

Aufbau von Wasserstoff-Hubs in Europa

Eine Analyse der europäischen Wasserstoff-Landschaft

André Wolf



© shutterstock_Shawn Hempel

Grüner Wasserstoff ist dem Stadium der Erprobung entwachsen: In ganz Europa machen sich große Konsortien in den nächsten Jahren daran, mit hohem Aufwand die Lieferketten von morgen aufzubauen. In dieser Phase werden die Weichen für Erfolg oder Misserfolg im Wettrennen bei dieser Technologie gestellt. Erfolgreich wird Europa als Ganzes nur dann sein, wenn es den Aufbau von Lieferketten an den Potenzialen seiner Regionen ausrichtet und die Vorteile einer europäischen Arbeitsteilung ausschöpft. Dieser cepInput liefert mit einer ersten Analyse des räumlichen Musters einer europäischen Wasserstoffwirtschaft einen Denkanstoß.

Kernthesen:

- ▶ Die regionale Wirtschaftsstruktur in Europa bietet angesichts vielfältiger Verwertungsmöglichkeiten **große Potenziale für eine europäische Arbeitsteilung** entlang von Wasserstoff-Lieferketten.
- ▶ Die räumliche Verteilung der gegenwärtig in den Startlöchern stehenden Großprojekte **spiegelt diese Potenziale nur in Teilen wider**.
- ▶ Eine **verbesserte europäische Koordination von Förderkanälen** und deren konsequente Ausrichtung an regionalwirtschaftlichen Standortkriterien ist in der gegenwärtigen Anschubphase wichtig.
- ▶ Mittelfristiges Ziel muss die **Entstehung überregionaler Märkte** für grünen Wasserstoff in Europa sein. Hierfür sind bereits heute durch eine verstärkte Förderung des Infrastrukturausbaus und eine Harmonisierung der Marktregulatorik die Bedingungen zu schaffen.

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	4
2	Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft	5
2.1	Klimapolitischer und volkswirtschaftlicher Nutzen	5
2.2	Ökonomische Barrieren.....	6
3	Standortanalyse für EU-Regionen	8
3.1	Analysekriterien	8
3.2	Technische Potenziale	10
3.2.1	Erzeugung	10
3.2.2	Verwertung Industrie	11
3.2.3	Verwertung Mobilitätssektor	13
3.2.4	Verwertung Gebäudesektor	15
3.3	Lokale Rahmenbedingungen	17
3.3.1	Know-how und Wissensdiffusion	17
3.3.2	Lokale Vorleistungen	19
3.3.3	Physische Infrastruktur.....	20
3.3.4	Staatliche Marktanreize	21
3.3.5	Gesamtbewertung nach Regionen	22
4	Grüner Wasserstoff als Gegenstand von Regionalpolitik	24
4.1	Das Konzept der Hydrogen Valleys	24
4.2	Förderpolitik in der EU	25
4.3	Status Quo der Projektlandschaft	26
5	Implikationen für die europäische Politik	30
5.1	Steuerungsbedarf.....	30
5.2	Instrumente.....	31
6	Fazit	32
7	Anhang	34
7.1	Datenbasis	34
7.2	Datilergebnisse für Fokusregionen.....	35
7.3	Verwertungspotenziale im Regionsvergleich	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Prozessketten	6
Abbildung 2: Analyseschema	9
Abbildung 3: Regionale EE-Strompotenziale in der EU	11
Abbildung 4: Schätzung regionaler Verbrauch industrielle Prozesswärme in 2019	13
Abbildung 5: Intensität regionaler Straßengüterverkehr in 2019	14
Abbildung 6: Schätzung regionaler Erdgasverbrauch Haushalte in 2019	16
Abbildung 7: H ₂ Know-how Indikatoren in Europa	18
Abbildung 8: EU NUTS-2-Regionen mit der größten Zahl an Wasserstofftankstellen	21
Abbildung 9: Existenz staatlicher Marktanreize in den Mitgliedstaaten	22
Abbildung 10: Geplante Elektrolysekapazitäten bis 2030 in EU NUTS-2 Regionen	28
Abbildung 11: Geplante Elektrolysekapazitäten vs. Erzeugungspotenziale EE-Strom.....	29

1 Hintergrund

Das Ziel der Klimaneutralität bis 2050 ist die zentrale Langzeitherausforderung für das europäische Wirtschaftssystem. Davon betroffen ist längst nicht nur der Energiesektor. Sämtliche Wirtschaftsbereiche stehen unter Druck, Prozesse zu dekarbonisieren oder durch andere Maßnahmen emissionsfrei zu machen. Damit das gelingt, müssen Technologien angewandt werden, die die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien (EE-Strom) über den unmittelbaren Verbrauch hinaus auch auf die Bereiche Wärme und Mobilität ausdehnen, d.h. zur Sektorkopplung beitragen. Die Möglichkeit der Produktion auf Basis regenerativ erzeugten Stroms und die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten in Industrie, Mobilitäts- und Gebäudesektor machen grünen Wasserstoff hierfür zu einem geeigneten Energieträger. In der jüngsten Energiekrise ist er als Beitrag zum Ausweg aus der Abhängigkeit von fossilen Energiequellen noch stärker ins Rampenlicht gerückt. Als Teil ihres *RePowerEU*-Plans hat die Europäische Kommission das Ziel ausgegeben, bis 2030 die heimische Produktion regenerativ erzeugten Wasserstoffs auf 10 Millionen Tonnen zu steigern.¹ Die Erreichung dieses Ziels setzt nicht nur einen steilen Ausbau heimischer Elektrolysekapazitäten voraus, sondern auch massive Investitionen in wasserstoffbasierte Anwendungstechnologien.

Entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche europäische Wasserstoffwirtschaft ist, dass kein Flickenteppich an regional beschränkten Märkten entsteht. Denn die europäischen Regionen unterscheiden sich deutlich in ihren Potenzialen, sowohl was die Produktion (EE-Kapazitäten, technologisches Know-how) als auch was die Verwertung (z.B. Industriestruktur, Mobilitätsbedürfnisse) von regenerativ erzeugtem Wasserstoff anbelangt. Es bedarf deshalb zukünftig auch im Wasserstoffhandel einer echten europäischen Arbeitsteilung, die sich an den komparativen Vorteilen der Regionen ausrichtet. Neben dem Aufbau einer regionsübergreifenden Infrastruktur verlangt dies auch eine ehrliche Bestandsaufnahme, inwieweit der Fokus der Projektförderung in Europa räumlichen Spezialisierungsvorteilen gerecht wird.

Dieser Artikel untersucht die Möglichkeiten der Regionen zur Teilhabe an einer europäischen Wasserstoffökonomie, und stellt sie dem sich abzeichnenden Muster an Projektaktivität gegenüber. Anders als in bisherigen, auf den Ländervergleich ausgerichteten Studien geht es nicht um die Ableitung von Kosten- oder Mengenprognosen. Der Fokus liegt vielmehr auf der Frage, in welchen Segmenten zukünftiger H₂-Lieferketten europäische Regionen Potenziale besitzen und wie diese Potenziale mit den lokalen (Infrastruktur, Wissen, Intermediäre) und nationalen (Förderpolitik) Rahmenbedingungen korrespondieren. Der üblichen techno-ökonomischen Betrachtung wollen wir so eine regionalwirtschaftliche Perspektive gegenüberstellen. Darauf aufbauend wird analysiert, mit welchen Instrumenten EU und Mitgliedstaaten die Hebung der regionalen Potenziale unterstützen können.

¹ European Commission (2022a). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Communication COM(2022) 108 final.

2 Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft

2.1 Klimapolitischer und volkswirtschaftlicher Nutzen

Unter den bestehenden Optionen im Bereich Sektorkopplung weisen in der Regel solche Technologien die beste Energiebilanz auf, die EE-Strom unmittelbar in Wärme (Wärmepumpen, Elektrodenkessel) oder mechanische Energie (batterieelektrische Antriebe) umsetzen. Nicht alle Formen der Energienutzung lassen sich aber sinnvoll direkt elektrifizieren. Auch stellt Elektrifizierung kein Mittel zur Verringerung nicht-energetischer Treibhausgasemissionen dar, insbesondere industrieller Prozessemissionen. Deshalb werden auch in Zukunft Verfahren zur anderweitigen Nutzbarmachung regenerativ erzeugten Stroms notwendig sein. Die Verwendung von EE-Strom zur Gewinnung von Wasserstoff mittels der Elektrolyse von Wassermolekülen, sogenannter grüner Wasserstoff, ist ein solches Verfahren. Durch den Verlust an Nutzenergie, den dieser Umwandschritt mit sich bringt, ist diese Technologie zwar energetisch der Elektrifizierung unterlegen. Sie punktet dafür aber mit der Vielseitigkeit der Anwendungsmöglichkeiten. Grüner Wasserstoff kann direkt als Gas genutzt werden und dabei in vielen Fällen Erdgas ganz oder teilweise ersetzen. Er kann aber auch zur Herstellung synthetischer Heiz- und Kraftstoffe eingesetzt werden. Neben der energetischen Nutzung ist er auch als Rohstoff in der chemischen Industrie und als Reduktionsagent in der Stahlherstellung einsetzbar, kann somit helfen, industrielle Prozesse zu dekarbonisieren.² Abbildung 1 stellt potenzielle Lieferketten schematisch nach Wirtschaftszweigen dar.

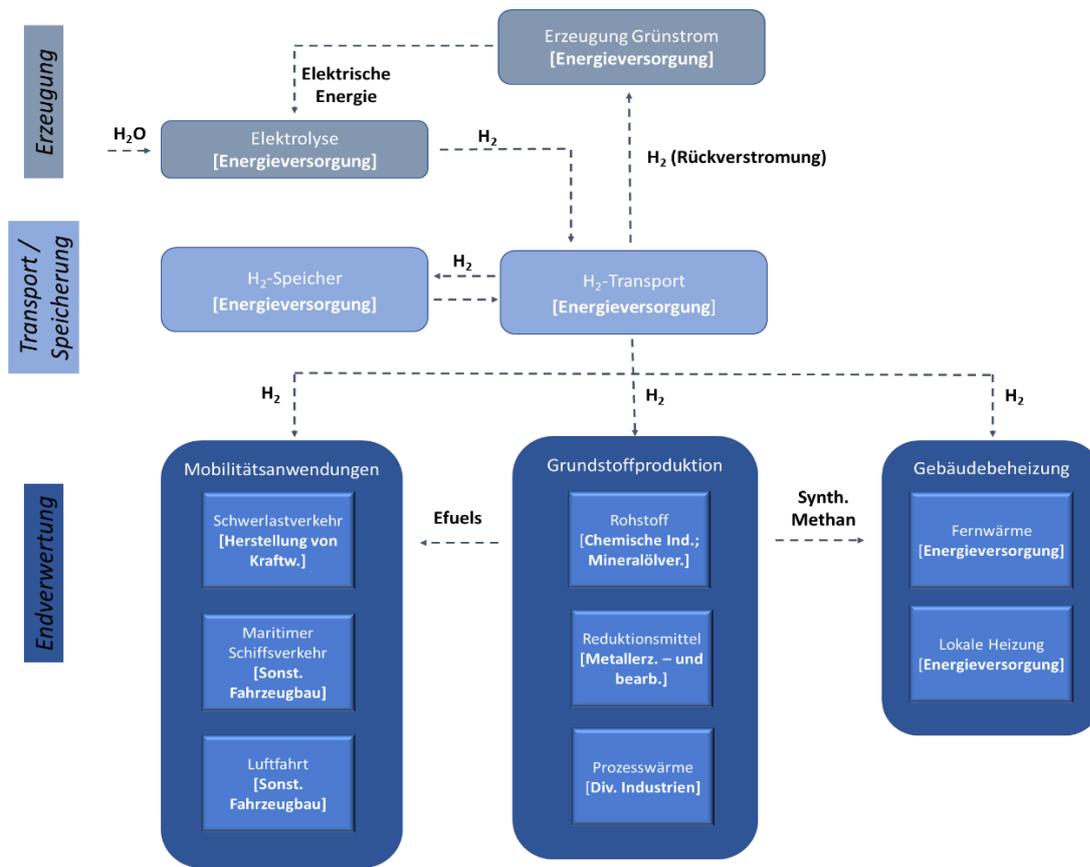
Aus volkswirtschaftlicher Perspektive weckt diese potenzielle Vielfalt an Lieferketten auch Hoffnungen auf bedeutende Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte, speziell für unter großem Transformationsdruck stehende Industrieregionen. Zwar herrscht mittlerweile Einigkeit, dass Europa angesichts begrenzter EE-Potenziale seine zukünftige Wasserstoffnachfrage nicht allein aus heimischer Produktion decken kann. Eigene Elektrolysekapazitäten sind aber als Ergänzung zu Wasserstoff-Importen aus Drittländern unverzichtbar, um den Marktaufbau zu beschleunigen und die Entstehung neuer externer Abhängigkeiten zu verhindern. Dies macht auch die Europäische Kommission deutlich, indem sie als Mittelfristziele bis 2030 für heimische Produktion und Importe jeweils 10 Millionen Tonnen erneuerbaren Wasserstoff ausgegeben hat, somit die Gleichrangigkeit der Bezugswege betont.³ Da potenziell viele Branchen und Energieformen an der Umsetzung beteiligt sein werden, bieten sich neue Potenziale für Arbeitsteilung in Europa.

Damit sich eine solche Arbeitsteilung auch in Konkurrenz zu anderen Energieträgern entfalten kann, bedarf es funktionierender Märkte als Steuerungsinstrumente. Das etablierte System des Emissionszertifikatehandels in Europa stellt für die Honorierung der CO₂-Ersparnis unterschiedlicher Technologien bereits einen wichtigen Baustein bereit. Aber auch grüner Wasserstoff selbst muss einen durch Marktkräfte bestimmten Preis bekommen, der seine gesamten betrieblichen und gesellschaftlichen Kosten mit anderen Energieformen vergleichbar macht. Nur über einen durch Marktpreise dezentral gesteuerten Regions- und sektorübergreifenden Handel werden Mittel in sinnvolle Investitionen gelenkt, die das europäische Energiesystem wirtschaftlich wie energetisch effizient machen. Für die Etablierung eines solchen Preismechanismus sind noch Hürden zu überwinden.

² Wolf, A. (2022). [Wie grüner Wasserstoff Europa unabhängiger macht](#). ceplInput Nr. 6 / 2022.

³ Vgl. European Commission (2022a).

Abbildung 1: Übersicht Prozessketten



Quelle: Eigene Darstellung

2.2 Ökonomische Barrieren

Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff in Europa spielen sich gegenwärtig noch in einem Konglomerat an mehr oder weniger stark fortgeschrittenen Pilotprojekten mit zumeist regionaler Ausrichtung ab. Ein Handel über die Grenzen von Projektverbänden und Kooperationspartnerschaften hinweg findet noch nicht in signifikantem Maße statt. Das hat kapazitäts- wie kostenseitige Gründe. Zunächst fehlt es an der dafür nötigen überregionalen Infrastruktur. Das betrifft einerseits die Möglichkeit des wirtschaftlichen Transports von grünem Wasserstoff. Größere Mengen an Wasserstoff werden innereuropäisch vorrangig über Pipelines transportiert werden müssen. Bis auf wenige, nicht öffentlich zugängliche Leitungen existiert aber noch kein Wasserstoff-Pipelinennetz in Europa. Zwar besteht prinzipiell die Möglichkeit der Beimischung ins Erdgasnetz, hier sind aber technische Limitationen zu beachten. Um große Mengen an Wasserstoff einzuspeisen, ist in jedem Fall eine Umrüstung vorhandener Netze notwendig, für Importkorridore und innereuropäische Erzeugungsregionen wird auch der Bau zusätzlicher Wasserstoff-Pipelines notwendig sein.⁴ Das zweite Problem sind die Kosten der Elektrolyse, hier insbesondere die Kombination aus hohen Fixkosten und geringen Wirkungsgraden. Neuere Generationen an Elektrolyseuren besitzen zwar Effizienzvorteile, erzeugen aber auch höhere

⁴ EHB Initiative (2021). Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. Report – June 2021. European Hydrogen Backbone Initiative.

Investitionsbedarfe.⁵ Hinzu kommt in einigen Regionen ein Mangel an nutzbarem regenerativem Strom als kapazitätsseitiges Problem.

Hohe Kosten und Infrastrukturhemmnisse sind an sich kein Spezifikum von grünem Wasserstoff, sondern typisch für die Anfangsphase vieler junger Technologien. Daraus allein lässt sich noch nicht die Notwendigkeit staatlicher Förderung ableiten. Zwei Faktoren kommen hinzu. Der eine Faktor ist die **Koinzidenz von Größenvorteilen und regulatorischer Unsicherheit**. Größenvorteile meint hier einen Rückgang der Produktionskosten je kg grünem Wasserstoff mit wachsender Produktionsmenge. Dieser Kostenrückgang resultiert aus einer verbesserten Deckung der Fixkosten des Kapazitätsaufbaus (statischer Größenvorteil), mittelfristig auch aus Effizienzsteigerungen durch Lerneffekte (dynamischer Größenvorteil). Für die Rentabilität privater Investitionen ist entscheidend, inwieweit solche Größenvorteile tatsächlich ausgeschöpft werden können. Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor sind staatliche Einflüsse auf den relativen Preis von grünem Wasserstoff. Das betrifft die Entwicklung von CO₂-Zertifikatpreisen und diesbezüglicher Marktregulierung, aber auch die Frage der Belastung von Wasserstoff-Lieferketten mit staatlichen Abgaben. Regelungen in diesem Bereich sind von Mitgliedstaat zu Mitgliedstaat noch sehr verschieden (siehe Abschnitt 3.3.4). Investitionszurückhaltung ist in einem solchen Umfeld die logische Folge, der Marktaufbau bleibt aus.

Ein zweiter Faktor ist die **Henne-Ei-Problematik zwischen Märkten und Infrastruktur**. Die Bildung funktionierender Märkte setzt flexiblen und diskriminierungsfreien Zugang zu Transport- und Speicherinfrastruktur voraus. Umgekehrt wird der Aufbau eines öffentlichen Infrastrukturnetzes aber erst bei Aussicht auf kontinuierlich hohe Wasserstoffströme rentabel. Die *European Hydrogen Backbone Initiative*, ein Zusammenschluss europäischer Energienetzebetreiber, schätzt die Kosten für den Aufbau eines paneuropäischen Pipeline-Netzwerkes bis 2040 auf eine Größenordnung von 80-143 Mrd. Euro.⁶ Dieses Koordinierungsproblem kann letztlich nur durch politische Impulse behoben werden.

Mit einer Kombination aus regulatorischen Marktanreizen und staatlicher Anschubfinanzierung kann die Politik die Skalierung fördern und so den Marktaufbau beschleunigen. Über die Entstehung von Preissignalen erhalten Anwender dann die Möglichkeit, eine transparente Abwägung zwischen den Kosten und Potenzialen verschiedener klimaneutraler Energieformen zu treffen, was die Realisierung kosteneffizienter Dekarbonisierungspfade begünstigt.

Die Heterogenität der Wirtschaftsstruktur, aber auch Unterschiede in Zentralität und topographisch-klimatischen Merkmalen der Regionen sorgen dabei für sehr unterschiedliche Startvoraussetzungen innerhalb Europas. Angesichts der knappen Zeit sollte sich die Förderung auf solche Regionen fokussieren, die durch ihre besonderen Erzeugungs- oder Nutzungspotenziale eine schnelle Skalierung ermöglichen. Das Ziel einer Wasserstoffökonomie wird so zu einem raumwirtschaftlichen Problem: Für den europäischen Wasserstoffmarkt von morgen müssen heute lokale Potenziale identifiziert und zielgerichtet ausgeschöpft werden. Davon wird in der Konsequenz nicht nur der Erfolg der Transformation, sondern auch die ökonomische Potenz des Industriestandortes Europa abhängen. Dieser Aspekt ist in der bisherigen, auf technologische und betriebswirtschaftliche Parameter fokussierten Debatte bislang kaum präsent. Wir widmen ihm im Folgenden eine vertiefte Analyse.

⁵ Iea (2022). Electrolyzers – Tracking report. September 2022. International Energy Agency.

⁶ EHB Initiative (2022). Estimated investment & cost. European Hydrogen Backbone Initiative. <https://ehb.eu/page/estimated-investment-cost>

3 Standortanalyse für EU-Regionen

3.1 Analysekriterien

Es ist schwierig, allgemeine Kriterien für einen idealen Produktionsstandort von grünem Wasserstoff zu bestimmen. Denn vielseitige Verwendbarkeit bedeutet auch, dass Regionen mit ganz unterschiedlichen Voraussetzungen gleichermaßen als Standort geeignet sein können. Entscheidend ist, dass sie die ihrer räumlichen Lage und Wirtschaftsstruktur entsprechenden Nutzungspotenziale ausschöpfen. Klassische, auf der Betrachtung von Wettbewerbsbedingungen beruhende Systeme von Standortfaktoren wie das Diamant-Modell von Porter sind für die Beschreibung ungeeignet, da die Märkte für grünen Wasserstoff erst im Entstehen begriffen sind. Wir wenden deshalb im Folgenden ein eigenes Schema an Potenzialindikatoren auf die europäischen Standorte an.

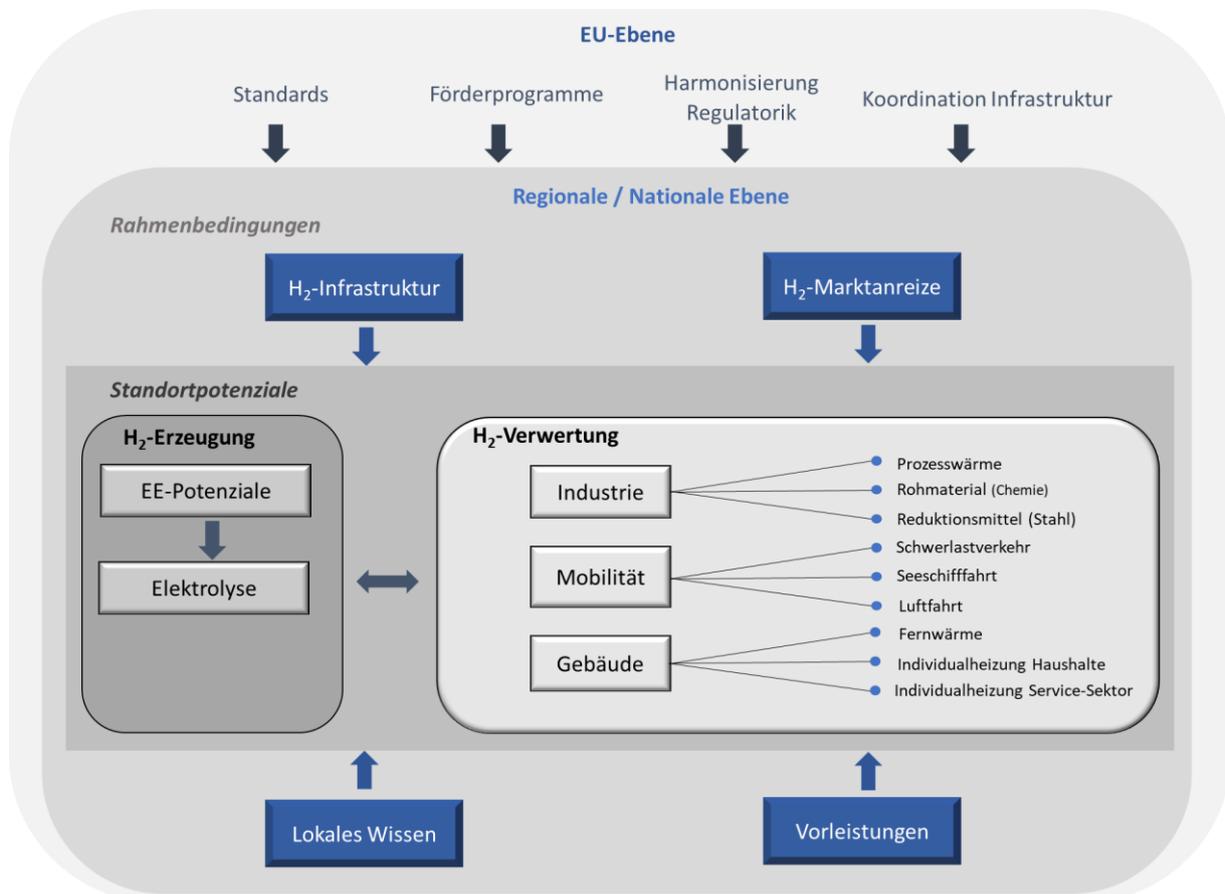
Ein mit Blick auf die Marktentwicklung wichtiges Standortkriterium ist die lokale Verfügbarkeit von EE-Strom für die Elektrolyse. Denn nur bei Aussicht auf ausreichenden Strombezug über weite Zeiträume der theoretisch möglichen Betriebsstunden kann die für Wirtschaftlichkeit notwendige Kapazitätsauslastung erreicht werden. Räumliche Nähe zu den Stromerzeugungsanlagen ist dabei mit Blick auf Systemintegration sehr wichtig. Grundsätzlich würde dieses Kriterium dafürsprechen, die Elektrolyse an wenigen, durch besonders große EE-Potenziale gekennzeichnete Standorte zu fokussieren. Größenvorteile in der Wasserstoffgewinnung würden so optimal ausgeschöpft, die starke Kostendegression zugleich nachfrageseitig über sinkende Preise die Marktentwicklung vorantreiben. Gegen eine solche räumliche Konzentration spricht allerdings die Bedeutung von Transportkosten und -kapazitäten. Das geringe Gewicht und – damit zusammenhängend – die starke Flüchtigkeit von Wasserstoffmolekülen bergen das Risiko von hohen Energieverlusten. Die hohe Reaktionsfreudigkeit erfordert zudem Aufmerksamkeit für die Frage der Reinhaltung des Wasserstoffs. Im Falle der Beimischung in vorhandene Gas-Pipelines besteht zudem das Risiko, dass der Wasserstoff in Leitungswände eindiffundiert und sie auf diese Weise beschädigt.⁷ Um dies zu vermeiden, entsteht Umrüstungsbedarf – oder alternativ Investitionsbedarf in neue Wasserstoff-Netze. Der Wasserstoff-Transport ist so in jedem Fall mit bedeutenden fixen und variablen Kosten verbunden. Diese Perspektive spricht eher für eine Ansiedlung von Elektrolyseuren in der Nähe von Verbrauchszentren.

Vor dem Hintergrund dieses kostenseitigen Trade-offs bieten solche Standorte die besten Voraussetzungen für eine schnelle Marktentwicklung, bei denen hohe EE-Erzeugungsmöglichkeiten auf ein ebenfalls hohes lokales Nachfragepotenzial treffen. Wir unterscheiden im Folgenden analog zum üblichen Vorgehen in der Literatur Nachfragepotenziale grundsätzlich nach den Sektoren Industrie, Wärme/Gebäude und Verkehr. Innerhalb der Sektoren betrachten wir solche Anwendungsbereiche, in denen grüner Wasserstoff als sinnvolle Alternative zur Elektrifizierung beim Ziel der Dekarbonisierung eingestuft wird. Neben diesen technischen Potenzialen haben auch die lokalen Rahmenbedingungen Einfluss auf die Eignung eines Standortes. Dazu zählen die physische Infrastruktur (Transport, Speicherung, Anwendung) genauso wie die regulatorischen Bedingungen für die Vermarktung von grünem Wasserstoff. Auch die Präsenz von Produzenten wichtiger Vorleistungen in der Region ist bei der Standortbewertung zu berücksichtigen. Schließlich sind auch die Verfügbarkeit von Wissen und qualifizierten Beschäftigten ein wichtiger Baustein beim Aufbau einer regionalen Wasserstoffökonomie. Abbildung 2 stellt

⁷ ALPIQ (2021). [Wasserstoff – Herausforderungen an die Infrastruktur](#). Energieforschungsgespräche Disentis, 22. Januar 2021.

die Struktur unserer Analyse und die verwendeten Merkmale schematisch dar. Eine Übersicht zu Herkunft und Berechnung der herangezogenen Indikatoren findet sich in Tabelle A1 im Anhang.

Abbildung 2: Analyseschema



Quelle: Eigene Darstellung

Für die räumliche Abgrenzung der Regionen in unserer Analyse sind wir auf die offizielle Systematik der Gebietseinheiten in der EU, die NUTS-Klassifikation⁸, angewiesen. Denn nur in dieser Systematik liegen die für die Analyse notwendigen Regionalindikatoren vor. Die NUTS-Klassifikation ist hierarchisch in vier Stufen (NUTS-0 bis NUTS-3) untergliedert. Bei der Wahl der NUTS-Ebene besteht ein Trade-off zwischen räumlicher Präzision und Datenverfügbarkeit. Die NUTS-1 Ebene etwa ist räumlich relativ unscharf und durch besonders starke Größenunterschiede gekennzeichnet. Auf der deutlich feiner gegliederten NUTS-3 Ebene liegen keine relevanten Indikatoren mehr vor. Wir wählen deshalb für unsere Zwecke die in ihrer Auflösung dazwischen liegende NUTS-2 Ebene.⁹ Auch auf dieser Ebene existieren flächenmäßige Größenunterschiede zwischen den Regionen, als Konsequenz aus der inhomogenen Verteilung von Bevölkerung und Wirtschaftskraft, sowie unterschiedlichen administrativen Abgrenzungen innerhalb der Mitgliedstaaten. Um zu Maßen für die räumliche Konzentration von Potenzialen in einer Region zu kommen, setzen wir die verfügbaren regionalen Kennzahlen deshalb in Relation zur Gebietsfläche. Zugleich ist zu bedenken, dass über den interregionalen Austausch Regionen einen Teil ihrer Standortvorteile auch aus den Potenzialen ihrer Nachbarregionen ziehen können.

⁸ Eurostat (2022). [NUTS - Nomenclature of territorial units for statistics](#).

⁹ In Deutschland entspricht dies der Ebene der Regierungsbezirke eines Bundeslandes (in größeren Bundesländern) bzw. des Bundeslandes als Ganzem (in kleineren Bundesländern).

Dies gilt insbesondere für NUTS-2-Regionen in Form von städtischen Agglomerationsräumen. Im späteren Verlauf der Analyse betrachten wir deshalb ergänzend die im Umkreis einer Region messbaren externen Potenziale.

3.2 Technische Potenziale

3.2.1 Erzeugung

Mittels Elektrolyse gewonnener Wasserstoff wird zukünftig nur dann als nachhaltig gelten, wenn der eingesetzte Strom vollständig aus erneuerbaren Quellen gewonnen wurde. Die Verfügbarkeit von EE-Strom in ausreichenden und zeitlich planbaren Mengen ist damit erzeugungsseitig eine entscheidende Standortbedingung für Elektrolyseure. Bereits heute existierende Windkraft- und Solarstromkapazitäten sind dabei aber keine wesentliche Größe. Denn die Europäische Kommission hat deutlich gemacht, dass sie die Nutzung von EE-Strom für die Elektrolyse mittelfristig nur auf Basis zusätzlich geschaffener EE-Kapazitäten befürwortet. So soll verhindert werden, dass eine Kannibalisierung von Verwertungsoptionen stattfindet, und für die Elektrifizierung von Verbrauchssektoren benötigter klimaneutraler Strom in die vergleichsweise ineffiziente Wasserstofferzeugung umgeleitet wird. Vor diesem Hintergrund wird die Kommission in einem lang erwarteten delegierten Rechtsakt zur Erneuerbaren-Energien-Richtlinie klare Kriterien für die Anerkennung von grünem Wasserstoff als erneuerbaren Kraftstoff formulieren. Gemäß des jüngsten Leaks soll nach einer bis 2028 laufenden Übergangsphase für die Anerkennung das Kriterium der Additionalität erfüllt sein: Der eingesetzte Strom muss aus Anlagen stammen, die frühestens 36 Monate vor Inbetriebnahme des Elektrolyseurs ans Netz gingen.¹⁰

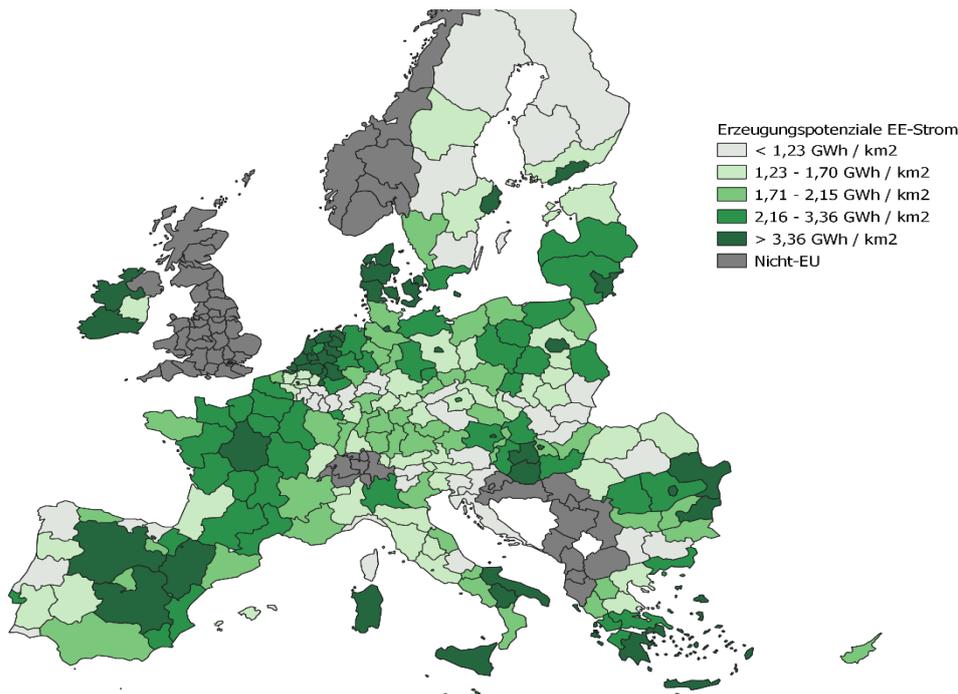
Wenngleich anstehende Pilotprojekte durch die Übergangsfrist Schonung genießen, sind die langfristigen Nachhaltigkeitsanforderungen an eine europäische Wasserstoffökonomie damit klar abgesteckt. Beim Aufbau signifikanter Elektrolysekapazitäten stellt räumliche Nähe zu zukünftigen Windkraft- und PV-Großprojekten einen Standortvorteil dar. Dies setzt entsprechend unausgeschöpfte EE-Potenziale voraus. Kakoulaki et al. (2021) haben auf Ebene der NUTS-2-Regionen die regionalen Flächenpotenziale für die Gewinnung von EE-Strom analysiert.¹¹ Konkret wurden auf Basis topographisch-klimatischer Standortinformationen die maximalen jährlichen Erzeugungspotenziale von Strom aus Solar-, Wasser- und Windkraft (Onshore + Offshore¹²) für die einzelnen Regionen geschätzt. Abbildung 3 stellt diese Potenziale in Relation zur regionalen Gesamtfläche dar, um die räumliche Konzentration der Erzeugungspotenziale vergleichbar zu machen.¹³ Im EU-Vergleich besonders hohe Potenziale zeigen sich erwartungsgemäß vor allem in Nordsee-Anrainerregionen (Windkraft), in sonnenreichen Mitgliedstaaten auch verstärkt in Binnenregionen. Inputseitig lässt sich damit keine Notwendigkeit für eine starke räumliche Konzentration der Wasserstoffproduktion in Europa erkennen. Eine nähere Betrachtung muss aber das räumliche Matching mit den regionalen Nachfragepotenzialen einbeziehen.

¹⁰ SP Global (2022). [New European Commission draft hydrogen rules draw industry, NGO ire.](#)

¹¹ Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe – A regional assessment: Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228, 113649.

¹² Bei der Schätzung der Windkraft-Offshore Potenziale wurde von den AutorInnen mangels direkter regionaler Verortung ein vereinfachtes Verfahren praktiziert: Nationale Schätzwerte wurden auf Basis der regionalen Stromnachfrageverteilung einzelnen Regionen zugeordnet. Dies ist bei der Interpretation zu berücksichtigen.

¹³ Die EU-Regionen wurden hier und in den folgenden Kartendarstellungen auf Basis ihrer Indikatorwerte in jeweils fünf gleich große Gruppen (Quintile) unterteilt.

Abbildung 3: Regionale EE-Strompotenziale in der EU

Quellen: Kakoulaki et al. (2021); Eurostat (2022); eigene Berechnungen

3.2.2 Verwertung Industrie

Bereits heute kommt Wasserstoff – noch vorrangig gewonnen aus fossilen Quellen (Dampfreformierung von Erdgas, Kohlevergasung) – als Rohstoff in vielen Produktionsketten der chemischen und petrochemischen Industrie zum Einsatz. In der chemischen Industrie wird reiner Wasserstoff zusammen mit Stickstoff für die Herstellung von Ammoniak eingesetzt, ein unverzichtbarer Grundstoff für die Herstellung verschiedenster Stickstoffdünger. In Verbindung mit CO₂ wird auf Basis von Wasserstoff zudem Methanol erzeugt. Methanol stellt den Grundstoff für eine Vielzahl an chemischen Produkten (u.a. Formaldehyd, Essigsäure) dar. Für den Verkehrssektor ist es auch in seiner möglichen Rolle als synthetischer Kraftstoff interessant. In der Mineralölindustrie wird Wasserstoff sowohl als Rohstoff als auch als Energieträger in der Aufbereitung von Rohöl eingesetzt. In verschiedenen Hydrierverfahren dient der Wasserstoff dabei zur Entfernung von Unreinheiten, insbesondere von Schwefel.¹⁴ Eine Umstellung der fossilen Wasserstoffgewinnung auf Elektrolyse birgt so mittelfristig große Dekarbonisierungspotenziale für wichtige chemische Prozessketten.

Existierende Potenzialstudien weisen der **chemischen Industrie** eine Schlüsselrolle bei der zukünftigen industriellen Verwertung von grünem Wasserstoff zu.¹⁵ Regionen mit ausgeprägter Wirtschaftsaktivität in diesem Bereich sind deshalb als potenzielle Verwertungszentren zu betrachten. In Ermangelung von Detailinformationen zu den relevanten Produktionsmengen auf regionaler Ebene kann die regionale Beschäftigungsdichte in der chemischen Industrie als Potenzialindikator herangezogen werden. Dabei ragen einzelne Regionen in Frankreich (Île de France), Deutschland (Bezirk Düsseldorf, Rheinhessen-Pfalz) und Belgien (Prov. Antwerpen) im europaweiten Vergleich deutlich heraus. Insgesamt ist die räumliche Verteilung positiv mit den in Abschnitt 3.2.1 präsentierten regionalen EE-

¹⁴ iea (2019). The future of hydrogen – Technology report. June 2019. International Energy Agency.

¹⁵ Hydrogen Council (2020). Path to hydrogen competitiveness – a cost perspective. 20 January 2020.

Strompotenzialen korreliert (Korrelationskoeffizient: +0,23). Regionen mit potenziell hoher Wasserstoff-Nachfrage durch die chemische Industrie besitzen im Schnitt also auch ein vergleichsweise hohes natürliches Angebotspotenzial an EE-Strom für die Elektrolyse.

Neben der Verwertung als Rohstoff steht auch der Einsatz von grünem Wasserstoff als Reduktionsagent in der **Stahlherstellung** im Fokus von Potenzialanalysen. Die herkömmliche, CO₂-intensive Form der Stahlgewinnung, Schmelzen von Eisenerz unter Einsatz von Koks in Hochöfen, kann durch sogenannte Direktreduktionsverfahren ersetzt werden. Dabei wird das Eisenerz nicht geschmolzen, sondern zu festem Eisenschwamm reduziert, wobei als Reduktionsmittel sowohl Erdgas als auch Wasserstoff in Frage kommen. Die Verwendung von grünem Wasserstoff kann die CO₂-Bilanz des Prozesses deutlich verbessern.¹⁶ Die Präsenz von Stahlproduzenten ist damit ebenfalls ein bedeutender Indikator für regionale Verwertungspotenziale von grünem Wasserstoff. Spezifisch für die Stahlindustrie liegen keine regionalen Vergleichszahlen zur Beschäftigungssituation in Europa vor. Wir verwenden stattdessen Geoinformationen vom Branchenverband *Eurofer* zur Verteilung der Stahlproduktionskapazitäten in Europa als Grundlage für den Regionalvergleich.¹⁷ Eine regionale Zuordnung dieser Zahlen auf NUTS-2-Ebene liefert ein räumliches Muster, das ebenfalls positiv mit der Verteilung der EE-Strompotenziale korreliert, allerdings in etwas geringeren Ausmaß als im Falle der chemischen Industrie (Korrelationskoeffizient: +0,16). Die räumliche Beziehung zwischen Wasserstoff-Nachfrage und erzeugungsseitigen Potenzialen ist bei dieser Verwertungsform also uneindeutiger.

Zusätzlich zur stofflichen Verwertung kommt grüner Wasserstoff auch als Energieträger für die Bereitstellung von **industrieller Prozesswärme** in Frage. Die industrielle Wärmenutzung wird bei jeder Dekarbonisierungsstrategie zukünftig eine wichtige Rolle zukommen müssen, ist sie doch für einen bedeutenden Teil der gesamten Endenergienutzung (nach IEA-Schätzungen global etwa 25%¹⁸) verantwortlich. Der überwiegende Teil der Anlagen zur Wärmeengewinnung wird gegenwärtig noch mit fossilen Energieträgern betrieben. Ihr Anteil am industriellen Endenergieverbrauch in der EU insgesamt lag im Jahr 2020 bei 83%.¹⁹ Grüner Wasserstoff kann als Wärmequelle für Gasturbinen und Industrieöfen dazu beitragen, diesen Anteil deutlich zu senken. Dabei ist jedoch die starke Konkurrenz durch Technologiealternativen wie Power-to-Heat (Wärmepumpen, Elektrodenheizkessel) und Biomasse zu bedenken. Insbesondere die Direktstromnutzung wird mittelfristig aus Effizienzgründen bei vielen Anwendungen den bevorzugten Weg zur Dekarbonisierung darstellen.²⁰ Wasserstoff wird jedoch bei einigen Hochtemperaturprozessen eine Zukunft vorausgesagt, bei denen die Elektrifizierung technisch besonders schwierig und kostenaufwendig wäre. Hier könnte Wasserstoff als Beimischung oder alleiniger Energieträger etablierte gasbasierte Technologien CO₂-neutral gestalten und so die Investitionskosten der Dekarbonisierung senken.²¹ Die Entscheidung darüber wird in jedem Fall stark prozessspezifisch sein und auch innerhalb von Branchen variieren. Dabei kann keine Branche grundsätzlich ausgeschlossen werden. Für den Regionsvergleich der wärmebezogenen Nutzungspotenziale in der Industrie wird deshalb der industrielle Prozesswärmeverbrauch insgesamt herangezogen. Abbildung 4 zeigt die räumliche Verteilung der geschätzten regionalen Jahresverbräuche je km₂. Industrielle

¹⁶ Dena (2022). Einsatzgebiete für Power Fuels.

¹⁷ Eurofer (2022). [Map of EU steel production sites](#).

¹⁸ IEA (2020). Renewables 2020 - Renewable heat. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/renewables-2020/renewable-heat>

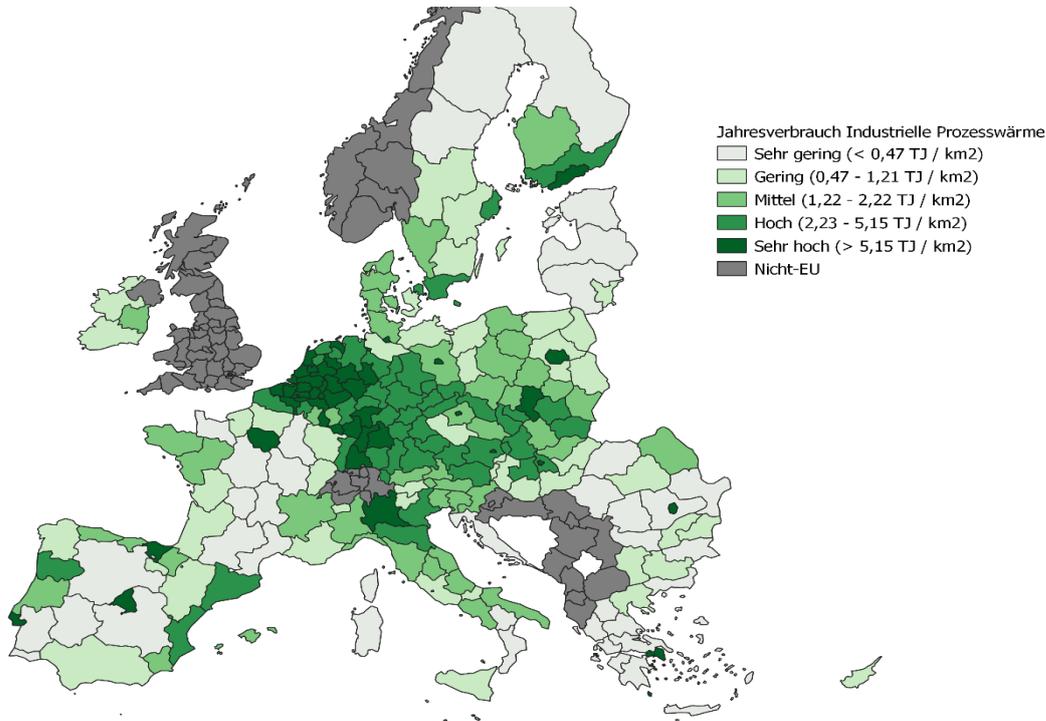
¹⁹ Eurostat (2022). Energy balance sheets April 2022- EU27 energy balance 2020.

²⁰ Piebalgs, A., Jones, C., Dos Reis, P. C., Soroush, G., & Glachant, J. M. (2021). Cost-effective decarbonisation study. *European Energy & Climate Journal*, 10(1), 46-74.

²¹ Deloitte (2022). Hydrogen opportunities for industrial products companies - Heat and power generation.

Zentren wie die Benelux-Länder, Südwest-Deutschland und Nord-Italien sind klar als Großverbraucher auszumachen. Abseits des geografischen Zentrums beschränken sich die überdurchschnittlichen Werte weitgehend auf einzelne Metropolregionen. Auch hier zeigt sich insgesamt eine positive Korrelation mit regionalen EE-Strompotenzialen, welche etwas deutlicher ausfällt als bei den anderen industriellen Verwertungsformen (Korrelationskoeffizient: +0.38).

Abbildung 4: Schätzung regionaler Verbrauch industrielle Prozesswärme in 2019



Quelle: Eurostat (2022); eigene Regionalisierung.

3.2.3 Verwertung Mobilitätssektor

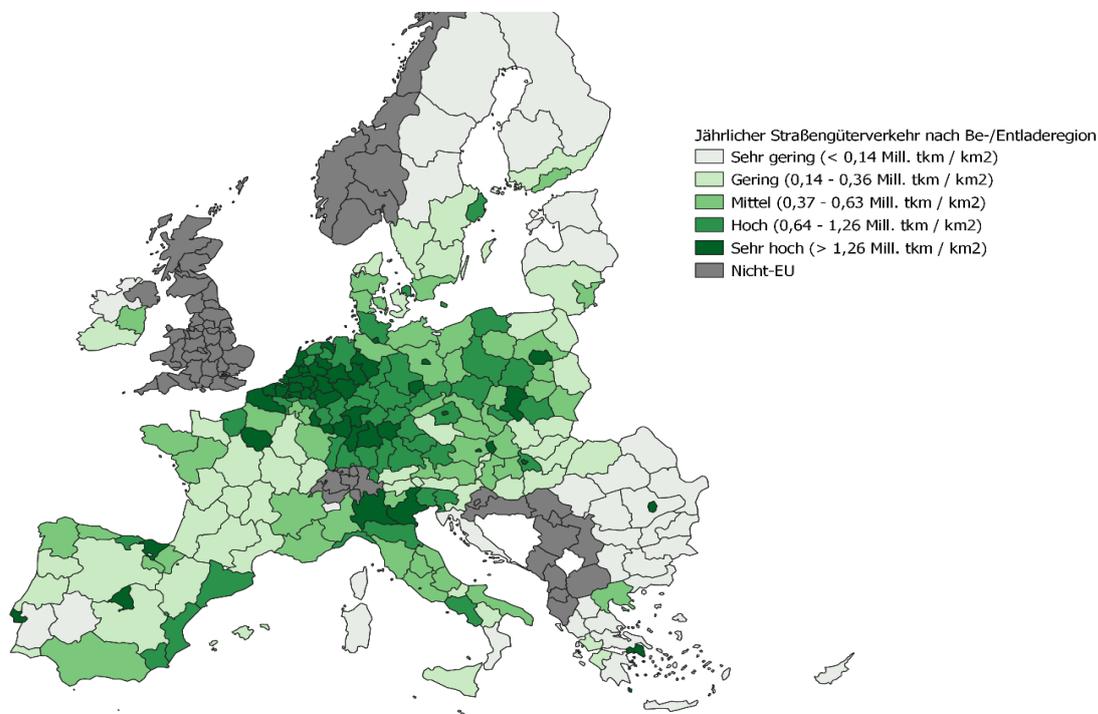
Der Mobilitätssektor war in Europa der historische Ausgangspunkt für Überlegungen zum Aufbau überregionaler Wasserstoff-Lieferketten. Von Anfang an im Zentrum stand die Brennstoffzellentechnologie. In der Wasserstoff-Brennstoffzelle wird Energie aus der chemischen Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in Strom umgewandelt. Brennstoffzellenfahrzeuge tanken daher Wasserstoff und nutzen den gewonnenen Strom als Antriebsenergie. Das ist jedoch bei weitem nicht die einzige Verwertungsform von Wasserstoff für den Fahrzeugantrieb. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren können Wasserstoff unmittelbar als Kraftstoff zu nutzen. Der Wasserstoff wird hierfür zuvor komprimiert oder verflüssigt. Alternativ kann grüner Wasserstoff auch mittelbar als Ausgangspunkt für die Herstellung klimaneutraler synthetischer Kraftstoffe zur Verkehrswende beitragen. Synthetische Kraftstoffe können dem Benzin für Ottomotoren beigemischt werden oder diese können mit geringem Aufwand auf die vollständige Verwendung synthetischer Kraftstoffe umgestellt werden. Die Einsatzmöglichkeiten der Technologien und die Konkurrenzsituation zu batterieelektrischen Fahrzeugen sind je nach Verkehrsträger unterschiedlich. Aufgrund des hohen Energiegehalts von Wasserstoff (im komprimierten Zustand) haben wasserstoffbasierte Antriebe in der Regel Reichweitenvorteile gegenüber batteriebetriebenen Fahrzeugen. Auch der Betankungsvorgang ist deutlich weniger zeitaufwändig.²² Diesen

²² VDI/VDE (2019). Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge - Bedeutung für die Elektromobilität. VDI/VDE-Studie Mai 2019.

Vorteilen steht jedoch ein deutlich geringerer Wirkungsgrad als bei Batteriefahrzeugen gegenüber. Eine Studie von Horváth & Partners geht von Durchschnittswerten von 25 bis 35 % aus, verglichen mit 70 bis 80 % bei batteriebetriebenen Fahrzeugen.²³

Im Straßenverkehr sehen Kostenanalysen dennoch Wettbewerbspotenziale für die Brennstoffzelle, allerdings vorwiegend bei schweren Fahrzeugen mit hohen Reichweitebedürfnissen. In diesem Segment kann sie die Vorteile der höheren Energiedichte und kürzeren Ladedauer gegenüber batterieelektrisch betriebenen Fahrzeugen am stärksten ausspielen.²⁴ Der **Schwerlastverkehr** ist damit ein naheliegendes Anwendungsgebiet. Auch hier sind regional variierende Nutzungspotenziale zu erwarten: Die Regionen partizipieren im unterschiedlichen Ausmaß an den wichtigen Transportrouten im innereuropäischen Güterverkehr. Ein direktes regionales Verbrauchspotenzial – im Sinne einer regionalen Verteilung der Treibstoffverbräuche durch Lkw – ist hier nicht messbar. Der Ort von Tankvorgängen wird statistisch nicht erfasst. Allerdings kann für regionale Logistik-Hubs, identifizierbar über die Menge an be- und entladener Fracht in einer Region, indirekt auch auf einen vergleichsweise hohen zukünftigen Bedarf an Wasserstoff-Tankstellen geschlossen werden. Wir verwenden daher als Indikator für die Intensität des regionalen Straßengüterverkehrs den Durchschnitt aus in der Region pro Jahr beladener und pro Jahr entladener Fracht (in Tonnen-Kilometern) gemäß Eurostat, in Relation zur Gesamtfläche der Region. Abbildung 5 stellt die regionale Verteilung dieses Indikators in Europa dar. Erwartungsgemäß zeigt sich hier eine große Ähnlichkeit zur Verteilung der industriellen Verwertungspotenziale (siehe Abschnitt 3.2.2). Entsprechend bewegt sich auch ihre Korrelation mit den regionalen EE-Strompotenzialen in einer vergleichbaren (positiven) Größenordnung (Korrelationskoeffizient: +0,32).

Abbildung 5: Intensität regionaler Straßengüterverkehr in 2019



Quelle: Eurostat (2022); eigene Darstellung

²³ Horváth & Partners (2019). Automobilindustrie 2035 – Prognosen zur Zukunft.

²⁴ Hydrogen Council (2020). Path to hydrogen competitiveness – a cost perspective. 20 January 2020.

Im **Schiffsverkehr** ergeben sich breitere Anwendungsspielräume. Batterieelektrische Antriebe sind hier auf längeren Strecken weitgehend unpraktikabel. Daher wird grüner Wasserstoff eine Schlüsselrolle bei der Dekarbonisierung dieser Verkehrsträger spielen. In der Schifffahrt stehen verschiedene Wasserstofftechnologien in direkter Konkurrenz. Neben Brennstoffzellen und der Entwicklung von synthetischen Schiffskraftstoffen wird hier auch die direkte Nutzung über Wasserstoff-Verbrennungsmotoren erforscht. Aktuelle Studien kommen zu dem Schluss, dass die Zukunft der Seeschifffahrt in einer Kombination aus verschiedenen klimaneutralen Kraftstoffen liegen wird, abhängig von den lokalen Produktionspotenzialen in den Hafenregionen und den zurückzulegenden Distanzen. Wasserstoffbasierten Kraftstoffen, insbesondere Ammoniak, wird dabei eine wichtige Rolle zukommen.²⁵ Nicht als Kraftstoff eingesetztes Ammoniak kann für die Weiterverarbeitung in der Düngemittelindustrie (siehe Abschnitt 3.2.1) Verwendung finden. Hafenregionen könnten so zukünftig als Standort für regionale H₂-Produktionsketten gleich in mehrerer Hinsicht Attraktivität entwickeln: für die Produktion von Schiffskraftstoffen, als auch für die Weiterverarbeitung von importierten Wasserstoff-Derivaten. Voraussetzung ist der Aufbau einer geeigneten Hafen-Infrastruktur (z.B. Ammoniak-Cracker). Als Indikator für die regionalen Verwertungspotenziale im Bereich Seeschifffahrt verwenden wir Zahlen zur jährlichen Menge an in regionalen Seehäfen be- und entladener Fracht, in Relation zur Gesamtfläche der Region. Nennenswerte Potenziale ergeben sich so nur für wenige Küstenregionen, vor allem an Nordsee und Mittelmeer. Die Korrelation zur regionalen Verteilung an EE-Strom-Potenzialen ist dennoch eindeutig positiv (Korrelationskoeffizient: +0,32), vor allem infolge der hohen Windkraftpotenziale in den Küstenregionen.

Im **Luftverkehr** schließlich wird grüner Wasserstoff als Grundbaustein für die Herstellung von synthetischem Kerosin zukünftig eine entscheidende Rolle spielen.²⁶ In Ermangelung praktikabler Alternativen kann das Ziel der Verringerung von Treibhausgasemissionen im Luftverkehr, zumindest auf längeren Strecken, nur durch die groß angelegte Substitution fossiler Brennstoffe durch synthetisches Kerosin erreicht werden, ergänzt durch die Verwendung von Biokraftstoffen. Als Indikator für die regionalen Potenziale bietet sich hier die Intensität der Flughäfenutzung in der Region an, gemessen am jährlichen Passagieraufkommen (incoming + outgoing) je km². Auch hierbei zeigt sich eine gewisse Korrelation zu den erzeugungsseitigen EE-Potenzialen (Korrelationskoeffizient: + 0,25).

3.2.4 Verwertung Gebäudesektor

Grüner Wasserstoff kann als Wärmequelle auch für die Raumbeheizung und Warmwasseraufbereitung in Wohnhäusern, Unternehmensniederlassungen und sonstigen Gebäuden eingesetzt werden. Innerhalb gewisser technischer Grenzen kann die bestehende Gasnetzinfrastruktur für den Transport des grünen Wasserstoffs zu den Wärmeverbrauchern genutzt werden (siehe Abschnitt 3.3.3). Der Einsatz von grünem Wasserstoff in der Raumwärmeversorgung steht jedoch in starker Konkurrenz zu anderen klimaneutralen Heiztechnologien. Dazu gehört vor allem die direkte Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien (Power-to-Heat) in Form von Wärmepumpen und Elektrodenkesseln. Hier sind prinzipiell Wirkungsgrade von nahezu 100 % bzw. im Falle von Wärmepumpen sogar weit über 100 % möglich, so dass die Power-to-Gas-Technologie in diesem Anwendungsbereich auch bei zukünftigen

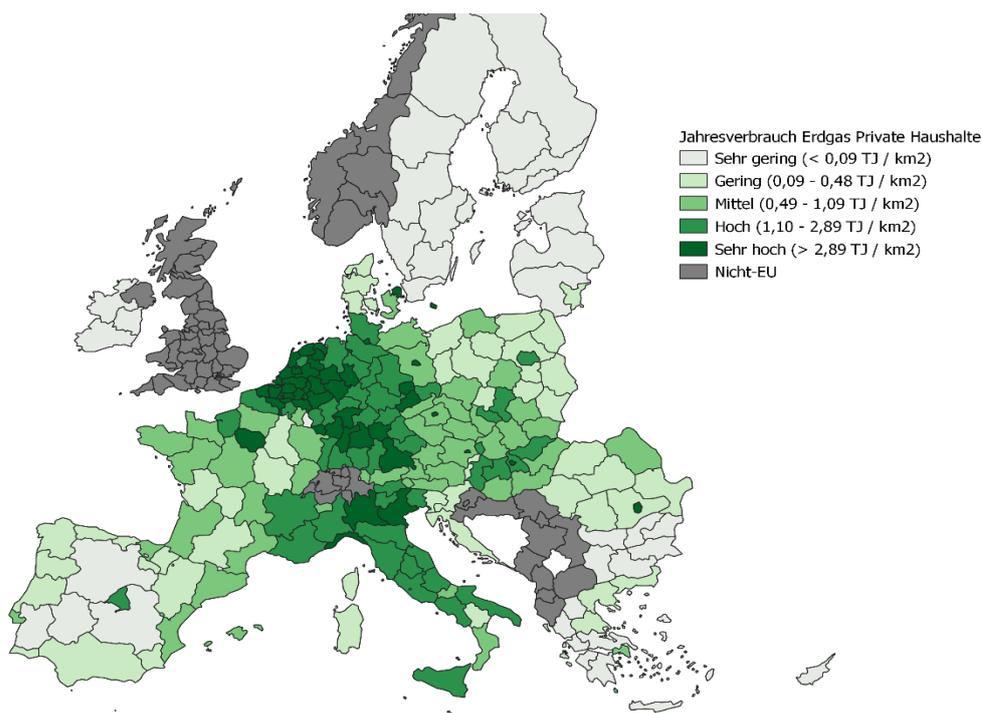
²⁵ Ics-shipping (2022). Fuelling the fourth propulsion revolution – an opportunity for all. May 2022. International Chamber of Shipping – In collaboration with Prof. Dr. Stefan Ulreich.

²⁶ IPP (2019). Potenzialstudie Wasserstoffwirtschaft. IPP ESN Power Engineering.

Effizienzsteigerungen deutlich im Schatten steht.²⁷ In diesem Sektor ist grüner Wasserstoff daher besonders interessant für eine Übergangsphase, in der es darum geht, den CO₂-Fußabdruck des europäischen Wärmesektors auf der Basis des aktuellen Bestands an Heiztechnologien möglichst schnell zu reduzieren.

Moderne Gas-Brennwertheizungen können relativ hohe Beimischungsquoten von Wasserstoff (gemäß dem Hersteller Vaillant bis zu 30%²⁸) vertragen. Verhältnismäßig große sektorale Verwertungspotenziale ergeben sich damit für Regionen, in denen Erdgasheizungen als Heiztechnologie besonders stark verbreitet sind. Der **regionale Erdgasverbrauch von Privathaushalten** ist hierfür ein guter Indikator. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der geschätzten Jahresverbräuche je km². Die Verbrauchszentren konzentrieren sich demnach weitgehend auf Mitteleuropa. In einigen Mitgliedstaaten sind Gasheizungen generell nur von untergeordneter Bedeutung für die Raumwärmegewinnung. Auch hier ergibt sich eine schwach positive Korrelation mit regionalen EE-Strompotenzialen (Korrelationskoeffizient: +0,37). Ähnliche Schätzwerte lassen sich auch für den regionalen Einsatz von **Erdgas bei der Beheizung von kommerziell genutzten Gebäuden** gewinnen. Hier stehen urbane Wirtschaftszentren als Großverbraucher im Regionalvergleich noch stärker im Fokus, davon abgesehen ist auch hier die Beziehung zu den regionalen EE-Potenzialen grundsätzlich positiv (Korrelationskoeff.: +0,32).

Abbildung 6: Schätzung regionaler Erdgasverbrauch Haushalte in 2019



Quelle: Eurostat (2022); eigene Regionalisierung nach der Methode von Sandoval (2021)²⁹

²⁷ Gerhardt, N., Bard, J., Schmitz, R., Beil, M., Pfennig, M., & Kneiske, T. (2020). Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung.

²⁸ BBB (2022). [Neue Heizgeräte versprechen Durchbruch beim Wasserstoff](#). BundesBauBlatt 1-2/2022.

²⁹ Sandoval, J.E. (2021). Estimation and simulation of gas demand time series for European NUTS-3 regions. Master's Thesis. University of Oldenburg.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit von grünem Wasserstoff im Gebäudesektor besteht in der zentralen Wärmeversorgung. In Blockheizkraftwerken kann elektrolytisch erzeugter Wasserstoff als Heizquelle für die Gewinnung von Fernwärme genutzt werden, je nach Technologie entweder allein oder in Kombination mit anderen nicht-fossilen (oder fossilen) Energieträgern. Auch hier ist der Wirkungsgrad der Elektrolyse für die Frage der Nutzungseffizienz von großer Bedeutung.³⁰ Der **Fernwärmeverbrauch** ist in Europa sehr ungleich verteilt. Fernwärme ist vor allem in Nord- und Mitteleuropa eine beliebte Heiztechnologie, im Süden dagegen kaum verbreitet. Auch hieraus folgt eine gewisse räumliche Kongruenz mit den Windkraftpotenzialen an Nord- und Ostseeküste, die Korrelation des regionalen Fernwärmeverbrauchs mit den örtlichen EE-Strompotenzialen ist ebenfalls positiv (Korrelationskoeff.: +0,31).

3.3 Lokale Rahmenbedingungen

3.3.1 Know-how und Wissensdiffusion

Die Verwirklichung der technischen Potenziale hängt nicht nur an Infrastrukturinvestitionen, sondern auch an der Verfügbarkeit von Humankapital. Die Umwandlungsprozesse und Anwendungstechnologien einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft definieren auf regionaler Ebene eine Vielfalt neuer Wissensanforderungen an die in den betroffenen Sektoren tätige Erwerbsbevölkerung. Durch die sektorübergreifende Anwendbarkeit von Wasserstoff kann das potenziell unterschiedlichste Berufsgruppen betreffen, und zwar sowohl auf leitender (Organisation) als auch auf operativer (technische Umsetzung) Ebene. Im Zuge dessen erwarten Arbeitsmarktexperten auch die Entstehung neuer Tätigkeitsfelder und Querschnittsfunktionen, für die gegenwärtig noch keine standardisierten Ausbildungsprogramme existieren. Bezdek (2019) entwickelt in seiner Analyse für den US-Arbeitsmarkt eine Liste von insgesamt 42 neuen wasserstoffbezogenen Berufsbezeichnungen. Sie sind vorrangig im Segment der Hochbezahlten angesiedelt und umfassen vorrangig, aber nicht nur, Berufe im Ingenieursumfeld sowie Aktivitäten im Bereich Projektmanagement/-überwachung.³¹

Für die als zukünftige Wasserstoffstandorte in Frage kommenden europäischen Regionen ist das ein wichtiger Fingerzeig. Regionen, die heute durch die Präsenz von Unternehmen und Forschungszentren schon über besonders viele Hochqualifizierte im technisch-naturwissenschaftlichen Bereich verfügen, besitzen einen Startvorteil. Die Wissensadoption dürfte hier leichter fallen, zudem gibt es ausreichende Multiplikatoren für die Wissensdiffusion innerhalb der Region.

Um hierzu auf NUTS-2 Ebene ein Bild zu gewinnen, ist zum einen die Betrachtung der Dichte der in einer Region tätigen Wissenschaftlern und Ingenieuren aufschlussreich (siehe Abbildung 7). Auch hier zeigen sich deutliche Unterschiede sowohl zwischen als auch innerhalb der Mitgliedstaaten. Als zusammenhängende Region herausragend sind vor allem der Benelux-Raum/Hauts-de-France sowie Teile Südwestens Deutschlands. Hinzukommen einige Metropolregionen in den Mitgliedstaaten. Die industriellen Zentren Europas sind hier insgesamt weitgehend stark vertreten, es besteht also eine gewisse räumliche Kongruenz zu den industrieseitigen Wasserstoffbedarfen. Ein zweiter wesentlicher Faktor sind regionale Qualifizierungsinitiativen im Hinblick auf Wasserstofftechnologien. Die in

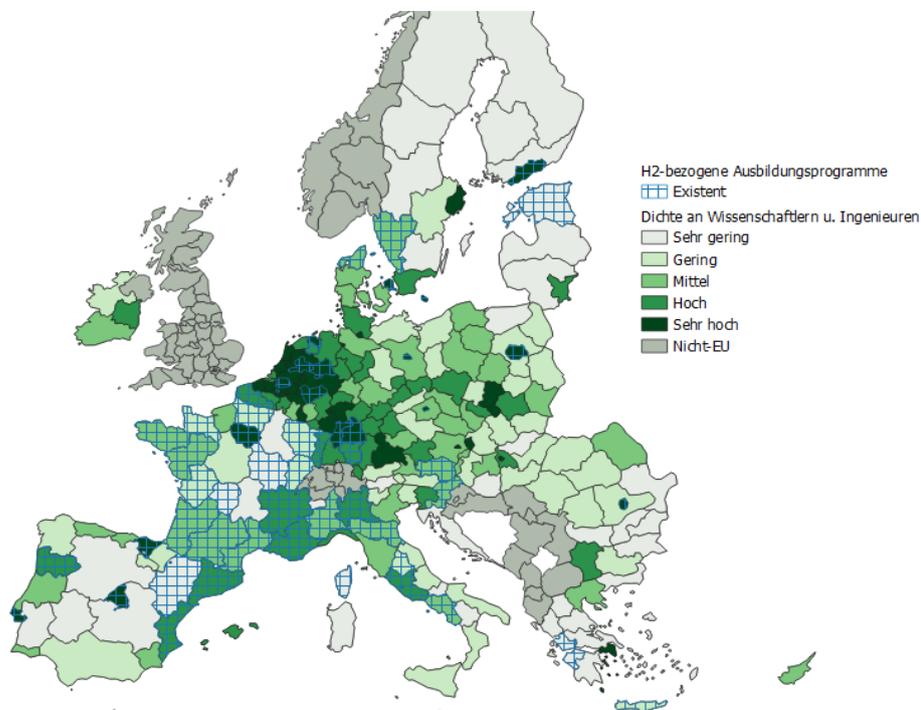
³⁰ Böhm, H., Moser, S., Puschnigg, S., & Zauner, A. (2021). Power-to-hydrogen & district heating: Technology-based and infrastructure-oriented analysis of (future) sector coupling potentials. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(63), 31938-31951.

³¹ Bezdek, R. H. (2019). The hydrogen economy and jobs of the future. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, 4, 1.

traditionell konzipierten Studien- und Ausbildungsgängen im ingenieurwissenschaftlich/-technischen Bereich vermittelten Inhalte werden zwar auch zukünftig relevant bleiben, können aber nur in begrenztem Maße die für eine Wasserstoffwirtschaft nötigen Spezialqualifikationen abdecken. Daher braucht es für Personen in diesem Tätigkeitsfeld zukünftig ergänzende Programme, die auf Wasserstofftechnologien zugeschnitten sind. Das umfasst neu designte Studien- und Ausbildungsgänge, aber auch Möglichkeiten zur Weiterbildung der Erwerbstätigen.

Das *Fuel Cells & Hydrogen Observatory* (FCH Observatory) sammelt Informationen zum gegenwärtigen Angebot an Bildungs-/Weiterbildungsprogrammen mit Schwerpunkt Wasserstofftechnologien in Europa.³² Darunter befinden sich Bachelor- und Masterstudiengänge, Workshops und Summer Schools. Insgesamt listet das FCH Observatory aktuell (Stand: 16.11.22) 486 solcher Angebote verteilt über Europa auf. In Abbildung 7 sind solche Regionen blau schraffiert, in denen mindestens eines dieser Angebote lokalisiert ist. Auch hier zeigt sich eine räumliche Konzentration, die aber nur begrenzt mit dem Muster an qualifizierten Beschäftigten korrespondiert. Ein räumlicher Schwerpunkt ist Frankreich und der Norden Italiens, während etwa in Deutschland bislang nur regional vereinzelt Angebote geschaffen wurden. In den östlichen EU-Regionen konzentrieren sich die Angebote weitgehend auf wenige Metropolregionen. Natürlich sagt eine solche Betrachtung noch nichts über die Qualität der einzelnen Programme aus. Sie macht aber deutlich, dass die Mitgliedstaaten und Regionen das Thema Wasserstoff qualifizierungsseitig bislang in sehr unterschiedlichem Maße ernst nehmen. Startvorteile, wie sie sich aus der gegenwärtigen Verteilung von qualifizierten Kräften für einzelne Regionen ergeben, sind kein Ruhekiten.

Abbildung 7: H₂ Know-how Indikatoren in Europa



Quellen: Eurostat (2022); FCH Observatory (2022a); eigene Berechnungen

³² FCH Observatory (2022a). Training programmes. Fuel Cells & Hydrogen Observatory. https://www.fchobservatory.eu/observatory/education-and-training/training-programmes?combine=&field_education_category_target_id=All&field_education_language_target_id=All&field_education_focus_target_id=All

3.3.2 Lokale Vorleistungen

Ein weiterer unterstützender Faktor ist die regionale Präsenz von Vorleistern. Sie erhöht nicht nur die Chancen auf regionale Multiplikatoreffekte im Hinblick auf Wertschöpfungs- und Beschäftigungseffekte. Sie verbessert auch die Möglichkeiten der Wissensdiffusion und Kooperation der Produktionsebenen im Bereich Forschung und Entwicklung erhöhen, was wiederum der Standortattraktivität zugutekommt. Ein wesentliches Bindeglied im Bereich der Erzeugung ist die Präsenz von Herstellern von Elektrolyseuren bzw. deren Komponenten. Externe Abhängigkeiten ergeben sich hier aus gesamt-europäischer Perspektive vor allem im Rohstoffbereich: Die Produktion der im Hinblick auf ihre schnellen Reaktionszeiten besonders geschätzten Polymermembran (PEM)-Elektrolyseure hängt am Zugang zu seltenen Metallen wie Platin und Iridium, die außerhalb Europas gefördert und verarbeitet werden.³³ Auf den im Entstehen begriffenen Märkten für Elektrolyseure selbst sind europäische Unternehmen dagegen stark vertreten. Für die Zukunft hat die EU im Mai 2022 in einer gemeinsamen Erklärung mit 20 Industrie-CEOs das Ziel einer Verzehnfachung der Kapazitäten in der Produktion von Elektrolyseuren bis 2025 ausgegeben. Hierzu sollen u.a. über „Elektrolyseur-Partnerschaften“ Hersteller entlang der gesamten Produktionskette zusammengebracht werden.³⁴

Für deren regionale Verortung liefern amtliche regionale Branchenstatistiken kaum Hinweise, dafür ist die Technologie zu neuartig und zu spezifisch. Das FCH Observatory bietet jedoch eine Liste europäischer Hersteller, die sich anhand ihrer (Haupt-)Standorte NUTS-2 Regionen zuordnen lassen.³⁵ Gemessen an der Zahl an vertretenen Regionalstandorten ragt in Europa Deutschland heraus, in mindestens 11 NUTS-2-Regionen sind nach Informationen des FCH Observatory entsprechende Unternehmen angesiedelt. Dies entspricht einem Anteil von 29% aller NUTS-2 Regionen in Deutschland, ebenfalls ein im Vergleich zu anderen Mitgliedstaaten hoher Wert (siehe Tabelle 1). Diese Standorte fokussieren sich längst nicht nur auf die großen industriellen Zentren, sondern sind quer über das Land verteilt. In Frankreich und Italien beschränkt sich die Präsenz hingegen stärker auf einzelne Industriestandorte (z.B. Île de France, Lombardei). Der osteuropäische Raum ist in der Liste nur mit einzelnen Standorten in Ungarn und Estland vertreten. Im Bereich der Hersteller von Anwendungstechnologien ergibt sich ein ähnliches Bild. So fungiert die Hälfte aller deutschen NUTS-2 Regionen als Standort von Brennstoffzellenproduzenten bzw. Komponentenherstellern. Produzenten in Frankreich und Italien sind auch in diesem Segment deutlich stärker auf regionale Zentren beschränkt.

³³ Ansari, D.; Grinschgl, J.; Pepe, J.M. (2022). Electrolysers for the hydrogen revolution- Challenges, dependencies and solutions. SWP Comment 2022/C 57, Stiftung Wissenschaft und Politik.

³⁴ ECH Alliance (2022). European electrolyzer summit – joint declaration. European Clean Hydrogen Alliance. Brussels, 5 May 2022.

³⁵ FCH Observatory (2022b). Company directory. Fuel Cells & Hydrogen Observatory. <https://www.fchobservatory.eu/observatory/technology-and-market/company-directory>

Tabelle 1: Regionale Standorte von Vorleistern im Ländervergleich

Land	Anzahl NUTS-2 Regionen	Anzahl Regionen mit Unternehmensniederlassungen		
		Herstellung Elektrolyseure/Elektrolyse-Stacks	Herstellung Brennstoffzellen	Herstellung Stack-Komponenten
Deutschland	38	11	19	11
Frankreich	27	3	8	3
Italien	21	1	3	1
Spanien	19	1	2	1

Quelle: FCH Observatory (2022b); eigene Regionszuordnung

3.3.3 Physische Infrastruktur

Der Aufbau einer physischen Wasserstoff-Infrastruktur ist Grundvoraussetzung für die Teilhabe von Regionen an zukünftigen europäischen Märkten. Entscheidend ist zunächst die Wahl der dominierenden Transportform. Der Transport per Schiff (entweder als verflüssigter elementarer Wasserstoff oder als chemische Verbindung wie Ammoniak) wird sich weitgehend auf den Import in die EU beschränken, da die energetischen Fixkosten der Umwandlung für den Transport sich erst bei großen Distanzen rentieren.³⁶ Für die rein lokale Verteilung von Wasserstoff (oder Wasserstoff-Derivaten) innerhalb von Industrieagglomerationen können zum Teil bereits bestehende lokale Pipelines zum Einsatz kommen. Für den interregionalen Transport innerhalb der EU muss die Infrastruktur dagegen erst noch geschaffen werden. Hier zeigen Analysen, dass für den innereuropäischen Transport signifikanter Mengen an Wasserstoff die Leitung durch Pipelines gegenüber der Alternative des LKW-Transports die effizientere Transportform darstellt.³⁷

Eine noch kontrovers diskutierte Frage ist, in welchem Ausmaß dies den Bau dezidierter Wasserstoff-Pipelines voraussetzt, und inwieweit eine Beimischung von Wasserstoff in das vorhandene Erdgasnetz technisch möglich und vertretbar ist. Klar ist: Für den Transport großer Mengen an Wasserstoff im Erdgasnetz ist ein teilweiser Austausch von Pipeline-Komponenten wie Kompressoren und Ventile notwendig. Denn aufgrund seiner besonderen Eigenschaften, vor allem seiner Reaktionsfreudigkeit, drohen ansonsten Schäden an den Leitungen und zu Effizienzverlusten führende Minderungen des Reinheitsgrads.³⁸ Darüber hinaus wird der Bau neuer Pipelines in solchen Regionen erforderlich sein, wo besonders große Wasserstoff-Flüsse zu erwarten sind. Die *European Hydrogen Backbone Initiative* hat eine Vision für ein europäisches Wasserstoff-Pipelinennetz entwickelt. Es soll bis 2030 zunächst wichtige Häfen, industrielle Cluster und Erzeugungsregionen miteinander verbinden, bis 2040 dann zu einem echten pan-europäischen Netzwerk heranwachsen.³⁹ Regionen, die bereits heute über Wasserstoff-Pipelines verfügen, besitzen für die zeitnahe Umsetzung solcher Visionen einen natürlichen Standortvorteil. Während sich das europäische Erdgasnetz über fast den gesamten EU-Raum erstreckt,

³⁶ Vgl. Ics-shipping (2022).

³⁷ Hydrogen Council (2020). Path to hydrogen competitiveness – a cost perspective. Report, January 20th, 2020.

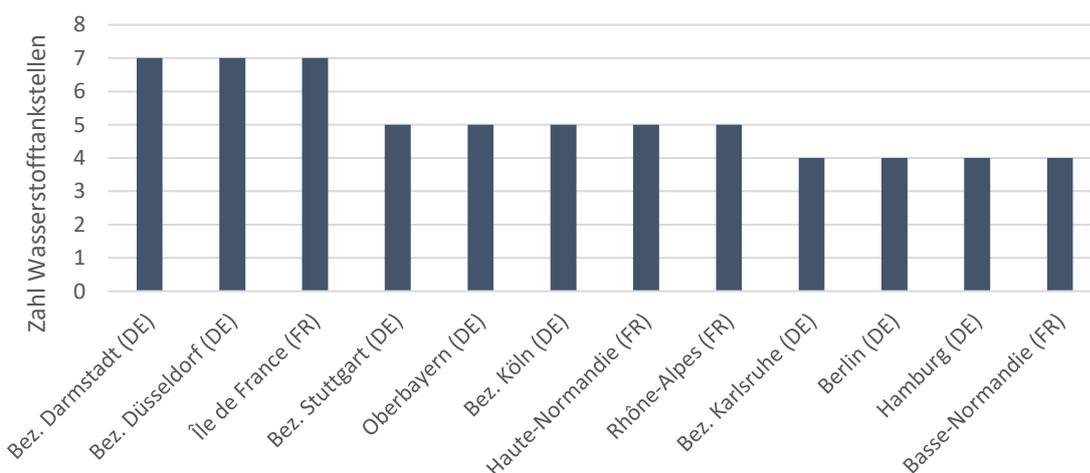
³⁸ EHB Initiative (2021). Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen. Report – June 2021. European Hydrogen Backbone Initiative.

³⁹ EHB Initiative (2022). European hydrogen backbone maps. European Hydrogen Backbone Initiative. <https://ehb.eu/page/european-hydrogen-backbone-maps>

verfügen gegenwärtig nur wenige Regionen über ein in Nutzung befindliches lokales Wasserstoff -Netz. Hierbei handelt es sich jeweils um intern durch die örtliche chemische Industrie genutzte Pipelines. Die umfangreichsten intraindustriellen Netze finden sich in den Benelux-Ländern, im Ruhrgebiet, in Sachsen-Anhalt und in der Region Auvergne-Rhône-Alpes.⁴⁰

Im Bereich der Anwenderinfrastruktur ist die Existenz von Wasserstofftankstellen ein kritischer Engpassfaktor im Aufbau von Lieferketten. Investitionen in den Tankstellenbau werden mittlerweile in einer Reihe von Mitgliedstaaten staatlich gefördert (siehe folgender Abschnitt). Für den Einsatz von brennstoffzellenbasierten Antrieben im Langstreckentransport in Europa ist die räumliche Verteilung dieser Investitionen entscheidend. Es reicht nicht aus, einige Agglomerationsregionen mit Tankstellen auszustatten, die Ausrüstung muss möglichst homogen in der Fläche erfolgen. Auch in dieser Hinsicht ist Europa noch weit von einer flächendeckenden Infrastruktur entfernt, wie eine Auswertung der von *glpautogas* bereitgestellten aktuellen Standort-Informationen zeigt.⁴¹ Die im Ländervergleich mit Abstand größte Zahl an Tankstellen findet sich in Deutschland und Frankreich. Die Versorgung konzentriert sich allerdings auch hier bislang auf einzelne Agglomerationsräume (siehe Abbildung 8). Im Süden Europas ist die Tankstellendichte generell deutlich niedriger. In den östlichen Mitgliedstaaten ist sie bislang auf wenige Metropolen beschränkt.

Abbildung 8: EU NUTS-2-Regionen mit der größten Zahl an Wasserstofftankstellen



Quelle: glpautogas (2022) – Stand: November 2022; eigene Regionszuordnung

3.3.4 Staatliche Marktanziehe

Neben der gezielten Förderung von Wasserstoffprojekten (siehe Kapitel 4) wird der Markthochlauf in Europa staatlicherseits mittlerweile durch eine Vielzahl an fiskalischen Instrumenten unterstützt. Auch hier werden verschiedene Stufen der Wertschöpfungskette adressiert, von der Erzeugung (Befreiung von staatlichen Strompreiskomponenten, CAPEX-Förderung Elektrolyseure in der Industrie) über die Distribution (Befreiung/Reduktion von Gasnetzentgelten, Investitionszuschüsse Wasserstofftankstellen) bis hin zu Anwendungstechnologien (Kaufprämien Brennstoffzellenfahrzeuge). In dieser Hinsicht ist die EU weit von einer Harmonisierung entfernt: Art und Intensität der gesetzten Anreize

⁴⁰ FCH Observatory (2022c). Hydrogen Pipelines. <https://www.fchobservatory.eu/observatory/technology-and-market/hydrogen-pipelines>

⁴¹ glpautogas (2022). Hydrogen stations in November 2022. <https://www.glpautogas.info/en/hydrogen-stations.html>

unterscheiden sich deutlich zwischen den Mitgliedstaaten. Abbildung 9 gibt einen Überblick über den Einsatz verschiedener Instrumente in den Mitgliedstaaten, gemäß Informationen aus dem Policy Monitoring des FCH Observatory.⁴² Dabei ist zu beachten, dass der Anwendungsbereich der jeweiligen Anreizinstrumente von Land zu Land sehr unterschiedlich abgegrenzt sein kann. Das betrifft zum einen die Frage, ob Regelungen auf Elektrolyse-Wasserstoff generell oder nur auf über den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen gewonnenen Wasserstoff Anwendung finden, und wie die Abgrenzung zu anderen Herstellungstechnologien erfolgt. Zum anderen sind die Maßnahmen teilweise befristet oder an bestimmte Verwertungsformen des Wasserstoffs geknüpft.

Diese Unterschiede machen die fiskalische Anreizpolitik im innereuropäischen Vergleich ebenfalls zu einem potenziell bedeutenden Standortfaktor beim Aufbau regionaler H²-Wertschöpfungsketten. Unmittelbar kostensenkende oder nachfragesteigernde Instrumente vergrößern die erwarteten betrieblichen Überschüsse und verkürzen den Amortisationszeitraum von H²-Investitionsprojekten, verbessern so auch ihre Finanzierungsmöglichkeiten. In welchem Ausmaß die unterschiedlichen nationalen Politiken im EU-Raum in diese Richtung wirken, kann nur eine Detailanalyse der nationalen Rechtsrahmen klären.

Abbildung 9: Existenz staatlicher Marktanreize in den Mitgliedstaaten



Quelle: FCH Observatory (2022d) – Stand: November 2022; eigene Darstellung

3.3.5 Gesamtbewertung nach Regionen

Die diskutierten Rahmenbedingungen sind insgesamt eher komplementär als substitutiv. Der Aufbau einer wertschöpfungsintensiven regionalen Wasserstoffwirtschaft setzt neben vorhandenen technischen Potenzialen idealerweise eine Kombination aus zielgerichteten Infrastrukturinvestitionen, der Präsenz von Vorleistern, einer förderlichen Anreizregulatorik und eines qualifizierten Pools an Erwerbstätigen voraus. Mangelnde Kapazitäten in der Transportinfrastruktur bspw. werden dabei kaum durch regionale Fachkräfteeexzellenz kompensiert werden können. Anreizinstrumente sind auf regionaler Ebene nur insoweit wirksam, als dass eine industrielle Basis als Akteur im Bereich Erzeugung und

⁴² FCH Observatory (2022d). Policy and RCS. Fuel Cells & Hydrogen Observatory. <https://www.fchobservatory.eu/observatory/policy-and-rs>

Verwertung existiert. Auch für Maßnahmen zur Verbesserung der Rahmenbedingungen gilt deshalb, dass sie möglichst parallel angegangen werden sollten. Welche europäischen Regionen dabei zukünftig die Rolle von Leuchttürmen einnehmen werden, wird der anstehende Transformationsprozess erst in einigen Jahren zeigen. Zumindest kann bereits jetzt auf Basis der Ausgangslage untersucht werden, welche NUTS-2-Regionen dafür die besten Startvoraussetzungen besitzen. Dazu können wir die in den Abschnitten 3.3.1.-4. diskutierten Regionalindikatoren heranziehen. Im Sinne der Komplementarität betrachten wir die Voraussetzungen in solchen Regionen als besonders günstig, die zugleich eine hohe Dichte an Wissenschaftlern und Ingenieuren, Niederlassungen von Vorleistern, Wasserstoff-Tankstellen und die Existenz staatlicher Marktanziehe (gemäß nationalem Rahmen) aufweisen. Tabelle 2 präsentiert die resultierende Liste an Regionen. Ein Großteil dieser Regionen hat zugleich auch sektorübergreifend hohe Verwertungspotenziale für Wasserstoff (siehe Abschnitt 3.2).

Tabelle 2: Regionen mit besonders günstigen Rahmenbedingungen

NUTS-ID	Name Region	Dichte Naturwiss. u. Ing.	Präsenz regionale Vorleister	Physische Infrastruktur	Staatliche Marktanziehe (national)
BE10	Région de Bruxelles	Sehr hoch	Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 1	Kauf FCEVs, Bau H2-Tankstellen
BE21	Prov. Antwerpen	Sehr hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 2; lokales Wasserstoffnetz	Kauf FCEVs, Bau H2-Tankstellen
DE11	Bezirk Stuttgart	Sehr hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 5	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
DE12	Bezirk Karlsruhe	Sehr hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 4	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
DE14	Bezirk Tübingen	Hoch	Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 2	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
DE30	Berlin	Sehr hoch	Elektrolyseure, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 4	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
DEA2	Bezirk Köln	Sehr hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 5	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
DEA3	Bezirk Münster	Hoch	Elektrolyseure, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 2	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse, Bau H2-Tankstellen
ES51	Cataluña	Hoch	Elektrolyseure, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 1	Kauf FCEVs
FR10	Île de France	Sehr hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 7	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse
FRK2	Rhône-Alpes	Hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 5; lokales Wasserstoffnetz	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse
FRL0	Provence-Alpes-Côte d'Az.	Hoch	Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 2; lokales Wasserstoffnetz	Kauf FCEVs, Strombezug Elektrolyse
ITC4	Lombardia	Hoch	Elektrolyseure, Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 2	Kauf FCEVs, Bau H2-Tankstellen
NL13	Drenthe	Hoch	Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 1	Bau H2-Tankstellen
NL22	Gelderland	Sehr hoch	Brennstoffzellen, Stack-Komp.	Wasserstoff-Tankstellen: 1	Bau H2-Tankstellen

Quellen: Eurostat (2022), FCH Observatory (2022a;b;c;d); glpautogas.info (2022); FCEVs: Brennstoffzellenfahrzeuge

4 Grüner Wasserstoff als Gegenstand von Regionalpolitik

4.1 Das Konzept der Hydrogen Valleys

Die Anwendung grünen Wasserstoffs in Europa ist über die Phase der rein technischen Erprobung mittlerweile hinaus. Bei gegenwärtigen Umsetzungsprojekten steht die Schaffung sogenannter „**Hydrogen Valleys**“ als Ziel im Zentrum. Dies meint im Wesentlichen den Aufbau regionaler Märkte der Wasserstoffherzeugung und -nutzung, wobei die Nutzung sich nicht auf Einzelabnehmer beschränkt, sondern sektorübergreifend angelegt ist. Der jüngste Hydrogen Valley Fortschrittsreport von Weichenhain et al. (2022) definiert vier konstituierende Merkmale von Hydrogen Valleys: Investitionen in bedeutender Größenordnung (mind. zweistellige Millionenbeträge), Belieferung mehrerer Sektoren, Abdeckung weiter Bereiche der Wertschöpfungsketten sowie eine klare räumliche Abgrenzung.⁴³ Insbesondere werden Hydrogen Valleys von reinen Pilot- und Demonstrationsprojekten unterschieden: Es geht nicht um die Demonstration der technischen Machbarkeit von Wasserstoff-Technologien, sondern um den nächsten Schritt in ihrer Implementierung: die Hochskalierung unter realen Marktbedingungen und den Aufbau wirtschaftlich tragfähiger Lieferketten. Räumliche Nähe wird dabei flexibel ausgelegt: Sowohl Kleinstregionen als auch Projekträume länderübergreifenden Ausmaßes können als Hydrogen Valleys firmieren. Weichenhain et al. (2022) unterscheiden in diesem Zusammenhang drei Archetypen von Hydrogen Valleys: lokale Valleys mit geringen Erzeugungskapazitäten und Mobilitätsfokus, lokale Valleys mit mittleren Erzeugungskapazitäten und Industriefokus, international angelegte Valleys mit hohen Erzeugungskapazitäten und Exportfokus.

Gemäß *Hydrogen Valleys Platform* ist ein Großteil der weltweiten Projekte aber bislang im europäischen Raum anzutreffen. Die Bedeutung, die dieses Konzept für die förderpolitische Debatte in Europa erlangt hat, zeigt sich auch daran, dass es zum Bestandteil der politischen Kommunikation der Europäischen Kommission geworden ist. So hat Kommissionspräsidentin Von der Leyen in ihrer *State of the Union Address 2020* den Aufbau von Hydrogen Valleys als einen wichtigen Verwendungszweck für die Gelder des *NextGenerationEU* Fonds hervorgehoben.⁴⁴ Zudem hat sich bereits 2019 ein *European Hydrogen Valleys S3 Partnership* europäischer Regionen formiert, der die Interessen in Europa führender H₂-Cluster beim Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft vertritt.⁴⁵ Ein Großteil der Projekte befindet sich gegenwärtig noch in der Konzeptionierung bzw. in der Frühphase der Implementierung. Die von der *Hydrogen Valleys Platform* aufgelisteten Projekte sind in ihrer Skalierung zudem höchst heterogen. Eine zentrale Gemeinsamkeit der aufgeführten Projekte ist ihre gemischte Finanzierung. Sämtliche Projekte aus dem EU-Raum, für die Informationen zur Finanzierung vorliegen, sehen eine Ko-Finanzierung aus öffentlichen Quellen (EU/national/regional) vor.⁴⁶ Damit geht es hier auch um die Frage der räumlichen Allokation von Steuergeldern.

Für die praktische regionalwirtschaftliche Analyse ist das Konzept der Hydrogen Valleys aufgrund seiner räumlichen Unschärfe kaum einsetzbar. Auf theoretischer Ebene ist es dennoch hilfreich, weil es den Blick auf die raumwirtschaftliche Dimension von Wasserstoff-Wertschöpfungsketten lenkt.

⁴³ Weichenhain, U.; Kaufmann, M.; Benz, A.; Matute Gomez, G. (2022). Hydrogen Valleys – Insights into the emerging hydrogen economies around the world. FCH 2 JU / Europäische Kommission / Inycom / Roland Berger.

⁴⁴ Von der Leyen, U. (2020). State of the Union Address 2020 by President von der Leyen at the European Parliament Plenary. 16 September 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_20_1655

⁴⁵ EHV-S3P (2020). European Hydrogen Valleys Partnership. Presentation, June 24th 2020. https://clustercollaboration.eu/sites/default/files/WYSIWYG_uploads/hydrogen_-_presentation_ehv-s3p_eaac_2020-0624.pdf

⁴⁶ CHP/MI (2022). Mission Innovation Hydrogen Valley Platform. Clean Hydrogen Partnership/Mission Innovation. <https://h2v.eu/hydrogen-valleys>

Wichtig ist das vor allem für die Frage der regionalen Skalierung: Werden Projekte zu groß für die regionalen Bedürfnisse, zieht der Markthochlauf zusätzliche Infrastrukturbedürfnisse nach sich. Investitionen werden dann von Produktion in Transport umgelenkt, der Aufbau von Produktionskapazitäten verzögert. Die Deckung der im Infrastrukturausbau entstehenden Kosten kann zudem die preisliche Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen, aus der Hochskalierung resultierende Kostenvorteile in der Produktion werden so in ihrer Wirkung reduziert. Eine ungünstige räumliche Verteilung von Fördergeldern kann so den Markthochlauf von Wasserstoff in Europa verzögern.

4.2 Förderpolitik in der EU

Neben den auf nationaler Ebene gesetzten Marktanreizen (siehe Abschnitt 3.3.4) und Maßnahmen im Bereich Investitionsförderung ist auch die EU-Ebene unmittelbar aktiv. Die Erforschung von Wasserstofftechnologien wird von der EU bereits seit Ende der 1980er Jahre gefördert. Im Jahr 2008 gründete die EU gemeinsam mit Vertretern von Industrie und Forschung das *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH JU), ein Public-Private-Partnership zur finanziellen Unterstützung nicht nur der Forschung, sondern auch von Vorhaben zur Umsetzung von Wasserstofferzeugung und -infrastruktur. Ein Fokus lag dabei auf Demonstrationsprojekten, die die Praxistauglichkeit von Wasserstoffanwendungen unter Beweis stellen sollten.⁴⁷ Im Zentrum stand die Brennstoffzelle als Wasserstoff-Verwertungstechnologie für den Mobilitätssektor und Rückverstromung. Ab 2014 wurde die Initiative in einer zweiten Phase unter dem Dach des EU-Forschungsrahmenprogramms *Horizon Europe* fortgeführt (FCH JU2). Inhaltlicher Schwerpunkt blieben Projekte im Bereich von Mobilitätsanwendungen und interner Verwertung im Energiesektor.⁴⁸

Mit der **Europäischen Wasserstoffstrategie** wurde 2020 der Blick auf die sektorübergreifende Verwendung von grünem Wasserstoff gerichtet und konkrete Ziele (40 GW Elektrolysekapazität in 2030) definiert.⁴⁹ Als Instrument zur besseren Koordination von Stakeholdern und Investitionsvorhaben wurde in diesem Zusammenhang die *European Clean Hydrogen Alliance* geschaffen. Im Februar 2021 wurde dann der *Clean Hydrogen Partnership* als Nachfolgeprogramm zu FCH 2 JU vorgestellt.⁵⁰ Ein erster Call for Proposal im Mai 2022 kam auf ein Ausschreibungsvolumen von 300 Mill. EUR. Mit diesen Geldern sollen mindestens fünf Hydrogen Valleys auf den Weg gebracht werden.⁵¹ Im Dezember 2020 haben sich zudem 22 EU-Mitgliedstaaten und Norwegen in einem Manifest zum Aufbau europäischer Wertschöpfungsketten im Bereich „Hydrogen Systems and Technologies“ verpflichtet, und als Instrument hierfür die Förderung von *Important Projects of Common European Interest* angekündigt.⁵² Als eine erste Technologiewelle *Hy2Tech* wurden im Juli 2022 41 solcher grenzüberschreitenden Projekte von der Europäischen Kommission genehmigt. Die Genehmigung einer zweiten Welle an Projekten *Hy2Use*

⁴⁷ De Colvenaer, B., & Castel, C. (2012). The Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) in Europe. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 7(1), 5-9.

⁴⁸ EU Funding Overview (2022). Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking. <https://eufundingoverview.be/funding/fuel-cells-and-hydrogen-2-joint-undertaking-other-organisations>

⁴⁹ European Commission (2020). A hydrogen strategy for a climate neutral Europe. 8 July 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296

⁵⁰ CHP (2022). European Partnership for Hydrogen Technology. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en

⁵¹ EURACTIV (2022). EU unveils €300 million plan to fund hydrogen research. March 15th, 2022. <https://www.euractiv.com/section/energy/news/eu-unveils-e300-million-hydrogen-research-priorities/>

⁵² EU-Countries/Norway (2020). Manifesto for the development of a European “Hydrogen Technologies and Systems” value chain. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/strategy/hydrogen/ipceis-hydrogen_en

mit einem Gesamtvolumen von über 5 Milliarden Euro, deren Fokus auf Anwendungstechnologien und Infrastruktur liegt, erfolgte nur kurze Zeit später im September 2022.⁵³

Die durch den Ukraine-Krieg befeuerte Energiekrise hat weitere Aktivitäten entfacht. Grüner Wasserstoff soll mittelfristig einen bedeutenden Beitrag zur Dekarbonisierung europäischer Prozessketten leisten. Als Bestandteil ihres **RePowerEU** Plans hat die Europäische Kommission im Mai 2022 erstmals konkrete Mengenziele für die Produktion grünen Wasserstoffs formuliert: Bis zum Jahr 2030 sollen 10 Millionen Tonnen erneuerbaren Wasserstoffs in der EU produziert werden, ergänzt durch Importe im Umfang von ebenfalls 10 Millionen Tonnen. Zu diesem Zweck strebt die Kommission u.a. eine Verdopplung der Zahl an Hydrogen Valleys in Europa an, durch verstärkte Förderaktivitäten unter dem Dach von *Horizon Europe*.⁵⁴ In ihrer *State of the Union Address 2022* kündigte von der Leyen zudem die Gründung einer Europäischen Wasserstoffbank an, die den Aufbau eines europäischen Wasserstoffmarktes mit weiteren 3 Milliarden Euro unterstützen soll.⁵⁵ Details zu diesem neuen Instrument sollen 2023 präsentiert werden. Hinzu kommt eine Vielfalt an Initiativen auf Ebene der Mitgliedstaaten und Regionen. Insgesamt ergibt sich so eine Vielzahl an unterschiedlichsten Kanälen, die mehr oder weniger unabhängig voneinander Implementierungsprojekte unter Einsatz öffentlicher Gelder auf den Weg bringen wollen. Ein Überblick über die Planungssituation für die nächsten Jahre ist deshalb für Steuerungszwecke wichtig.

4.3 Status Quo der Projektlandschaft

Der sprunghafte Ausbau der Förderkanäle für Praxis-Vorhaben hat an (fast) allen Enden Europas die Bildung von Projektkonsortien befördert. Ähnlich vielschichtig wie die Verwendungsmöglichkeiten von grünem Wasserstoff gestalten sich auch die gegenwärtigen Projektpläne und -ambitionen. Sie reichen von der Schaffung lokaler Elektrolyse-Kapazitäten für industrielle Einzelabnehmer bis hin zur Konzeptionierung paneuropäischer Lieferketten, einschließlich der dazugehörigen Transportinfrastruktur. Gerade die gegenwärtig in den Startlöchern stehenden Großprojekte werden angesichts der diskutierten Pfadabhängigkeiten mit großer Wahrscheinlichkeit die räumliche Struktur einer zukünftigen europäischen Wasserstoffwirtschaft über die nächsten Jahrzehnte prägen. Damit einher geht beträchtlicher Einfluss auf die Frage, ob und wann der Markthochlauf von grünem Wasserstoff gelingt. Die in Abschnitt 3 diskutierten regionalen Verwertungspotenziale werden hier eine Schlüsselrolle spielen: Sie entscheiden über die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Projekte in der anfänglichen Phase des Aufbaus überregionaler Transportnetze. Sie bestimmen damit auch, ob sich frühzeitig regionale Leuchttürme der Wasserstoffwirtschaft in Europa etablieren können, die dann eine überregionale Marktintegration durch Infrastrukturausbau incentivieren können.

Für die Bewertung staatlicher Förderpolitik bedeutet das, dass sie sich nur auf die Höhe der Fördervolumina konzentrieren sollte, sondern auch auf deren räumliche Verteilung. Durch die Vielzahl an fördernden Institutionen und Förderprogrammen ist das keine leichte Aufgabe. Es existiert gegenwärtig kein offizielles Zentralregister der öffentlich geförderten Wasserstoffprojekte in Europa. Allerdings pflegen einige Plattformen mehr oder minder umfangreiche Projekt-Datenbanken. Die mit Abstand

⁵³ European Commission (2022b). State Aid: Commission approves up to €5.2 billion of public support by thirteen Member States for the second Important Project of Common European Interest in the hydrogen value chain. Press release 21 September 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_5676

⁵⁴ Vgl. European Commission (2022a).

⁵⁵ Von der Leyen, U. (2020). State of the Union Address 2022 by President von der Leyen at the European Parliament Plenary. 14 September 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_22_5493

umfassendste Datenbank ist die *Hydrogen Projects Database* der International Energy Agency (iea).⁵⁶ Sie umfasst nach eigenen Angaben nahezu sämtliche seit dem Jahr 2000 bis dato bekanntgegebene Projekte, die der Gewinnung von Wasserstoff als Energiequelle und/oder Mittel zur Bekämpfung des Klimawandels dienen. Neben zahlreichen abgeschlossenen Kleinstprojekten der Vergangenheit finden sich hier auch die in jüngster Zeit angekündigten Großprojekte, einschließlich Angaben zu Zeitrahmen und Umfang der geplanten Erzeugungskapazitäten sowie den anvisierten Verwertungszwecken. Diese Projektliste wurden von uns abgeglichen mit zwei weiteren aktuellen Datenbanken, der Projektübersichten der *Mission Innovation Hydrogen Valley Platform*⁵⁷ und der *Hydrogen Project Visualisation Platform*⁵⁸ des Verbandes Europäischer Fernleitungsnetzbetreiber für Gas. Durch Bereinigung⁵⁹ der so gewonnenen Übersicht entstand eine Liste von insgesamt 262 Projekteinträgen, die im Folgenden von uns auf Basis ihres Elektrolyse-Standortes (gemäß verfügbarer Projektinformationen) einzelnen NUTS-2 Regionen zugeordnet wurden.

Abbildung 10 stellt die Verteilung der ermittelten regionalen Gesamtkapazitäten für den Planungszeitraum bis zum Jahr 2030 dar. Infolge der für die kommenden Jahre geplanten Hochskalierung ist sie ganz entscheidend durch die aktuell in der Planungsphase befindlichen Großprojekte geprägt. Über die technische Machbarkeit einzelner Vorhaben kann sie natürlich keine Auskunft geben. Insofern ist sie vor allem als Landkarte der Ambitionen zu lesen. Sie offenbart ein Europa höchst unterschiedlicher Geschwindigkeiten. Es sind markante regionale Erzeugungszentren auszumachen, die zugleich weitflächig über den EU-Raum verteilt sind. Als Zentren treten vor allem die iberische Halbinsel und der Nordseeraum hervor. Insgesamt nehmen Küstenregionen eine wichtige Rolle in den Planungen ein. Im Ländervergleich ist die geringe Präsenz Italiens, zentraler Teile Frankreichs sowie Süddeutschlands auf der Projekt-Landkarte augenfällig. Dies umfasst zahlreiche Regionen, für die überdurchschnittlich hohe Verwertungspotenziale und gute lokale Rahmenbedingungen diagnostiziert wurden (siehe Abschnitt 3), darunter industrielle Kernregionen wie *Ile-de-France* (FR) und *Lombardia* (IT). Auch die Projektplanungen für die östlichen Mitgliedstaaten bewegen sich insgesamt, mit Ausnahme weniger Großvorhaben, in einem vergleichsweise bescheidenen Rahmen.

Die besondere Rolle, die einzelnen Leuchtturmregionen bei der Formierung einer europäischen Wasserstoff-Ökonomie zukommen wird, verlangt eine separate Analyse. Wir betrachten hierzu als Untergruppe solche NUTS-2-Regionen, für die auf Basis des heutigen Kenntnisstandes bis 2030 jeweils Elektrolyse-Kapazitäten von mehr als 1 GW geplant sind. Dies gilt für 14 der 241 EU-Regionen. Diese 14 Regionen kommen auf eine geplante Gesamtkapazität von 55,3 GW. Dies würde allein schon mehr als die Hälfte der EU-weiten Kapazität ausmachen, wie sie nach Schätzungen der *European Clean Hydrogen Alliance* für die Erreichung des 10-Millionen-Tonnen-Ziels bis 2030 nötig sein wird.⁶⁰ Jeweils drei dieser im Folgenden als „**Fokusregionen**“ bezeichneten Gebiete sind in Dänemark und den Niederlanden lokalisiert, zwei in Spanien, sowie jeweils eins in Belgien, Deutschland, Frankreich, Portugal,

⁵⁶ iea (2022). Hydrogen Projects Database. International Energy Agency. Stand: November 2022. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>

⁵⁷ Vgl. CHP/MI (2022).

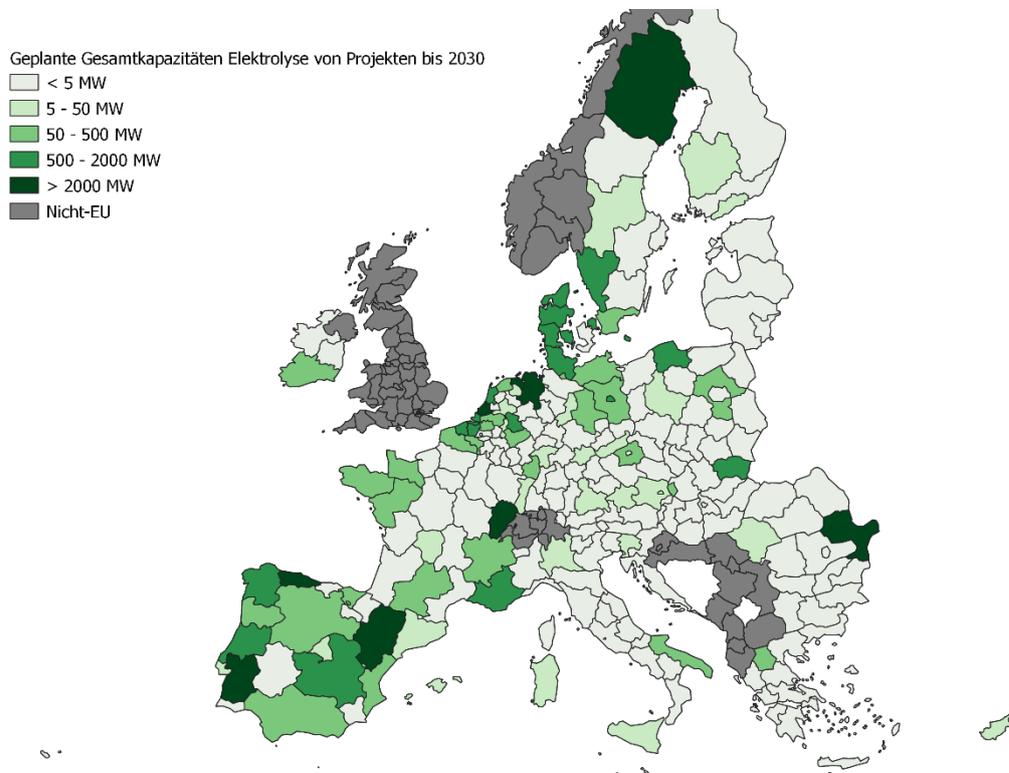
⁵⁸ ENTSOG (2022). Hydrogen Project Visualisation Platform. European Network of Transmission System Operators for Gas. <https://h2-project-visualisation-platform.entsog.eu/>

⁵⁹ Berücksichtigt wurden lediglich Projekte, die die Schaffung von Kapazitäten zur elektrolytischen Gewinnung von Wasserstoff vorsehen und hierfür klare Mengenziele und Zeitrahmen ausgegeben haben. Ausgeschlossen wurden darunter Kleinstprojekte (< 1 MW Elektrolyse-Kapazität) sowie Projekte, die ausschließlich die Rückverstromung als Verwertungsoption vorsehen. Zukünftige Offshore-Elektrolyse-Kapazitäten wurden mangels Zuordnungsmöglichkeit ausgeschlossen.

⁶⁰ ECH (2022). European Electrolyser Summit – Joint Declaration. Brussels, May 5th 2022. <file:///C:/Users/user/Downloads/signature%20Joint%20Declaration%20European%20Electrolyser%20Summit%20V9%20public.pdf>

Rumänien und Schweden. Eine Gegenüberstellung ihrer spezifischen Potenziale mit dem Rest der EU gibt Auskunft, welchen Beitrag die örtlichen Verhältnisse zum Markthochlauf in Europa leisten können.

Abbildung 10: Geplante Elektrolysekapazitäten bis 2030 in EU NUTS-2 Regionen

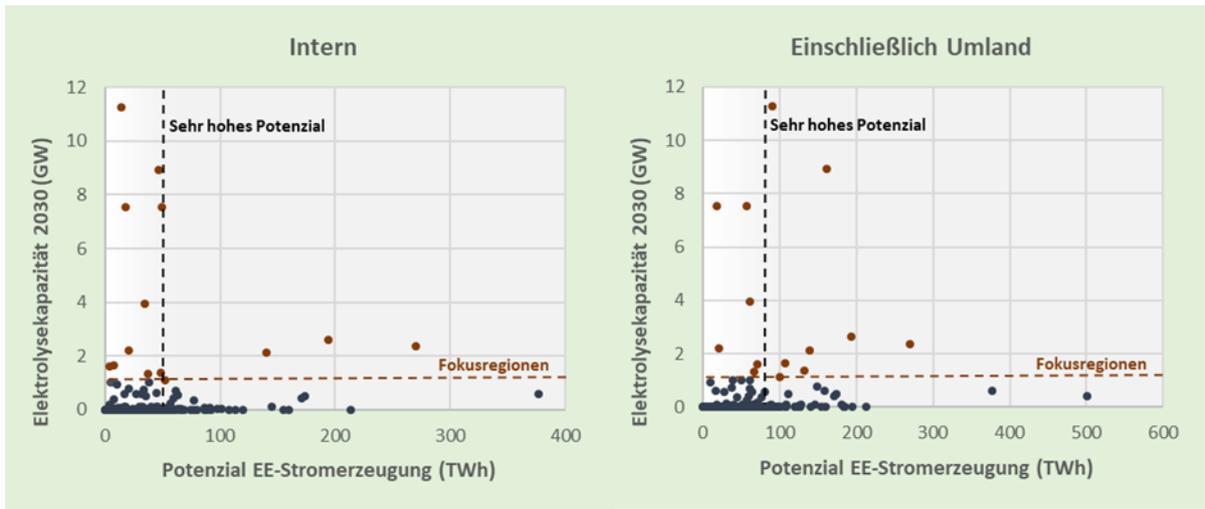


Quellen: IEA (2022); CHP/MI (2022); ENTSOG (2022); Stand: November 2022; eigene Berechnungen.

Ein Teil der Fokusregionen verfügt den Schätzungen von Kakoulaki et al. (2021) gemäß über im EU-weiten Vergleich sehr hohe Flächenpotenziale in der EE-Strom-Erzeugung (siehe Abbildung 11). In Relation zur Regionsfläche betrachtet gilt dies vor allem für die Nordsee-Anrainer, in Zusammenhang mit ihren hohen Windkraftpotenzialen. Dies gilt jedoch längst nicht für alle Fokusregionen. Auf der Nachfrageseite ist das Bild ebenfalls sehr heterogen. Ein klarer Zusammenhang zum Umfang an geplanten Kapazitäten ist in keinem Fall auszumachen (siehe Abbildungen A1-A3 im Anhang). Nur für fünf der 14 Fokusregionen werden bei Gegenüberstellung der Verwertungsformen überwiegend hohe bis sehr hohe regionsinterne Potenziale ermittelt. Diese erstrecken sich jeweils auf alle drei Anwendungssektoren (Industrie, Mobilität, Wärme/Gebäude). In den übrigen Fokusregionen sind die geschätzten Nachfragepotenziale wenn überhaupt nur in einzelnen Bereichen überdurchschnittlich, in manchen Regionen überwiegend gering. Tabelle A2 im Anhang fasst die regionsinternen Potenziale zusammen. Das gewonnene Bild bleibt grundsätzlich auch dann erhalten, wenn die Potenziale der jeweils umliegenden Regionen miteinbezogen werden.⁶¹

⁶¹ Wir ergänzen hierzu jeweils die Potenziale derjenigen Regionen, deren Distanz zur Betrachtungsregion sich in einem Radius von 100 km bewegt. Die interregionalen Distanzen haben wir dem Datensatz von [Kurbucz & Katona \(2022\)](#) entnommen.

Abbildung 11: Geplante Elektrolysekapazitäten vs. Erzeugungspotenziale EE-Strom



Quellen: Kakoulaki et al. (2021); IEA (2022); CHP/MI (2022); ENTSOG (2022); eigene Berechnungen. Sehr hohes Potenzial: 20%-höchste Werte unter den EU-Regionen.

Im Hinblick auf die lokalen Rahmenbedingungen (siehe Abschnitt 3.3) erscheinen die Fokusregionen in ihrer Gesamtheit kaum als außergewöhnlich. Besonderheiten können am ehesten noch bei den regionalen Branchenbeziehungen und der physischen Infrastruktur festgestellt werden. So sind in mindestens der Hälfte der Fokusregionen Hersteller von Brennstoffzellen angesiedelt, in mindestens einem Viertel Hersteller von Elektrolyse-Stacks/-Systemen, im EU-Vergleich jeweils deutlich überdurchschnittliche Werte (EU-weit 36 % bzw. 12 % aller Regionen). Die Fokusregionen weisen im Schnitt zudem eine größere Dichte an Wasserstofftankstellen auf als der Rest der EU, werden zum Teil unter geologischen Prämissen (Existenz Salzkavernen) auch als geeigneter Standort für die langfristige Speicherung großer Mengen an Wasserstoff betrachtet.⁶² Im Hinblick auf die Fachkräfteverfügbarkeit und die Anreizregulatorik zeigen die Fokusregionen als Gruppe dagegen keine systematisch besseren regionalen Bedingungen.

Die gegenwärtig als wichtige Standorte für die Wasserstoff-Gewinnung auserkorenen Regionen sind somit aus gesamteuropäischer Perspektive nur in Teilen für ihre Rolle prädestiniert. Insbesondere zeigt sich in einigen Fällen eine Kluft zwischen der herausgehobenen Position als Erzeugungsstandort und der zu erwartenden Bedeutung als Abnehmerregion, auch bei Einbeziehung des in der regionalen Umgebung vorhandenen Potenzials. Als Erklärung für dieses Muster kommen – neben allgemeinen regionalen Kostenunterschieden - vor allem weiche Faktoren in Frage: Unterschiedliche Ausrichtung unternehmerischer Initiative, regionale Stakeholder-Netzwerke, und nicht zuletzt das politische Backing auf regionaler und nationaler Ebene. Der Preis einer solchen Ausrichtung ist, dass der überregionale Transport von Wasserstoff bei vielen Großprojekten bereits in der Anfangsphase Teil des Geschäftsmodells sein müssen wird, einschließlich der Schaffung dafür notwendiger Kapazitäten.

⁶² Małachowska, A., Łukasik, N., Mioduska, J., & Gębicki, J. (2022). Hydrogen Storage in Geological Formations—The Potential of Salt Caverns. *Energies*, 15(14), 5038.

5 Implikationen für die europäische Politik

5.1 Steuerungsbedarf

Bei Umsetzung der im Abschnitt zuvor analysierten Projektpläne wäre der Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft zunächst nur durch wenige Fokusregionen geprägt, die grünen Wasserstoff im nennenswerten Ausmaß bereitstellen. Im Hinblick auf bestehende Größenvorteile in der Erzeugung erscheint das grundsätzlich auch sinnvoll. Die Auswahl dieser Regionen lässt sich jedoch nur teilweise durch überdurchschnittliche regionale Potenziale rechtfertigen, sowohl angebots- als auch nachfrage-seitig. Die überregionale Distribution des erzeugten Wasserstoffs wird in einigen Fällen daher schon in der Frühphase Teil des Wirtschaftsplans sein müssen. In vielen, durch eine besonders günstige Kombination an Potenzialen gekennzeichneten europäischen Regionen (siehe Kapitel 3), sind bislang andersherum kaum nennenswerte Projektaktivitäten festzustellen. In Abwesenheit einer paneuropäischen Transportinfrastruktur besteht so die Gefahr, dass bestehende Skalierungspotenziale nicht zeitnah ausgeschöpft werden, die eingangs diskutierte Henne-Ei-Problematik im Infrastrukturausbau damit ungelöst bleibt. Der Aufbau von in der Konkurrenz der Energieträger preislich wettbewerbsfähigen Wasserstoff-Lieferketten in Europa droht sich so zu verzögern. Die EU kann es sich aber nicht leisten, Zeit zu verlieren, und das nicht nur mit Blick auf die selbstgesetzten Ziele. Der Aufbau von Importkanälen aus Drittstaaten wird parallel vorangetrieben. Aus Regionen wie Nordafrika oder Südamerika importierter grüner Wasserstoff wird zwar durch den aufwendigen Transport kostenseitig belastet, dem stehen jedoch produktionsseitig die besonders günstigen natürlichen Bedingungen für die Gewinnung von EE-Strom gegenüber. Und auch für den Langstreckentransport von Wasserstoff per Schiff sind zukünftig über eine Kombination aus innovativen Konversionstechnologien deutliche Kostensenkungen zu erwarten.⁶³

Die EU muss deshalb aufpassen, bei einem wichtigen Baustein des sektorübergreifend integrierten Energiesystems der Zukunft erzeugungsseitig nicht schon in der Frühphase den Anschluss zu verlieren. Das hätte nicht nur industriepolitisch mit Blick auf die entgangene Wertschöpfung und Beschäftigung negative Konsequenzen. Es droht auch die Entstehung neuer externer Abhängigkeiten, von denen man sich Europa im Zuge der Dekarbonisierung eigentlich befreien wollte. Die Entscheidungsträger in der EU und den Mitgliedstaaten sind deshalb gut beraten, die Förderpolitik im Bereich grünen Wasserstoffs noch konsequenter am Ziel der Wettbewerbsfähigkeit auszurichten. Dazu gehört zum einen die Ermutigung von integrierten Projekten in räumlicher Nähe zu zukünftigen europäischen Verwertungszentren: Nur wenn die raumökonomischen Vorteile geringer Distanz wirklich ausgeschöpft werden können, werden „Hydrogen Valleys“ ihrem Namen gerecht. Zum anderen zwingt die derzeitige Projektlandschaft die Entscheidungsträger, den Aufbau der Infrastruktur und die Harmonisierung regulatorischer Rahmenbedingungen für die Bildung länderübergreifender Märkte noch entschiedener anzugehen. Hierzu stehen eine Reihe von Instrumenten bereit, die in Teilen schon als Vorschläge von der Europäischen Kommission in den EU-Gesetzgebungsprozess eingebracht wurden.

⁶³ Vgl. Hydrogen Council (2020).

5.2 Instrumente

Angebotsseitig: Standards und Zertifizierung als Marktsignale

Grüner Wasserstoff aus Europa nur dann zeitnah wirtschaftlich, wenn die Nachhaltigkeitsvorteile heimischer Wasserstofferzeugung aus regenerativen Quellen auch am Markt sichtbar werden. Mit Blick auf CO₂-Emissionen: entsprechend Preissignale bereits sichergestellt, aber zukünftige Preisentwicklung unsicher. Die Signale beschränken sich zudem auf innereuropäische CO₂-Emissionen entlang der Prozesskette. Um ausreichend Investitionsanreize zu schaffen, Legitimation und regulatorisches Commitment wird ergänzend durch Definition EU-weit verbindlicher Standards für nachhaltig erzeugten Wasserstoff und deren Zertifizierung, unter Einbeziehung möglichst der gesamten Lieferkette. Im Rahmen ihres Entwurfs einer *Richtlinie über gemeinsame Vorschriften für die Binnenmärkte für erneuerbare Gase und Erdgas sowie Wasserstoff* verweist die Europäische Kommission auf eine in der vorgeschlagenen Revision der Erneuerbare-Energien-Richtlinie vorgenommene Definition sogenannten „*erneuerbaren Wasserstoffs*“. Danach wird erneuerbarer Wasserstoff als solcher Wasserstoff definiert, der seinen Energiehalt aus nicht-biogenen erneuerbaren Quellen zieht und gegenüber fossilen Kraftstoffen eine Reduktion der THG-Emissionen um mindestens 70% erzielt.⁶⁴ Die Methodik zur Berechnung dieser Einsparungen ist jedoch noch nicht definiert. Insbesondere ist die wesentliche Frage ungeklärt, welche Teile der Produktions- und Lieferkette hierbei erfasst und welche Informationsgrundlagen jeweils herangezogen werden sollen. Auch der daran anschließende Prozess der Zertifizierung muss noch ausgestaltet werden. Hier sollte die Europäische Kommission zeitnah Vorschläge unterbreiten und mit den relevanten Stakeholdern aus der Industrie abstimmen. Insbesondere sollte mit Blick auf die seit Veröffentlichung des Gesetzesentwurfs deutlich verschlechterte Gas-Versorgungslage kritisch diskutiert werden, ob sogenannter „low-carbon“- Wasserstoff zukünftig als ergänzende Option für Europa eine Rolle spielen kann. Damit ist Wasserstoff aus nicht-erneuerbaren Energiequellen gemeint, der durch Maßnahmen wie CO₂-Abscheidung ebenfalls auf eine THG-Reduktion von mindestens 70% gegenüber herkömmlichen Technologien kommt. Um dem möglichen Beitrag von grünem Wasserstoff nicht nur zur Bekämpfung des Klimawandels, sondern auch zur Unabhängigkeit Europas von Produzenten fossiler Rohstoffe Rechnung zu tragen, wäre es angebrachter, Nachhaltigkeitsstandards generell an die Herkunft aus erneuerbaren Quellen zu binden.

Nachfrageseitig: Instrumente zur Risikoabsicherung als Investitionsanreize

Die Realisierung regionaler Verwertungspotenziale hängt entscheidend an der Bereitschaft der Akteure auf der Nachfrageseite, in den Umstieg auf Wasserstoff-Technologien zu investieren. Unsicherheiten über die zukünftige regulatorische Behandlung von grünem Wasserstoff, aber auch hinsichtlich der CO₂-Bepreisung in Europa, stellen ein Hemmnis bei solchen langfristigen Investitionsentscheidungen dar. Solche Hemmnisse durch Instrumente zur Risikoabsicherung abzubauen, kann auch zu einer raumwirtschaftlich günstigeren Verteilung von Leuchtturm-Projekten in Europa beitragen. Denn bei grundsätzlich offenem Zugang zu solchen standardisierten Instrumenten verlieren politisches Backing und regionale Stakeholder-Netzwerke als alternative Absicherungsmechanismen an Bedeutung. Insbesondere ein staatlicherseits auf Vertragsbasis garantierter fixer CO₂-Preis erlaubt es Investoren, zukünftige Kostenersparnisse aus der CO₂-Vermeidung als wesentlichen Bestandteil des Investitionsertrags besser zu kalkulieren. Der Staat kompensiert dazu über einen vereinbarten

⁶⁴ European Commission (2021). Proposal for a directive of the European Parliament and the Council on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen. COM/2021/803 final.

Zeitraum den Differenzbetrag zwischen dem vertraglich fixierten Preis und dem jeweils herrschenden Marktpreis im Emissionszertifikatehandel. Mit Rücksicht auf zu erwartende langfristige Preisanstiege im Zertifikatehandel kann die Kontraktdauer zeitlich begrenzt, staatliche Budgetrisiken so minimiert werden.

Marktintegration: Einheitliche Wettbewerbsbedingungen und konsequenter Infrastrukturausbau

Um trotz unterdurchschnittlicher lokaler Absatzpotenziale in einigen Leuchtturm-Regionen den Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft voranzutreiben, bedarf es verstärkter Anstrengungen zur Förderung der überregionalen Marktintegration. Das setzt zum einen die Existenz ausreichender Investitionsanreize für Infrastrukturbetreiber voraus. Im Wasserstoff-Transport betrifft das sowohl die Umrüstung von Teilen des Erdgas-Netzes als auch den ergänzenden Neubau von Wasserstoff-Pipelines. Um Planungs- und Genehmigungsverfahren zu verkürzen und Baukosten zu sparen, sollten bestehende Gasnetze umgerüstet werden können, wo immer dies technisch möglich ist. Finanzierungsbarrieren im Zusammenhang mit Entflechtungsanforderungen sollten im Interesse bezahlbarer Transportkosten in der Startphase so niedrig wie möglich gehalten werden, ohne die Gefahr der Anbieterkonzentration außer Acht zu lassen. Regulatorische Hemmnisse im grenzüberschreitenden Transport sollten zugleich abgebaut, ein diskriminierungsfreier Zugang für alle Anbieter von als nachhaltig zertifizierten Wasserstoff sichergestellt werden. Zudem sollten die Wettbewerbsbedingungen für Wasserstoff-Lieferketten europaweit möglichst harmonisiert werden. Das betrifft die abgabenbezogene Belastung des Strombezugs von Elektrolyseuren, aber auch die Frage der Rabattierung von Entgelten der Netznutzung im Wasserstoff-Transport durch Elektrolyseure und Speicherbetreiber. Ziel sollte die Schaffung einer europäischen Arbeitsteilung sein, die möglichst wenig von den Aktivitäten einzelner Leuchtturm-Projekte und ihrer Pfadabhängigkeiten, und möglichst stark von den echten komparativen Vorteilen der Regionen geprägt ist.

6 Fazit

Für den Einstieg in eine europäische Wasserstoffwirtschaft ist der zügige Aufbau von Märkten für grünen Wasserstoff essenziell. Damit dies gelingt, müssen Größenvorteile in der Wasserstoff-Erzeugung ausgeschöpft und Anreizhemmnisse im Infrastrukturausbau überwunden werden. Regionalen Erzeugungs- und Verwertungspotenzialen kommt dabei eine Schlüsselrolle zu: Sie sind in Abwesenheit einer überregionalen Infrastruktur der ökonomische Impulsgeber für den Kapazitätsaufbau in allen Teilen der Lieferkette, und damit auch für die zukünftige Entstehung überregionaler Märkte. Der Erfolg der Transformation wird damit nicht nur bestimmt durch Technologie und betriebswirtschaftliche Optimierung, sondern ganz entscheidend auch durch die raumwirtschaftlichen Verhältnisse in Europa. Erzeugung, Infrastruktur und Anwendungstechnologien müssen nicht nur parallel ausgebaut, der Ausbau muss auch räumlich synchronisiert werden.

Dieser cepInput leistet einen Beitrag zum näheren Verständnis dieses Problems, indem er eine erste umfassende Analyse der Erzeugungs- und Verwertungspotenziale von grünem Wasserstoff auf regionaler Ebene in Europa vorlegt. Aus der Menge an Detailergebnissen können zwei zentrale Erkenntnisse hervorgehoben werden. Erstens lässt sich trotz der Vielfalt an regionalen Sonderfaktoren eine gewisse Kongruenz zwischen der räumlichen Verteilung der EE-Potenziale und der Nutzungspotenziale für grünen Wasserstoff in Europa feststellen, und das quer über alle potenziellen Anwendungsfelder. Regionen, die aufgrund ihrer Wirtschaftsstruktur als zukünftiger Wasserstoff-Abnehmer prädestiniert sind, weisen im Schnitt auch ein relativ hohes Flächenpotenzial für die Gewinnung erneuerbarer Energien

auf. Dieser Zusammenhang trifft nicht auf alle Regionen zu, in jedem Fall aber auf die wirtschaftsstarke Nordsee-Anrainer sowie einige Mittelmeerregionen. Auch im Hinblick auf die gesellschaftlich-infrastrukturellen Rahmenbedingungen lässt sich für einige dieser Regionen eine besonders günstige Ausgangslage diagnostizieren. Das ist eine gute Nachricht für den Aufbau regionaler Lieferketten, da der Transport über größere Distanzen input- (Strom) wie outputseitig (Wasserstoff) wirtschaftlich und energiesystemisch große Herausforderungen mit sich bringen wird.

Zweitens ragen in der räumlichen Verteilung der gegenwärtig in Planung befindlichen Hydrogen Valleys einzelne Regionen im Hinblick auf die geplanten Elektrolysekapazitäten deutlich heraus. Diese herausragende Stellung geht aber längst nicht in allen Fällen mit überdurchschnittlichen regionalen Erzeugungs- oder Verwertungspotenzialen einher, auch nicht bei Einbeziehung umliegender Regionen. Für die anstehende, entscheidende Phase des Kapazitätsaufbaus besteht somit das Risiko, dass der Pfad Richtung Wirtschaftlichkeit teilweise durch überregionale Infrastrukturrestriktionen ausgebremst wird. Da in diesen Projekten auch in erheblichem Maße öffentliche Gelder investiert werden, sollte die europäische Politik ihre Steuerungsaufgabe wahrnehmen. Eine bessere räumliche Koordination und konsequentere Ausrichtung der gegenwärtig über verschiedenste Kanäle geförderten Projekte ist erforderlich.

Die überregionale Integration der entstehenden Märkte stellt beim Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft den nächsten Schritt dar. Sie ist Voraussetzung dafür, dass sich eine effiziente räumliche Arbeitsteilung in der Erzeugung und Nutzung von grünem Wasserstoff etablieren kann. Nur so werden europäische H₂-Lieferketten gegenüber den parallel aufgebauten Import-Kanälen konkurrenzfähig sein. Für die Beschleunigung dieses Prozesses sind bereits heute die richtigen politischen Impulse gefragt. Auch hierbei ist ein wertschöpfungskettenorientierter Ansatz erforderlich: Die Regulatorik sollte Erzeugung, Verwertung und Infrastruktur gleichermaßen in den Blick nehmen und anreiztechnisch konsistent behandeln. Europäische Harmonisierung ist hier wichtig, um keine Verzerrung in der Allokation zu erzeugen. Das betrifft die abgabenbezogene Belastung von Elektrolyseuren und Speicherbetreibern genauso wie die Regulierung zukünftiger Wasserstoffnetze. Die Europäische Kommission hat in ihren jüngsten Gesetzesentwürfen bereits einige Vorschläge in dieser Richtung vorgelegt, in vielen Fällen besteht aber noch Konkretisierungs- und Abstimmungsbedarf.

Für die Zukunft setzt eine verbesserte raumwirtschaftliche Steuerung auch eine Ausweitung der Informationsbasis voraus. Das betrifft die Schätzung regionaler Erzeugungskosten und Mengenprognosen genauso wie die Höhe der Kosten des interregionalen Wasserstoff-Transports. Dies erfordert zum einen detaillierte Bottom-up Analysen der kleinräumiger Potenziale als Ergänzung zu den amtlichen Regionaldaten. Zum anderen sollte die Planung der innereuropäischen Transport-Infrastruktur räumlich und kapazitätsbezogen konkretisiert werden, um die aus räumlicher Distanz resultierenden Kosten näher bestimmen zu können.

7 Anhang

7.1 Datenbasis

Tabelle A 1: Übersicht Datenquellen

Kategorie	Indikator	Erklärung	Zeitbezug	Einheit	Quelle	URL
	Kapazitäten Elektrolyse 2030	Summe geplante Elektrolysekapazitäten bis 2030	Planungen bis 2030 (Stand: November 2022)	MW	Eigene Regionszuordnung, basierend auf IEA (2022); CHP/MI (2022); ENTSOE (2022)	..
Rahmenbedingungen						
Know-how	Dichte Naturwiss. u. Ing.	Dichte Naturwiss. u. Ing.	Jahr 2019	Zahl Besch. / km ²	Eurostat (2022)	Link
	H2-Ausbildungsprogramme	Existenz von Ausbildungsangeboten	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
Lokale Vorleistungen	Herstellung Elektrolyseure/Elektrolyse-Stacks	Präsenz Hersteller in der Region	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
	Herstellung Brennstoffzellen	Präsenz Hersteller in der Region	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
	Herstellung Stack-Komponenten	Präsenz Hersteller in der Region	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
Infrastruktur	Wasserstofftankstellen	Zahl Wasserstofftankstellen	Stand: November 2022	Zahl	glpautogas (2022)	Link
	Wasserstoffpipelines	Existenz von Wasserstoffpipelines	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
Staatliche Marktanziehe	Kaufprämien oder Steuerbefreiung FCEVs	Existenz Förderinstrument	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
	CAPEX-Zuschüsse Wasserstofftankstellen	Existenz Förderinstrument	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
	CAPEX-Zuschüsse Wasserstoffproduktion	Existenz Förderinstrument	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
	Reduktion / Befreiung Gasnetzentgelte	Existenz Förderinstrument	Stand: November 2022	Ja/Nein	FCH Observatory (2022)	Link
Potenzialindikatoren						
Erzeugung	Erzeugungspotenzial EE-Strom	Jährliches Erzeugungspotenzial	..	TWh	Kakoulaki et al. (2021)	..
Gebäude	Verbrauch Fernwärme	Jahresverbrauch	Jahr 2019	TJ	Eigene Regionalisierung basierend auf Eurostat nach der Methode von Sandoval (2021)	..
	Gasverbrauch: Haushalte	Jahresverbrauch	Jahr 2019	TJ	Eigene Regionalisierung basierend auf Eurostat nach der Methode von Sandoval (2021)	..
	Gasverbrauch: Service-Sektor	Jahresverbrauch	Jahr 2019	TJ	Eigene Regionalisierung basierend auf Eurostat nach der Methode von Sandoval (2021)	..
Industrie	Verbrauch Prozesswärme	Jahresverbrauch	Jahr 2019	TJ	Eigene Regionalisierung auf Basis nationaler Energieverbräuche und regionaler Beschäftigungszahlen der Industriesektoren (Eurostat (2022))	..
	Kapazität Stahlherstellung	Produktionskapazitäten Stahl	Stand: November 2022	t	Eigene Regionszuordnung auf Basis von EUFOR (2022)	Link
	Besch. Chemische Industrie	Anzahl Beschäftigte	Jahr 2019	Zahl Besch.	EurostatDur (2022)	Link
Transport	Fracht Straßengüterverkehr	Durchschnitt be- und entladene Fracht	Jahr 2019	Mill.tkm	Eurostat (2022)	Link
	Passagiere Luftfahrt	Anzahl Passagiere (Starts und Landungen)	Jahr 2019	Tsd. Pers.	Eurostat (2022)	Link
	Fracht Seeverkehr	Abgewickelte Fracht (Be- und Entladung)	Jahr 2019	kt	Eurostat (2022)	Link

Quelle: eigene Darstellung

7.2 Detailergebnisse für Fokusregionen

Tabelle A 2: Detailergebnisse für Fokusregionen

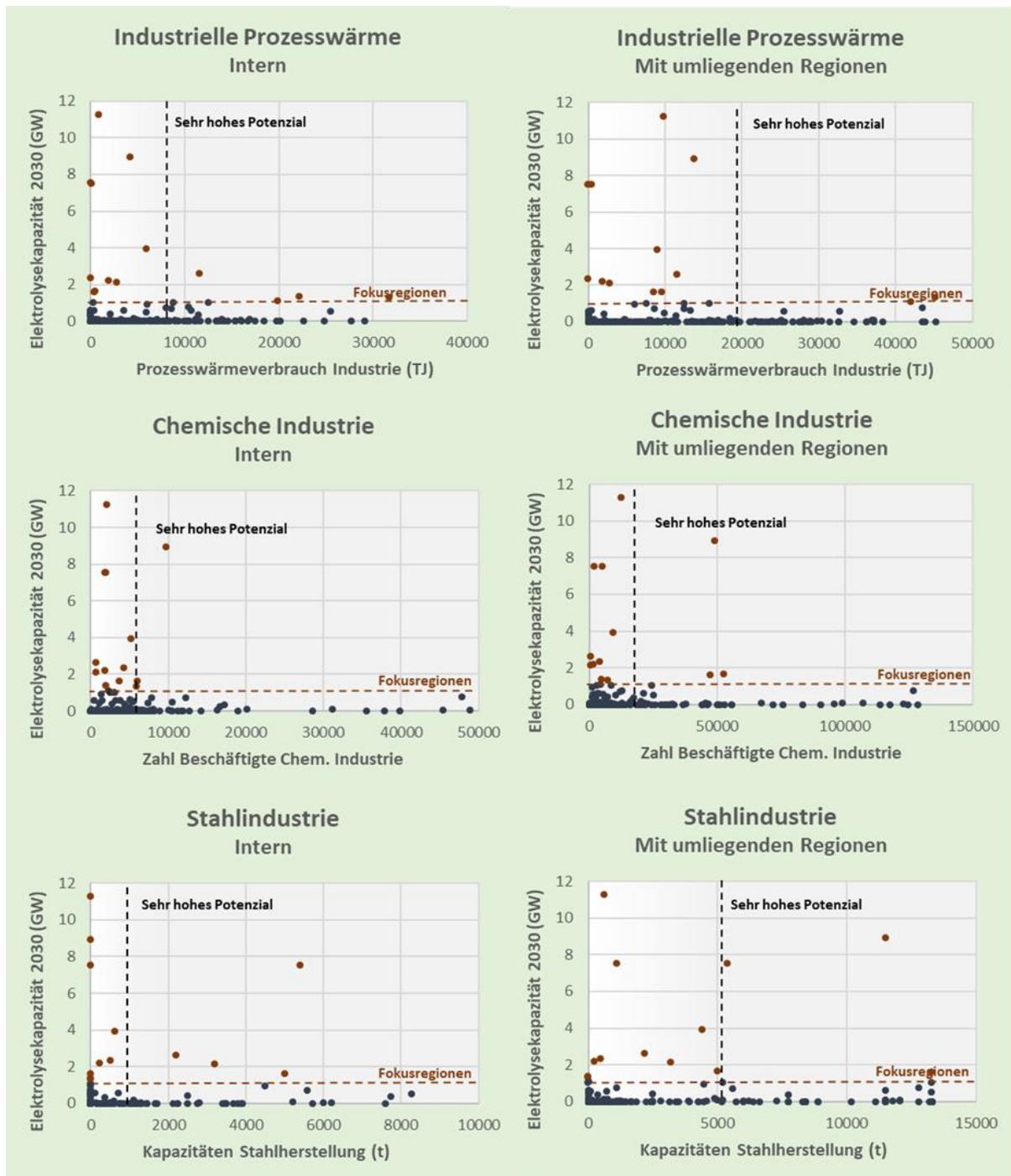
Kategorie	Indikator	Einheit	Fokusregionen													
			NL11	NL33	ES12	PT18	DE94	SE33	ES24	FRC2	RO22	NL34	BE23	DK04	DK01	DK03
	Region	NUTS_ID	NL	NL	ES	PT	DE	SE	ES	FR	RO	NL	BE	DK	DK	DK
	Land	ID Land	NL	NL	ES	PT	DE	SE	ES	FR	RO	NL	BE	DK	DK	DK
	Name		Groningen	Zuid-Holland	Principado de Asturias	Alentejo	Weser-Ems	Övre Norrland	Aragón	France-Comté	Sud-Est	Zeeland	Prov. Oost-Vlaanderen	Midtjylland	Hovedstaden	Syddanmark
	Gebietsfläche	km2	2405	3247	10601	31604	14987	164083	47722	16308	35774	1935	3009	13007	2559	12256
	Geplante Kapazitäten Elektrolyse 2030	MW	11240	8913	7520	7504	3928	2600	2337	2200	2115	1625	1600	1350	1303	1100
Rahmenbedingungen																
Knowhow	Dichte Naturwiss. u. Ing.	Zahl Besch. / km2	16,76	76,07	3,22	0,76	5,62	0,18	0,96	1,97	1,32	9,46	27,58	5,50	55,57	4,00
	H2-Ausbildungsprogramme	Ja/Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein
Lokale Vorleistungen	Herstellung Elektrolyseure/Elektrolyse-Stacks	Ja/Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
	Herstellung Brennstoffzellen	Ja/Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
	Herstellung Stack-Komponenten	Ja/Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Infrastruktur	Wasserstofftankstellen	Zahl	1	3	0	0	1	1	3	0	0	0	1	1	2	2
	Wasserstoffpipelines	Ja/Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
Staatliche Marktanziehe	Kaufprämien oder Steuerbefreiung FCEVs	Ja/Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein
	CAPEX-Zuschüsse Wasserstofftankstellen	Ja/Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
	CAPEX-Zuschüsse Wasserstoffproduktion	Ja/Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
	Reduktion / Befreiung Gasnetzentgelte	Ja/Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
Regionale Potenziale je km2 Fläche: Intern																
Erzeugung	Erzeugungspotenzial EE-Strom	TWh	5,93	14,55	1,70	1,58	2,35	1,18	5,67	1,32	3,92	4,39	1,53	3,74	14,78	4,29
Gebäude	Verbrauch Fernwärme	TJ	0,35	1,30	0,00	0,00	0,40	0,07	0,00	0,12	0,08	0,23	0,12	1,70	12,40	1,62
	Gasverbrauch: Haushalte	TJ	5,04	15,72	0,36	0,04	1,70	0,00	0,09	0,67	0,24	3,26	5,83	0,45	3,07	0,44
	Gasverbrauch: Service-Sektor	TJ	1,66	7,51	0,15	0,03	0,71	0,00	0,05	0,32	0,06	1,08	3,82	0,15	1,19	0,13
Industrie	Verbrauch Prozesswärme	TJ	7,23	23,49	1,81	0,19	3,19	0,14	0,52	0,58	0,32	12,12	15,65	1,33	4,24	1,40
	Kapazität Stahlherstellung	t	0,00	0,00	0,51	0,00	0,04	0,01	0,01	0,01	0,09	0,00	1,66	0,00	0,00	0,00
	Besch. Chemische Industrie	Zahl Besch.	0,85	2,99	0,18	0,06	0,35	0,00	0,09	0,11	0,02	1,90	1,99	0,15	2,30	0,19
Transport	Fracht Straßengüterverkehr	Mill. tkm	1,28	5,26	0,38	0,09	1,21	0,03	0,26	0,33	0,08	1,48	3,65	0,45	0,98	0,59
	Passagiere Luftfahrt	Tsd. Pers.	0,00	0,65	0,13	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	11,78	0,31
	Fracht Seeverkehr	kt	2,52	138,24	2,10	1,23	2,85	0,08	0,00	0,00	1,45	20,11	11,08	1,02	6,05	1,62
Regionale Potenziale je km2 Fläche: Einschließlich Umland (NUTS-2 Regionen in 100 km Radius)																
Erzeugung	Erzeugungspotenzial EE-Strom	TWh	3,31	7,92	1,70	1,64	2,99	1,18	5,67	1,32	3,92	4,98	2,34	4,02	6,82	4,00
Gebäude	Verbrauch Fernwärme	TJ	0,36	0,68	0,00	0,01	0,44	0,07	0,00	0,12	0,08	0,44	0,28	1,59	4,62	1,66
	Gasverbrauch: Haushalte	TJ	2,88	8,96	0,36	0,12	2,59	0,00	0,09	0,67	0,24	8,11	4,40	0,43	1,18	0,44
	Gasverbrauch: Service-Sektor	TJ	1,08	4,42	0,15	0,12	1,02	0,00	0,05	0,32	0,06	4,46	2,83	0,13	0,42	0,14
Industrie	Verbrauch Prozesswärme	TJ	4,24	16,67	1,81	0,77	4,23	0,14	0,52	0,58	0,32	16,71	9,48	1,34	1,83	1,36
	Kapazität Stahlherstellung	t	0,02	0,56	0,51	0,03	0,22	0,01	0,01	0,01	0,09	0,23	0,43	0,00	0,00	0,00
	Besch. Chemische Industrie	Zahl Besch.	0,46	2,41	0,18	0,15	0,46	0,00	0,09	0,11	0,02	2,44	1,54	0,14	0,77	0,17
Transport	Fracht Straßengüterverkehr	Mill. tkm	1,16	2,96	0,38	0,22	1,34	0,03	0,26	0,33	0,08	3,42	2,13	0,48	0,50	0,52
	Passagiere Luftfahrt	Tsd. Pers.	0,01	3,96	0,13	0,90	0,12	0,02	0,01	0,00	0,00	1,66	1,22	0,18	3,08	0,18
	Fracht Seeverkehr	kt	1,80	39,81	2,10	1,62	5,29	0,08	0,00	0,00	1,45	35,75	12,32	1,30	4,07	1,31



Quellen: siehe Tabelle A1; eigene Darstellung

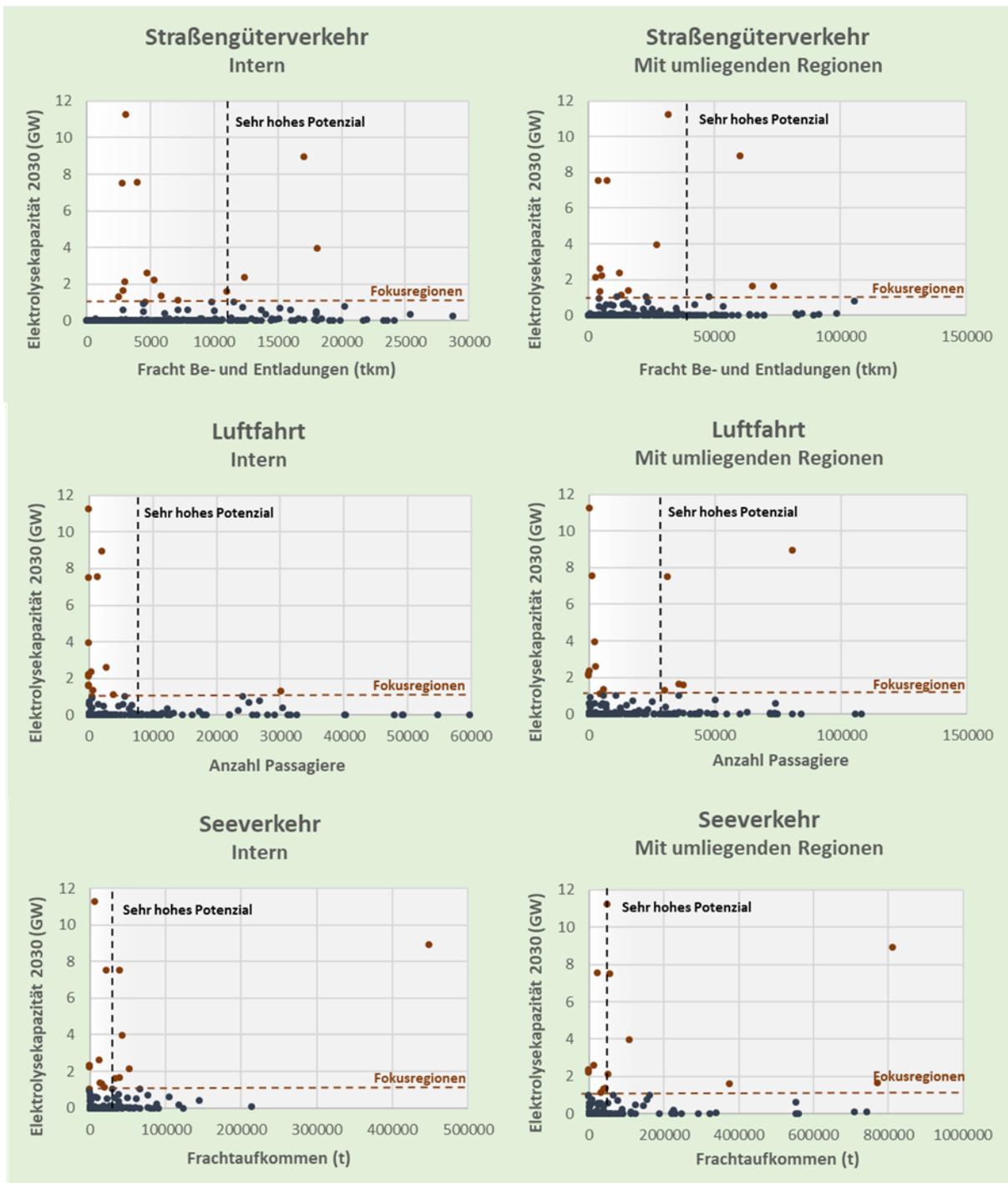
7.3 Verwertungspotenziale im Regionsvergleich

Abbildung A 1: Verwertungspotenziale Industrie in EU NUTS-2 Regionen



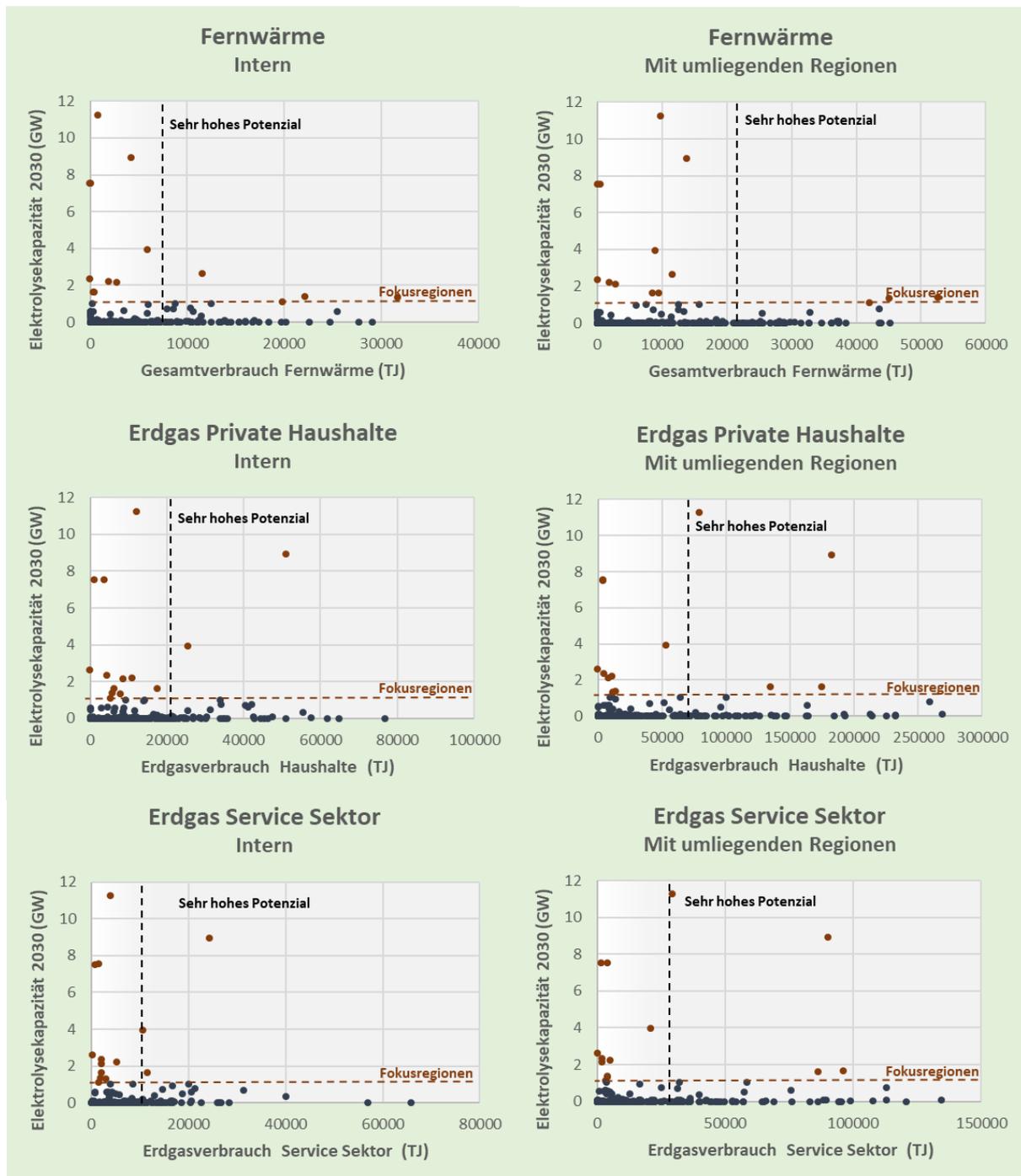
Quellen: siehe Tabelle A1; eigene Darstellung; sehr hohes Potenzial: 20%-höchste Werte unter den EU-Regionen.; dunkelrot: Fokusregionen; Abgrenzung Umland: Siehe Fußnote 61

Abbildung A 1: Verwertungspotenziale Mobilitätssektor in EU NUTS-2 Regionen



Quellen: siehe Tabelle A1; eigene Darstellung; sehr hohes Potenzial: 20%-höchste Werte unter den EU-Regionen.; dunkelrot: Fokusregionen; Abgrenzung Umland: Siehe Fußnote 61

Abbildung A 2: Verwertungspotenziale Gebäudesektor in EU NUTS-2 Regionen



Quellen: siehe Tabelle A1; eigene Darstellung; dunkelrot: Fokusregionen; sehr hohes Potenzial: 20%-höchste Werte unter den EU-Regionen; Abgrenzung Umland: Siehe Fußnote 61



Autor:

Dr. André Wolf

Leiter Fachbereich Technologische Innovation, Infrastruktur und industrielle Entwicklung

wolf@cep.eu

Centrum für Europäische Politik FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Freiburg

Schiffbauerdamm 40 Raum 4315 | D-10117 Berlin

Tel. + 49 761 38693-0

Das **Centrum für Europäische Politik** FREIBURG | BERLIN, das **Centre de Politique Européenne** PARIS, und das **Centro Politiche Europee** ROMA bilden das **Centres for European Policy Network** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Das gemeinnützige Centrum für Europäische Politik analysiert und bewertet die Politik der Europäischen Union unabhängig von Partikular- und parteipolitischen Interessen in grundsätzlich integrationsfreundlicher Ausrichtung und auf Basis der ordnungspolitischen Grundsätze einer freiheitlichen und marktwirtschaftlichen Ordnung.