoffzellen,
- Wasserstoffdruckspeicher mit unterschiedlichem Volumen und Druck,
- Systeme zur Einspeisung von Wasserstoff in bestehende Gasnetze,
- Leitungsnetz für den Transport von Wasserstoff bei unterschiedlichen Drücken,
- Tankstellen für die Betankung von Fahrzeugen mit Wasserstoff (eigenständig oder in bestehende Tankstellen integriert),
- Wasserstoffsysteme zur Erweiterung von Solarkraftwerken,
- Wasserstoffsysteme für die Versorgung von Industrieanlagen,
- Wasserstoffsysteme für lokale Energiegemeinschaften zur Versorgung von Wohnsiedlungen,
- Wasserstoffsysteme für einzelne Wohnräume und ihre Anordnung in oder an Gebäuden,
- Wasserstoffsysteme zum Ausgleich des Stromsystems

Es ist notwendig, die Sicherheitsbedingungen festzulegen, die die Grundelemente der Wasserstofftechnologien (Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Druckspeicher) erfüllen müssen. Dazu gehören die Vorschriften, die die Hersteller von Bauteilen bei der Konstruktion befolgen müssen, und die Prüfungen, die die Hersteller nach der Produktion durchführen müssen (abschließende Qualitäts- und Sicherheitskontrolle).

Für jede Kategorie von Wasserstoffsystemen muss eine Regelung für regelmäßige technische und sicherheitstechnische Überprüfungen getroffen werden.

Aus sicherheitstechnischer Sicht ist es wichtig, denjenigen Elementen von Wasserstoffsystemen besondere Aufmerksamkeit zu schenken, die große Mengen gespeicherten Wasserstoffs enthalten, der eine potenzielle Gefahr darstellen kann, vor allem Wasserstofftanks und Rohrleitungen. Folgendes sollte festgelegt werden:

- die Sicherheitsvorschriften, die erfüllt werden müssen (Materialien, Form, Sicherheitsprüfungen),
- die zulässigen Installationsmethoden und -orte,
- die erforderlichen Sicherheitsausrüstungen wie Wasserstoff-Leckdetektoren und Belüftungssysteme.

Derzeit gibt es in Slowenien keine spezifischen Vorschriften für Wasserstoffsysteme. Es gelten die Rechtsvorschriften für chemische Industrieobjekte und die Rechtsvorschriften für technische Gase. Dies führt zu relativ komplexen und zeitaufwändigen Verfahren für die Anordnung von Wasserstoffsystemen im Raum und in Gebäuden.

Österreich und Slowenien werden sich im Einklang mit der revidierten TEN-E-Verordnung [14] um die Ausarbeitung von Vorschriften und Leitlinien für die Einführung von Dienstleistungen und Infrastrukturen für Wasserstofftechnologien bemühen, mit dem Ziel der Dekarbonisierung und der Verringerung der Abhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe. Die revidierten Leitlinien für die transeuropäischen Energienetze (TEN-E-Verordnung) tragen zur Dekarbonisierung der europäischen Strom- und Gasinfrastruktur bei und gewährleisten gleichzeitig die Integration von Sektoren und Märkten sowie Versorgungssicherheit und Wettbewerb. Dadurch können neue Projekte in den Bereichen Wasserstoffproduktion, -speicherung, -transport und -nutzung gestartet werden. Dazu gehören die Einführung der Wasserstoffproduktion durch Elektrolyse und die Aufrüstung der bestehenden Gasinfrastruktur für die Nutzung von Wasserstoff und anderen erneuerbaren Gasen sowie die Einführung von Gas-/Energiespeichersystemen.

17 Kooperation zwischen Sektoren

Die Einführung von Wasserstofftechnologien in großem Umfang ist mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden, wobei die Investitionen in Wasserstoffsysteme im MW-Maßstab mehrere Millionen Euro betragen. Große Investitionen setzen voraus, dass die Projekte von der Planungsphase an finanziell tragfähig sind, was von den Umständen der gesamten Kette abhängt, in die das Wasserstoffsystem eingebettet ist, angefangen bei der Ökostromproduktion bis hin zum Wasserstoffendverbraucher. Bei der Einführung von Wasserstoffsystemen muss die gesamte Kette berücksichtigt und optimiert werden.

Die Situation soll am Beispiel der Produktion von grünem Wasserstoff und seiner Einspeisung in das bestehende Gasnetz verdeutlicht werden.

In diesem Szenario sind Subjekte aus vielen Bereichen oder Sektoren der Wirtschaft beteiligt und bilden eine Versorgungs- und Übertragungskette, die von der Bereitstellung von Energie für die Produktion von grünem Wasserstoff bis hin zum Endverbraucher von grünem Wasserstoff reicht. Sie sind in folgender Reihenfolge angeordnet: 1. Hersteller von (grünem) Strom für die Wasserstoffproduktion, 2. Unternehmen für die Stromübertragung und -verteilung, 3. Hersteller von grünem Wasserstoff, 4. Rohrleitungen, die Wasserstoff in das Erdgasnetz einspeisen und zu den Endverbrauchern transportieren, 5. Unternehmen, die mit dem Verkauf von Erdgas befasst sind, und 6. Endverbraucher von Erdgas (Industrie, Haushalte, usw.). Anhand des obigen Beispiels können wir sehen, dass die gesamte Kette sehr umfangreich ist. Damit das Projekt erfolgreich ist, müssen alle Glieder der Kette ihre wirtschaftliche Kalkül erkennen und ihren Teil der technischen Voraussetzungen für die Integration in das gemeinsame System erfüllen. Zu diesen sechs Subjekten kann noch ein siebtes hinzukommen: Der Staat, der bei der Ausarbeitung von Rechtsvorschriften und Verwaltungsverfahren für die Erteilung von Genehmigungen für den Bau von Wasserstoffsystemen eine Rolle spielt. Der Staat muss eine Einführungsstrategie für Wasserstofftechnologien verabschieden und Finanzinstrumente bereitstellen, um Investitionen in Wasserstofftechnologien zu fördern und die finanzielle Lücke zu schließen, die durch die hohen Marktpreise für den zur Produktion von grünem Wasserstoff benötigten Ökostrom entstehen kann.

Im Folgenden wird die Rolle der verschiedenen Glieder in der Kette der Produktion und Verwendung von grünem Wasserstoff kurz analysiert.

Die Hersteller von Ökostrom können zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments (2. Quartal 2022) ihren Strom zu extrem hohen Preisen auf dem Markt verkaufen. Würden diese Preise in den Produktionspreis von grünem Wasserstoff einkalkuliert, wäre er gegenüber anderen Energiequellen nicht wettbewerbsfähig, obwohl auch die Preise anderer Energiequellen in diesem Zeitraum steigen. In einer Zeit hoher Strompreise wäre eine Stromsubvention erforderlich, um die Produktionskosten für grünen Wasserstoff auf einem akzeptablen Niveau zu halten.

In der Kette haben Unternehmen für die Stromübertragung und -verteilung oder Betreiber von Stromübertragungs- und -verteilungsnetzen die Aufgabe, Ökostrom von der Quelle (in der Regel ein

Solkraftwerk) zum Standort der Wasserstoffproduktion zu transportieren, wo die Elektrolyseanlage (Elektrolyseur) installiert ist. Die Betreiber der Stromnetze schlagen die Übertragungskosten (Netzentgelte) auf den Gesamtstrompreis auf, der auch in den Produktionspreis von grünem Wasserstoff integriert ist. Um die hohen Strom- und Übertragungskosten teilweise auszugleichen, haben die Netzbetreiber die Möglichkeit, Wasserstoffsysteme in die Ausgleichsmechanismen des Stromsystems einzubeziehen, wodurch zusätzliche Einnahmen generiert werden können, die sich positiv auf die Rentabilität von Wasserstoffsystemen auswirken, wie in Kapitel 9 näher beschrieben.

Die Hersteller von grünem Wasserstoff sind das Herzstück der gesamten Kette. Sie steuern in erster Linie den Prozess der Wasserstoffproduktion, müssen aber auch technisch und wirtschaftlich mit allen anderen Gliedern der Kette koordiniert werden. Bei der technischen Koordinierung bezüglich der Rohrleitungen muss sichergestellt werden, dass die erforderliche Reinheit des Wasserstoffs erhalten bleibt und eine ausreichende Menge zur Verfügung steht, um das vorgeschriebene Wasserstoff-Erdgas-Verhältnis sicherzustellen. Die technische Koordinierung mit den Herstellern von elektrischer Energie bezieht sich auf die Mengen und Preise der gelieferten Energie sowie auf die zeitliche Abstimmung des Lieferprofils. Die Koordinierung mit den Netzbetreibern umfasst Einzelheiten der Integration von Systemdienstleistungen in das Stromsystem.

Rohrleitungen oder der Gasnetzbetreiber ermöglichen die Einspeisung von grünem Wasserstoff in das Gasnetz. Dabei muss der Gasnetzbetreiber für stabile Bedingungen im Gasnetz sorgen und Schwankungen des Heizwerts (kWh/Sm³) des Erdgas-Wasserstoff-Gemischs vermeiden, indem er ein konstantes Mischungsverhältnis zwischen Wasserstoff und Erdgas gewährleistet, z. B. 5 %. Ein schwankender Heizwert kann den Endverbrauchern von Gas Probleme bereiten, insbesondere bei der Verbrennungsregelung. Dies bedeutet, dass eine Koordinierung zwischen dem Hersteller von grünem Wasserstoff und dem Gasnetzbetreiber gewährleistet sein muss.

Erdgasvermarktungsunternehmen können die Vermarktung und den Verkauf von mit Erdgas gemischtem grünem Wasserstoff übernehmen. Bei der Vermarktung können bis zu einem gewissen Grad die Verringerung der Kosten für CO₂-Emissionszertifikate und mögliche Subventionen für die Verwendung von grünem Wasserstoff berücksichtigt werden.

Erdgas wird von den Endverbrauchern hauptsächlich als Energiequelle für die Wärmeerzeugung (Wärme- und Dampferzeugung in industriellen Prozessen, Beheizung von Gebäuden) und auch als Rohstoff (z. B. für die Herstellung von Wasserstoff und damit von Wasserstoffperoxid) verwendet. Die Endnutzer müssen feststellen, ob ihr technisches Verfahren die Substitution eines Teils des Erdgases durch Wasserstoff technisch zulässt und inwieweit ihre technischen Verfahren auf mögliche Schwankungen des Heizwerts des Gasgemischs reagieren. Die Endverbraucher müssen feststellen, ob der potenziell höhere Preis des Wasserstoff-Erdgas-Gemischs im Vergleich zu Erdgas in ihren Endprodukten und Dienstleistungen berücksichtigt werden kann und ob der Markt bereit ist, einen etwas höheren Preis für ökologisch hergestellte Produkte und Dienstleistungen zu zahlen. Die Verwendung einer Mischung aus Erdgas und grünem Wasserstoff hilft den Endnutzern, die Kosten für CO₂-Emissionszertifikate zu senken, da grüner Wasserstoff und seine Herstellung keine CO₂-Emissionen verursachen.

Neben dem oben genannten Szenario gibt es eine Reihe weiterer Anwendungen für Wasserstofftechnologien, wie z. B.:

- Herstellung von Wasserstoff für die Mobilität (Stadtbusse),
- Aufrüstung von Solarkraftwerken mit Wasserstofftechnologien, um die Abhängigkeit von den Wetterbedingungen zu verringern,
- Wasserstoffsysteme zum Ausgleich des Stromsystems und für mehr Flexibilität,
- lokale Wasserstoffsysteme zur Versorgung lokaler Gemeinschaften und einzelner Gebäude.

In jedem dieser Szenarien gibt es neben dem Wasserstoffhersteller oder dem Träger der Wasserstofftechnologien noch andere Akteure, die in die technische und wirtschaftliche Analyse des Szenarios einbezogen werden müssen. Daher ist es wichtig, Unternehmen aus verschiedenen Sektoren und aus dem ganzen Staat miteinander zu vernetzen. Ohne die erwähnte Koordinierung ist eine erfolgreiche Einführung von Wasserstofftechnologien nicht zu erwarten.

18 Wertschöpfungskette für die Produktion von Ausrüstung und Dienstleistungen

Mit dem massiven Durchbruch der Wasserstofftechnologien wird die Versorgung mit technologischen Ausrüstungen (Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Speicher, periphere Komponenten) einen Engpass darstellen, da die Nachfrage das Angebot um ein Vielfaches übersteigen wird. Es gibt also bereits heute Raum für neue Komponentenhersteller und Dienstleister. Die derzeitige Produktion von Komponenten ist noch wenig automatisiert und findet hauptsächlich in kleinen und mittleren Unternehmen statt, sodass es noch Raum für neue Start-ups gibt. Viele Wasserstofftechnologien, -lösungen und -komponenten sind durch Patente geschützt. Dies kann ein Hindernis darstellen, das durch den Kauf von Patenten, die Zahlung für die Rechte zur Nutzung von Patenten oder die Entwicklung neuer alternativer Designs für Komponenten gelöst werden kann. Die zweite Chance liegt im Konzept und der Einrichtung von Produktionslinien für die Herstellung von Komponenten der Wasserstofftechnologien, d. h. von automatisierten Anlagen mit vollständiger Endkontrolle der Qualität der Produkte. Österreich und Slowenien können daher bei Dienstleistungen und bei der Produktion von Komponenten zusammenarbeiten:

Dienstleistungen

- Prospektive Studien zur Einführung von Wasserstofftechnologien (Fakultäten, Institute),
- Markt- und Wirtschaftsanalysen der Einführung von Wasserstofftechnologien in der Industrie und im Elektrizitätssektor (Fakultäten, Institute, bestimmte Unternehmen),
- Systemtechnik aus kommerziell verfügbaren grundlegenden Einheiten der Wasserstofftechnologie (Brennstoffzellen-Stapel und Elektrolyseure), die zu einer Vielzahl von Systemen führen, wie z. B. Energieumwandlungssystemen, Strom- und Wärmegeneratoren mithilfe von Brennstoffzellen, Energiespeichern, Hilfsstromquellen auf Brennstoffzellenbasis und Brennstoffzellen-Kraft-Wärme-Kopplungssystemen,
- Planung und Aufbau von automatisierten Prozesslinien für die Herstellung von Komponenten von Wasserstofftechnologien.

Physische Komponenten

- Peripheriekomponenten wie Gebläse, Pumpen,
- Gleichspannungswandler,
- Automatisierungsmodule,
- Katalysatoren, Membrane,
- komplette Brennstoffzellen- und Elektrolyseur-Module,
- Solarpaneele.

Software-Komponenten (Software)

- Algorithmen für die automatische Steuerung,
- Algorithmen zum Ausgleich des Stromsystems durch Systemdienstleistungen und automatisierten Handel an der Strombörse,

- Algorithmen für die Zustandsbewertung, die Vorhersage des bevorstehenden Verbrauchs und die Schätzung der Restlebensdauer von Wasserstoffsystemen.

19 Optionen für ein Upgrade des Projekts H2GreenTech

Auf der Grundlage der in diesem Dokument dargestellten Ergebnisse und Analysen sind wir der Ansicht, dass das Konsortium der Teilnehmer am regionalen Hydrogen Center im Rahmen des H2GreenTech-Projekts über die entsprechenden Kapazitäten und Kompetenzen verfügt, um auf den Gebieten grüner Wasserstoff und Wasserstofftechnologien in den Bereichen Forschung und Entwicklung von Wasserstofftechnologien, deren Transfer in die Industrie sowie Produktion, Speicherung und Nutzung von grünem Wasserstoff effektiv zu arbeiten.

Die oben angeführten Daten und Analysen zeigen, dass in der grenzüberschreitenden Region Slowenien-Österreich ein großes Potenzial für die regionale Zusammenarbeit vorhanden ist. Das regionale Netzwerk Hydrogen Center ist ein wichtiger Vermittler und Motivator, der mit seinen bestehenden und künftigen Mitgliedern zusammenarbeitet, um gemeinsame Lösungen zu finden, die zur Verbesserung des regionalen Ökosystems beitragen.

Die Entwicklungsstrategie des grenzüberschreitenden Netzwerks Hydrogen Center hebt das Innovationspotenzial der grenzüberschreitenden Region Slowenien-Österreich in den Bereichen Forschung, Entwicklung und Soziales hervor. Dies ermöglicht einen breit angelegten Ansatz für Innovationen in der Region im Bereich grüner Wasserstoff und Wasserstofftechnologien, der Folgendes umfasst:

- Förderung technologischer und nicht-technologischer Innovationen,
- Stärkung der Innovationskompetenzen von KMUs und anderen Unternehmen,
- Aufbau von regionalen Wertschöpfungsketten.

Für den nachhaltigen und erfolgreichen Betrieb des regionalen Hydrogen Centers ist Folgendes wichtig:

- Umsetzung der Entwicklungsstrategie des Hydrogen Centers
- Umsetzung des Plans für Wasserstofftechnologien in Slowenien und Österreich und
- der Marketingstrategie des Hydrogen Centers [17].

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der nachhaltigen Kooperation aller H2GreenTECH-Partner und aller Mitglieder des Hydrogen Centers bis 2025 und darüber hinaus.

Eine der wichtigsten Entwicklungs- und Marketingaktivitäten des Hydrogen Centers bis 2025 und darüber hinaus ist daher die Vernetzung und Verbindung regionaler Innovationsorganisationen und Akteure sowie die Förderung der Projektzusammenarbeit.

Die regionale Zusammenarbeit der Mitglieder des Hydrogen Centers wird zum Aufbau eines stärkeren regionalen Innovationsökosystems für grünen Wasserstoff und Wasserstofftechnologien beitragen.

Gleichzeitig bedeutet dies auch, dass innovatives Unternehmertum unterstützt wird, um neue innovative Entwicklungen zu schaffen und die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft und die

industrielle Diversifizierung im Bereich Wasserstofftechnologien zu steigern. Dies wird zur Zunahme des Innovationspotenzials beitragen.

Es ist wichtig zu erkennen, dass eine wirksame regionale Strategie des Hydrogen Centers und ein widerstandsfähiges Innovationsökosystem für die Interreg SI-AT-Region im Prozess des grünen Wandels von zentraler Bedeutung sind.

Gleichzeitig ist es sinnvoll und notwendig, auf den im Rahmen des H2GreenTech-Projekts durchgeführten Aktivitäten aufzubauen, insbesondere in den folgenden Bereichen:

- Förderung des Bewusstseins der Fachöffentlichkeit und von Fachfremden über die Bedeutung der Einführung von Wasserstofftechnologien für einen erfolgreichen Wandel zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft (Konferenzen, Seminare, Webinare usw.).
- Grenzüberschreitende Ausbildung in Grund- und Aufbaustudiengängen (Austausch von Dozenten und Studierenden in Ausbildungsprogrammen zur Entwicklung und Anwendung von Wasserstofftechnologien, Konzeption eines einheitlichen Ausbildungsprogramms im Bereich Wasserstofftechnologien).
- Bildung von Konsortien zur inhaltlichen Vorbereitung von Anmeldungen für relevante internationale F&I-Projekte (Horizon Europe, Interreg, Innovation Fund, Eurostars, AT-SLO bilateral).
- Überblick und Bewertung der in beiden Regionen durchgeführten Demonstrationsprojekte zur Nutzung von Wasserstofftechnologien.
- Ausarbeitung von Vorschlägen für neue gemeinsame Demonstrationsprojekte zur Nutzung von Wasserstofftechnologien (Bewertung der Machbarkeit eines gemeinsamen H₂ Valleys nach dem Vorbild der Zusammenarbeit zwischen Slowenien, Italien und Kroatien, Energiespeicherung im Bereich der Wasserkraftwerke an der Drau, Wasserstoff im Stadt- und Vororttransport).
- Bewertung des Potenzials für Joint Ventures im Bereich der Dienstleistungen und der Produktionsausrüstung für Wasserstofftechnologien.
- Aufbau der Zusammenarbeit mit staatlichen und nichtstaatlichen Organisationen, die sich mit der Einführung von Wasserstofftechnologien und dem Wandel zu einer kohlenstoffarmen Gesellschaft befassen.

20 Quellenangaben

- [1] P. Kumer, et al., Roadmap for hydrogen technologies in Slovenia and Austria. Ministry of education, science and sport of Republic Slovenia, 2022.
- [2] Republik Slowenien: NEPN – Načrt za energetiko in podnebje, 35400-18/2019/22, Ljubljana, 2020. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/si_final_necp_main_en.pdf
- [3] Federal Ministry, Republic of Austria, Sustainability and Tourism, Integrated National Energy and Climate Plan for Austria. https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-03/at_final_necp_main_en_0.pdf
- [4] Fuel Cells and Hydrogen for Green Energy in European Cities and Regions, The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, 2018.
- [5] IEA, The Future of Hydrogen, iea.org, 2019.
- [6] I. Dincer, Green methods for hydrogen production, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 37, no. 2, pp. 1954-1971, 2012.
- [7] U. Gupta and U. Turaga: Hydrogen is back in vogue. <https://adi-analytics.com/2019/11/12/hydrogen-is-back-in-vogue>
- [8] J. Bohinec, J. Tršinar, Ž. Žerjav, L. Blažej, T. Štokelj und D. Paravan: Sustainable Transition of the Slovenian Power System until 2050, Elektrotehniški vestnik, Ausgabe 89, S. 7-20, 2022.
- [9] M. Kovač, A. Urbančič, D. Staničič: LIFE ClimatePath2050 (LIFE16 GIC/SI/000043), Deliverable C1.1: Climate Mitigation 2050 Potentials and Mid-term Challenges Part 5B: Photovoltaic Rooftop Potential in Slovenia by 2050, IJS-DP-12619, 2018. https://www.podnebnapot2050.si/wp-content/uploads/2020/06/Deliverable_C_1_1-Part-5B-Potencial-son%C4%8Dnih-elektarn-na-strehah-objektov-v-Sloveniji.pdf
- [10] Advanced Fuel Cell and Hydrogen Technologies Slovenia – Austria, Protocol B: Fuel Cell and Hydrogen Technologies Development, Research and Infrastructure in the Interreg Region Slovenia – Austria, Task Leader: Graz University of Technology.
- [11] Republik Slowenien: Resolucija o Dolgoročni podnebni strategiji Slovenije do leta 2050 (ReDPS50), Ministrstvo za okolje in prostor, Ljubljana, Juli 2021.
- [12] Agencija za energijo Republike Slovenije, <https://www.agen-rs.si/web/emonitor/delovanje/zemeljski/omrezne-dejavnosti?gid=131643>
- [13] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort: Wasserstoffstrategie für Österreich, Wien, 2022. <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/wasserstoffstrategie.html>
- [14] Revision of the TEN-E Regulation, EU guidelines for new energy infrastructure, 2021. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689343/EPRS_BRI\(2021\)689343_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2021/689343/EPRS_BRI(2021)689343_EN.pdf)
- [15] M. Anderl, K. Geiger, B. Gugele, G. Mössl, S. Haider, C. Heller, T. Köther, T. Krutzler, V. Kuchel, C. Lampert, et al. Report: REP-0738 Umweltbundesamt. Klimaschutzbericht 2020, Wien, 2020.
- [16] A. Wang, J. Jens, D. Mavins, M. Moultak, M. Schimmel, K. van der Leun, D. Peters, M. Buseman, Report: Analysing Future Demand, Supply, and Transport of Hydrogen. European Hydrogen Backbone. Report. Juni 2021.
- [17] Marketingstrategie Hydrogen Center, B2B-Plattform, One-Stop-Shop, bis 2025 im grenzüberschreitenden Raum Interreg Slowenien – Österreich im Rahmen des H2GreenTECH Projektes: Industrie- und Handelskammer Štajerska, 2022.