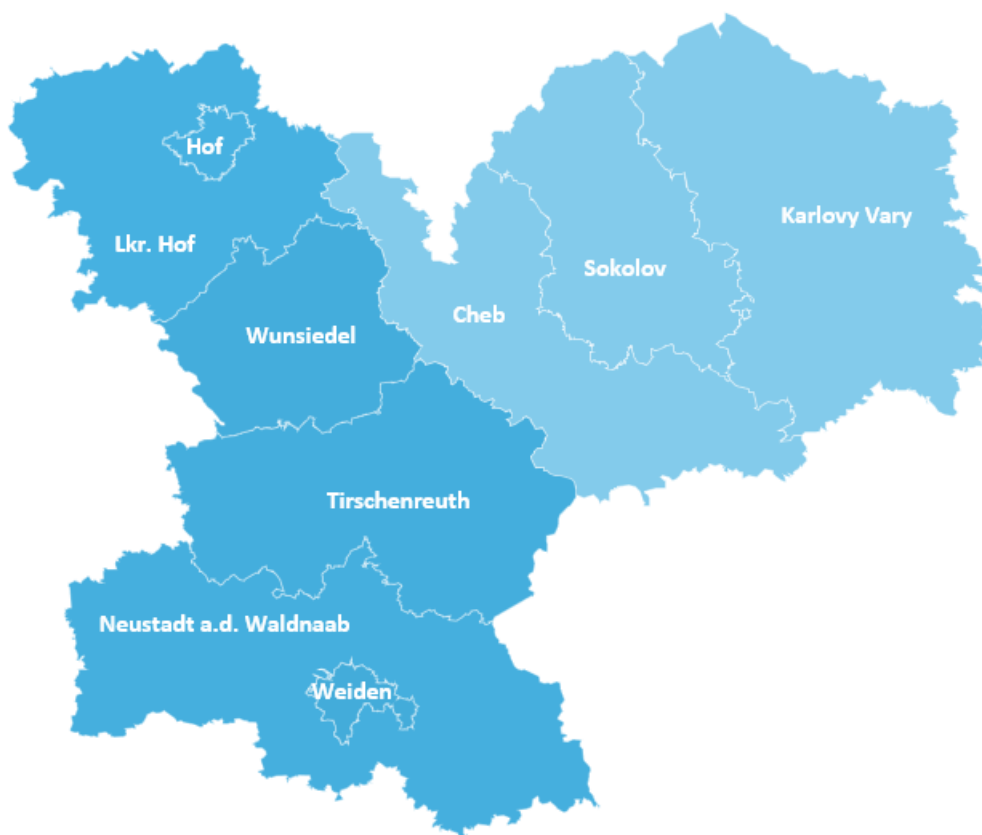


Regionalkonzept Wasserstoff Bayern - Böhmen



Interreg



Kofinanziert von
der Europäischen Union

Bayern – Tschechien

IMPRESSUM

Gefördert durch

INTERREG Bayern – Tschechien

Projekt: BYCZ01-136 – HyBaBo

Projektlaufzeit: 01.04.2024 – 31.03.2026

Projektleitung

Prof. Dr. Raphael Lechner (Ostbayerische
Technische Hochschule Amberg-Weiden)

Herausgeber

Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden

Kaiser-Wilhelm-Ring 23

92224 Amberg

Autoren

Maximilian Schinhammer

(Institut für Energietechnik IfE GmbH)

Anna Lena Reinhardt, Florian Birner

(Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden)

Dr. Stefan Bayer, Julian Knopp

(Hochschule für Angewandte Wissen-
schaften Hof)

Richard Štěpánovský (Krajská hospo-
dářská komora Karlovarského kraje)

Erscheinungsjahr

2026

Ein besonderer Dank gilt dem gesamten Akteurs- und Partnernetzwerk für die gelungene Zusammenarbeit!

LANDKREIS
TIRSCHENREUTH



Landkreis
Neustadt
an der Waldnaab



Stadt Weiden in der Oberpfalz



Stadt Hof



Landkreis Hof
wir sind Heimat



Karlovarský
kraj



Deutsch-Tschechische
Industrie- und Handelskammer
Česko-německá
obchodní a průmyslová komora



WASSERSTOFF
REGION
H2NOFF

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	III
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	VII
TABELLENVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XII
1 Einleitung.....	1
1.1 Vorstellung Projektregionen	1
1.2 Projekt HyBaBo	2
1.2.1 Einleitende Informationen zum Projekt.....	2
1.2.2 Ausgangslage und Motivation des Projekts.....	3
1.2.3 Teilnehmende Akteure	3
1.2.4 Projektplan	4
1.3 Ziele des Projekts.....	4
1.4 Öffentlichkeitsarbeit.....	5
2 Grundlagen des Wasserstoffhochlaufs	7
2.1 Europäische Ebene	7
2.2 Nationale und regionale Wasserstoffstrategien	8
2.3 Zusammenfassung	11
3 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	14
3.1 Europäische Ebene	14
3.1.1 Erzeugung von RFNBO-Wasserstoff	14
3.1.2 Erzeugung von kohlenstoffarmem Wasserstoff	19

3.1.3	Erzeugung von fortschrittlichen Biokraftstoffen	21
3.2	Tschechische Perspektive	22
3.2.1	Novelle des Luftreinhaltegesetzes	22
3.2.2	Industrieller Wasserstoffverbrauch	23
3.3	Deutsche Perspektive	23
3.3.1	Wasserstoffbeschleunigungsgesetz	23
3.3.2	Wasserstoff im Zuge der kommunalen Wärmeplanung	24
4	Politische Fördermaßnahmen zum Wasserstoffhochlauf	26
4.1	Europäische Förderprogramme	27
4.1.1	Important Project of Common European Interest (IPCEI)	27
4.1.2	Hydrogen Valleys	27
4.1.3	INTERREG	28
4.1.4	HORIZON	28
4.2	Tschechische Förderprogramme	29
4.3	Bundesweite Förderprogramme	30
4.3.1	Bundesförderprogramm Industrie und Klimaschutz	30
4.3.2	Förderung von Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr in Verbindung mit Nutzfahrzeugen mit wasserstoffbasierten Antrieben	30
4.3.3	CO ₂ -Differenzverträge	32
4.4	Bayerische Förderprogramme	33
4.4.1	Bayerische Förderung zum Aufbau einer Elektrolyse-Infrastruktur (BayFELI) ..	33
4.4.2	Bayerisches Förderprogramm zur Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen	34

5	Örtliche Rahmenbedingungen	35
5.1	Energieversorgung	35
5.1.1	Wärmeversorgung.....	35
5.1.2	Stromversorgung	36
5.1.3	Energiebedarfe im Sektor Wirtschaft.....	37
5.2	Zukünftige Wasserstofftransportnetze in der Region	39
5.3	Wirtschaftsstruktur	41
5.4	Mobilität.....	42
5.4.1	Straßenverkehr	42
5.4.2	Schienenverkehr	44
6	Wasserstoffpotenzialanalyse für die HyBaBo-Region.....	45
6.1	Technische Rahmenbedingungen	45
6.1.1	Wasserstoff aus Elektrolyse	46
6.1.2	Wasserstoff aus biogenen Reststoffen	47
6.1.3	Wasserstofftransport und -Speicherung	51
6.1.4	Wasserstoffnutzung	53
6.2	Zukünftiger Wasserstoffhochlauf in der Region.....	54
6.2.1	Wasserstoffhochlauf: Ambitioniertes Szenario.....	56
6.2.2	Wasserstoffhochlauf: Mittelweg-Szenario.....	58
6.2.3	Wasserstoffhochlauf: Konservatives Szenario	59
6.2.4	Übertragbarkeit der betrachteten Studien.....	61
6.3	Wasserstofferzeugungspotenziale mit Schwerpunkt Elektrolyse und Nutzungspotenziale in der Projektregion	62

6.4	Wasserstoffherzeugung aus biogenen Reststoffen	72
6.4.1	Wasserstoffpotenzial aus der Landwirtschaft	73
6.4.2	Wasserstoffpotenzial aus Bioabfällen und Grüngut.....	74
6.4.3	Wasserstoffpotenzial aus Resthölzern.....	76
6.4.4	Wasserstoffpotenzial aus Klärschlamm.....	79
6.4.5	Einordnung der Potenziale im Kontext bestehender Verwertungsstrukturen ...	80
6.5	Zusammenfassung Wasserstoffpotenziale.....	80
7	Abschluss und Ausblick.....	84
7.1	Fazit.....	84
7.2	Handlungsempfehlungen	86
Anhang A.1 Zeitliche Abgrenzung und Auswertungsansatz der betrachteten Reststoffströme.....		
		90
Anhang A.2 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung landwirtschaftlicher Reststoffe.....		
		91
Anhang A.3 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Bioabfällen und Grüngut		
		95
Anhang A.4 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Resthölzern ...		
		106
Anhang A.5 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Klärschlamm .		
		129
8	Literaturverzeichnis	132

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Kriterien für die Erzeugung von RFNBO-Wasserstoff gemäß des delegierten Rechtsakts der RED II und der 37. BImSchV.	18
Abbildung 2: Auszug aus dem genehmigten Wasserstoffkernnetz (Ausbaustand 31.12.2032). [51]	39
Abbildung 3: CGHI Corridor. [52]	40
Abbildung 4: 1,25 MW _{el} PEM-Elektrolyseur (links) mit Wasseraufbereitung (rechts) in der Stadt Haßfurt [67]	47
Abbildung 5: Prozesskette von biogenen Reststoffen bis hin zur Wasserstoffbereitstellung an der Tankstelle [72]	48
Abbildung 6: Abfüllstation mit Logistikkomponenten für die Wasserstoffproduktion und Auslieferung [89].	52
Abbildung 7: Stationärer Wasserstoffverbrennungsmotor (Wasserstoff-BHKW).	53
Abbildung 8: Darstellung der 67 Datenrückläufer aus der Unternehmensbefragung.	56
Abbildung 9: Wasserstoffhochlauf im ambitionierten Szenario	58
Abbildung 10: Wasserstoffhochlauf im Mittelweg-Szenario	59
Abbildung 11: Wasserstoffhochlauf im konservativen Szenario.	60
Abbildung 12: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Systems.	62
Abbildung 13: Aktuelle Wasserstoffinfrastruktur sowie das geplante Kernnetz in der Projektregion.	63
Abbildung 14: Potenzialräume zum Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur in der HyBaBo-Projektregion.	64
Abbildung 15: Verlauf der THG-Quotenpreise von 2023 bis 2026 [107]	70
Abbildung 16: Resultierende Wasserstoffgestehungskosten	71



Abbildung 17: Prozentuale Verteilung der Waldflächen nach Eigentumsarten in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz.....	110
Abbildung 18: Anteil der Beschäftigten des Clusters Forst und Holz an der Gesamtbeschäftigung in den Landkreisen und kreisfreien Städten 2024, nach [142], Legende grafisch überarbeitet	113
Abbildung 19: Prozentuale Verteilung der Waldflächen nach Eigentumsarten im Karlovarský kraj	117

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Darstellung der Gesamtinvestitionskosten netto der einzelnen Varianten.....	67
Tabelle 2: Zeitliche Abgrenzung und Auswertungsansatz der betrachteten Reststoffströme.....	90
Tabelle 3: Eingangsgrößen zur Potenzialberechnung - Tierbestände und Methanerträge - Projektregion Bayern.....	93
Tabelle 4: Eingangsgrößen zur Potenzialberechnung - Tierbestände und Methanerträge - Karlovarský kraj.....	93
Tabelle 5: Abgeleitete Energie- und Wasserstoffpotenziale je Tierart – Projektregion Bayern	94
Tabelle 6: Abgeleitete Energie- und Wasserstoffpotenziale je Tierart – Karlovarský kraj	94
Tabelle 7: Eingangsparameter zur Bestimmung der Siedlungsstrukturtypen in der bayerischen Projektregion.....	97
Tabelle 8: Klassifizierung der Siedlungsstruktur und zugeordnete Organikanteile im Hausmüll	98
Tabelle 9: Substratspezifische Kennwerte zur Potenzialberechnung	103
Tabelle 10: Bioabfallmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der Teilregionen.....	103
Tabelle 11: Hausmüllmengen sowie Organikanteile und -mengen der Teilregionen	104
Tabelle 12: Organikmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der Teilregionen.....	104
Tabelle 13: Grüngutmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen	105

Tabelle 14: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Bioabfällen und Grüngut der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)	105
Tabelle 15: Verteilung der Waldflächen in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz nach Eigentumsarten	109
Tabelle 16: Waldflächen der Teilregionen und für die Potenzialabschätzung berücksichtigte Flächen	111
Tabelle 17: Altholzmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen	119
Tabelle 18: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Altholz der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)	120
Tabelle 19: Mengen an forstwirtschaftlichen Resthölzern in den bayerischen Teilregionen	120
Tabelle 20: Energie- und Wasserstoffpotenziale aus forstwirtschaftlichen Resthölzern in den bayerischen Teilregionen	121
Tabelle 21: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus forstwirtschaftlichen Resthölzern der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)	121
Tabelle 22: Beschäftigte im Cluster Forst und Holz und daraus abgeleitete energetische Potenziale in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz	122
Tabelle 23: Beschäftigtenbezogene Eingangsgrößen und abgeleitete Cluster- Beschäftigte in Oberfranken	122
Tabelle 24: Cluster-Beschäftigte und skalierte Cluster-Beschäftigte in Oberfranken	123
Tabelle 25: Anteile am Bezirkscluster und energetische Teilpotenziale in Oberfranken	124
Tabelle 26: Beschäftigtenbezogene Eingangsgrößen und abgeleitete Cluster- Beschäftigte in Oberpfalz	125
Tabelle 27: Cluster-Beschäftigte und skalierte Cluster-Beschäftigte in der Oberpfalz	126



Tabelle 28: Anteile am Bezirkscluster und energetische Teilpotenziale in der Oberpfalz	127
Tabelle 29: Energetische Potenziale und theoretische Wasserstoffpotenziale aus Industrierestholz in den Teilregionen der bayerischen Projektregion	128
Tabelle 30: Verarbeitete Holzmengen und Sägenebenprodukte in der tschechischen Projektregion	128
Tabelle 31: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Sägenebenprodukten in der tschechischen Projektregion.....	128
Tabelle 32: Klärschlamm-mengen und theoretische Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen	130
Tabelle 33: Klärschlamm-mengen und theoretische Wasserstoffpotenziale der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)	131

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AEL	Alkalische Elektrolyse
AFIR	Alternative Fuels Infrastructure Regulation
AltholzV	AltholzV
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad (biologisch abbaubarer kommunaler Abfall)
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilization
CGHI	Czech-German Hydrogen Interconnector
CH ₄	Chemisch: Methan
CZK	Tschechische Kronen
DFH	Durchforstungsholz
DOM	Domestic (Haushalt)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EHB	European Hydrogen Backbone
EK	Eigenkapital
EnFG	Energiefinanzierungsgesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EWC	European Waste Catalogue
FAME	Fatty Acid Methyl Ester (Fettsäuremethylester)
FAO	Food and Agriculture Organization
FAUNA	Fahrpläne für die Umstellung der Netzinfrastuktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff
FK	Fremdkapital
FM	Frischmasse
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GIS	Geoinformationssystem

GW	Gigawatt
GWh	Gigawattstunden
H ₂	Chemisch: Wasserstoff
H ₂ O	Chemisch: Wasser
HD_C	High Demand Customer
HT	Hochtemperatur (> 200 °C)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (hydriert biogene Öle und Fette)
HYTEP	Czech Hydrogen Technology Platform
IRH	Industrierestholz
IROP	Integrierte Regionale Operationelle Programm
KAV	Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KVK	Karlovarský kraj
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
KWP	Kommunale Wärmeplanung
LD_C	Low Demand Customer
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
MD_C	Medium Demand Customer
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunden
NECP	National Energy and Climate Plans
NEW	Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab
Nm ³	Normkubikmeter
NT	Niedertemperatur (< 200 °C)
NWS	Nationale Wasserstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland

O ₂	Chemisch: Sauerstoff
oTM	organische Trockenmasse
PEM	Proton Exchange Membrane Elektrolyse
POH	Plán odpadového hospodářství (Abfallwirtschaftsplan)
PPA	Power Purchase Agreement
PtG	Power-to-Gas (z. B. Elektrolyse)
PV	Photovoltaik
RED	Renewable Energy Directive (Erneuerbare-Energien-Richtlinie der EU)
RFNBO	Renewable fuels non biological origin (Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs)
SAF	Sustainable Aviation Fuels (nachhaltige Flugkraftstoffe)
SKO	směsný komunální odpad (gemischter Siedlungsabfall / Restmüll)
SNP	Sägenebenprodukte
SOEC	Hochtemperatur Festoxid-Elektrolyse
SPK	Strompreiskompensation
StromStG	Stromsteuergesetz
TEN V	Transeuropäische Verkehrsnetze
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
Vbh	Vollbenutzungsstunden (Anzahl Stunden unter Volllastbetrieb im Jahr)
WPG	Wärmeplanungsgesetz
WRH	Waldrestholz
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni (Universität Westböhmen in Pilsen)

1 Einleitung

1.1 Vorstellung Projektregionen

Die Projektregionen Karlsbad (Karlovarský kraj), Östliches Oberfranken und Nördliche Oberpfalz ähneln sich in vielen Punkten. Sie liegen im Grenzgebiet zwischen Bayern und Westböhmen und sind geografisch wie historisch eng miteinander verbunden. Geografisch sind alle drei Regionen durch Mittelgebirgslandschaften geprägt: Die nördliche Oberpfalz wird vom Oberpfälzer Wald dominiert, während das östliche Oberfranken stark durch das Fichtelgebirge und Teile des Frankenwaldes beeinflusst ist. Auf tschechischer Seite setzt sich diese Landschaft im Karlsbader Raum mit dem Erzgebirge und dem Böhmischem Becken fort. Der hohe Waldanteil, vergleichbare Höhenlagen und ein gemäßigtes Klima schaffen günstige Bedingungen für erneuerbare Energieformen wie Windenergie und Biomasse. Zudem sind alle drei Regionen eher ländlich geprägt und sehen sich ähnlichen strukturellen Herausforderungen gegenüber, etwa dem demografischen Wandel sowie den Folgen eines bereits durchlaufenen Strukturwandels, aus dem heraus sich zugleich neue wirtschaftliche Entwicklungspotenziale ergeben.

Trotz dieser Gemeinsamkeiten gibt es auch Unterschiede. Die Karlsbader Region ist international bekannt für ihre Heilbäder wie Karlovy Vary (Karlsbad), was ihr einen deutlichen touristischen Schwerpunkt verleiht. Im Gegensatz dazu ist die nördliche Oberpfalz stärker landwirtschaftlich orientiert, während das östliche Oberfranken eine etwas ausgeprägtere industrielle Basis besitzt, insbesondere im Bereich kleiner und mittlerer Unternehmen. Historisch bestehen zwischen den Regionen viele Verbindungen. Alle gehörten über Jahrhunderte hinweg zum Heiligen Römischen Reich Deutscher Nation, wobei Teile der nördlichen Oberpfalz und des Egerlandes zeitweise zum Königreich Böhmen zählten. Alte Handelsrouten wie die „Goldene Straße“, die Nürnberg mit Prag verband, förderten den Austausch von Waren, Menschen und Ideen. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden diese Beziehungen durch den Eisernen Vorhang unterbrochen. Erst seit dem politischen Umbruch in den Jahren 1989/90 und dem EU-Beitritt Tschechiens 2004 hat sich die grenzüberschreitende Zusammenarbeit wieder intensiviert. Zahlreiche EU-geförderte Programme haben dazu beigetragen, alte Verbindungen neu zu beleben. Gerade im Bereich der Energieversorgung ergeben sich aus diesen

historischen und geografischen Gemeinsamkeiten gute Anknüpfungspunkte. Unterschiedliche Erfahrungen – etwa im Bereich Energieeffizienz oder Netzmodernisierung – können zu einem produktiven Austausch führen. Während Bayern in den vergangenen Jahren verstärkt in den Ausbau erneuerbarer Energien investiert hat, bietet die tschechische Seite Know-how in Bereichen wie Fernwärmeversorgung oder Energieeinsparung in der Industrie. Gemeinsam sollten grenzüberschreitende Energieinfrastrukturen entstehen, die nicht nur zur regionalen Versorgungssicherheit beitragen, sondern auch wirtschaftliche und ökologische Impulse setzen. Die nördliche Oberpfalz, das östliche Oberfranken und die Karlsbader Region stellen eine historisch und landschaftlich gewachsene Einheit dar, die sich bestens für ein gemeinsames Energieprojekt eignet. Die bestehenden Gemeinsamkeiten bieten eine solide Basis für Kooperation, während die Unterschiede eine Chance für gegenseitiges Lernen und ergänzende Kompetenzen darstellen.

1.2 Projekt HyBaBo

1.2.1 Einleitende Informationen zum Projekt

Mit dem Start eines Netzwerkes zwischen Bayern und Böhmen brachten die Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden (OTH), die Hochschule Hof sowie die Bezirkswirtschaftskammer des Bezirks Karlsbad (Krajská hospodářská komora Karlovarského kraje) die regionale Entwicklung im Bereich der Zukunftstechnologie Wasserstoff einen großen Schritt voran. Das Projekt mit der Kurzbezeichnung HyBaBo („Hydrogen Bavaria Bohemia“) wurde Anfang April 2024 offiziell gestartet und lief bis Ende März 2026. Ziel der Projektpartner war es, mit der Wasserstoffregion Bayern – Böhmen die angrenzenden Regionen - bestehend aus den Landkreisen Tirschenreuth, Neustadt a.d. Waldnaab, Stadt und Landkreis Hof sowie der Stadt Weiden auf deutscher Seite so-wie der Region Karlsbad mit den Städten und Landkreisen Karlsbad (Karlovy Vary), Eger (Cheb) und Falkenau (Sokolov) auf tschechischer Seite - im Bereich der Wasserstofftechnologien zusammen zu entwickeln und einen koordinierten Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen. Ein stetiger Wissenstransfer zu Wasserstofftechnologien wurde angestoßen und Kommunen mit bereits umfangreichen Wasserstoffaktivitäten mit Kommunen mit weniger Erfahrungen zusammengeschlossen. Neben dem Wissenstransfer entlang der gesamten Wasserstoffwertschöpfungskette stand auch die

Öffentlichkeitsarbeit im Fokus des Projektes: Es konnte mehr Vertrauen innerhalb der Gesellschaft in diese Technologie geschaffen werden, damit sie ein wichtiger Baustein sein kann, um die Energiewende zu meistern.

1.2.2 Ausgangslage und Motivation des Projekts

Im Zuge der Energiewende ist Wasserstoff sektorübergreifend einer der vielversprechendsten Energieträger, wo die direkte Nutzung von erneuerbarem Strom oder biogenen Reststoffen nicht anwendbar ist. Im Zuge nationaler Programme sind in den letzten Jahren daher zahlreiche regionale Konzepte entstanden. Die Grenzregionen Hof, Tirschenreuth und Karlsbad waren jedoch noch weiße Flecken auf der Landkarte der Wasserstoffregionen. Das HyBaBo-Projekt füllt diese Lücke und etabliert eine grenzübergreifende Zusammenarbeit. Als Gesamtziel des Projektes wurden grenzübergreifend Akteure aus Wirtschaft, Forschung, Bildung und kommunale Entscheidungsträger in einem Wissenstransfernetzwerk vernetzt und somit ein Akteurskreis gebildet, der anschließend selbstständig fähig ist, in die Umsetzung zu gehen. Zu den Aktivitäten zählten die Vernetzung der Akteure und die Abhaltung von Transfer- und Weiterbildungsmaßnahmen zu Wasserstofftechnologien. Für eine erfolgreiche Umsetzung der Transferleistungen wurde parallel eine Potentialstudie mit Aktivitätenlandkarte und ein konkretes Wasserstoffkonzept erstellt. Dies beinhaltete die Ermittlung des konkreten Wasserstoffbedarfs in der Projektregion. Dabei wurden die Sektoren Industrie, Mobilität und Wärme (Strom, Wärme, Mobilität) unterschieden und das Potential zur Wasserstoff-Erzeugung aus erneuerbaren Energien und (Rest-) Biomasse ermittelt. Mit diesen Erkenntnissen wurde dann schließlich ein länderübergreifendes Regionalkonzept erarbeitet, um regionale Synergien zu schaffen und eine lückenlose Versorgungsmöglichkeit zu planen. Zielgruppen waren KMUs, Forschungs- und Bildungseinrichtungen, Regionalnetzwerke, kommunale Entscheidungsträger und zukünftige Fachkräfte.

1.2.3 Teilnehmende Akteure

Das Projekt Hydrogen Bavaria – Bohemia war eine Zusammenarbeit zwischen der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden, der Hochschule für angewandte Wissenschaften Hof und der Bezirkswirtschaftskammer des Karlsbader Bezirks (Krajská hospodářská komora Karlovarského kraje). Gefördert wurde es durch das INTERREG-Programm der

Europäischen Union. Die Europäische Territoriale Zusammenarbeit (INTERREG) ist eines der Ziele, die im Rahmen der EU-Strukturförderung aus dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) finanziert werden. INTERREG ist gegliedert in drei Stränge: Die grenzübergreifende, transnationale und interregionale Zusammenarbeit. In der Förderperiode von 2021 bis 2027 stellt die Europäische Union für diese Programme insgesamt 8,9 Milliarden Euro zur Verfügung. 6,6 Milliarden Euro fließen hiervon in die Programme zur grenzübergreifenden Zusammenarbeit. HyBaBo wurde mit knapp 620.000 € unterstützt.

Die Projektregion umfasste die Landkreise Neustadt a.d. Waldnaab, Tirschenreuth und Wunsiedel, Stadt und Landkreis Hof und die Stadt Weiden auf deutscher Seite sowie die Region Karlsbad mit den Städten Karlsbad (Karlovy Vary), Eger (Cheb) und Falkenau (Sokolov) auf tschechischer Seite. Dabei sollte die Projektregion im Bereich der Wasserstoffwirtschaft entwickelt und eine grenzübergreifende Zusammenarbeit etabliert werden.

1.2.4 Projektplan

Der Projektzeitplan von HyBaBo erstreckte sich von April 2024 bis März 2026 und umfasste vier eng verzahnte Aktivitäten. Zu Beginn wurden im Rahmen von Workshops, Exkursionen und Weiterbildungsmaßnahmen regionale Akteurskreise aufgebaut und gestärkt, um Wissen zu Wasserstofftechnologien zu vermitteln und Projektideen zu generieren. Parallel dazu erfolgte von Juli 2024 bis März 2025 eine umfassende Potentialanalyse zur Ermittlung von Wasserstoffbedarfen und Erzeugungsmöglichkeiten sowie zur Bewertung konkreter Projektansätze. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde von April 2025 bis März 2026 dieses länderübergreifende Regionalkonzept entwickelt, das strategische Leitlinien und konkrete Maßnahmen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft in der Grenzregion definierte. Flankierend begleitete eine kontinuierliche Öffentlichkeitsarbeit über die gesamte Projektlaufzeit hinweg die Aktivitäten, informierte die Bevölkerung und band weitere Akteure in den Transformationsprozess ein.

1.3 Ziele des Projekts

Ziele des Projekts waren die Etablierung eines Wasserstoff-Akteurskreises sowie der Wissenstransfer zu Wasserstofftechnologien, mit dem Ziel, den koordinierten Hochlauf einer

Wasserstoffwirtschaft in der Grenzregion zu ermöglichen und bestehende Initiativen zu beschleunigen. Dazu schlossen sich Partner mit bereits umfangreichen Wasserstoffaktivitäten (NEW HyPerspectives Wasserstoffmodellregion Neustadt a.d. Waldnaab mit Stadt Weiden, HyExperts in WUN) mit Landkreisen und Städten zusammen, die bisher keine diesbezüglichen Erfahrungen hatten (Bezirk Karlsbad, Lkr. Tirschenreuth und Hof, Stadt Hof). Federführend koordiniert wurde das Vorhaben von der OTH Amberg-Weiden in Kooperation mit der Hochschule Hof mit ihrem Institut für Wasserstoff- und Energietechnik. Auf tschechischer Seite war die Bezirkswirtschaftskammer des Bezirks Karlsbad Mit Antragsteller und fungierte als Multiplikator zu den Unternehmen vor Ort. Über die Aktivitäten sollten möglichst viele Unternehmen/Akteure in der Grenzregion erreicht werden.

1.4 Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen des Projekts HyBaBo wurde die Öffentlichkeitsarbeit systematisch aufgebaut und kontinuierlich umgesetzt. Ziel war es, das Projekt in der Projektregion bekannt zu machen, relevante Akteure frühzeitig einzubinden und zugleich den fachlichen Horizont im Themenfeld Wasserstoff zu erweitern. Die Projekthomepage wurde regelmäßig mit aktuellen Berichten zum Projektfortschritt, zu Veranstaltungen und zu inhaltlichen Ergebnissen gepflegt. Ergänzend dazu wurde eine LinkedIn-Seite eingerichtet und aktiv genutzt, um Fachakteure sowie eine breitere interessierte Öffentlichkeit über Entwicklungen im Projekt zu informieren.

Zur gezielten Ansprache relevanter Akteursgruppen wurde ein E-Mail-Newsletter aufgebaut, über den Projektinformationen, Veranstaltungshinweise sowie Hinweise auf Fördermöglichkeiten im Wasserstoffbereich verbreitet wurden. Darüber hinaus wurde HyBaBo bei verschiedenen regionalen und überregionalen Veranstaltungen vorgestellt und damit potenziellen Unterstützern aus Wirtschaft, Wissenschaft, Verwaltung und Politik präsentiert. Durch diese Formate wurden neben der Projektvorstellung auch neue Perspektiven, Anwendungsbeispiele und aktuelle Entwicklungen aus anderen Regionen vermittelt und diskutiert.

Die beiden projektspezifischen Workshops konnten über die aufgebauten Kommunikationskanäle eine relevante Zielgruppe erreichen. Zusätzlich wurde die Öffentlichkeitsarbeit durch



initiierte Presseberichterstattung ergänzt, unter anderem durch Fernsehbeiträge sowie Zeitungsmeldungen zum Projekt.

Parallel zur formalen Öffentlichkeitsarbeit wurde das Projekt-Netzwerk kontinuierlich gepflegt und erweitert. Der regelmäßige Austausch zwischen potenziellen Anwendern, Forschungseinrichtungen und Förderstellen trug dazu bei, Informationsdefizite abzubauen, Akteure für das Thema Wasserstoff zu sensibilisieren und die Voraussetzungen für weiterführende Aktivitäten und mögliche Investitionen in nachfolgenden Projektphasen zu schaffen.

2 Grundlagen des Wasserstoffhochlaufs

Schon seit den 1990er Jahren gibt es weltweite Abkommen zum Klimaschutz. Aktuell gilt das Pariser Klimaabkommen (Paris Agreement), welches am 04.11.2016 in Kraft getreten ist und von 195 Staaten weltweit und den EU-Ländern unterzeichnet wurde. Kernziel ist es, die globale Erderwärmung auf deutlich unter 2°C zu begrenzen. Verpflichtend für alle Staaten sind nationale Klimaschutzziele, welche alle 5 Jahre aktualisiert und auch nachzuschärfen sind. Viele Länder haben angekündigt, ihre Netto-Treibhausgasemissionen auf null zu bringen, also eine Klimaneutralität bis 2050 oder später. Unterschiede bestehen beim Zeitpunkt (2050, 2060, 2070) und in der rechtlichen Verbindlichkeit. [1]

Übergeordnetes Ziel der beiden Projektregionen in Tschechien und Deutschland sind das Ziel der Europäischen Union, eine Klimaneutralität bis 2050 zu erreichen. Wasserstoff als klimaneutraler Energieträger ist ein Baustein in der Transformation der Energieversorgung und ist in den gemeinsamen Zielen, aber auch in den länderspezifischen Zielen verankert. Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist ein weltweites Ziel, wenn auch mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Schwerpunkten. [2], [3]

2.1 Europäische Ebene

Die Europäische Union hat den European Green Deal, der 2019 veröffentlicht wurde, als ihren wichtigsten strategischen Ausgangspunkt für Klima- und Energiepolitik gewählt. Dieses Strategiepapier legte eine Vision für die Transformation der EU zu einer klimaneutralen Wirtschaft bis 2050 dar, durch die schrittweise Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die Förderung von Innovationen, die Stärkung der Kreislaufwirtschaft und die umfassende Modernisierung von Energie und Industrie. Der Green Deal stellt somit die konzeptionelle Grundlage dar, auf der nachfolgende EU-Gesetzgebung im Bereich der Dekarbonisierung basiert. [4]

Im Einklang mit diesem Rahmen wurde 2021 das Europäische Klimagesetz verabschiedet, das erstmals in der Geschichte politische Ziele in rechtlich bindende Standards verwandelte. Das Klimagesetz schreibt vor, dass die Union die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um mindestens 55 % reduzieren und bis 2050 Klimaneutralität erreichen muss. Diese Ziele sind die Hauptpunkte, die die Richtung aller anderen EU-Gesetzgebungen

im Bereich Energie, Industrie und Mobilität bestimmen. Um die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55% gegenüber 1990 zu reduzieren hat die Europäische Union das Fit-for-55-Paket als umfangreiches Gesetzgebungspaket zur Erreichung der Klimaneutralität beschlossen. Dieses Paket beinhaltet zahlreiche miteinander verknüpfte Reformen und Rechtsakte, welche nahezu alle Wirtschaftszweige betreffen. [3], [5]

Zusätzlich wurde im Mai 2022 der REPowerEU-Plan vorgestellt, welcher als Reaktion auf die Energiekrise infolge des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine entstand. Ziel ist es, die Abhängigkeit der EU von fossilen Energieimporten rasch zu verringern und gleichzeitig die Energiewende hin zu innerhalb der EU produzierten klimaneutraler Energie. [2]

In der EU-weiten Zielsetzung REPowerEU wurde festgelegt, dass bis 2030 10 Mio. Tonnen Wasserstoff in der Europäischen Union produziert wird und gleichzeitig 10 Mio. Tonnen Wasserstoff aus anderen Ländern importiert werden sollen. Sukzessive sollen langfristige Energiepartnerschaften mit Drittstaaten geschlossen werden, Importkorridore über Pipeline und Schiffstransport geschaffen werden sowie der Handel mit Wasserstoff, flüssigem Wasserstoff und deren Derivaten wie Ammoniak und synthetischen Kraftstoffen ausgebaut werden. [2]

Aufbau eines European Hydrogen Backbone (EHB)

Ein wichtiger europäischer Zusammenschluss für den Wasserstoffhochlauf ist das European Hydrogen Backbone (EHB). Der Zusammenschluss aus mittlerweile 33 europäischen Gasinfrastrukturunternehmen aus EU-Mitgliedsstaaten sowie Norwegen, dem Vereinigten Königreichs und die Schweiz hat sich zum Ziel gesetzt, ein europaweites Pipeline-Netz, welches Erzeuger, Verbraucher und Speicherstandorte miteinander verbindet, aufzubauen. Hierzu werden vorhandene bestehende Erdgasleitungen umgewidmet und neue grenzüberschreitende Verbindungen geschlossen. Der Wasserstoff soll vorwiegend aus Norwegen, Nordafrika per Pipeline nach Europa gebracht werden. [6]

2.2 Nationale und regionale Wasserstoffstrategien

Die Umsetzung der europäischen Klimaziele wird durch die Nationalen Energie- und Klimapläne (NECP – National Energy and Climate Plans) der einzelnen EU-Staaten geregelt.

Dadurch wird sichergestellt, dass alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union gemeinsam die langfristigen Klimaziele erreichen, gleichzeitig aber die jeweiligen nationalen Besonderheiten berücksichtigt werden können. Diese NECP müssen regelmäßig aktualisiert werden und decken jeweils einen Zeitraum von zehn Jahren ab. Die NECPs verbinden dabei Energiepolitik, Klimaschutz, wirtschaftliche Entwicklung und Versorgungssicherheit in einem integrierten strategischen Dokument. [7]

Deutschland und Tschechien haben nach ihrer ersten Veröffentlichung ihrer NECP im Jahr 2019 eine Überarbeitung im Jahr 2024 vorgenommen, um aktuelle Klimaziele und EU-Vorgaben zu berücksichtigen. Diese Pläne markieren zugleich die Grundlage, auf der spezifische sektorale Strategien entstehen. Neben den NECPs haben einige EU-Staaten, wie auch Deutschland und Tschechien eine separate nationale Wasserstoffstrategie verabschiedet. [7]

Tschechische Wasserstoffstrategie

Die Vodíková strategie České republiky (tschechische Wasserstoffstrategie) wurde erstmals im Juli 2021 vom Ministerium für Industrie und Handel der Tschechischen Republik erstellt und im Juli 2024 über einen Regierungsbeschluss aktualisiert. Die Strategie integriert ausdrücklich die europäische Terminologie der RFNBO und passt die Definitionen von erneuerbarem und kohlenstoffarmem Wasserstoff auf nationaler Ebene an. Damit wird der Verpflichtung Rechnung getragen, sich an den europäischen delegierten Rechtsakten zu orientieren (z. B. Delegierte Verordnung (EU) 2023/1184), die die Bedingungen für die Herstellung erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs einschließlich erneuerbaren Wasserstoffs festlegen. Die Wasserstoffstrategie dient somit als strategischer Rahmen für die Koordinierung nationaler Politiken, Investitionen und die Umsetzung europäischer Ziele, wobei sie RFNBO ausdrücklich als den einzigen gesetzlich anerkannten Wasserstofftyp definiert, der auf die Erfüllung der EU-Ziele in Industrie und Verkehr angerechnet werden kann. [8]

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Tschechische Republik die europäischen Verpflichtungen im Bereich erneuerbarer Energien und Wasserstoff aktiv in ihr Rechtssystem überführt, wenngleich einige Umsetzungsschritte noch Teil des Gesetzgebungsverfahrens sind oder durch strategische Dokumente und Pläne gelöst werden. Die zentralen

europäischen Verpflichtungen werden insbesondere durch Gesetzesnovellen (z. B. Luftreinhaltegesetz), die Vorbereitung eines speziellen Gesetzes zur Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien sowie durch die Aktualisierung energie- und wasserstoffpolitischer Strategien wie des NECP und der Wasserstoffstrategie umgesetzt. Diese Rechtsakte und Dokumente spiegeln die sich aus den europäischen Richtlinien und Verordnungen ergebenden Verpflichtungen wider und passen gleichzeitig spezifische nationale Mechanismen zur Erreichung der EU-Ziele im Bereich Wasserstoff und erneuerbare Energien an. [8]

Deutsche Nationale Wasserstoffstrategie

Die Deutsche Nationale Wasserstoffstrategie (NWS) ist ein zentrales energie- und industriepolitisches Instrument der Bundesregierung zur Umsetzung der europäischen Forderungen der Energiewende und zur Erreichung der Klimaziele. Sie wurde erstmals im Jahr 2020 verabschiedet und im Juli 2023 umfassend fortgeschrieben, um auf veränderte energiepolitische Rahmenbedingungen, steigende Nachfrage und neue technologische Entwicklungen zu reagieren. Ziel der Strategie ist der Aufbau einer wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Produktion über Transport und Speicherung bis hin zur industriellen Nutzung. Die NWS wird durch die Deutsche Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate ergänzt mit dem Ziel, klare Signale an Partnerländer und Unternehmen im Hinblick auf den Bedarf und die Bereitschaft Deutschlands, Wasserstoff und Wasserstoffderivate zu importieren, zu senden. Zusätzlich zu den Strategieprogrammen hat die Bundesregierung den Nationalen Wasserstoffrat (NWR) ins Leben gerufen als ein unabhängiges, überparteiliches Beratungsgremium. Der Rat besteht aus hochrangigen Expertinnen und Experten aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. [9]

Bayerische Wasserstoffstrategie

Um die starke Position der bayerischen Wirtschaft und Wissenschaft in dem wichtigen Zukunftsfeld Wasserstoff zu festigen und auszubauen, gründet der Freistaat Bayern im September 2019 in Nürnberg das Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B). Basierend auf der 2020 verabschiedeten Bayerischen Wasserstoffstrategie hat die Staatsregierung einen geeigneten Handlungsrahmen für die konkrete Ausgestaltung des Wasserstoffhochlaufs im Freistaat

Bayern geschaffen und im Juli 2024 die Bayerische Wasserstoffstrategie 2.0 veröffentlicht, die Teil des Energieplan Bayern 2040 ist. [10], [11]

In der Bayerischen Wasserstoffstrategie sind auf Basis des Ist-Zustands klare Ziele und konkrete Maßnahmen für den Hochlauf der Bayerischen Wasserstoffwirtschaft genannt:

Ziel der Bayerischen Wasserstoffstrategie ist die Schaffung von Grundlagen und Rahmenbedingungen durch einen konsistenten und Anreize setzenden Rechtsrahmen für den Wasserstoffhochlauf. Bayern setzt einen Fokus auf die Beschaffung und Bereitstellung von Wasserstoff über den nationalen sowie den internationalen Markt durch Importe, da die künftigen Bedarfe in Bayern die heimischen Produktionskapazitäten deutlich übersteigen werden. Die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Wasserstoff soll mit Hilfe des Wasserstoffkernnetzes bis 2032 und einer zeitgleichen Netzentwicklung bis für die weitere Erschließung der Regionen erfolgen. Das Voranbringen der Transformation der Wirtschaft und Industrie soll durch die Erschließung breiter Einsatzfelder zur stofflichen und energetischen Nutzung in der Industrie, der Mobilität und im Energiebereich unterstützt werden. Umgesetzt werden sollen diese Ziele durch die Stärkung der bayerischen Netzwerke und Kompetenzen im Bereich Wasserstoff sowie eine Begleitung und Unterstützung beim Aufbau der Wasserstoffinfrastruktur in Bayern sowie durch den Einsatz der bayerischen Interessenvertretung auf Bundes- und EU Ebene. Um die gewünschten Ziele und geplanten Maßnahmen genauer zu definieren, wurde 2022 die Wasserstoff-Roadmap vom Zentrum Wasserstoff.Bayern (H2.B) veröffentlicht. Im Jahr 2025 arbeitete das H2.B an einem Nachfolgedokument, welches als Fortschrittsbericht veröffentlicht werden soll. [10], [11]

2.3 Zusammenfassung

Trotz der gemeinsamen europäischen Klimaschutzziele und des gemeinsamen Rahmens unterscheiden sich die NEPCS der Tschechischen Republik und der Bundesrepublik deutlich aufgrund ihrer wirtschaftlichen Struktur, ihrer Beschaffenheit der Energieversorgung und der politischen Prioritäten. Um die europäischen Klimaziele zu erreichen, erstellt und aktualisiert jeder EU-Staat seine nationale Energie- und Klimastrategien. Jedes Land hat unterschiedliche Voraussetzungen und Besonderheiten, welche sich in den NECP widerspiegeln.

Eine wesentliche Gemeinsamkeit besteht darin, dass sowohl Deutschland als auch Tschechien ihre Energie- und Klimapolitik integriert planen. Beide NECPS behandeln dieselben fünf zentralen Bereiche: Emissionsminderung, Ausbau erneuerbarer Energien, Verbesserung der Energieeffizienz, Sicherstellung der Energieversorgung sowie Förderung von Forschung und Innovation. Zudem verfolgen beide Staaten das übergeordnete Ziel der Klimaneutralität bis zur Mitte des Jahrhunderts und orientieren sich an den europäischen Reduktionszielen für das Jahr 2030. In beiden Ländern spielt außerdem die Modernisierung der Industrie eine wichtige Rolle, da energieintensive Wirtschaftssektoren erheblich zu den Emissionen beitragen.

Die Unterschiede zeigen sich vor allem im Energiemix und in der Transformationsstrategie. Deutschland setzt stark auf den schnellen Ausbau erneuerbarer Energien wie Wind- und Solarenergie und verfolgt eine weitgehende Elektrifizierung von Verkehr, Wärme und Industrieprozessen. Der Ausstieg aus der Kernenergie sowie der geplante Kohleausstieg führen dazu, dass erneuerbare Energien und neue Technologien wie Wasserstoff eine zentrale Rolle im deutschen NECP einnehmen.

Tschechien hingegen verfolgt einen stärker diversifizierten Ansatz, bei dem Kernenergie eine wichtige Funktion für eine stabile und CO₂-arme Stromversorgung übernimmt. Aufgrund der historisch bedeutenden Kohleindustrie erfolgt der Strukturwandel vorsichtiger und schrittweise, um wirtschaftliche und soziale Auswirkungen abzufedern. Der Ausbau erneuerbarer Energien wird ebenfalls vorangetrieben, jedoch in einem moderateren Tempo als in Deutschland.

Ein weiterer Unterschied liegt in den wirtschaftlichen Ausgangsbedingungen. Deutschland verfügt über einen größeren Anteil an Dienstleistungssektoren und umfangreiche Investitionskapazitäten für Energiewende-Technologien, während Tschechien stärker industriell geprägt ist und daher besonderen Wert auf Versorgungssicherheit und Wettbewerbsfähigkeit legt.

Trotz dieser unterschiedlichen Wege verfolgen beide NECP dasselbe langfristige Ziel: die Transformation zu einem nachhaltigen, sicheren und klimafreundlichen Energiesystem. Die nationalen Strategien zeigen, dass innerhalb eines gemeinsamen europäischen Rahmens



verschiedene technologische und politische Ansätze möglich sind, solange sie zur Reduktion von Emissionen und zur Erreichung der gemeinsamen Klimaziele beitragen.

Beim Thema Wasserstoff unterscheiden sich beide Länder grundsätzlich: Während in Deutschland der Wasserstoff ein zentrales Schlüsselement der Energiewende ist, spielt Wasserstoff in der Tschechischen Republik eine ergänzende, strategisch langfristige – aber derzeit noch keine zentrale – Rolle innerhalb der Energiewende.

3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Europäische Union hat den Mitgliedstaaten im Rahmen ihrer energie- und klimapolitischen Gesetzgebung die Verpflichtung auferlegt, die festgelegten Ziele und Regeln in ihre nationalen Rechtsordnungen zu überführen (vgl. Kapitel 2).

Im Bereich der erneuerbaren Energien und des Wasserstoffs ergeben sich diese Verpflichtungen insbesondere aus der Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (RED II), die anschließend im Rahmen des Pakets „Fit for 55“ sowie des Plans REPowerEU überarbeitet und ergänzt wurde. [2], [5], [12]

Die neue Überarbeitung dieser Richtlinie, bezeichnet als RED III (Richtlinie (EU) 2023/2413), regelt auch die Verpflichtungen der Mitgliedstaaten im Zusammenhang mit der Herkunft und Nutzung erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biologischen Ursprungs (RFNBO), zu denen auch erneuerbarer Wasserstoff gehört. Die RED-III-Richtlinie legt ein verbindliches Ziel für den Anteil erneuerbarer Energien am Energiemix der EU bis 2030 von mindestens 42,5 % fest, mit der Möglichkeit einer Erhöhung auf 45 %, einschließlich der Verpflichtung der Mitgliedstaaten, den Verbrauch von erneuerbarem Wasserstoff in Industrie und Verkehr zu fördern. Die RED-III-Richtlinie wurde in die nationalen Rechtsordnungen der Mitgliedstaaten umgesetzt. [13]

Ein Auszug der relevanten EU-Regulatorik, insbesondere in Richtung der Wasserstofferzeugung, als auch Auszüge aus Deutschland und Tschechien werden nachfolgend behandelt.

3.1 Europäische Ebene

3.1.1 Erzeugung von RFNBO-Wasserstoff

Die nachfolgende Definition bezieht sich auf erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs) und damit auch auf elektrolytisch erzeugten Wasserstoff, der im Mobilitätssektor eingesetzt wird. Weiterhin muss nachgewiesen werden, dass die sog. RFNBOs über ihre gesamte Wertschöpfungskette inkl. Transport zur Tankstelle mind. 70 % der THG-Emissionen gegenüber der fossilen Referenz

einsparen. Die fossile Referenz ist erdgasbasierter Wasserstoff, welcher per Dampfreformierung erzeugt wird. Die Kriterien wurden auf EU-Ebene in einem sog. „Delegierten Rechtsakt“ im Rahmen der RED II formuliert und am 14.03.2024 in die 37. BImSchV (deutsches Recht) übernommen [14], [15]. Zudem sieht die neue RED III eine Mindestquote von RFNBO-Kraftstoffen (z. B. Wasserstoff) von 1 % des Endenergieverbrauchs im Verkehrssektor vor [16]. Die Kriterien sind für alle EU-Länder gleichermaßen gültig.

Für den Fall, dass eine direkte elektrische Verbindung ohne Umweg über das öffentliche Netz zwischen der RFNBO-Anlage (auch PtX-Anlage genannt) und der EE-Anlage existiert, gilt der Wasserstoff als erneuerbar, sofern die EE-Anlage nicht mehr als 36 Monate vor der RFNBO-Anlage in Betrieb genommen wurde und der Netzstrombezug der RFNBO-Anlage ausgeschlossen werden kann.

Für die Möglichkeit des Bezugs von Strom aus dem elektrischen Netz für den Betrieb von Elektrolyseuren ergeben sich die folgenden vier Fälle:

Fall 1

Wasserstoff ist demnach erneuerbar hergestellt, wenn sich die Anlage in einer Gebotszone befindet, in der der durchschnittliche Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien im vorangegangenen Kalenderjahr über 90 % lag und die Erzeugung eine Höchstzahl von Stunden nicht überschreitet, die im Verhältnis zum Anteil von Strom aus Erneuerbaren Energien in der Gebotszone festgelegt wurde.

Sobald der durchschnittliche Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien in einem Kalenderjahr 90 % übersteigt, gilt er auch in den folgenden fünf Kalenderjahren als höher als 90 %.

Die für die Projektregion geltenden Gebotszonen sind die Zone Deutschland-Luxemburg und Tschechien. In dieser müssen nach der 37. BImSchV 90 % Erneuerbare Energien im Strommix enthalten sein, um ohne weitere Einschränkungen Netzstrom zu RFNBO zu verarbeiten.

Fall 2

Sind die in Fall 1 genannten Bedingungen nicht erfüllt, können Kraftstoffhersteller aus dem Netz entnommenen Strom als vollständig erneuerbar anrechnen, wenn die Anlage in einer Gebotszone liegt, in der die Emissionsintensität von Strom weniger als 18 g CO₂eq/MJ (65 g CO₂eq/kWh) beträgt, sofern die folgenden Kriterien erfüllt sind:

- wenn ein PPA vorliegt, welcher den gesamten für erneuerbaren Wasserstoff verwendeten Strom bereitstellt
- wenn die Bedingungen für die zeitliche und geografische Korrelation gemäß den Artikeln 6 und 7 des delegierten Rechtsaktes erfüllt sind

Die Emissionsintensität von Strom wird nach Artikel 28 Abs. 5 der Richtlinie (EU) 2018/2001 berechnet. Sobald die Emissionsintensität von Strom in einem Kalenderjahr unter 18 g CO₂eq/MJ (65 g CO₂eq/kWh) liegt, gilt die durchschnittliche Emissionsintensität von Strom auch in den folgenden fünf Kalenderjahren als unter 18 g CO₂eq/MJ (65 g CO₂eq/kWh) liegend. Diese Erleichterung ermöglicht es, RFNBO in Gebotszonen mit geringem EE-Anteil und zugleich geringen spezifischen Emissionen herzustellen. Dies ist insbesondere in Gebotszonen relevant, welche von „emissionsneutralem“ Strom aus Kernkraftwerken, wie z.B. Frankreich, geprägt sind.

Zum Vergleich liegen die durchschnittlichen, spezifischen Emissionen für das Jahr 2024 in Deutschland bei 331 g CO₂eq/kWh und in Tschechien bei 476 g CO₂eq/kWh [17]. Damit ist in beiden Ländern die Produktion von RFNBO-Wasserstoff nach diesem Fall nicht möglich.

Fall 3

Aus dem Netz entnommene Elektrizität kann ebenfalls als vollständig erneuerbar angerechnet werden, wenn diese während eines Ausgleichszeitraums verbraucht wird, in dem der Erzeuger des Kraftstoffs auf der Grundlage von Nachweisen des nationalen Übertragungsnetzbetreibers beweisen kann, dass:

- Stromerzeugungsanlagen, die erneuerbare Energiequellen nutzen, gemäß Artikel 13 der Verordnung (EU) 2019/943 nach unten „redispatched“ wurden

- der für die Erzeugung von Wasserstoff verbrauchte Strom den Bedarf an Redispatching in entsprechendem Umfang verringert hat

Fall 4

Aus dem Netz entnommener Strom kann als vollständig erneuerbar angerechnet werden, wenn er die Bedingungen der Zusätzlichkeit, der zeitlichen und der geografischen Korrelation gemäß den Artikeln 5, 6 und 7 des delegierten Rechtsakts erfüllt.

Zusätzlichkeit:

Eigene EE-Anlage oder PPA mit der entsprechenden Strommenge,

- Die frühestens 36 Monate vor der PtX-Anlage in Betrieb genommen wurde
- Wenn die EE-Anlage keine Förderungen in Form von Betriebs- oder Investitionsbeihilfen erhalten hat (es existieren gewisse Ausnahmen)

Hinweis: RFNBO-Anlagen, die vor 2028 in Betrieb genommen werden, sind bis 31.12.2037 von den Auflagen in Bezug auf die Zusätzlichkeit ausgenommen. So wird gewährleistet, dass Elektrolyseure auch mit EE-Bestandsanlagen Wasserstoff produzieren können, sofern der Strom über PPA bezogen wird.

Zeitliche Korrelation:

- Bis Ende 2029: wenn Wasserstoff im selben Kalendermonat hergestellt wird wie der dafür verwendete Strom (direkt genutzt oder im selben Kalendermonat eingespeichert)
- Ab Anfang 2030: Zeithorizont wird auf eine Stunde verkürzt
- Zeitliche Korrelation gilt als immer erfüllt, wenn der Clearingpreis für Elektrizität unter 20 Euro/MWh oder niedriger als das 0,36-fache des CO₂-Zertifikatspreises liegt

Damit wird sichergestellt, dass sich kein fossiler Strom im Netz befindet oder ausschließlich fossiler Strom, der keinesfalls zur Deckung der Grenzkosten des fossilen Kraftwerks beiträgt und demnach unwirtschaftlich vermarktet wird (Stichwort „Merit-Order-Effekt“).

Geografische Korrelation:

- PtX-Anlage mit PPA liegt in gleicher Gebotszone wie die EE-Anlage
- EE-Anlage kann auch in einer zusammenhängenden Gebotszone liegen, wenn die Strompreise größer als oder gleich hoch sind wie diejenigen in der Gebotszone der PtX-Anlage
- Offshore-Anlagen, die im Rahmen eines PPA den Strom an eine mit der Offshore-Zone verbundene Gebotszone an Land, in welcher die PtX-Anlage steht, liefern

Abbildung 1 stellt einen Entscheidungsbaum dar, in dem alle Prüfschritte korrekt aufeinander aufbauend abgefragt werden. Dieser ermöglicht eine individuelle Einschätzung zum erzeugten Wasserstoff im konkreten Fall bzw. Projekt.

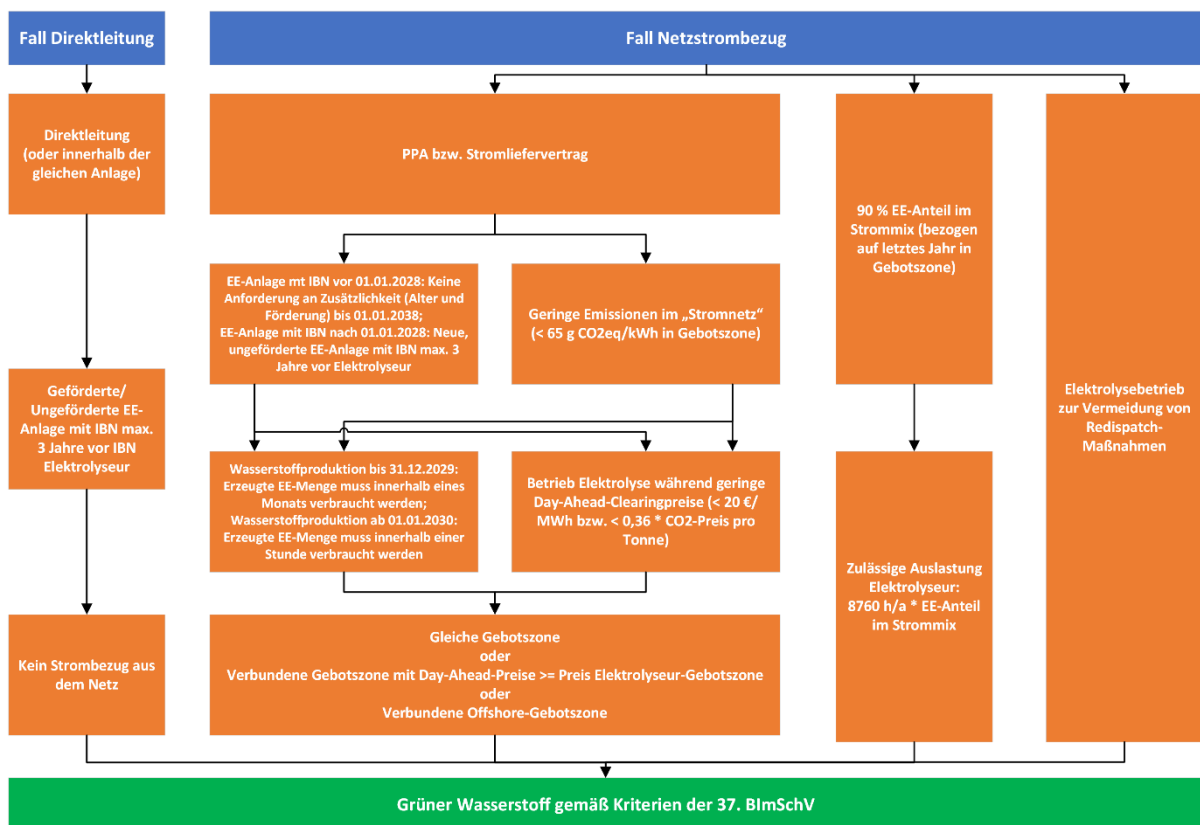


Abbildung 1: Kriterien für die Erzeugung von RFNBO-Wasserstoff gemäß des delegierten Rechtsakts der RED II und der 37. BImSchV.

3.1.2 Erzeugung von kohlenstoffarmem Wasserstoff

Mit dem Wasserstoff- und Gasmarkt-Paket hat die EU im Jahr 2024 einen konsistenten Rechtsrahmen für erneuerbare und kohlenstoffarme Gase geschaffen. Zentrale Bausteine sind die Richtlinie (EU) 2024/1788 und die Verordnung (EU) 2024/1789, die gemeinsamen Regeln für Terminologie, Zertifizierung und Infrastruktur für erneuerbare und kohlenstoffarme Gase – einschließlich Wasserstoff – festlegen. Die Richtlinie verpflichtet die EU-Kommission zudem, eine einheitliche Methode zur Bewertung der Treibhausgas-(THG)-Einsparungen für kohlenstoffarme Kraftstoffe zu entwickeln.

Diese Methodik wurde mit der Delegierten Verordnung (EU) 2025/2359 am 8. Juli 2025 verabschiedet. Sie ergänzt die Richtlinie 2024/1788 und definiert, wie THG-Einsparungen über den gesamten Lebenszyklus zu berechnen sind – einschließlich vor- und nachgelagerter Emissionen sowie der tatsächlich erreichten CO₂-Abscheidung. [18]

Die EU definiert kohlenstoffarmen Wasserstoff über eine THG-Einsparung von mindestens 70 % gegenüber dem fossilen Referenzwert der EU (94 g CO₂eq/MJ). Das entspricht einer maximalen Lebenszyklus-Emissionsintensität von 28,2 g CO₂eq/MJ bzw. 3,38 kg CO₂eq pro kg H₂. Diese Schwelle ist in der Praxis der maßgebliche Grenzwert, um Wasserstoff und seine Derivate als „kohlenstoffarm“ einzustufen. Die Delegierte Verordnung (EU) 2025/2359 legt fest, dass bei der Bilanzierung alle relevanten Prozessschritte zu berücksichtigen sind. Dazu gehören Emissionen aus Bereitstellung der Einsatzstoffe, Prozessenergie und -umwandlung, Transport und Verteilung, sowie Gutschriften aus CO₂-Abscheidung und geologischer Speicherung (CCS). Ebenso sind Methanleckagen, beispielsweise aus Erdgasförderung und -transport, explizit mit einzubeziehen. Für strombasierte Pfade, die nicht unter RFNBO (vgl. Kapitel 3.1.1) fallen, z. B. Elektrolyse mit emissionsarmen Netzstrom, enthält die Methodik Stromzuteilungsoptionen. Bei gasbasierten Pfaden definiert die EU Emissionsfaktoren für CO₂- und Methanintensitäten des eingesetzten Brennstoffs. Für Erdgas wurden diese u. a. auf 4,9 g CO₂/MJ festgelegt. Zusätzlich unterscheidet die Methodik zwischen Pipeline-Gas und LNG. [18]

Im Nachfolgenden wird die Methodik der Stromzuteilungsoptionen für die Nutzung von Netzstrom während der Elektrolyse näher erläutert [18]. Die neue EU-Methodik ermöglicht grundsätzlich, dass Wasserstoff als *kohlenstoffarm* eingestuft werden kann, auch wenn er mit Netzstrom erzeugt wird. Dafür gibt es vier verschiedene Zuteilungswege für die Bewertung der Stromemissionen: Jahresmittelwerte, stündliche Durchschnittswerte, den Vollbenutzungsstunden-Ansatz sowie den Marginal-Technologie-Ansatz. Bei den Jahresmittelwerten werden die durchschnittlichen Emissionsfaktoren des Strommixes eines EU-Mitgliedsstaats verwendet. 2023 lagen diese Werte in Deutschland bei 103,8 g CO₂eq/MJ und in Tschechien bei 127,6 g CO₂eq/MJ. Je niedriger dieser Wert ist, desto leichter kann ein Elektrolyseur die Anforderungen für kohlenstoffarmen Wasserstoff erfüllen. Über stündliche Durchschnittswerte kann ein Elektrolyseur seine Emissionsbilanz verbessern, indem er gezielt in Stunden arbeitet, in denen der prognostizierte Emissionsfaktor des Netzstroms besonders niedrig ist. Dieser Ansatz setzt voraus, dass die Methode von der nationalen Aufsichtsbehörde zugelassen wurde. Der Vollbenutzungsstunden-Ansatz erlaubt, Emissionen mit 0 g CO₂eq/MJ anzusetzen, solange der Elektrolyseur nicht mehr Stunden läuft, als im Vorjahr Stunden existierten, in denen der Strompreis durch erneuerbare Energien oder Kernkraftwerke gesetzt wurde. Bei einer Überschreitung gilt ein hoher Standardwert von 183 g CO₂eq/MJ. Beim Marginal-Technologie-Ansatz wird der Emissionswert der jeweils preissetzenden Technologie angesetzt. Er ist jedoch nur zulässig, wenn der nationale Übertragungsnetzbetreiber diese Daten stundenaktuell und transparent bereitstellt.

Deutschland kann aufgrund seines emissionsärmeren Strommixes und eines hohen Anteils erneuerbarer Energien häufiger Stunden vorweisen, in denen Elektrolyse klimafreundlich möglich ist. Durch flexible Fahrweise (z. B. Betrieb in wind- und sonnenreichen Stunden) kann die Zertifizierung als *kohlenstoffarm* eher erreicht werden. In Tschechien ist dies schwieriger, da der Strommix bis zum geplanten Kohleausstieg 2033 (vgl. [19]) weiterhin deutlich fossiler geprägt ist. Fossile Kraftwerke setzen dort häufiger den Strompreis, was sowohl die Jahresmittelwerte als auch die nutzbaren stündlichen Zeitfenster verschlechtert. Dadurch sind die Voraussetzungen für eine Einstufung des Wasserstoffs als „kohlenstoffarm“ ungünstiger als in Deutschland.

3.1.3 Erzeugung von fortschrittlichen Biokraftstoffen

Fortschrittliche Biokraftstoffe (Advanced Biofuels) sind im europäischen Rechtsrahmen als Biokraftstoffe definiert, die aus den in Anhang IX Teil A der Richtlinie (EU) 2018/2001 (RED II) aufgeführten Rohstoffen hergestellt werden. Hierzu zählen insbesondere ausgewählte Abfall- und Reststofffraktionen [12]. Anhang IX nennt daneben auch Rohstoffe für die Herstellung von Biogas für den Verkehr. Damit diese Kraftstoffe im Rahmen der Richtlinie berücksichtigt werden können, müssen die festgelegten Nachhaltigkeits- und Treibhausgas-minderungskriterien erfüllt werden. Die THG-Wirkung ist dabei nach der vorgegebenen Methodik lebenszyklusbezogen zu bestimmen und auf einen fossilen Vergleichswert zu beziehen. Parallel dazu begrenzt der europäische Rechtsrahmen den Beitrag von Biokraftstoffen aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen und enthält besondere Vorgaben für Rohstoffe mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen.

Mit der RED III wurde das Ambitionsniveau im Verkehrssektor angehoben. Bis 2030 müssen die Mitgliedstaaten entweder einen Anteil erneuerbarer Energien im Verkehr von mindestens 29 % erreichen oder alternativ eine Minderung der Treibhausgasintensität um mindestens 14,5 % erzielen [13]. Zusätzlich gilt eine kombinierte Unterquote von mindestens 1 % im Jahr 2025 und 5,5 % im Jahr 2030 für fortschrittliche Biokraftstoffe sowie Biogas aus Rohstoffen nach Anhang IX Teil A und für erneuerbare Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs. 2030 muss davon mindestens ein Prozentpunkt auf RFNBOs entfallen. Diese Zielwerte gehen auf die Änderungen durch RED III zurück.

Für die regulatorische Bewertung fortschrittlicher Biokraftstoffe sind nicht nur die verwendeten Einsatzstoffe maßgeblich. Die RED verknüpft die Anerkennung von Biokraftstoffen auch mit Nachhaltigkeits- und THG-Minderungskriterien. Die Treibhausgaswirkung ist nach der in Anhang V festgelegten Methodik lebenszyklusbezogen zu berechnen und umfasst insbesondere Emissionen aus Rohstoffgewinnung bzw. -anbau, Verarbeitung sowie Transport und Verteilung [12]. Produktbezeichnungen wie FAME (Fatty Acid Methyl Ester, Fettsäuremethylester) oder HVO (Hydrotreated Vegetable Oil, hydrierte biogene Öle und Fette) begründen daher für sich genommen noch keine Einstufung als fortschrittlicher Biokraftstoff. Die

regulatorische Einordnung hängt vielmehr von den jeweils eingesetzten Rohstoffen sowie von der Erfüllung der Nachhaltigkeits- und Nachweisanforderungen ab.

Für die Luftfahrt ist eine begriffliche Trennung erforderlich. Sustainable Aviation Fuels (SAF) umfassen synthetische Flugkraftstoffe, Flug-Biokraftstoffe (darunter auch fortschrittliche Biokraftstoffe), weitere Biokraftstoffe sowie recycelte kohlenstoffbasierte Flugkraftstoffe [20], [21]. Fortschrittliche Biokraftstoffe können damit Teil von SAF sein, sind jedoch nicht mit SAF insgesamt gleichzusetzen. Die regulatorische Anerkennung setzt voraus, dass die betreffenden Flug-Biokraftstoffe die Nachhaltigkeits- und Lebenszyklus-THG-Kriterien der RED erfüllen und gemäß Art. 30 RED zertifiziert sind [21].

3.2 Tschechische Perspektive

In der Tschechischen Republik ist die Umsetzung europäischer Verpflichtungen bereits in einer Reihe nationaler Rechtsnormen sichtbar, wenngleich einige aus der RED-III-Richtlinie resultierende Verpflichtungen noch auf ihre endgültige Verabschiedung und den Abschluss des Gesetzgebungsverfahrens warten.

3.2.1 Novelle des Luftreinhaltegesetzes

Erste Schritte in diese Richtung stellten insbesondere die Novelle des Luftreinhaltegesetzes dar, die einen Teil der Verpflichtungen im Zusammenhang mit erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biologischen Ursprungs im Verkehrssektor umsetzt. Diese Novelle, die im Dezember 2024 vom Abgeordnetenhaus verabschiedet und im Februar 2025 vom Präsidenten unterzeichnet wurde, führt Verpflichtungen für ausgewählte Kraftstofflieferanten ein, ein Mindestmaß an fortschrittlichen Biokraftstoffen und erneuerbaren Kraftstoffen nicht-biologischen Ursprungs im Verkehrssektor in den einzelnen Jahren bis 2030 sicherzustellen. Ein Teil dieser Verpflichtungen legt den Mindestenergieanteil von RFNBO im Verkehr im Sinne der Anforderungen der europäischen RED-III-Richtlinie fest und erfüllt damit die europäische Umsetzungspflicht. Bestandteil der Regelung ist zudem eine schrittweise Reduzierung der Treibhausgasemissionen der im Verkehrssektor bereitgestellten Energie gemäß dem im tschechischen Gesetz festgelegten Zeitplan. [22]

3.2.2 Industrieller Wasserstoffverbrauch

Ein weiterer Bereich der Umsetzung betrifft den industriellen Wasserstoffverbrauch. In Tschechien ist das im Rahmen der energie- und förderrechtlichen Umsetzung der RED-III-Richtlinie geregelt. Für Unternehmen mit hohem Wasserstoffverbrauch werden dort Mindestanteile erneuerbaren Wasserstoffs festgelegt. Dieser Anteil ist in der tschechischen Regelung niedriger festgelegt als in der RED-III-Richtlinie selbst vorgesehen – während die Richtlinie Ziele von bis zu 42 % Anteil erneuerbaren, RFNBO-Wasserstoffs im industriellen Verbrauch bis 2030 vorsieht, reduziert die tschechische Umsetzung diese Verpflichtung (beispielsweise auf 10 % für große Verbraucher ab 2030 mit anschließend steigenden Anteilen). [23]

3.3 Deutsche Perspektive

3.3.1 Wasserstoffbeschleunigungsgesetz

Der Entwurf des Wasserstoffbeschleunigungsgesetzes (WasserstoffBG) zielt darauf ab, die Verfügbarkeit von Wasserstoff zu erhöhen, indem Planungs-, Zulassungs- und Vergabeverfahren entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette beschleunigt, vereinfacht und durchgängig digitalisiert werden, um den Hochlauf einer nationalen Wasserstoffinfrastruktur wirksam zu unterstützen. Einschlägigen Anlagen und Leitungen wird hierfür der Status des „übertragenden öffentlichen Interesses“ zugewiesen, womit ihnen in behördlichen Abwägungsentscheidungen besonderes Gewicht zukommt. Zentrale Instrumente sind klare Fristenregelungen, eine umfassende Verfahrensdigitalisierung und beschleunigte Vergabeverfahren. Konkret vorgesehen sind u. a. Höchstfristen in wasserrechtlichen Zulassungsverfahren, digitale Genehmigungsprozesse, Erleichterungen des vorzeitigen Maßnahmenbeginns, Verkürzungen des Instanzenzugs und beschleunigte Eilverfahren. Zugleich sind Erleichterungen im Energiewirtschaftsrecht für Genehmigungen von Wasserstoffleitungen geplant. Zur Überprüfung der Wirksamkeit der beschleunigenden Instrumente sieht der Regierungsentwurf Evaluations- und Berichtspflichten vor. [24]

Zum sachlichen Anwendungsbereich des Gesetzes zählen insbesondere Elektrolyseure, Importanlagen für Wasserstoff und dessen Derivate (z. B. Ammoniak, Methanol),

Speicheranlagen und die Leitungsinfrastruktur. Damit adressiert das Gesetz die gesamte Lieferkette. Zur Dekarbonisierung schwer direkt zu elektrifizierender Sektoren werden zudem Anlagen zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe erfasst. Gegenüber früheren Entwürfen erweitert der Regierungsentwurf den Umfang u. a. um Anlagen zur Erzeugung von Wasserstoff aus biogenen Reststoffen, zur Rückumwandlung (Cracking) von Derivaten sowie zur Konditionierung. Des Weiteren soll die Gewinnung natürlichen Wasserstoffs erleichtert werden, indem dieser als bergfreier Bodenschatz im Bundesberggesetz definiert und so dem bergrechtlichen Regime für bergfreie Rohstoffe unterstellt wird. [24]

3.3.2 Wasserstoff im Zuge der kommunalen Wärmeplanung

Die kommunale Wärmeplanung (kWP) ist ein strategisches Instrument zur Vorbereitung einer klimaneutralen Wärmeversorgung auf kommunaler Ebene. Ziel des Wärmeplans ist es, Bürgerinnen und Bürgern auf Grundlage einer neutralen und technologieoffenen Analyse Orientierung bei der Wahl zukünftiger Heizsysteme zu bieten. Mit der Veröffentlichung eines Wärmeplans sind noch keine unmittelbaren Umsetzungs- oder Bauentscheidungen verbunden. Vielmehr liegt der Schwerpunkt der kommunalen Wärmeplanung auf der langfristigen strategischen Ausrichtung der Kommune, um den Transformationsprozess im Wärmesektor strukturiert zu starten und dauerhaft voranzubringen. Der rechtliche Rahmen ergibt sich auf Bundesebene aus dem Wärmeplanungsgesetz (WPG) sowie dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) [25], [26]. Die Verpflichtung zur Durchführung der kommunalen Wärmeplanung wird in Bayern durch Landesrecht auf die Kommunen übertragen. Für Kommunen mit mehr als 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern ist die Wärmeplanung bis spätestens 30. Juni 2026 abzuschließen, für Kommunen mit bis zu 100.000 Einwohnerinnen und Einwohnern bis spätestens 30. Juni 2028.

Im Rahmen der KWP kann Wasserstoff als flexibler und klimafreundlicher Energieträger integriert werden, um fossile Brennstoffe schrittweise zu ersetzen und das CO₂-Emissionsziel zu erreichen. Dabei bietet Wasserstoff insbesondere in Bereichen Potenzial, in denen herkömmliche Technologien wie dezentrale Versorgungsoptionen oder Wärmenetze an ihre Grenzen stoßen. Die Industrie spielt in diesem Transformationsprozess eine zentrale Rolle. Industriebetriebe, vor allem in Branchen wie der Chemie- und Stahlproduktion, aber auch

Glas- und Porzellanherstellung können dabei als Motor fungieren, die den lokalen Ausbau von Wasserstofftechnologie und -transportsystemen vorantreiben. [27]

Ein weiterer wichtiger Baustein in diesem Zusammenspiel kann der Einsatz von „Fahrplänen für die Umstellung der Netzinfrastruktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff“ („FAUNA“) sein. Ein solcher Fahrplan kann anschließend an die kommunale Wärmeplanung ausgearbeitet und beschlossen werden. Grundstein hierfür ist die Ausweisung von Wasserstoffnetzausbaubereichen im Zuge der Erarbeitung des Wärmeplans. Ein Wasserstoffnetzausbaubereich kann z. B. auf Basis der Alternativlosigkeit eines Industriebetriebs beim Thema Prozessgas oder Prozesswärme ausgewiesen werden. [27]

FAUNA schafft damit auf die KWP aufbauend einen klaren Rahmen zur Transformation der Gasnetzinfrastruktur in eine zukunftsfähige, wasserstoffbasierte Versorgung. Durch die Festlegung von Umstellungsterminen, Nachweispflichten und definierten Meilensteinen schaffen die FAUNA-Fahrpläne Planungssicherheit für alle Akteure – von Netzbetreibern über Kommunen bis hin zu industriellen Partnern und Wasserstoff-Abnehmern. Der Wasserstofffahrplan ermöglicht eine koordinierte und transparente Umsetzung der Umstellungsstrategien und fördert gezielte Investitionen in die notwendige Infrastruktur. [27]

Insgesamt entsteht durch die kombinierte Betrachtung von Wasserstoff als Energieträger, der aktiven Rolle der Industrie und den strukturierten Wasserstofffahrplänen ein integrativer Ansatz für die kommunale Wärmeplanung.

4 Politische Fördermaßnahmen zum Wasserstoffhochlauf

Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft ist mit erheblichen wirtschaftlichen und strukturellen Herausforderungen verbunden, die eine Unterstützung sowie die Schaffung von Anreizen erforderlich machen. Insbesondere hohe Produktionskosten für erneuerbaren Wasserstoff, fehlende Infrastruktur sowie Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Nachfrage führen zu erhöhten Investitionsrisiken. Für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft benötigt es Investitionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, da Produktion, Transportinfrastruktur und industrielle Nutzung zeitgleich aufgebaut werden müssen. Ohne politische Eingriffe entsteht ein sogenanntes Henne-Ei-Problem, das den Markthochlauf verzögert.

Fördermaßnahmen zielen daher darauf ab, Investitionsrisiken zu reduzieren, Kostenunterschiede temporär auszugleichen und technologische Lernprozesse zu beschleunigen. Durch die Unterstützung von Forschung, Demonstrationsprojekten, Infrastruktur und Markteinführung soll der Übergang von einer frühen Entwicklungsphase zu einem langfristig selbsttragenden Wasserstoffmarkt ermöglicht werden. Vor diesem Hintergrund nimmt die Förderpolitik eine zentrale Rolle beim Aufbau einer europäischen Wasserstoffwirtschaft ein.

Technologische Innovationen folgen häufig sogenannten Lernkurven: Mit steigender Produktionsmenge sinken Kosten durch Erfahrungseffekte, Standardisierung und effizientere Herstellungsprozesse. Historische Beispiele aus der Photovoltaik- und Windenergiebranche zeigen, dass staatliche Anschubförderungen entscheidend für spätere Kostensenkungen waren.

Der Wasserstoffhochlauf wird mittels unterschiedlicher Förderprogramme auf mehreren Ebenen unterstützt. Zentrale Programme der Europäischen Union, nationale Förderprogramme in Deutschland und Tschechien sowie Förderungen auf bayerischer Ebene sollen unterstützen. Ziel ist der Aufbau einer vollständigen Wasserstoffwirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von Forschung über Produktion bis zur Infrastruktur und industriellen Anwendungen. Wir möchten im Rahmen dieser Arbeit auf einige Fördermöglichkeiten aufmerksam machen und einige Fördermöglichkeiten vorstellen.

4.1 Europäische Förderprogramme

4.1.1 Important Project of Common European Interest (IPCEI)

Die Förderung von Wasserstoffprojekten im Rahmen der sogenannten IPCEI (Important Projects of Common European Interest) ist ein zentrales industriepolitisches Instrument der Europäischen Union, um den Hochlauf einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft zu beschleunigen. IPCEI ist kein einmaliges Programm, sondern ein Förderinstrument, das immer wieder genutzt werden kann und auch in anderen Bereichen wie der Batterieindustrie einen gemeinsamen europäischen Hochlauf einer Technologie fördert.

Bislang hat die EU vier große Wasserstoff-IPCEI-Wellen genehmigt: Hy2Tech, Hy2Use, Hy2Infra und Hy2Move. Diese decken gemeinsam die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette ab. Investitionen in Erzeugung von grünem Wasserstoff, in Wasserstoffinfrastruktur und die Nutzung von Wasserstoff in der Industrie und für Mobilität.

Insgesamt sind rund 100 Unternehmen aus mehr als 15 Ländern beteiligt, darunter große Industriekonzerne ebenso wie spezialisierte Technologieanbieter. Mittlerweile wurden auf EU-Ebene über 400 Projekte aus 18 Staaten registriert. [28]

4.1.2 Hydrogen Valleys

Hydrogen Valleys sind regionale Wasserstoff-Ökosysteme, die Mobilität, Industrie und Energieversorgung durch eine gemeinsame Infrastruktur verbinden. Diese Cluster bilden die gesamte Wertschöpfungskette ab und schaffen dezentrale Strukturen zur Wasserstofferzeugung, -verteilung und -nutzung in Europa. Gefördert durch das Horizon-Programm gibt es zwei Varianten:

- Small-scale: Erfordern jährliche Produktion von 500 Tonnen Wasserstoff, der mehrere Sektoren bedient, und müssen Kohlenstoffemissionen im Vergleich zu fossilen Technologien senken
- Large-scale: Erfordern 4.000 Tonnen Wasserstoff, der mehrere Sektoren bedient, und müssen Kohlenstoffemissionen im Vergleich zu fossilen Technologien senken; Versorgung von wenigstens zwei Wasserstoffanwendungen aus verschiedenen Sektoren

Die Projekte dürfen Wasserstoff durch Elektrolyse, Pyrolyse oder Dampfreformierung erzeugen. Förderfähig sind der Bau und die Inbetriebnahme von Produktionsanlagen und Infrastruktur, jedoch keine Betriebskosten. Das „Technology Readiness Level“ muss von Stufe 6 auf 8 ansteigen. Maximalfördersummen betragen 9 Millionen Euro (small-scale) bzw. 20 Millionen Euro (large-scale). [29], [30]

4.1.3 INTERREG

Die Interreg-Förderung unterstützt die grenzüberschreitende, transnationale und interregionale Zusammenarbeit zwischen europäischen Regionen, um gemeinsame Lösungen für wirtschaftliche, soziale und ökologische Herausforderungen zu entwickeln. Gefördert werden gemeinsame Projekte von öffentlichen Institutionen, Unternehmen und Forschungseinrichtungen in Bereichen wie Innovation, Umweltschutz und Bildung. Interreg stärkt den Austausch von Know-how, verbessert die Mobilität und trägt zur Verringerung regionaler Unterschiede bei. Damit fördert das Programm nachhaltige Entwicklung und den europäischen Zusammenhalt, insbesondere in Grenzregionen. Hier ist vor allem im grenzüberschreitenden Kontext das Thema Wasserstoff und ein gemeinsamer Hochlauf von Grenzregionen wichtig.

4.1.4 HORIZON

Die Clean Hydrogen Partnership hat im Rahmen von Horizon Europe einen neuen Förderaufruf für Wasserstoff-Forschungs- und Innovationsprojekte veröffentlicht. Das Gesamtfördervolumen beträgt 105 Millionen Euro und verteilt sich auf 21 Themenfelder. Gefördert werden unter anderem Projekte zur Wasserstofferzeugung, -speicherung und -verteilung entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der regionalen Umsetzung von Wasserstofflösungen: Für zwei Hydrogen-Valley-Projekte sind insgesamt 25 Millionen Euro vorgesehen. Für die Einreichung eines Projekts muss ein Konsortium aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen, Behörden oder Verwaltungen sowie anderen juristischen Personen aus relevanten Sektoren wie Energie, Verkehr oder Infrastruktur gebildet werden. Zusätzlich muss das Konsortium aus drei rechtlich unabhängigen Organisationen sowie aus drei unterschiedlichen EU-Mitgliedsstaaten oder Horizon Europe-assozierten Ländern bestehen.

4.2 Tschechische Förderprogramme

Die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in der Tschechischen Republik wird institutionell wesentlich durch die tschechische Wasserstofftechnologie-Plattform HYTEP begleitet. Nach ihrer Eigendarstellung unterstützt HYTEP die Entwicklung der Wasserstoffwirtschaft in Tschechien, vernetzt relevante Akteure und stellt fachliche Analysen zur Verfügung. Zugleich ist HYTEP auch auf europäischer Ebene angebunden; auf ihrer Website verweist die Plattform auf ihre Mitgliedschaft bei Hydrogen Europe. [31]

Auch die Einbindung von HYTEP in die nationale Wasserstoff-Governance ist offiziell dokumentiert. Die Wasserstoffstrategie des Ministeriums für Industrie und Handel führt HYTEP sowohl in der Hydrogen Coordination Group als auch im National Hydrogen Council auf. Außerdem wurde die Strategie 2021 unter Mitwirkung von HYTEP vorbereitet. Die von der Regierung im Juli 2024 beschlossene Aktualisierung der Strategie wurde ebenfalls unter Beteiligung von HYTEP erarbeitet. [8]

Förderpolitisch konzentriert sich die tschechische Wasserstoffpolitik vor allem auf Produktion, Mobilität und Infrastruktur. Die aktualisierte Wasserstoffstrategie betont die Bedeutung der Erzeugung beziehungsweise des Imports von Wasserstoff auf Basis von Elektrolyse und nennt für den Mobilitätsbereich ausdrücklich die Förderung wasserstoffbetriebener Straßen- und Schienenfahrzeuge, den Ausbau wasserstoffbasierter öffentlicher Mobilität sowie den koordinierten Aufbau eines Netzes von Wasserstofftankstellen [3]. Auch die Aktualisierung des Nationalen Aktionsplans für saubere Mobilität verweist auf Fördermaßnahmen für Wasserstoffmobilität und Betankungsinfrastruktur. [8], [32]

Als relevante Förderrahmen des EU-kofinanzierten tschechischen Programmsystems sind insbesondere das Operationelle Programm Verkehr, das Operationelle Programm Gerechter Übergang und das Integrierte Regionale Operationelle Programm zu nennen. Eine unmittelbar belegbare wasserstoffspezifische Förderung ist dabei vor allem im Verkehrsbereich sichtbar: Das Verkehrsministerium veröffentlichte im Rahmen des Operationellen Programms Verkehr 2021–2027 einen Aufruf zur Unterstützung des Baus von Wasserstofftankstellen mit einem Volumen von 300 Mio. CZK. Das Operationelle Programm Verkehr nennt zudem die stärkere Nutzung und Verfügbarkeit alternativer Kraftstoffe ausdrücklich als Priorität; das

Programm Gerechter Übergang adressiert den Übergang zur Klimaneutralität in ausgewählten Regionen, während das IROP auf nachhaltige territoriale Entwicklung und Verkehrsinfrastruktur ausgerichtet ist. [33], [34]

4.3 Bundesweite Förderprogramme

4.3.1 Bundesförderprogramm Industrie und Klimaschutz

Das Bundesförderprogramm Industrie und Klimaschutz (BIK) unterstützt die Industrie und Abfallwirtschaft bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen. Insgesamt stehen bis 2030 ca. 3,3 Milliarden Euro zur Verfügung. Antragsberechtigt sind Unternehmen, die Anlagen planen oder betreiben, sowie Konsortien, wobei der Zuwendungsempfänger eine Betriebsstätte in Deutschland haben und das Vorhaben in Deutschland umgesetzt werden muss. Das Förderprogramm gliedert sich in zwei Fördermodule. Modul 1 zielt dabei auf die Dekarbonisierung von Produktionsprozessen ab (Reduktion der direkten Emissionen um min. 40 %). Die Abscheidung und anschließende Speicherung/Nutzung von schwer vermeidbaren CO₂-Emissionen wird über das Modul 2 gefördert. In beiden Modulen werden sowohl Investitionsvorhaben in Bestands- und Neuanlagen als auch Innovationsvorhaben (Forschungs- und Entwicklungsvorhaben bzw. Durchführbarkeitsstudien) gefördert. Der Energieträger Wasserstoff wird im BIK gesondert berücksichtigt. Vorhaben zur Nutzung oder Produktion von Wasserstoff werden nur gefördert, wenn dieser aus der Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom stammt, wobei Anlagen zur Erzeugung oder Speicherung des Stroms im Modul 1 nicht Bestandteil der Förderung sind. Werden im Modul 1 die THG-Emissionen durch den Bau von sogenannter *gewidmeter Infrastruktur* (vorab festgelegte kleine Nutzergruppe) für Wasserstoff reduziert, so sind die Kosten für Infrastruktur und Speicher mit einer Förderintensität von 100 % bis zu einem Fördervolumen von max. 25 Mio. EUR förderfähig. [35]

4.3.2 Förderung von Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr in Verbindung mit Nutzfahrzeugen mit wasserstoffbasierten Antrieben

Der Förderaufruf des Bundesministeriums für Verkehr (BMV) zur „Förderung von Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr in Verbindung mit Nutzfahrzeugen mit wasserstoffbasierten Antrieben“ zielt auf den Aufbau eines initialen Netzes öffentlich zugänglicher

Wasserstofftankstellen für schwere Nutzfahrzeuge ab. Grundlage ist die Förderrichtlinie der Marktaktivierung im Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP II) vom 13. November 2025. Ziel ist es, die technische Marktreife wasserstoffbasierter Mobilität im Nutzfahrzeugsegment in den Markt zu überführen und den Hochlauf von Brennstoffzellen- und Wasserstoffverbrenner-Lkw zu beschleunigen. Das Programm koppelt daher den Aufbau von Tankstellen eng mit der gleichzeitigen Förderung von Fahrzeugflotten, um eine garantierte Grundausrüstung der Tankstellen sicherzustellen. Mit dem Aufruf sollen in etwa 40 Tankstellen und dazugehörige Fahrzeuge gefördert werden. Es stehen vier Varianten einer Paketförderung zur Verfügung: die Errichtung neuer Wasserstofftankstellen mit neuen Fahrzeugen, der Ausbau bestehender Tankstellen auf AFIR-Konformität mit neuen Fahrzeugen, der Neubau von Tankstellen mit bereits vorhandenen oder geplanten Fahrzeugen sowie die Förderung zusätzlicher Fahrzeuge zur Auslastung bereits realisierter oder im Bau befindlicher AFIR-konformer Tankstellen. Die Tankstellen müssen entlang des TEN-V-Kernnetzes oder in den funktionalen Bereichen ausgewiesener städtischer Knoten liegen. Zudem gelten Mindestabstände von 100 Kilometern zu bestehenden AFIR-konformen Standorten und eine tägliche Mindestabgabekapazität von 1.000 Kilogramm Wasserstoff. Die Tankstellen müssen öffentlich zugänglich sein und erneuerbaren Wasserstoff abgeben, wobei bis 2035 auch biogener oder kohlenstoffarmer Wasserstoff erlaubt sind.

Die Förderung umfasst Investitionszuschüsse für Tankstellen und Fahrzeuge. Wasserstofftankstellen können mit bis zu 50 % der förderfähigen Investitionsausgaben gefördert werden, maximal jedoch mit 4 Mio. € pro Standort. Für Fahrzeuge werden bis zu 80 % der Investitionsmehrausgaben gegenüber einem Dieselreferenzfahrzeug gewährt, begrenzt durch Förderhöchstbeträge (z. B. 150.000 € für N2-Brennstoffzellenfahrzeuge oder 300.000 € für N3-Lkw über 30 Tonnen mit Brennstoffzelle). Ein Paketantrag darf insgesamt 7 Mio. € nicht überschreiten, wobei maximal 3 Mio. € für Fahrzeuge bewilligt werden können. Voraussetzung für die Förderung der Fahrzeuge ist ein nachgewiesener Beitrag zur täglichen Mindestauslastung der Tankstelle zwischen 10 und 20 Prozent. Anträge können bis zum 31. Mai 2026 eingereicht werden.

Nach der Bewilligung gilt eine Zweckbindungsfrist von sechs Jahren für Tankstellen und vier Jahren für Fahrzeuge. Während des Projekts sowie während der Zweckbindungsphase müssen die Zuwendungsempfänger regelmäßige Berichte sowie Betriebs- und Verbrauchsdaten an den Projektträger Jülich und die NOW GmbH übermitteln. Die maximale Projektlaufzeit beträgt in der Regel 36 Monate. [36]

4.3.3 CO₂-Differenzverträge

Klimaschutzverträge (KSV) bzw. ab 2026 CO₂-Differenzverträge sind ein zentrales Instrument zur Förderung klimafreundlicher Technologien und Produktionsumstellungen, insbesondere in der energieintensiven Industrie. Gegenüber den früheren Klimaschutzverträgen wurden die CO₂-Differenzverträge für 2026 technologieoffener und mittelstandsfreundlicher ausgestaltet. Neu ist insbesondere, dass jetzt auch CCU-/CCS-Technologien (CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung) förderfähig sind. Dieses erweiterte Spektrum soll zusätzliche Transformationspfade eröffnen und den Wettbewerb stärken. Die Bundesregierung fördert ausgewählte Projekte über einen Zeitraum von 15 Jahren, indem sie die Mehrkosten für klimafreundliche Anlagen gegenüber einer definierten Referenzanlage übernimmt. Sobald sich die über die Klimaschutzverträge geförderten Anlagen innerhalb der Vertragslaufzeit ohne weitere Fördermittel wirtschaftlich betreiben lassen, zahlen die Unternehmen Geld an die Bundesregierung zurück. Die Verträge funktionieren über ein Gebotsverfahren, bei dem Unternehmen den Preis pro eingesparter Tonne CO₂ pro Tonne hergestelltem Produkt kalkulieren und anbieten. Diese Projekte zeichnen sich durch einen hohen Innovationsgrad aus, da sie in der jeweiligen Branche noch nicht in diesem Stil umgesetzt wurden. Auch die Fördereffizienz (Gebotspreis pro eingesparter Tonne CO₂) ist dabei ein wichtiges Vergabekriterium. Je niedriger der Gebotspreis pro eingesparter Tonne CO₂, desto höher die Zuschlagswahrscheinlichkeit. Das Verfahren dient somit auch dem Aufzeigen von technischen Möglichkeiten und Wegweisern für die Zukunft. Dabei spielt auch die Umstellung bestehender Industrieanlagen auf grünen Wasserstoff eine wichtige Rolle. Die Erzeugung von Wasserstoff ist jedoch nicht Teil der Förderrichtlinie. Weitere Informationen sind unter [37] zu finden.

4.4 Bayerische Förderprogramme

Zusätzlich zu den europäischen und nationalen Förderprogrammen hat auch der Freistaat Bayern den Hochlauf der regionalen Wasserstoffwirtschaft in den letzten Jahren durch verschiedene Programme entlang der Wertschöpfungskette gefördert und so den Ausbau zusätzlich unterstützt.

4.4.1 Bayerische Förderung zum Aufbau einer Elektrolyse-Infrastruktur (BayFELI)

BayFELI soll den Hochlauf von dezentralen Elektrolyseuren in Bayern, welche ausschließlich erneuerbaren Wasserstoff produzieren, vorantreiben. Die Elektrolyseure können z. B. mit Strom aus PV, Windkraft, Wasserkraft oder Geothermiekraftwerken betrieben werden. Projektträger ist das VDI TZ (www.vditz.de/bayfeli). Die maximale Fördersumme pro Projekt beträgt 5 Mio. Euro. Gefördert werden damit Elektrolyseanlagen mit einer Mindestleistung von 1 MW (Anschlussleistung). Die Förderquote beläuft sich auf 45 % der zuwendungsfähigen Ausgaben, welche je nach Unternehmensgröße um bis zu 20 Prozentpunkte auf 65 % der zuwendungsfähigen Ausgaben erhöht werden kann. Des Weiteren muss ein vollständiges Konzept vorliegen. Das Antragsverfahren läuft zweistufig ab. In der ersten Stufe muss eine Projektskizze mit einem vollständigen und umfangreichen Wasserstoffkonzept mit Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Region vorliegen. Die Skizzen werden vom Projektträger mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren (die Summe der Gewichtung aller Faktoren ergibt 100 %) priorisiert und bewertet:

1. Fördereffizienz: erwartete Wasserstoffproduktion/Fördervolumen in kg H₂/Euro
2. Wirtschaftlichkeit und Geschäftsmodell: Angaben zu Ausgaben, Einnahmen, Finanzierung, Abnahmekonzept und Kostenplan
3. Nachhaltigkeit: Konzept über Strom- und Wasserbezug sowie Zubau von weiteren EE-Anlagen
4. Regionale Verwendung des Wasserstoffs: erzeugungsnahe Eigen- und/oder Fremdnutzung
5. Vorliegen einer Machbarkeitsstudie: Angaben zum Planungsstand, zeitnahe Umsetzung möglich und Machbarkeitsstudie

Sobald eine Skizze in die zweite Antragsstufe gelangt, muss ein Vollantrag mit Daten zur Finanzierung sowie mit Vergleichsangeboten für die förderfähigen Investitionskosten eingereicht werden. **Die Förderrichtlinie tritt am 31.12.2026 außer Kraft.** [38]

4.4.2 Bayerisches Förderprogramm zur Anschaffung von wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen

Im November 2025 wurde die Förderlinie angekündigt, welche zum 01.01.2026 in Kraft getreten ist. Das Bayerische Wirtschaftsministerium will mit dem Förderprogramm mit einem Umfang von 35 Millionen EUR den Hochlauf von wasserstoffbetriebenen Nutzfahrzeugen der Fahrzeugklassen N1, N2 und N3 voranbringen. Gefördert werden der Kauf und das Leasing sowohl von Wasserstoffverbrenner- als auch von Brennstoffzellenfahrzeugen. Die Förderquote beträgt 80% der Investitionsmehrkosten im Vergleich zu einem entsprechenden Fahrzeug mit Dieselantrieb. Ein erster Förderaufruf soll im Sommer 2026 nach dem nationalen Förderaufruf (vgl. Kapitel 4.3.2) stattfinden. Weitere Informationen sind unter [39] zu finden.

5 Örtliche Rahmenbedingungen

5.1 Energieversorgung

5.1.1 Wärmeversorgung

Die Wärmeversorgung innerhalb der HyBaBo-Projektregion weist deutliche räumliche Unterschiede auf. In den deutschen Teilräumen überwiegen weiterhin kleinteilige Heizstrukturen, die überwiegend auf einzelne Gebäude oder gebäudenähe Anlagen bezogen sind. Im Bezirk Karlsbad haben demgegenüber zentrale und netzgebundene Formen der Wärmebereitstellung traditionell ein höheres Gewicht. Für Bayern insgesamt zeigen die verfügbaren Haushaltsdaten, dass 2022 noch 38 % der Wohnungen vor allem mit Erdgas und 30 % mit Heizöl beheizt wurden. Fernwärme erreichte 14 %, Holz beziehungsweise Holzpellets 10 % und weitere erneuerbare Hauptheizungen 4 %. Die Ausgangslage auf deutscher Seite ist damit weiterhin klar von fossilen Energieträgern geprägt, auch wenn Biomasse im Bestand bereits einen sichtbaren Beitrag leistet. [40], [41]

Im Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab stammt der überwiegende Teil der Wärme weiterhin aus fossilen Quellen: Rund 54 % entfallen auf Erdgas und 31 % auf Heizöl, während erneuerbare Energien einen Anteil von 14 % erreichen. Im Landkreis Tirschenreuth lag der Endenergieverbrauch privater Haushalte 2021 bei 799.300 MWh. Davon waren nur 11 % strombasiert. Der deutlich größere Teil hing somit mit Wärmebereitstellung zusammen, wobei vor allem Heizöl, Biomasse und Erdgas relevant waren. Auch im Landkreis Wunsiedel i. Fichtelgebirge bleibt die Wärmeseite bislang nur begrenzt erneuerbar geprägt: Für 2020 wurde ein Anteil erneuerbarer Energien von 14 % am Wärmeverbrauch ausgewiesen. Innerhalb dieses erneuerbaren Anteils nahm Biomasse mit 81 % mit Abstand die größte Rolle ein. Umweltwärme, Solarthermie und erneuerbar gespeiste Nahwärme blieben deutlich dahinter zurück. [42], [43], [44]

Auch in den größeren Städten der Projektregion ist die Wärmeversorgung im Bestand bislang überwiegend fossil geprägt. In Weiden lag der Anteil erneuerbarer Wärme 2021 bei 11 %. Gleichzeitig entfielen in privaten Haushalten 84 % des Endenergieverbrauchs auf Raumwärme und Warmwasser. Erdgas war dort mit 64 % der dominante Energieträger. Für Hof

wird in der kommunalen Wärmeplanung ein Wärmeendenergiebedarf von rund 701 GWh pro Jahr ausgewiesen. Davon entfallen 326 GWh pro Jahr auf Erdgas, während der bestehende Wärmenetzbestand 18 GWh pro Jahr umfasst. Der erneuerbare Anteil am Wärmebedarf liegt bei rund 20 %. Zwar bieten verdichtete Siedlungsräume grundsätzlich günstigere Bedingungen für leitungsgebundene Wärmelösungen, im aktuellen Bestand dominiert jedoch auch dort noch überwiegend eine brennstoffbasierte Versorgung. [45], [46]

Im Bezirk Karlsbad stellt sich die Ausgangslage anders dar. Nach den Ergebnissen des Zensus 2021 werden 46,4 % der bewohnten Wohnungen über zentrale oder außerhalb des Gebäudes bereitgestellte Heizsysteme versorgt. Gas ist für 25,4 % der Wohnungen die wichtigste Heizenergie, Strom für 6,8 % und Kohle, Koks oder Briketts für 5,2 %. Gleichzeitig verfügen 73,8 % der bewohnten Wohnungen über einen Anschluss an das Gasnetz. Im grenzüberschreitenden Vergleich steht damit auf deutscher Seite eher ein dezentraler und kleinräumig organisierter Wärmemarkt einer tschechischen Teilregion gegenüber, in der netzgebundene und zentralere Versorgungsformen stärker verankert sind. [41]

Innerhalb der Projektregion lassen sich bereits erste Schwerpunkte einer weitergehenden Transformation erkennen. In Wunsiedel sind nach Angaben der Stadt in den Ortsteilen Schönbrunn und Breitenbrunn inzwischen rund 130 Gebäude in erneuerbar ausgerichtete Wärmenetze eingebunden. Solche Ansätze sind für die Region insgesamt noch nicht flächendeckend prägend, zeigen aber, dass leitungsgebundene und erneuerbar gespeiste Wärmeversorgung in geeigneten Teilräumen bereits praktisch umgesetzt wird. [47]

5.1.2 Stromversorgung

Im Unterschied zur Wärmeversorgung ist die Stromseite in der HyBaBo-Projektregion bereits deutlich weiter transformiert. Deutschlandweit lag der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch 2025 bei rund 55 %. Für Bayern wurde 2024 ein rechnerischer Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch von 57 % ausgewiesen. Diese Werte bilden einen sinnvollen Referenzrahmen, um die deutschen Teilräume der Projektregion einzuordnen. [48], [49]

Die regionalen Daten zeigen, dass mehrere deutsche Teilräume bereits hohe rechnerische Deckungsbeiträge aus regional erzeugtem Strom erreichen. Im Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab lag der Anteil erneuerbarer Energien und Kraft-Wärme-Kopplung an der Stromversorgung 2019 bei 55 %. Im Landkreis Tirschenreuth konnten 2021 rund 63 % des Stromverbrauchs bilanziell durch regional erzeugte erneuerbare Energien gedeckt werden. Einschließlich fossiler KWK-Anteile lag der regionale Deckungsbeitrag bei rund 66 %. Für den Landkreis Wunsiedel wurden 2020 rund 300.000 MWh erneuerbarer Strom ausgewiesen. Dies entsprach 69 % des gesamten Stromverbrauchs. Die Zusammensetzung der Erzeugung war breit: 54 % stammten aus Windenergie, 23 % aus Biomasse und 21 % aus Photovoltaik. Insgesamt ist die Stromversorgung in mehreren deutschen Teilräumen damit bereits wesentlich stärker erneuerbar geprägt als der Wärmesektor, auch wenn der Austausch mit dem überregionalen Netz weiterhin eine zentrale Rolle spielt. [42], [43], [44]

Für den Bezirk Karlsbad ergibt sich hingegen ein stärker konventionell geprägtes Bild. Im Jahr 2024 belief sich die Bruttostromerzeugung auf 1.327 GWh, während der Nettoverbrauch bei 1.486 GWh lag. Die Region war damit unter dem Strich auf Stromimporte von außen angewiesen. Innerhalb der Erzeugung dominierten Dampfkraftwerke mit 71,9 %. Ergänzt wurde dies durch Windenergie mit 10,2 %, GuD-Anlagen mit 7,9 %, weitere verbrennungsbasierte Anlagen mit 5,4 %, Photovoltaik mit 2,7 % sowie Wasserkraft einschließlich Pumpspeicherung mit 1,9 %. Auf der Verbrauchsseite entfielen 29,4 % auf die Industrie, 25,6 % auf Haushalte, 22,3 % auf Handel, Dienstleistungen, Schulen und Gesundheitswesen sowie 20,4 % auf den Energiesektor. Der tschechische Teilraum verbindet damit eine relevante Eigenerzeugung mit einer weiterhin deutlichen Abhängigkeit von thermischen Großanlagen und Stromimporten. [50]

5.1.3 Energiebedarfe im Sektor Wirtschaft

Für die energiewirtschaftliche Bewertung der HyBaBo-Projektregion ist neben den Haushalten auch die Wirtschaftsstruktur von zentraler Bedeutung. In mehreren Teilräumen tragen Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen in erheblichem Umfang zur Last- und Verbrauchsstruktur bei. Besonders deutlich wird dies im Landkreis Tirschenreuth. Im Sektor Industrie wurden im Jahr 2021 1.693.000 MWh Endenergie verbraucht. Das

Klimaschutzkonzept des Landkreises weist hierfür einen Anteil von 43 % am gesamten Endenergieverbrauch aus. Lediglich 21 % davon entfielen auf Strom. Der übrige Bedarf stand vor allem mit Raumwärme, Prozesswärme und Kühlung in Zusammenhang. Hinzu kamen im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen weitere 532.600 MWh beziehungsweise 14 % des gesamten Endenergieverbrauchs. Die Transformationsanforderung betrifft dort folglich nicht nur Wohngebäude, sondern in hohem Maße auch betriebliche Wärme- und Energieanwendungen. [43]

Ein ähnliches Muster zeigt sich auch in den übrigen Teilräumen. In Weiden entfallen 41 % des Energieverbrauchs und 43 % der Emissionen auf den Sektor GHDI einschließlich kommunaler Einrichtungen. Im Landkreis Wunsiedel erreicht dieser Bereich 38 % des Energieverbrauchs und 40 % der Emissionen. Gleichzeitig ist Erdgas dort mit 56 % der wichtigste Energieträger, während erneuerbare Energien bislang nur 3 % beitragen. Für den Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab ist zudem ausgewiesen, dass 78 % des Strombezugs auf wirtschaftliche Nutzungen entfallen. Die kommunale Wärmeplanung in Hof verweist darüber hinaus darauf, dass in einzelnen gewerblich und industriell geprägten Teilräumen mit höherem Temperaturniveau und prozessbedingtem Wärmebedarf andere Versorgungsoptionen in Betracht zu ziehen sind als in klassischen Wohngebieten. [42], [44], [45], [46]

Insgesamt zeigt sich die HyBaBo-Projektregion im Ist-Zustand als Raum mit bereits weit entwickelter Stromtransformation, zugleich aber weiterhin deutlich anspruchsvollerer Wärmeversorgung. Während auf deutscher Seite im Wärmemarkt nach wie vor überwiegend gebäudebezogene und fossil geprägte Strukturen vorherrschen, ist der tschechische Teilraum stärker durch zentrale Wärme- und Kraftwerksstrukturen geprägt. Hinzu kommt, dass wirtschaftliche Strom- und Wärmebedarfe in mehreren Teilräumen ein ähnliches oder sogar größeres Gewicht haben als die Haushalte. Die energiewirtschaftliche Besonderheit der HyBaBo-Projektregion liegt damit in der Verbindung eines bereits deutlich erneuerbar geprägten Stromsektors mit einem noch überwiegend fossil dominierten Wärmesektor und gleichzeitig substanziellen industriellen und gewerblichen Energiebedarfen. [41], [42], [43], [44], [50]

5.2 Zukünftige Wasserstofftransportnetze in der Region

Im Herbst 2024 wurde das bundesweite Wasserstoffkernnetz durch die Bundesnetzagentur genehmigt und die ersten Abschnitte wurden im Jahr 2025 fertiggestellt. Das genehmigte Netz, welches aus einer Gesamtlänge von 9.040 km Pipelines besteht, davon ca. 60 % aus bestehenden Leitungen, die von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt werden und 40 % Neubauleitungen, soll stufenweise bis 2032 ausgebaut werden. [51]



Abbildung 2: Auszug aus dem genehmigten Wasserstoffkernnetz (Ausbaustand 31.12.2032). [51]

Wie aus der Karte des genehmigten Wasserstoffkernnetzes ersichtlich, führt eine Neubauleitung, die bayerischen Anbindungsleitung, kurz H2-BAL von Sachsen aus kommend durch die im Projektgebiet befindlichen Landkreise Hof, Wunsiedel, Tirschenreuth sowie Neustadt a.d. Waldnaab und endet an der Verdichterstation in Waidhaus an der tschechischen Grenze. Ansprechpartner für dieses Leitungsprojekt ist die Ferngas Netzgesellschaft mbH.

Die H2-BAL unterteilt sich in den Abschnitt Waidhaus-Arzberg mit einer Länge von 52,3 km und in den Abschnitt Arzberg-Niederhohndorf/Zwickau mit einer Länge von 117,5 km und einer planerischen Inbetriebnahme bis 12/2030. In Waidhaus im Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab wird auch die Umstellungsleitung H2ercules, welche von Rimpar im unterfränkischen Landkreis Würzburg nach Rothenstadt im Stadtgebiet Weiden mit einer Länge von 183 km führt, sowie der Abschnitt von Rothenstadt nach Waidhaus über eine Länge von 28,5 km. Für diese Umstellungsleitung ist eine Inbetriebnahme für Ende 2032 geplant. [51]

Die Verdichter- und Übergabestation in Waidhaus im Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab ist somit ein wichtiger Übergabepunkt zwischen dem nationalen Wasserstoffkernnetz und dem Czech-German Hydrogen Interconnector (CGHI) als Teil des European Hydrogen Backbone. [52]

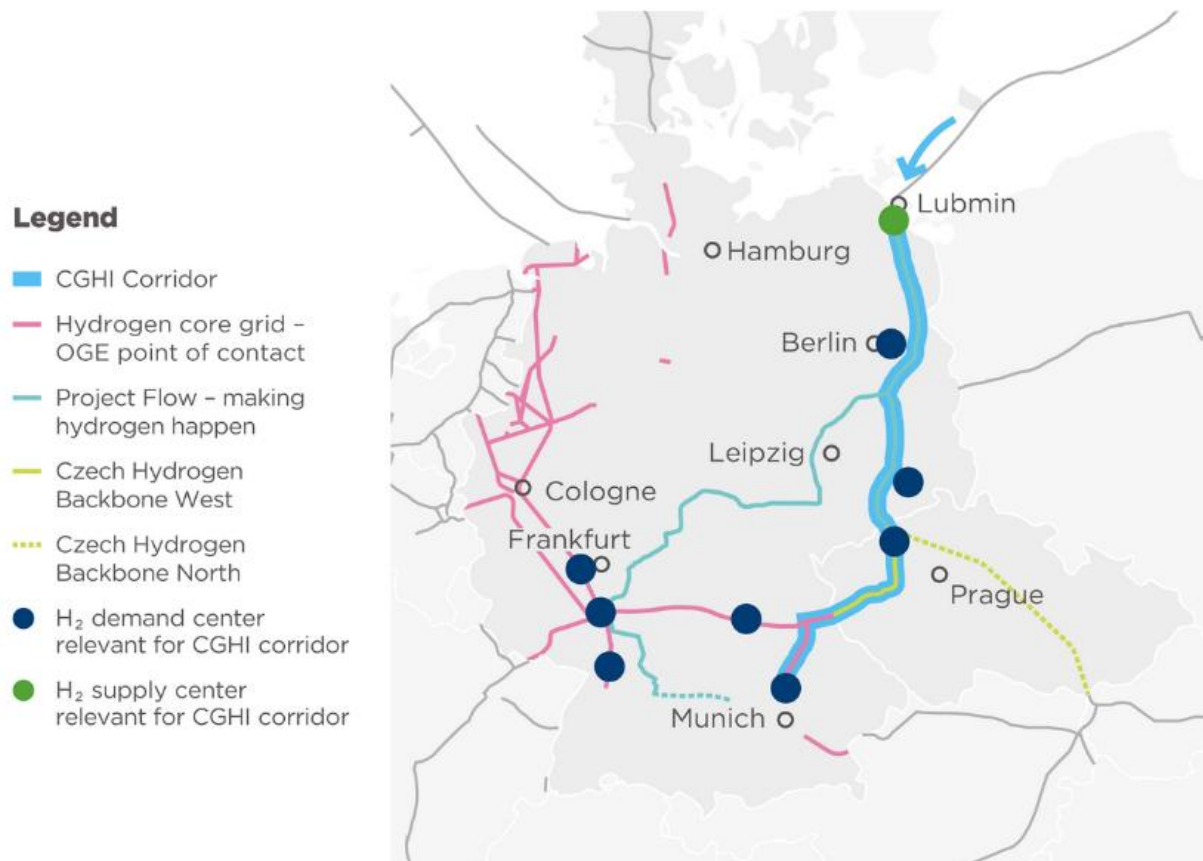


Abbildung 3: CGHI Corridor. [52]

Czech Hydrogen Backbone WEST

Das Czech Hydrogen Backbone West ist der etwa 163 km lange Abschnitt durch die Tschechische Republik des Czech-German Hydrogen Interconnector (CGHI), welcher von Sachsen aus außerhalb der Karlsbader Region herum nach Waidhaus führt. Das Projekt Czech Hydrogen Backbone West ist Teil des internationalen Wasserstoffkorridors namens Czech-German Hydrogen Interconnector (CGHI) [53] und somit auch Bestandteil des European Hydrogen Backbone. Die regionalen Gasnetzbetreiber arbeiten seit Jahren intensiv an dem Thema Wasserstofftransport und arbeiten auch eng mit den Nachbarländern zusammen für den gemeinsamen Aufbau des Netzes.

Die NET4GAS, s. r. o. beschäftigt sich seit 2021 intensiv mit dem Thema Wasserstofftransport und arbeitet eng mit Deutschland sowie weiteren Ländern Mittel- und Südosteuropas beim Aufbau von Wasserstoffkorridoren zusammen. Dank des guten technischen Zustands der Transportinfrastruktur sind ausgewählte bestehende Gasleitungen nach Anpassungen (sogenanntes Repurposing) auch für den Transport von Wasserstoff nutzbar. Es wurden umfangreiche Materialprüfungen durchgeführt. Aufwändige Bauarbeiten für den Neubau von hunderten Kilometern unterirdischer Gasleitungen sind daher nicht erforderlich; Anpassungen beschränken sich auf Technologien oberhalb der Erde. [54]

Die Vorbereitungsarbeiten befinden sich in einem fortgeschrittenen Stadium, und die erste Baugenehmigung für das Projekt „Česká vodíková páteří infrastruktura ZÁPAD“ wird bereits 2026 beantragt. NET4GAS (TSO) und GasNet (DSO) planen ein Projekt für den Karlsbader Kreis (bereits für die Region Pilsen umgesetzt). Ziel ist es, einen Überblick über mögliche Wege vom Transit zur Verteilung von sauberem Wasserstoff zu gewinnen, sobald dieser im Transportsystem verfügbar ist. Die Studie wird die zentralen technischen Aspekte dieses Prozesses beschreiben, seine Durchführbarkeit bestätigen und auf spezifische Punkte hinweisen, die berücksichtigt werden müssen. [54]

Die Gaswirtschaft spielt eine Schlüsselrolle in der Energietransformation der Tschechischen Republik im Zuge des schrittweisen Ausstiegs aus der Kohle. Ein Teil des Netzes kann auf 100 % Wasserstoff umgestellt und auf eine emissionsfreie Zukunft vorbereitet werden. Das Verteilnetz von GasNet ist technisch und kapazitiv für ein Gemisch aus Erdgas und Wasserstoff (sogenanntes Blend) bis zu 20 % vorbereitet. Ein Pilotprojekt wird derzeit in Hranice u Aše realisiert. [54]

5.3 Wirtschaftsstruktur

Trotz der Unterschiede zwischen den einzelnen Teilräumen lassen sich für die HyBaBo-Region einige gemeinsame Strukturmerkmale festhalten. Die Wirtschaftsstruktur ist insgesamt breit angelegt und nicht auf einen einzelnen Sektor beschränkt. Gleichzeitig zeigt sich, dass neuere Entwicklungen neben klassischen Industriezweigen bestehen. Für die bayerisch-tschechische Grenzregion verweist die Projektbeschreibung auf der Homepage selbst auf einen Strukturwandel hin zu einer High-Tech-Region, beschreibt aber zugleich weiterhin

wichtige energieintensive Unternehmen aus den Bereichen Glas, Keramik und Textil. Für Weiden passt dieses Bild ebenfalls, weil dort Glas- und Porzellanhersteller zusammen mit Unternehmen aus Fahrzeugbau, Kunststoffverarbeitung und Mikroelektronik genannt werden. Außerdem wird ein Branchenmix aus traditionellen Bereichen und jungen Start-ups hervorgehoben. Auch die Lage und die infrastrukturelle Einbindung an wichtigen Ost-West- und Nord-Süd-Transitrouten sind für die Region wichtig. Dadurch spielen Logistik, überregionale Verkehrsachsen und grenzüberschreitende Wirtschaftsverflechtungen in der gesamten Region eine zentrale Rolle. Auch auf Seiten des Bezirks Karlsbad wird die Bedeutung überregionaler Verkehrs- und Infrastrukturkorridore für die wirtschaftliche Entwicklung hervorgehoben. [55], [56] [57]

Hinzu kommt, dass die Region mit Blick auf die Energieversorgung vor einem spürbaren Wandel steht. Gerade wegen der vorhandenen industriellen Strukturen stellt sich die Frage nach klimafreundlichen Energielösungen und Dekarbonisierungsoptionen in besonderem Maße. Dies hat auch bereits die HyExpert-Studie für den Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab gezeigt. [57], [58], [59]

Das HyBaBo-Projekt knüpft daran an, indem es Wissenstransfer, Vernetzung von Akteuren, Potenzialanalysen und ein grenzüberschreitendes Regionalkonzept zum Thema Wasserstoff vorsieht.

5.4 Mobilität

5.4.1 Straßenverkehr

Für die Projektregion sind im Sektor Mobilität die Verkehrsträger Straßenverkehr sowie Schienenverkehr von Relevanz. Die Schifffahrt wird aufgrund fehlender Schifffahrtsstraßen in der Projektregion nicht behandelt. Das Autobahnnetz im Projektgebiet ist ein zentraler Bestandteil der überregionalen Verkehrsinfrastruktur und verbindet die Region mit dem nationalen und internationalen Straßennetz. Die Autobahn A93 stellt den längsten Autobahnanteil im Projektgebiet als Nord-Süd-Achse dar und führt durch alle bayerischen Landkreise im Projektgebiet sowie durch die Stadt Weiden. Der Landkreis Hof verfügt zudem mit der Autobahn A9 über eine bedeutende Nord-Süd-Verkehrsachse. Zusätzlich zweigt im Landkreis die

A72 von der A9 ab und stellt eine leistungsfähige Verbindung in östlicher Richtung zum Freistaat Sachsen her. Auch die A93 endet in der A72. Den unteren Abschluss des Projektgebiets bildet auf bayerischer Seite die Autobahn A6, welche den östlichen Landkreis Neustadt a.d. Waldnaab durchquert und Nürnberg mit Pilsen verbindet. [60]

Auf der tschechischen Seite ist die Autobahn D6 (Dálnice 6) die Hauptverkehrsverbindung, die Prag mit Bayern verbindet und durch die Region Karlsbad mit einer Länge von ca. 85 km verläuft. Teile der Autobahn befinden sich zum aktuellen Zeitpunkt noch im Bau und eine Fertigstellung bis Ende 2028 ist geplant. [61]

Die Nutzung von Wasserstoff im Sektor Mobilität in der Projektregion befindet sich noch in einer frühen Entwicklungsphase. Tankmöglichkeiten gibt es aktuell an der öffentlich zugänglichen Wasserstofftankstelle an der A9 am Shell Autohof Berg im Landkreis Hof. Die 2018 eröffnete und von H2 Mobility Deutschland betriebene Tankstelle ist für 350 bar und 700 bar ausgelegt [62]. Eine weitere Wasserstoff-Tankstelle für eine Betankung mit 350 bar ist in Wunsiedel, welche (nach Gesprächsinformationen) im Laufe des Jahres 2026 eröffnet werden soll.

Die Einordnung der Relevanz der Region im europäischen Straßenverkehr wird durch das transeuropäische Verkehrsnetz TEN-V dargestellt. In der EU-Verordnung 2024/1679 [63] wurde genau festgelegt, welche europäischen Hauptverkehrsstraßen das Kernnetz und das erweiterte Kernnetz bilden. Auch werden in dieser Verordnung verkehrstechnisch wichtige städtische Knoten definiert, welche städtische Gebiete, in denen die Verkehrsinfrastruktur des transeuropäischen Verkehrsnetzes mit anderen Teilen der Verkehrs- und Mobilitätsinfrastruktur zusammenläuft bzw. verknüpft werden. Gemäß der Verordnung 2024/1679 ist ein gemeinsamer schrittweiser Aufbau des Transeuropäischen Verkehrsnetzes mit der Fertigstellung des Kernnetzes bis 31.12.2030 und des erweiterten Kernnetzes bis 31.12.2040 geplant. Basierend auf der Einteilung in Kernnetz und erweitertes Kernnetz im Straßenverkehr sind auch die Prioritäten bei der bundesweiten Infrastrukturförderung von Wasserstofftankstellen.

5.4.2 Schienenverkehr

In der betrachteten tschechisch-bayerischen Grenzregion verlaufen bedeutende Eisenbahnstrecken. Auf deutscher Seite sind dies insbesondere die West-Ost-Verbindung Nürnberg – Hof – Sachsen (Franken-Sachsen-Magistrale) sowie die Nord-Süd-Achse des Ostkorridors zwischen Hof und Regensburg. An diese Hauptachsen schließen zahlreiche regionale und lokale Bahnstrecken an, die auch die größeren Städte Oberfrankens miteinander verbinden. Die nordöstliche Region Bayerns ist jedoch bislang nur in geringem Umfang elektrifiziert und wird daher als „Dieselinsel Nordostbayern“ bezeichnet. [64]

Auf tschechischer Seite ist die Situation günstiger, da die Hauptverbindungen von Cheb nach Osten (Karlovy Vary – Ústí nad Labem) sowie nach Süden (Plzeň – České Budějovice) elektrifiziert sind. Untersuchungen des Forschungsinstituts ÚJV Řež zeigen, dass auf langen, topografisch anspruchsvollen und nur teilweise elektrifizierten Strecken Wasserstoffzüge gegenüber batterieelektrischen Zügen betriebliche und wirtschaftliche Vorteile aufweisen. Während batterieelektrische Züge eine ausreichende Ladeinfrastruktur und begrenzte Ladezeiten benötigen, können Wasserstoffzüge den gesamten Tagesumlauf von bis zu 1.000 km ohne Nachtanken abdecken und sind insbesondere für hügelige und längere Regionalstrecken geeignet. [65]

6 Wasserstoffpotenzialanalyse für die HyBaBo-Region

Die Wasserstoffpotenzialanalyse bildet den Schwerpunkt im HyBaBo-Projekt. Innerhalb der Analyse soll die gesamte Wasserstoff-Wertschöpfungskette – ausgehend vom Strombezug und dessen Zusammensetzung, der Produktion von Wasserstoff an einem geeigneten, möglichen Standort mittels Elektrolyse und Biomasse, der Wasserstoffspeicherung und dem Wasserstofftransport per Leitung oder Straße sowie der Wasserstoffnutzung – eruiert werden. Die Prüfung der Machbarkeit dient als Grundlage zur Beschaffung notwendiger Fördermittel zum Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in der HyBaBo-Projektregion.

Zu Beginn des Projekts wurde daher eine umfassende Datenerhebung bei den ansässigen Industrie- und Gewerbebetrieben und kommunalen Akteuren durchgeführt. Diese Datenbasis ist notwendig, um mögliche Wasserstoffabnehmer und damit auch den zukünftigen Wasserstoffbedarf, aber auch Abnehmer der Elektrolyse-Nebenprodukte Sauerstoff und Abwärme in der Region zu ermitteln und das sog. „Henne-Ei-Problem“ zu umgehen. Sauerstoff kann z. B. in einer belüfteten Kläranlage oder als Reaktant innerhalb einer sog. Oxyfuel-Verbrennung eingesetzt werden. Die Abwärme könnte über ein Wärmenetz an nahegelegene Haushalte geliefert werden. Somit hat die Nutzung der Nebenprodukte sowohl einen wesentlichen ökologischen als auch ökonomischen Einfluss auf das Gesamtkonzept und bzw. für die Region. Des Weiteren wurden Daten von regionalen Netzbetreibern zur Infrastruktur in der Region angefordert. Zudem wurde auf Daten aus Openstreetmap und dem bayerischen Energieatlas zurückgegriffen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Vorgehensweise im Projekt, die ermittelten Wasserstoffbedarfe im Bereich der Wärmeversorgung, stofflichen Nutzung und Mobilität als auch mögliche Produzenten von Wasserstoff ausführlich dargestellt und erläutert. Das Kapitel baut unter anderem auf den örtlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen aus den Kapiteln 3 und 5 auf.

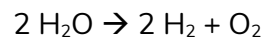
6.1 Technische Rahmenbedingungen

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Standortvoraussetzungen und die rechtlichen Rahmenbedingungen ausführlich erläutert wurden, beschreibt dieses Kapitel die technischen

Rahmenbedingungen. Darunter fallen die am Markt verfügbaren Technologien der Wasserelektrolyse, die Speicher- und Transporttechnologien sowie die möglichen (zukünftigen) relevanten Nutzungs- bzw. Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff. Als einer der Bausteine dieses Gliederungspunkts dienen die eigens verfassten Kapitel 4.3 und 4.4 aus [59].

6.1.1 Wasserstoff aus Elektrolyse

Die Elektrolyse ist eine Schlüsseltechnologie zur Erzeugung von Wasserstoff als sauberem und vielseitig einsetzbarem Energieträger. Das Grundprinzip der Wasser-Elektrolyse ist die Aufspaltung von Wasser (H_2O) in die beiden Moleküle Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) gemäß der chemischen Reaktionsgleichung [66]:



Neben einer Stromquelle sind außerdem ein Transformator und Gleichrichter notwendig. Zusätzlich wird in den meisten Fällen eine Wasseraufbereitung, welche das Leitungswasser z. B. von störenden Salz-Ionen befreit, sowie eine Gastrocknung benötigt. Eine Gastrocknung sorgt dafür, dass der erzeugte Wasserstoff und Sauerstoff frei von Feuchtigkeit sind. Verschiedene Elektrolysetechnologien wurden entwickelt, um den steigenden Anforderungen an Effizienz, Kostenreduktion und Flexibilität gerecht zu werden. Es gibt mehrere Elektrolysearten, welche serienreif auf dem Markt verfügbar sind. Das sind u. a. die alkalische Elektrolyse (AEL), Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM), Anion Exchange Membrane Elektrolyse (AEM) und Hochtemperatur Festoxid-Elektrolyse (SOEC).

In dieser Studie wird ausschließlich die PEM-Elektrolysetechnologie betrachtet. Die Proton Exchange Membrane Elektrolyse (PEM) ist eine fortschrittliche Technologie zur Wasserstoffproduktion. PEM-Elektrolysesysteme nutzen eine Protonenaustauschmembran, die den Transport von Protonen ermöglicht, während sie den Elektronenfluss blockiert. Insbesondere für dezentrale Anwendungen und erneuerbare Energiequellen mit variabler Leistungserzeugung bieten PEM-Elektrolyseure viele Vorteile, deren Effizienz typischerweise im Bereich von 60 – 70 % liegt. In der Praxis erfordert die PEM-Technologie regelmäßige Überwachung und Wartung, da nur so die optimale Leistung der Membran und anderer Komponenten sichergestellt werden kann. Insbesondere die Membran ist eine teure und empfindliche Komponente,

der besondere Beachtung geschenkt werden muss. In der folgenden Abbildung 4 ist ein 1,25-MW-PEM-Elektrolyseur von Siemens (links im Bild) im realen Betrieb dargestellt, betrieben vom Stadtwerk Haßfurt in Unterfranken.



Abbildung 4: 1,25 MW_{el} PEM-Elektrolyseur (links) mit Wasseraufbereitung (rechts) in der Stadt Haßfurt [67].

Dieser Elektrolyseur liefert bis zu 225 Nm³ H₂/h aus Überschussstrom Erneuerbarer Energien. Rechts im Bild ist eine Wasseraufbereitung zu sehen, die das verwendete Leitungswasser vollständig entsalzt. Die Wasseraufbereitung ist für den störungsfreien Betrieb der Anlage unabdingbar.

6.1.2 Wasserstoff aus biogenen Reststoffen

Im Zuge der Transformation des Energiesystems hin zu einer klimaneutralen Wasserstoffwirtschaft sind neben der Elektrolyse auch weitere Erzeugungspfade in den Blick zu nehmen. Als vielversprechende Quellen für nachhaltig erzeugten Wasserstoff gelten dabei auch Biomasse und biogene Reststoffe [68]. Biomasse kann über verschiedene Konversionspfade in Wasserstoff umgewandelt werden. Im Folgenden werden die Grundzüge der Dampfreformierung von Biogas, der Holzvergasung, der Pyrolyse sowie hydrothermalen Verfahren kurz erläutert.

Im industriellen Maßstab wird Wasserstoff überwiegend durch Dampfreformierung von Erdgas erzeugt, das hauptsächlich aus Methan (CH_4) besteht [69]. Der wesentliche Unterschied zur Biogasreformierung liegt in der Zusammensetzung des Ausgangsstoffes: Biogas weist typischerweise einen geringeren Methangehalt (im Mittel etwa 60 Vol.-% [70]) und einen höheren CO_2 -Anteil auf, wodurch ggf. zusätzliche Aufbereitungsschritte erforderlich sein können [71].

Abbildung 5 zeigt die Prozesskette der Biogasreformierung von landwirtschaftlichen Reststoffen über Bereitstellung und Aufbereitung des Biogases bis zur Wasserstoffbereitstellung an der Tankstelle.

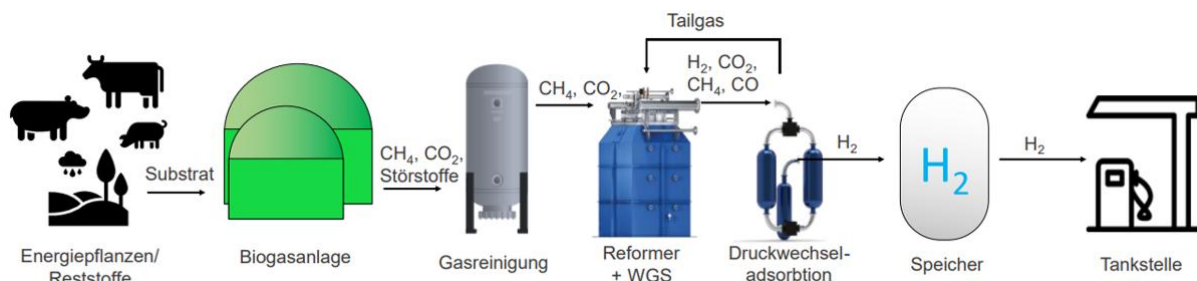
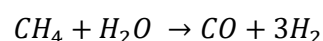


Abbildung 5: Prozesskette von biogenen Reststoffen bis hin zur Wasserstoffbereitstellung an der Tankstelle [72]

Biogas enthält neben CH_4 und CO_2 unter anderem Schwefelwasserstoff (H_2S), der vor der Reformierung (z. B. über Aktivkohle) entfernt wird [72], [73], da H_2S Katalysatoren deaktivieren kann [74].

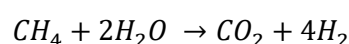
Die Reformierung des im Biogas enthaltenen Methans lässt sich idealisiert durch die folgenden parallel ablaufenden Reaktionsgleichungen beschreiben [72]:

In der endotherm ablaufenden Reaktion

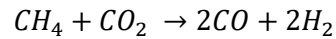


reagieren Methan und Wasser zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff.

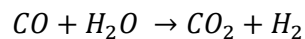
Methan und Wasser reagieren zu Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff gemäß:



Das im Biogas vorhandene Kohlenstoffdioxid reagiert mit Methan ebenfalls zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff [75]:



In der Wassergas-Shift-Reaktion (WGS) erfolgt die Konvertierung von Kohlenstoffmonoxid durch Reaktion mit dem im Gemisch enthaltenen Wasserdampf zu CO_2 :



Dadurch wird die Wasserstoffausbeute erhöht und der Kohlenstoffmonoxidgehalt reduziert.

Nach der Dampfreformierung und der WGS erfolgt die Wasserstoffabscheidung mittels Druckwechseladsorption (Pressure Swing Adsorption, PSA). PSA ist ein Verfahren zur Trennung von Gasgemischen. Aus dem Eingangsgemisch resultieren ein Wasserstoffstrom und ein Restgasstrom (Tailgas). Das Tailgas kann dem Brenner zurückgeführt und als Energiequelle des Prozesses verwendet werden [72], [75].

Zur Wasserstofferzeugung aus holzartiger Biomasse wird in der Fachliteratur überwiegend die thermochemische Vergasung mit nachgeschalteter Gasaufbereitung betrachtet [76], [77]. In diesem Verfahren wird die Biomasse zunächst mechanisch aufbereitet und auf einen niedrigen Wassergehalt getrocknet, bevor sie dem Vergasungsprozess zugeführt wird. Als Vergasungsmittel kommen Luft, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid oder deren Gemische zum Einsatz. Typische Prozesstemperaturen für die Biomassevergasung liegen (je nach Prozessführung und Reaktorauslegung) im Bereich von etwa 700 bis 1200 °C [76], [78]. Unter diesen Bedingungen finden im Vergaser Trocknung, Pyrolyse, Oxidations- und Vergasungsreaktionen statt, durch die der Festbrennstoff in ein brennbares Rohgas mit H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , leichten Kohlenwasserstoffen sowie Teeren und einem festen kohlenstoffreichen Rückstand (Char bzw. Biokohle) umgewandelt wird [76].

Es entsteht ein wasserstoff- und kohlenmonoxidreiches Rohgas, das über Gasreinigung sowie (je nach Prozesskonfiguration) über eine nachgeschaltete Wassergas-Shift-Reaktion und Wasserstoffabtrennung zu einem hochreinen Wasserstoffstrom aufbereitet werden kann.

Neben der Vergasung wird die Pyrolyse holzartiger Biomasse als weiterer Pfad zur Wasserstoffbereitstellung beschrieben [76], [79], [80]. Unter Pyrolyse wird die thermische Zersetzung kohlenstoffhaltiger Stoffe in Abwesenheit von Sauerstoff bzw. in inerter Atmosphäre verstanden. Die Biomasse wird dabei durch Wärmezufuhr in kondensierbare Bestandteile, nicht kondensierbare Gase (Pyrolysegas) und einen kohlenstoffreichen Feststoffrückstand (Char bzw. Biokohle) überführt. Im Unterschied zur Vergasung wird kein Oxidations- bzw. Vergasungsmittel zugeführt und die notwendige Wärme extern bereitgestellt [76], [80], [81].

Für die technische Pyrolyse von Biomasse werden in der Literatur Temperaturen im Bereich von etwa 350-700 °C angegeben [77]. Das nicht kondensierbare Pyrolysegas besteht im Wesentlichen aus H_2 , CO, CO_2 , CH_4 und weiteren leichten Kohlenwasserstoffen [76].

Ein häufig untersuchtes Konzept für wasserstofforientierte Prozessketten ist die zweistufige Kopplung aus Pyrolyse und katalytischer Reformierung der flüchtigen Produkte bzw. des Pyrolyseöls, um ein H_2 - und CO-reiches Synthesegas zu erzeugen [80], [81]. Dieses kann anschließend über eine Wassergas-Shift-Reaktion weiter zu wasserstoffreichen Produktgasen aufbereitet werden [81]. Die anfallende Biokohle bzw. der feste Kohlenstoff kann energetisch genutzt werden. Eine Nutzung als Kohlenstoffsенke wird ebenfalls diskutiert [82].

Unter hydrothermalen Verfahren werden thermochemische Prozesse zusammengefasst, bei denen Biomasse in heißem, unter Druck stehendem Wasser in feste, flüssige oder gasförmige Kohlenstoffträger überführt wird. Sie eignen sich insbesondere für feuchte Reststoffe wie Klärschlamm oder Gärreste, da Wasser gleichzeitig als Reaktionsmedium und Reaktant dient und somit eine energieintensive Vortrocknung weitgehend entfällt. Unterschieden werden insbesondere die hydrothermale Karbonisierung, die hydrothermale Verflüssigung und die hydrothermale Vergasung [76], [83]. Die hydrothermale Vergasung wird zwar als vielversprechend beschrieben, ist jedoch technisch anspruchsvoll und weist derzeit einen vergleichsweise niedrigen bis mittleren technologischen Reifegrad auf [76], [84]. Die hydrothermale Karbonisierung gilt dagegen als weitgehend ausgereift und ist bereits industriell implementiert [85], [86]. In wasserstofforientierten Konzepten kann die durch hydrothermale Karbonisierung erzeugte Hydrokohle über eine nachgeschaltete Vergasung in ein Synthesegas überführt und in weiteren Prozessschritten zu Wasserstoff umgesetzt werden [87].

6.1.3 Wasserstofftransport und -Speicherung

Ein weiterer Baustein des Wasserstoffregionalkonzepts ist die Analyse möglicher Verteilungswege von grünem und kohlenstoffarmem Wasserstoff in der Projektregion. Die Anlieferung per Trailer stellt in der Regel die kostenintensivste Variante dar. Da die Anlieferung aktuell mit dieselbetriebenen LKW erfolgt, ist mit einer Preissteigerung der Lieferkosten zu rechnen, die sich dann auf den Wasserstoffabnahmepreis auswirken werden. Allerdings könnte der regionale Hochlauf von grünem Wasserstoff per Trailer erfolgen, insofern er nicht am Ort der Erzeugung benötigt wird. Für einen kostengünstigen Transport größerer Mengen Wasserstoff, die nur bedingt regional erzeugt werden können, ist der leitungsgebundene Transport geeignet. Aktuell kann dies über die Beimischung in das Erdgasnetz oder in neu errichtete Wasserstoff-Leitungen erfolgen.

Welche dieser Möglichkeiten verwendet wird, hängt von mehreren individuellen Faktoren ab, wie z. B.:

- Entfernung der Erzeugungsanlagen und Verbraucher
- Vorhandensein der nötigen Infrastruktur wie (Erdgas-)Leitungen
- Transportkosten
- benötigte Reinheit des Wasserstoffs u. a.

Wie eingangs erwähnt, wird bis 2032 schrittweise das sog. Wasserstoffkernnetz aufgebaut. Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, verlaufen zukünftig mehrere Abschnitte des Kernnetzes durch die Projektregion. Die Abschnitte sollen bis spätestens 2032 Wasserstoff transportieren. Zudem soll zukünftig durch den Bezirk Karlsbad auf tschechischer Seite der sog. Czech German Hydrogen Interconnector (CGHI) verlaufen [52]. Um den Zeitraum bis zur Inbetriebnahme des relevanten Kernnetzabschnitts bis 2032 zu überbrücken und den Hochlauf von Wasserstoff in der grenzüberschreitenden Projektregion zu starten, gibt es neben dem leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff weiterhin auch die Möglichkeit sog. LKW-Wasserstofftrailer für den straßengebundenen Transport einzusetzen.

Das hat zur Folge, dass in den Regionen um Wasserstoffproduktionsanlagen und mögliche Abnahmeorte mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen durch LKWs zu rechnen ist. Bei

Wasserstofftrailern handelt es sich in der Regel um mehrere Druckflaschen vom Typ 1 (Stahlflasche) bis 4 (Behälter aus Kunststoff und faserverstärkten Verbundwerkstoffen), welche auf einem LKW-Auflieger befestigt sind. Diese können je nach Typ mit unterschiedlichen Druckniveaus befüllt werden und demnach unterschiedliche Mengen an Wasserstoff fassen. Typ-4-Behälter haben gegenüber den klassischen Stahlflaschen ein geringeres Gewicht und ein höheres Fassungsvermögen, da Wasserstoff bei hohem Druck bis zu 500 bar bzw. im PKW oder LKW bis zu 750 bar gespeichert und transportiert werden kann [88]. Diese Behälter befinden sich gebündelt in 20 bzw. 40-Fuß-Containern und werden als „Multi-Element-Gas-Container“ (MEGC) bezeichnet [88]. Bekannt ist hier z. B. das Konzept der Fa. Hydrosponder AG. Das System besteht aus mobilen Wasserstoffspeichern, welche mit bis zu 450 bar (entspricht ca. 440 kg) Wasserstoff befüllt werden können [89].



Abbildung 6: Abfüllstation mit Logistikkomponenten für die Wasserstoffproduktion und Auslieferung [89].

Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, können die befüllten Container mittels Standardauflieger via LKW an den Ort der Verwendung gebracht werden. Nötig sind hierzu „Dockingstations“ und Wechselbrücken am Be- und Entladestandort.

Zudem finden Gespräche zwischen den Energieversorgern sowie Unternehmen in der Projektregion bzgl. einer möglichen leitungsgebundenen Versorgung statt, um energieintensive Unternehmen zukünftig mit Wasserstoff versorgen zu können.

6.1.4 Wasserstoffnutzung

Die Anwendungsgebiete von Wasserstoff sind vielfältig. Als vorerst wichtigste Anwendungsfelder sind die stoffliche und energetische Nutzung in Industriebereichen, welche nur bedingt oder nicht anderweitig dekarbonisierbar sind, anzusehen. Das sind z. B. die Chemie- und Stahlindustrie, aber auch Glas-, Keramik- und Porzellanhersteller, welche hohe Prozesstemperaturen benötigen [90]. Aber auch im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) könnte zukünftig Wasserstoff eingesetzt werden. Aus Wasserstoff kann z. B. mittels Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren über KWK sowohl elektrische als auch thermische Energie gewonnen werden. Ein solches Aggregat zeigt die folgende Abbildung.



Abbildung 7: Stationärer Wasserstoffverbrennungsmotor (Wasserstoff-BHKW).

Ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet ist Wasserstoff in der Mobilität, v. a. in der Schwerlastmobilität. Dazu zählen z. B. Langstrecken-LKW, Flugzeuge und die Schifffahrt. Da diese Bereiche derzeit nur bedingt auf Elektroantriebe umgerüstet werden können, soll hier Wasserstoff z. B. in mobilen Brennstoffzellen in den Fahrzeugen rückverstromt werden und damit einen Elektromotor oder eine Batterie mit elektrischer Energie versorgen. Daneben spielen auch die sog. E-Fuels eine Rolle, synthetisch hergestellt aus Strom und Wasserstoff.

Auf lange Sicht kann Wasserstoff auch zur Beheizung von Wohngebäuden und als Energieträger in Gaskraftwerken als Spitzenlasterzeuger eingesetzt werden. [90]

6.2 Zukünftiger Wasserstoffhochlauf in der Region

Wie bereits beschrieben, wurde zu Beginn des Projekts eine Datenerhebung bei den ansässigen Unternehmen bzgl. ihrer energetischen Infrastruktur und deren potenzieller Wasserstoffbedarfe durchgeführt. Die Rückläufer der Datenerfassung wurden nach den folgenden Wasserstoffanwendungsfällen ausgewertet und bewertet:

- Wasserstoff als Prozessgas („H2_Einsatz_Prozessgas“)
- Wasserstoff für die Prozesswärme ($> 200\text{ °C}$) („H2_Einsatz_HT_Prozesswaerme“)
- Wasserstoff für Kraft-Wärme-Kopplungsprozesse („H2_Einsatz_Fuelswitch“)
- Niedertemperaturanwendung ($< 200\text{ °C}$) („NT_Waermeeinsatz“)
- Erdgasbedarf in der Region Karlsbad aus dem statistischen Jahrbuch für 2024 [91]

Die jeweiligen Wasserstoffabnahmepotenziale berechnen sich anhand der Angaben Strom- bzw. Brennstoffbedarf im Ist-Zustand. Die zukünftigen Wasserstoffpotenziale für Mobilitätsanwendungen berechnen sich anhand der zur Verfügung gestellten Zulassungsstatistiken der Projektregion und öffentlich zugängliche Daten über das Kraftfahrtbundesamt [92]. Des Weiteren wurden für den Bezirk Karlsbad Daten, wie Erdgasverbräuche oder zugelassene Fahrzeuge, aus dem statistischen Jahrbuch 2024 herangezogen [91]. Für die Aufteilung des Gasbedarfs als technisches Wasserstoffpotenzial in der Karlsbader Region wurden eigene Annahmen getroffen. Der Bedarf „Domestic“ (DOM) und „Low Demand Customer“ (LD_C) fällt demnach zu 100 % unter den Niedertemperaturbereich. Der Bedarf „Medium Demand Customer“ (MD_C) und „High Demand Customer“ (HD_C) teilt sich zu 50 % auf Wasserstoff für die Prozesswärme $> 200\text{ °C}$ und zu 50 % auf Wasserstoff für Kraft-Wärme-Kopplungsprozesse auf. Eine spezifischere Aufteilung kann aufgrund der Datenlage nicht erfolgen.

Zur Abschätzung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs im Zieljahr 2050 wurden drei Entwicklungsszenarien entwickelt: ein ambitioniertes Szenario, ein Mittelszenario („Mittelweg“) sowie ein konservatives Szenario. Die Szenarien basieren auf einer Kombination aus Datenerhebungen und Gesprächen bei regionalen Unternehmen sowie statistischen Daten der

Region Karlsbad. Ziel ist es, mögliche Entwicklungspfade des Wasserstoffeinsatzes unter unterschiedlichen energiepolitischen, technologischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abzubilden.

Die Szenarien orientieren sich dabei an den langfristigen klimapolitischen Zielsetzungen der Europäischen Union, insbesondere dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050, wie es im Rahmen des European Green Deal festgelegt wurde. Ergänzend wurden zentrale regulatorische Initiativen berücksichtigt, darunter das „Fit-for-55“-Paket, die EU-Wasserstoffstrategie sowie sektorale Dekarbonisierungsvorgaben für Industrie, Verkehr und Energiesysteme. Diese Politikinstrumente sehen unter anderem eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen, eine zunehmende Elektrifizierung von Endanwendungen sowie den verstärkten Einsatz von erneuerbarem Wasserstoff in schwer zu elektrifizierenden Sektoren vor.

In der industriellen Produktion betrifft dies insbesondere Hochtemperaturprozesse, beispielsweise in der Glas-, Keramik- oder Porzellanherstellung, bei denen eine vollständige Elektrifizierung technisch oder wirtschaftlich nur eingeschränkt möglich ist. Auch im Mobilitätssektor wird Wasserstoff vor allem in Anwendungen mit hohen Reichweiten- oder Leistungsanforderungen erwartet, etwa im Schwerlastverkehr oder im öffentlichen Verkehrssystem. Für Niedertemperaturprozesse im Wärmesektor wird hingegen in allen Szenarien kein Einsatz von Wasserstoff für Heizprozesse angenommen, da hier eine zunehmende Elektrifizierung (z. B. Wärmepumpen) als effizientere Dekarbonisierungsoption gilt. Die Szenarien unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Geschwindigkeit technologischer Transformationen, der Elektrifizierung von Industrieprozessen, der Verfügbarkeit und Kosten von Wasserstoff sowie der Effizienzsteigerungen im Energiesystem.

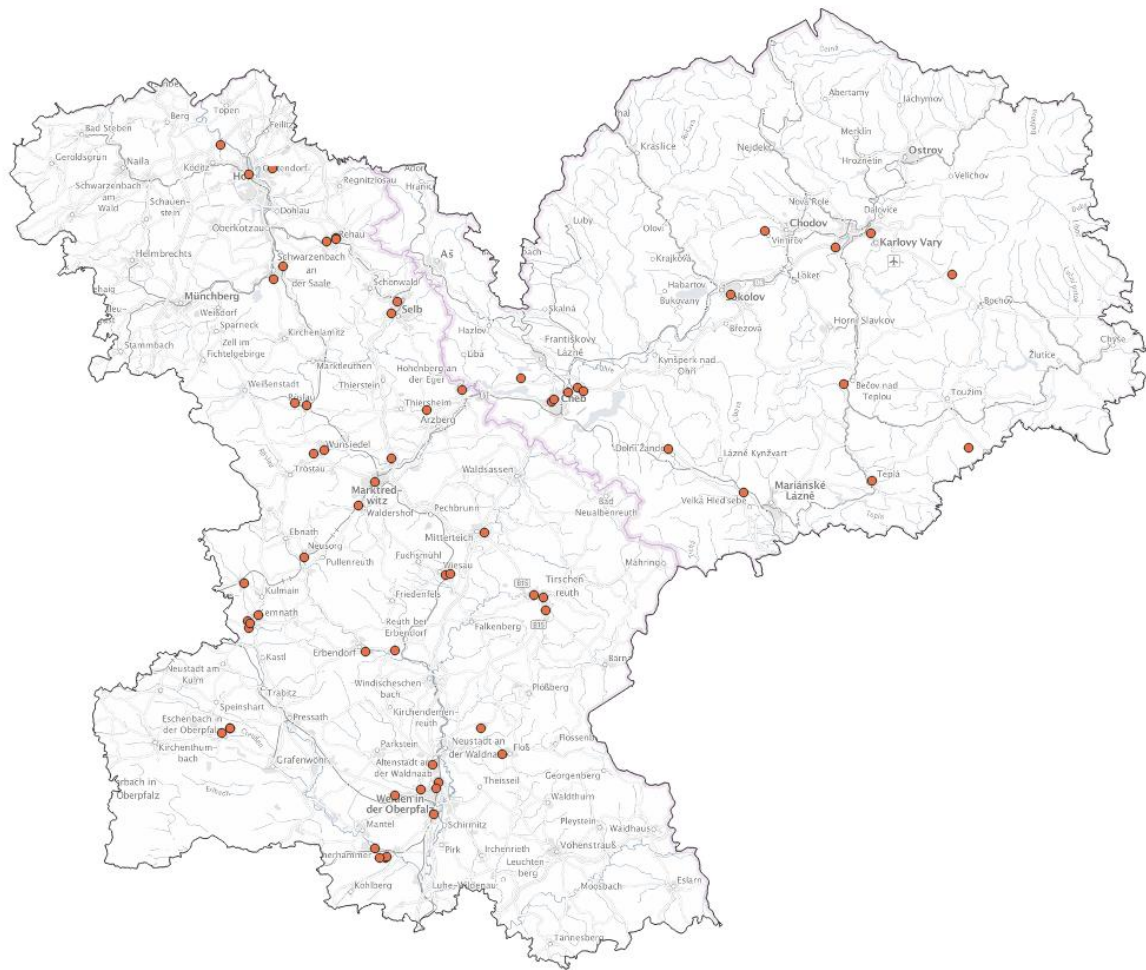


Abbildung 8: Darstellung der 67 Datenrückläufer aus der Unternehmensbefragung.

Abbildung 8 zeigt die räumliche Verteilung der Datenrückläufer (67 Teilnehmer) aus der Unternehmensbefragung. Der Großteil der Rückläufer kommt aus dem Sektor Industrie, darauf folgt der Sektor Handwerk und Dienstleistungen.

6.2.1 Wasserstoffhochlauf: Ambitioniertes Szenario

Im ambitionierten Szenario wird von einer konsequenten Umsetzung der europäischen Klimaziele sowie einer schnellen Transformation des Energiesystems ausgegangen. Dies umfasst eine jährliche hohe Effizienzsteigerung bzw. Einsparungen von etwa 2 % im Bereich Wärme und Kraft-Wärme-Kopplung, einen deutlichen Ausbau erneuerbarer Energien sowie eine umfangreiche Integration von Wasserstoff in industrielle Prozesse und im Verkehrssektor. Da Hochtemperaturanwendungen in vielen Fällen nur begrenzt elektrifizierbar sind, wird in diesem Szenario ein umfangreicher Einsatz von Wasserstoff angenommen, gerade im

Bereich Glas, Keramik und Porzellan als auch im Bereich der Groß-KWK-Anlagen. Zudem ist ein Kernnetzanschluss vorhanden und Wasserstoff liegt in ausreichenden Mengen und Preisen vor. Der Bedarf im Hochtemperaturbereich beläuft sich auf etwa 22.400 t Wasserstoff pro Jahr, was einem Energiebedarf von rund 750 GWh pro Jahr entspricht. Zusätzlich wird eine Umstellung bestehender Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Fuel Switch) auf Wasserstoff angenommen, wodurch ein zusätzlicher Bedarf von 10.600 t pro Jahr (ca. 350 GWh/a) entsteht.

Auch im Verkehrssektor wird eine weitgehende Transformation angenommen, insbesondere im Schwerlastverkehr und im öffentlichen Personennahverkehr, wo wasserstoffbasierte Antriebe aufgrund hoher Reichweitenanforderungen als technisch geeignet gelten. Hieraus ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 6.900 t Wasserstoff pro Jahr bzw. etwa 230 GWh. Diese Zahlen resultieren in Anlehnung an Ziele auf bayerischer und nationaler Ebene in Deutschland, welche auf den Bezirk Karlsbad ausgeweitet wurden. Diese beinhalten:

- Landesebene Freistaat Bayern:
 - Klimaneutralität des Verkehrssektors bis 2040 bzw. 2045 (Ziel Landesregierung) [93]
- Bundesebene Deutschland:
 - Bestand von 15 Mio. E-PKW bis 2030 (Ziel Bundesregierung) [94]
 - Minderung des Treibhausgas (THG)-Ausstoßes im Verkehrssektor um 49 % bis 2030 im Vergleich zu 1990 (Ziel Bundesregierung) [95]

Aus den formulierten Zielen sowie der von Agora Energiewende und Stiftung Klimaneutralität beauftragten Studie „*Klimaneutrales Deutschland 2045*“ aus dem Jahr 2021 lassen sich auf die Projektregion bezogene Annahmen für das Szenario „Ambitioniert“ ableiten. Des Weiteren werden für den Flug-, Schienen- und Binnenschiffverkehrsverkehr formulierte Ziele der jeweiligen Branchen in das Szenario aufgenommen. Außerdem wird in diesem Szenario auch die Verschiebung des Modal Split¹ weg von straßengebundenen und hin zu schienengebundenen bzw. öffentlichen Verkehrsmitteln beachtet. [97]

¹ Prozentuale Anteile der verschiedenen Verkehrsmittel an der gesamten Verkehrsleistung [96]

Nachfolgende Abbildung 9 stellt den zeitlichen Verlauf des ambitionierten Szenarios bis 2050 dar.

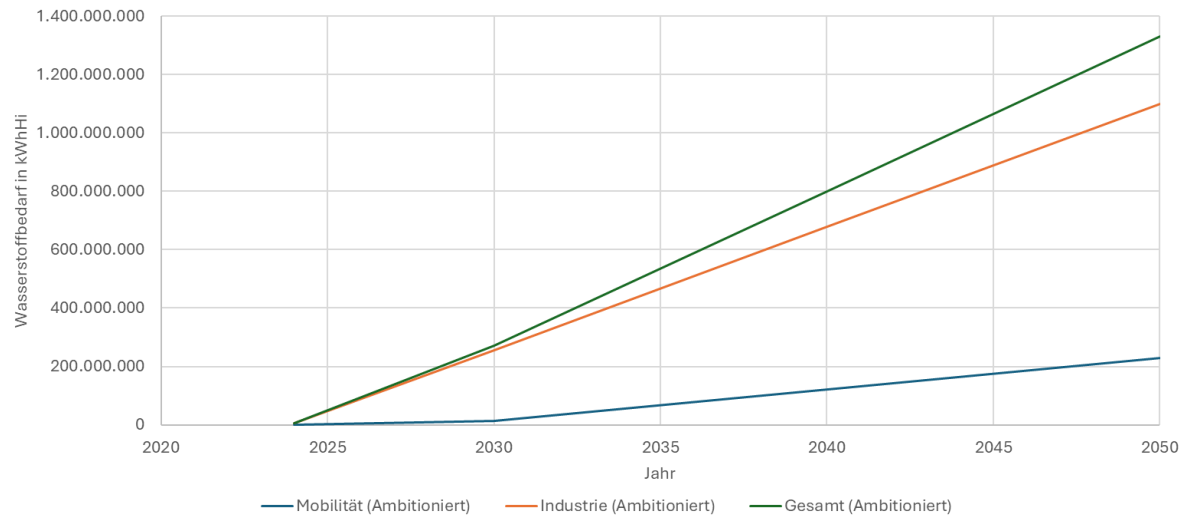


Abbildung 9: Wasserstoffhochlauf im ambitionierten Szenario.

Insgesamt beschreibt dieses Szenario einen Transformationspfad, der stark an langfristige Dekarbonisierungsstrategien auf europäischer und nationaler Ebene angelehnt ist.

6.2.2 Wasserstoffhochlauf: Mittelweg-Szenario

Das Mittelszenario stellt einen realistischeren Entwicklungspfad mit moderatem Transformationstempo dar. Hier wird eine jährliche Effizienzsteigerung bzw. Einsparung von etwa 1,5 % angenommen [98]. Gleichzeitig erfolgen sowohl eine Elektrifizierung von Prozessen als auch ein selektiver Einsatz von Wasserstoff. Im industriellen Hochtemperaturbereich wird ein Wasserstoffbedarf von etwa 10.300 t pro Jahr, entsprechend rund 340 GWh, angenommen. In diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass bestimmte Prozesse – etwa Hybridverfahren in der Glasproduktion – teilweise elektrifiziert werden können, während ein Teil des Energiebedarfs weiterhin durch Wasserstoff gedeckt wird. Es wird hierbei angenommen, dass rund 1/3 der benötigten Energie der Glasschmelzen durch Wasserstoff eingebracht wird [99]. Der Großteil, also rund 66 % der benötigten Energie, wird durch Strom eingebracht. Ein Einsatz von Wasserstoff in der Kraft-Wärme-Kopplung wird in diesem Szenario nicht angenommen, da hier alternative Dekarbonisierungsoptionen wie Elektrifizierung oder der Einsatz erneuerbarer Energieträger als wahrscheinlicher gelten. Im Mobilitätssektor erfolgt eine

moderate Umstellung auf wasserstoffbasierte Antriebe, insbesondere im Schwerlastverkehr und teilweise im öffentlichen Verkehr. Daraus ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von etwa 4.000 t Wasserstoff pro Jahr bzw. rund 130 GWh. Der Mobilitätsbedarf resultiert aus dem Mittelwert zwischen konservativem und ambitioniertem Szenario. Nachfolgende Abbildung stellt zeitlichen Wasserstoffhochlauf im Mittelweg dar.

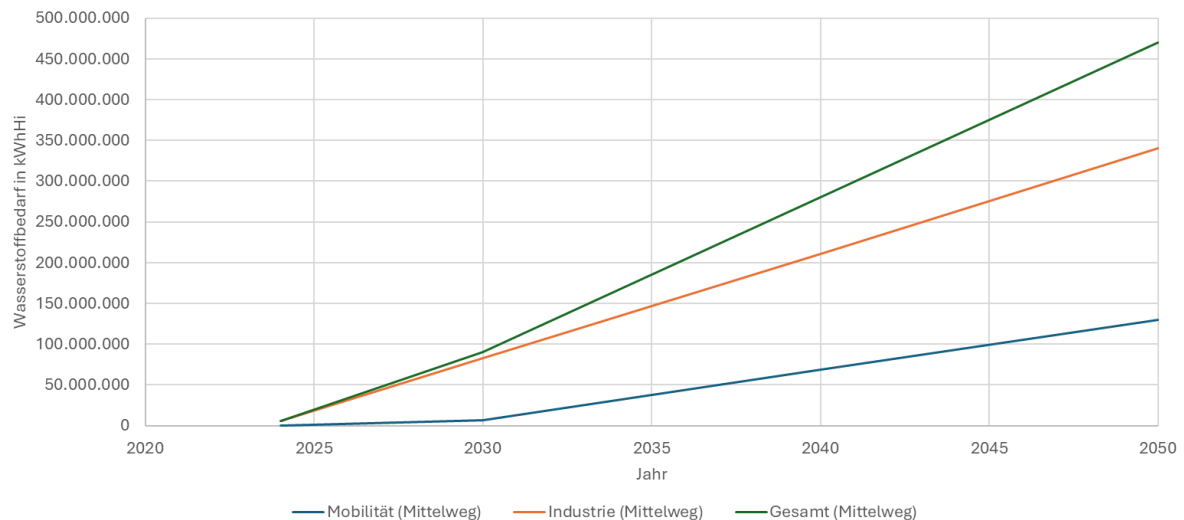


Abbildung 10: Wasserstoffhochlauf im Mittelweg-Szenario.

6.2.3 Wasserstoffhochlauf: Konservatives Szenario

Das konservative Szenario geht von einer langsamen Transformation des Energiesystems aus. Hier wird angenommen, dass vor allem Elektrifizierung und erneuerbarer Strom die Dekarbonisierung vorantreiben, während Wasserstoff aufgrund hoher Kosten, begrenzter Infrastruktur und unsicherer Verfügbarkeit nur in begrenztem Umfang eingesetzt wird. Die jährliche Effizienzsteigerung wird hier mit 1 % angenommen. Wasserstoff kommt überwiegend in Nischenanwendungen der Industrie zum Einsatz. Entsprechend fällt der Bedarf im Hochtemperaturbereich mit 1.700 t Wasserstoff pro Jahr bzw. rund 57 GWh deutlich geringer aus. Ein Einsatz von Wasserstoff in der Kraft-Wärme-Kopplung wird auch in diesem Szenario nicht angenommen.

Im Mobilitätssektor erfolgt lediglich eine geringe Umstellung auf wasserstoffbasierte Technologien, sodass ein zusätzlicher Bedarf von etwa 990 t pro Jahr bzw. rund 33 GWh entsteht. Die Angaben für die Mobilität basieren auf einer vom Bundesministerium für Wirtschaft und

Energie (BMW i bzw. BMW E) in Auftrag gegebenen Studie, die das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Zusammenarbeit mit der Consentec GmbH im Jahr 2021 veröffentlicht hat [100]. In Anlehnung an das dort beschriebene Szenario „TN-Strom“ werden die prognostizierten Energiebedarfe als Basis für die Berechnungen verwendet und auf das Jahr 2050 hochgerechnet. Des Weiteren fließen spezifische aktuelle Zulassungszahlen und historische Entwicklungstrends der Bestände von elektrisch betriebenen PKW der Jahre 2020 – 2024 mit in das Szenario ein [101]. Nachfolgende Abbildung stellt zeitlichen Wasserstoffhochlauf im konservativen Szenario dar.

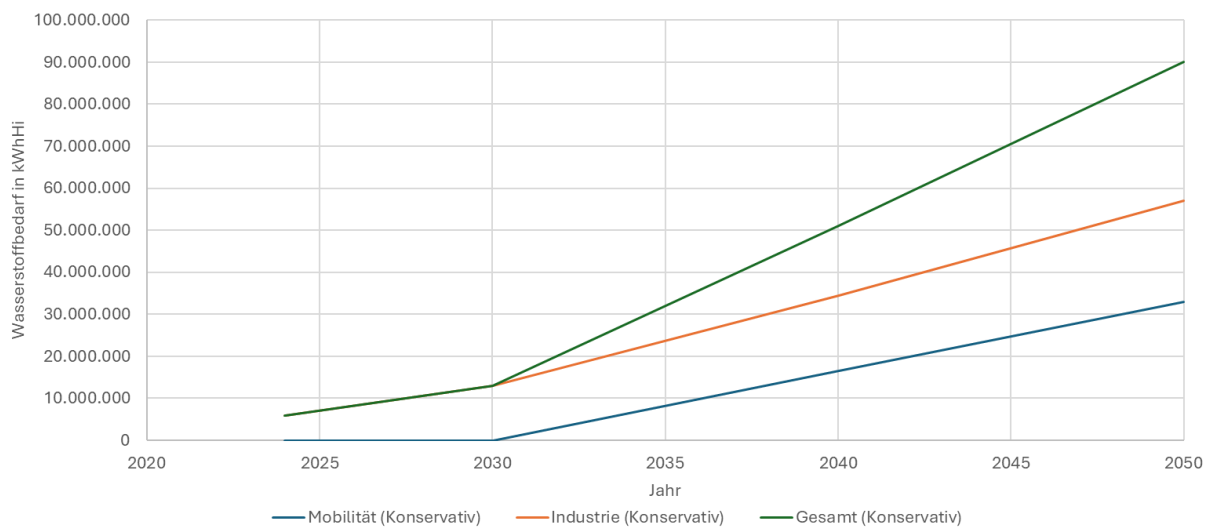


Abbildung 11: Wasserstoffhochlauf im konservativen Szenario.

6.2.4 Übertragbarkeit der betrachteten Studien

Für die Entwicklung der Szenarien wurden teilweise Studien und Modellannahmen aus Deutschland herangezogen, beispielsweise Analysen von Agora Energiewende oder Fraunhofer-Instituten. Die Verwendung solcher Studien ist methodisch vertretbar, da Deutschland und Tschechien in mehreren zentralen Aspekten vergleichbare Rahmenbedingungen aufweisen. Erstens unterliegen beide Länder denselben energie- und klimapolitischen Vorgaben der Europäischen Union, insbesondere im Hinblick auf Emissionsminderungsziele, Energieeffizienzanforderungen und den Ausbau erneuerbarer Energien. Zweitens sind die Industriestrukturen in vielen Bereichen ähnlich, insbesondere in energieintensiven Branchen wie Glas-, Keramik- oder Metallverarbeitung, die auch in der Region Karlsbad vertreten sind. Darüber hinaus sind die Energiesysteme beider Länder stark miteinander verbunden, etwa durch grenzüberschreitende Strom- und Gasinfrastruktur sowie gemeinsame Energiemärkte im europäischen Binnenmarkt. Technologische Entwicklungen, Investitionskosten und Infrastrukturtrends entwickeln sich daher häufig auf gesamteuropäischer Ebene und sind nicht strikt national begrenzt.

Aus diesen Gründen können deutsche Studien als Orientierungsrahmen für technologische Entwicklungen, Energiebedarfe und Transformationspfade dienen, auch wenn regionale Besonderheiten – wie industrielle Produktionsstrukturen oder lokale Energieinfrastrukturen – in der konkreten Entwicklung der Szenarien berücksichtigt werden müssen.

6.3 Wasserstofferzeugungspotenziale mit Schwerpunkt Elektrolyse und Nutzungspotenziale in der Projektregion

Dieses Kapitel geht auf die ermittelten Potenziale und die Ergebnisse der durchgeführten Analyse für den Aufbau einer lokalen Wasserstoffinfrastruktur in der Projektregion ein. Dabei werden die folgenden Komponenten der Wasserstoffwertschöpfungskette beleuchtet:



Abbildung 12: Vereinfachte Darstellung des betrachteten Systems.

Für das Konzept wurden zunächst die möglichen Abnehmer von Wasserstoff, aber auch Abwärme der Elektrolyse sowie Sauerstoff identifiziert. Im nächsten Schritt wurde eine Standortanalyse anhand der regionalen Infrastruktur durchgeführt. Auf Basis der Standortanalyse und der Szenarien für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft in der Projektregion aus Kapitel 6.2 resultieren mögliche dezentrale und regionale Wasserstoffversorgungskonzepte, welche auch ein Logistikkonzept beinhalten. Anhand des Standorts sowie des Wasserstoffbedarfs wurde die vorläufige Dimensionierung von Wasserstofferzeugungsanlagen mit dem jeweiligen Strombezug durchgeführt. Daraus ergibt sich eine Wasserstoffbilanz für die Projektregion, welche die Über- oder Unterdeckung des zukünftigen Wasserstoffbedarfs aufzeigt. Daraus resultieren die notwendigen Im- oder Exporte von Wasserstoff in bzw. aus der Region. Mit dem Verlauf des Kernnetzes durch die Projektregion sind beste Voraussetzungen für den zusätzlichen Import von Wasserstoff, aber auch dessen Export gegeben.

Es gibt derzeit bereits eine dezentral arbeitende Wasserstoffinfrastruktur in der Region. Im Norden der Projektregion befindet sich die Wasserstofftankstelle Berg bei Hof der H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG direkt an der Autobahn A9 [102]. Diese besitzt ein Druckniveau von 350 bar und 700 bar. Zudem liegt in Wunsiedel der bayernweit größte Elektrolyseur mit 8,75 MW, welcher zukünftig auf bis zu 17,5 MW erweitert werden könnte und bei welchem auch eine Wasserstofftankstelle (nach Gesprächsinformationen) kurz vor

der Inbetriebnahme vorhanden ist [62], [103]. Zudem befindet sich auf Karlsbader Seite eine Elektrolyseanlage von 600 kW Leistung, welche Wasserstoff zur Erdgasbeimischung produziert und so rund 360 Haushalte versorgt [104]. Des Weiteren verläuft zukünftig das Wasserstoffkernnetz durch die Region.

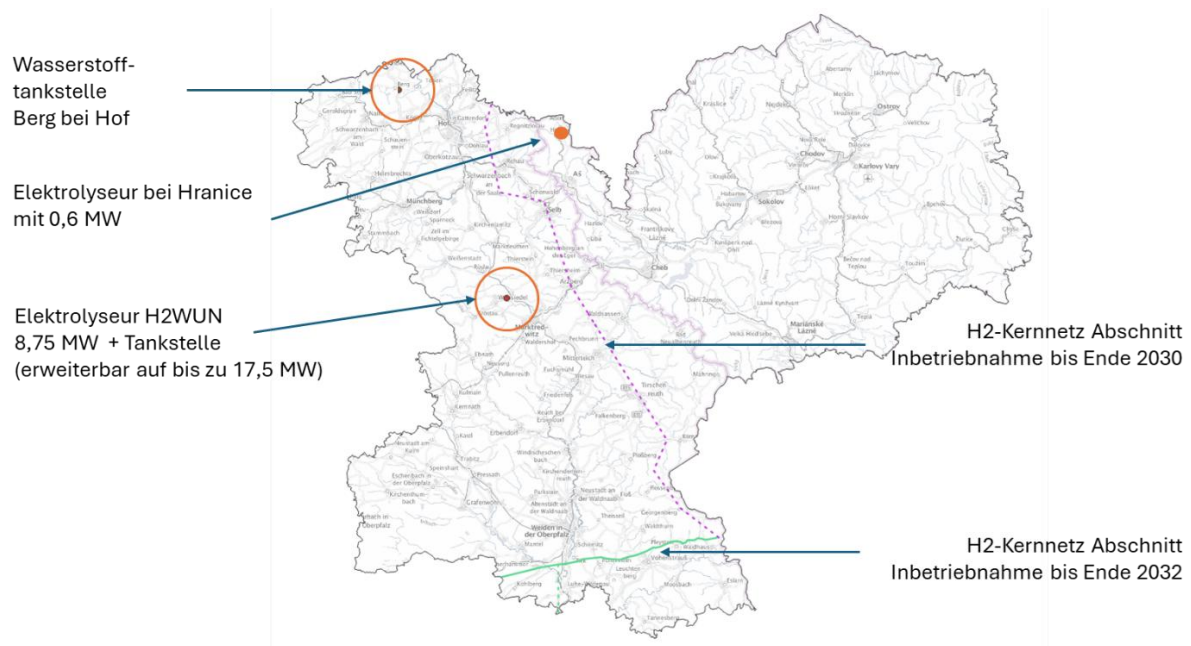


Abbildung 13: Aktuelle Wasserstoffinfrastruktur sowie das geplante Kernnetz in der Projektregion.

Abbildung 13 zeigt die aktuelle Wasserstoffinfrastruktur in der Region. Auf Karlsbader Seite soll zukünftig noch der sog. CGHI verlaufen und so das deutsche Kernnetz mit Tschechien verbinden. Im Rahmen des Projekts wurden hierzu Shape-Files zur GIS-Integration angefordert, welche aber leider noch nicht vorliegen. Neben der Erfassung der bereits vorhandenen Wasserstoffinfrastruktur in der Region ist die Standort- und Potenzialanalyse zum Aufbau weiterer dezentraler Infrastruktur ein essenzieller Baustein des Regionalkonzepts.

Wie bereits beschrieben, fanden hier umfangreiche Standort- und Potenzialanalysen statt. Zudem wurden Ergebnisse und Potenziale aus bereits vorhandenen Wasserstoffkonzepten herangezogen [59]. Nachfolgende Abbildung 14 stellt Potenzialräume zum Aufbau einer weiteren Wasserstoffinfrastruktur dar. Die Potenzialräume sind gleichmäßig über die gesamte Projektregion verteilt. Wie bereits erwähnt, ergeben sich die betrachteten Räume aus umfangreichen Abstimmungen im Verlauf des Projekts als auch der Analyse der regionalen

Begebenheiten, wie EE-Anlagen, Stromnetzverknüpfungspunkte sowie möglicher Wasserstoffabnehmern, den Verkehrsachsen, dem zukünftigen Wasserstofftransportnetz und möglichen Abnehmerstrukturen für die Elektrolyse nebenprodukte Sauerstoff und Abwärme.

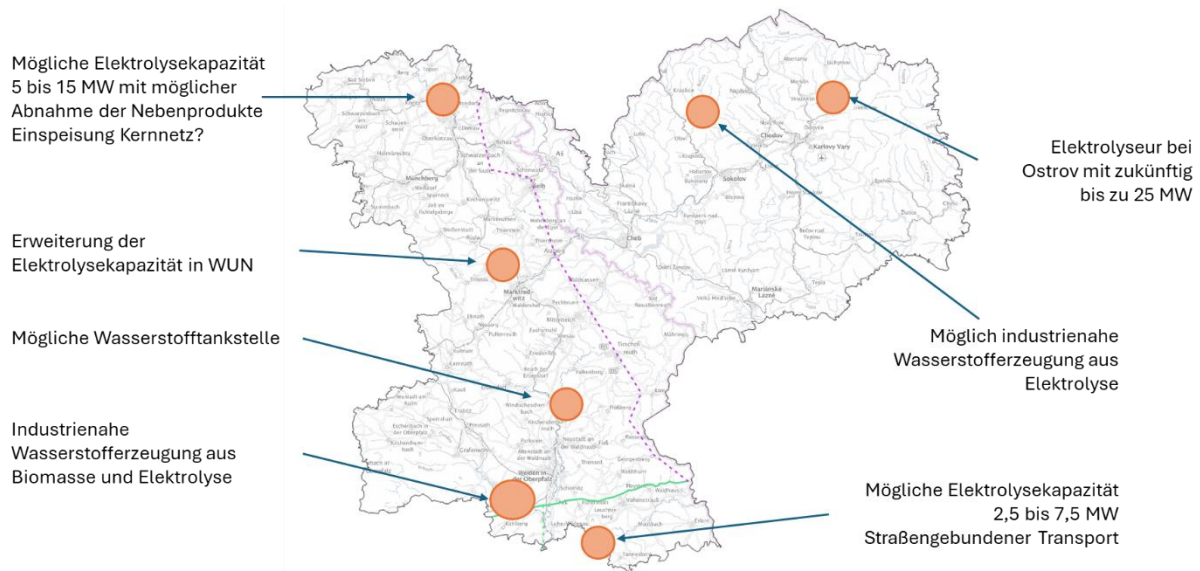


Abbildung 14: Potenzialräume zum Aufbau einer zukünftigen Wasserstoffinfrastruktur in der HyBaBo-Projektregion.

Als mögliche Potenzialräume ergeben sich auf der deutschen Projektseite der Norden der Stadt Hof in räumlicher Nähe zum Kernnetz mit einem 5 bis 15 MW-Elektrolyseur, die Erweiterung des Elektrolyseurs in Wunsiedel auf 17,5 MW, eine mögliche Wasserstofftankstelle im nördlichen Landkreis Neustadt an der Waldnaab, die industriennahe Wasserstoffherzeugung aus Elektrolyse und/oder biogenen Reststoffen im südlichen Landkreis Neustadt an der Waldnaab im Raum Mantel/Weiherhammer sowie der Aufbau einer Elektrolysekapazität mit 2,5 bis 7,5 MW in räumlicher Nähe zur Autobahn A6 für einen möglichen straßengebundenen Transport von Wasserstoff. Auf tschechischer Projektseite ergaben sich nach umfangreicher Analyse mögliche Elektrolysestandorte im Raum Kraslice/Sokolov als auch Ostrov mit bis zu 25 MW. Die Potenzialräume ergaben sich aufgrund folgender Begebenheiten:

- Norden der Stadt Hof:
 - Nähe Netzverknüpfungspunkt und Wasserstoffkernnetz zur Einspeisung von Wasserstoff
 - EE-Anlagen-Mix aus PV und Wind

- Kläranlage als potenzieller Abnehmer der Nebenprodukte Sauerstoff und Abwärme
- Erweiterung des Elektrolyseurs Wunsiedel auf 17,5 MW
 - Ursprünglich geplante Erweiterung mit Erzeugungskapazität von bis zu 1.350 t Wasserstoff pro Jahr
 - Trailerinfrastruktur bereits vorhanden
- Mögliche Wasserstofftankstelle im nördlichen Landkreis NEW
 - Ursprünglich geplantes Vorhaben mit vorhandener Förderskizze
- Industriennahe Wasserstoffherzeugung Raum Mantel/Weiherhammer:
 - Substituierung von grauem Wasserstoff vor Ort
 - Transport via Trailer und Direktleitung
- Elektrolyse in räumlicher Nähe zur Autobahn A6
 - Nähe Netzverknüpfungspunkt und Autobahn zum straßengebundenen Wasserstofftransport
 - Nähe PV-Freiflächenanlagen
- Standort zwischen Kraslice und Sokolov:
 - Schwere Industrie vor Ort
 - Nähe Netzverknüpfungspunkt und Windkraftanlagen
- Standort Ostrov:
 - Geplantes Vorhaben auf bis zu 25 MW Elektrolysekapazität

Ausgehend vom Mittelweg-Szenario (vgl. 6.2.2) werden zukünftig 2.700 t Wasserstoff pro Jahr ab dem Jahr 2030, 8.400 t/a ab 2040 und 14.100 t/a ab 2050 benötigt. Demgegenüber stehen lokale Elektrolysekapazitäten von 17,5 MW mit einer Wasserstoffherzeugung von 1.400 t/a bis 2030. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Erweiterung des bereits vorhandenen Elektrolyseurs in Wunsiedel realisiert wird. Dadurch kann ein regionaler Wasserstoffhochlauf entstehen, wodurch auch eine regionale Wasserstoff-Abnehmerstruktur geschaffen werden könnte, um zukünftig für Wasserstoff aus dem Kernnetz bereit zu sein. Bis zum Jahr 2050 könnte die Elektrolysekapazität in der Projektregion zudem auf bis zu 57,5 MW, verteilt auf mehrere Standorte, wachsen. Ein Ausbau der Elektrolysekapazität hat zur Folge, dass bis zu 150 MW an zusätzlicher EE-Leistung aus Wind und PV für die Erzeugung

von RFNBO-Wasserstoff (vgl. Abbildung 1) zur Verfügung stehen müssen. Alternativ kann zukünftig nach Ausstieg aus der Kohlekraft Tschechiens ab 2033 (vgl. [19]) auch mit Atomkraft kohlenstoffarmer Wasserstoff (vgl. Kapitel 3.1.2) erzeugt werden. Vergleicht man nun den zukünftigen Wasserstoffbedarf mit der möglichen lokalen Erzeugungskapazität (einschließlich einer möglichen Produktion aus biogenen Reststoffen von ca. 5 % des theoretischen Potenzials) gibt es ein Wasserstoffdefizit von 1.300 t/a ab 2030, 5.900 t/a ab 2040 und 9.600 t/a ab 2050. Hierbei handelt es sich um Wasserstoffmengen, welche zukünftig übergeordnet aus dem Kernnetz oder anderweitig bezogen werden müssen.

Für die weiteren Betrachtungen wird exemplarisch sowohl ein 5 MW Elektrolysesystem in räumlicher Nähe zur Autobahn A6 mit Trailerinfrastruktur als auch ein 10 MW Elektrolysesystem im Norden der Stadt Hof zur Einspeisung in das Wasserstoffkernnetz angenommen. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung des Elektrolysesystems erfolgt anhand einer Vollkostenrechnung nach der Annuitätenmethode (in Anlehnung an die VDI 2067 Blatt 1). Die Berechnung teilt sich in kapitalgebundene, betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten bzw. Energiekosten auf. Darauf basierend errechnen sich die sog. spezifischen Wasserstoffgestehungskosten in €/kg H₂.

Dabei wurden die folgenden Rahmenbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung getroffen und abgestimmt:

- Anteil Fremdkapital (FK): 80 %
- Anteil Eigenkapital (EK): 20 %
- Nutzungsdauer der Anlagen: 15 Jahre
- Zins FK: 4,0 %
- alle Kosten in € netto
- es wird eine 100-%-ige Umstellung auf Wasserstoff bei den relevanten Unternehmen angenommen
- eine Marge für die potenziellen Betreiber des Elektrolyseurs wird nicht berücksichtigt

Folgende Kosten wurden dabei berücksichtigt:

- Kapitalkosten (Investitionskosten auf Basis durchschnittlicher Nettomarktpreise für die einzelnen Komponenten)
- betriebsgebundene und verbrauchsgebundene Kosten (Wartung, Instandhaltung, Betrieb, technische Überwachung, Personalkosten, Versicherung, Verwaltung)
- Energiekosten (elektrische Energie, Hilfsenergie)

Die Investitionskosten sind nicht vollständig als konkrete Angebotspreise, sondern lediglich als durchschnittliche Marktpreise zu verstehen. Diese können in der tatsächlichen Umsetzung nach oben oder unten abweichen. Die angesetzten Investitionskosten können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Darstellung der Gesamtinvestitionskosten netto der einzelnen Varianten.

Kosten in € netto	Fall 1: 5 MW Elektrolyseur mit Trailertransport in Nähe zur Autobahn	Fall 2: 10 MW Elektrolyseur und Einspeisung in Kernnetzabschnitt
Planungs-, Installations- und unvorhergesehene Kosten	3.800.000 €	7.400.000 €
Elektrolyseur	8.500.000 €	15.500.000 €
Speicher, Verdichter und Leitungsbau	8.600.000 €	18.300.000 €
Sonstige Peripherie	400.000 €	700.000 €
Erschließungskosten Strom	900.000 €	1.400.000 €
Gesamt	22.200.000 €	43.300.000 €

Die Gesamtkosten liegen zwischen 22,2 Mio. € und 43,3 Mio. € für den Elektrolyseur und dessen Peripherie. Bei den in der Tabelle aufgeführten Investitionskostenbestandteilen sind folgende Anlagenbestandteile enthalten:

- Elektrolyseur:
 - Elektrolyseurcontainer 5 MW bzw. Elektrolysesystem mit 10 MW
 - Wärmerückgewinnungsmodul

- Lieferkosten
 - Speicher, Trailer, Verdichter und Verteilung:
 - Niederdruck Pufferspeicher
 - Verdichterstation
 - Trailerinfrastruktur und Trailer (nur Fall 1)
 - Direktleitung Elektrolyseanlage → Kernnetz (nur Fall 2)
 - Sonstige Peripherie
 - Elektrische Anbindung
 - Messtechnik
 - Kosten für Gebäude/Unterstand und Montagesystem
 - Erschließungskosten Strom
 - Stromanschlusskosten
 - Baukostenzuschuss bei Netzbezug (Umspannung Hoch-/Mittelspannung)
- [105]

Die drei Kostenbestandteile Planung (7,5 %), Installation (7,5 %) und Unvorhergesehenes (5 %) werden pauschal/prozentual in Abhängigkeit der Investitionskosten ermittelt und anschließend prozentual (in Abhängigkeit der Investitionskosten) aufgeteilt. Die daraus resultierenden Kosten sind in Tabelle 1 unter dem Punkt „Planungs-, Installations- und unvorhergesehene Kosten“ zusammengefasst.

Die betriebsgebundenen und verbrauchsgebundenen Kosten beinhalten die Kosten für die Bedienung der technischen Anlagen, die Kosten für Wartung und Instandhaltung der einzelnen Anlagen und Komponenten sowie Personalkosten, Versicherung, Verwaltung und Pachtkosten. Die Kosten werden in Anlehnung an die in der VDI 2067 festgelegten Werte und Daten aus der Marktanalyse bzw. aus den Gesprächen mit Herstellern angesetzt:

- Wartung und Instandhaltung der Komponenten: 1,3 % (angelehnt an Aussagen der Hersteller)
- Bedienungsaufwand: 1 Vollzeitstelle
- Wasserbezugskosten: 2 €/m³

Die Energiekosten setzen sich aus den angenommenen Strompreisen zum Betrieb des Elektrolyseurs sowie der Verdichterstation und weiteren Komponenten zusammen:

- Strompreis Netzbezug Elektrolyseur: 8,09 ct/kWh_{el} bis 8,13 ct/kWh_{el} (Annahme IfE für PPA)
- Strompreis Netzbezug Verdichterstation: 9,72 bis 10,65 ct/kWh_{el} (Annahme IfE für Börsenbezug)

Die unterschiedlichen Strompreise resultieren aus den unterschiedlichen, zu zahlenden Netzentgelten. So ist der Elektrolysestrom von folgenden Entgelten und Umlagen befreit:

- Stromsteuer (über nachträgliche Rückerstattung) (vgl. § 9a StromStG)
- Netznutzungsentgelte der Verteilnetzbetreiber (vgl. § 118 Abs. 6 EnWG)
- Konzessionsabgabe (unter Umständen, sofern die derzeitigen Strompreise der Sondervertragskunden des vorletzten Jahres höher als der PPA-Preis sind; vgl. § 2 KAV Abs. 4) bzw. Sondervertragskunden-Kondition
- Offshore- und KWKG-Umlage (vgl. § 25 EnFG i.V. § 26 EnFG und § 93 EEG)

Bei der Berechnung der Stromkosten wurde angenommen, dass es Anlagen zur Produktion von RFNBO-Wasserstoff auf deutscher Projektseite nach [15] handelt.

Nachfolgend werden potenzielle Erlöse ausgewiesen, die nach Kalkulation der H₂-Gestehungskosten als Zusatzerlöse (wasserstoffseitig) in Abzug gebracht werden können. Sie sind in der Ergebnisdarstellung in Abbildung 16 noch nicht gegengerechnet. Es handelt sich hierbei um Zusatzerlöse für die deutsche Projektregion.

- Vermarktung der Abwärme: 0,6 €/kg H₂ (bei einem Erlös von 5 ct/kWh_{th})
- Vermarktung von Sauerstoff derzeit nicht monetär abschätzbar
- THG-Quotenerlöse: 8,50 €/kg H₂ (für CO₂-Preis von 300 €/t CO₂-Äquivalent; Zielwert THG-Minderung im Jahr 2026) sofern in der Mobilität eingesetzt
- Strompreiskompensation (SPK) für stromintensive Unternehmen [106]: 1,90 €/kg H₂ (Voraussetzung: Einführung eines Energiemanagementsystems und Bezug von mind. 30 % EE-Strom aus ungefördernden EE-Anlagen → PPAs ist ohnehin notwendig;

- Bezug von Fördermitteln auf Bundes- oder Landesebene → Derzeit kein relevanter Förderaufruf

Das Erlöspotenzial über die Vermarktung der THG-Quote für die Wasserstoffanwendung in der Mobilität hängt sehr stark von der Preisentwicklung der THG-Quoten (€/t CO₂-Äquivalent) ab. Mit steigenden Preisen für THG-Quoten können zusätzliche Erlöse generiert werden. Seit Anfang des Jahres 2026 liegt der Wert nach einer Talfahrt wieder bei ca. 300 €/t CO₂-Äquivalent. Dies kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.



Abbildung 15: Verlauf der THG-Quotenpreise von 2023 bis 2026 [107].

Die Reduktion der Wasserstoffgestehungskosten durch die Vermarktung der bei der Elektrolyse anfallenden Abwärme hängt sehr stark vom möglichen Wärmepreis ab. Im obigen Beispiel wurde ein Erlös von 5 ct/kWh_{th} angenommen. Der Erlös resultiert aus dem möglichen Verkaufspreis der Wärme abzgl. der Betriebskosten eines Wärmenetzes. Die Vermarktung des anfallenden Sauerstoffs kann derzeit nicht monetär abgeschätzt werden. Hierzu wurde ein Potenzial von 2.800 bis 5.600 Tonnen jährlich abgeschätzt.

Auf Basis der oben beschriebenen Kosten und Annahmen resultieren die im nachfolgenden Diagramm dargestellten Wasserstoffgestehungskosten für die verschiedenen Varianten. Wie bereits beschrieben, berechnen sich diese Kosten aus der Summe der jährlich laufenden

kapitalgebundenen, betriebsgebundenen und verbrauchsgebundenen Kosten sowie Energiekosten, dividiert durch die produzierte Wasserstoffmenge im Jahr.

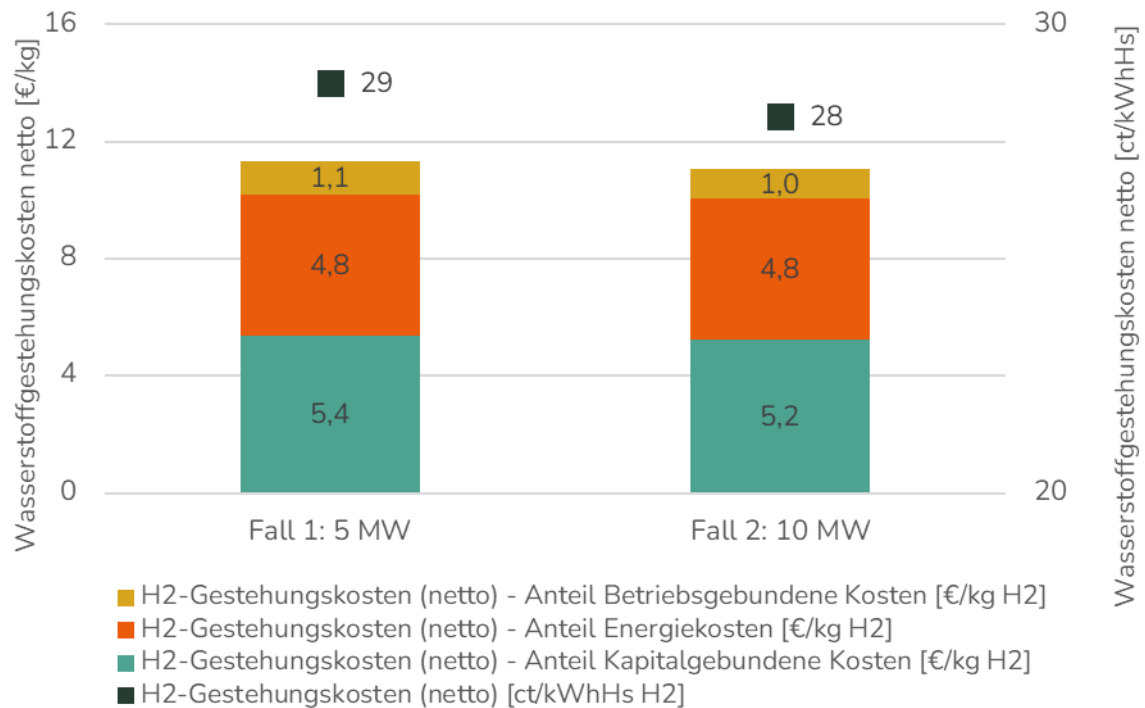


Abbildung 16: Resultierende Wasserstoffgestehungskosten.

Die abgebildeten Wasserstoffgestehungskosten liegen zwischen 11,00 €/kg H₂ netto bzw. 28 ct/kWh_{H₂} netto und 11,30 €/kg H₂ netto bzw. 29 ct/kWh_{H₂} netto. Mögliche Zusatzerlöse aus der Vermarktung von THG-Quoten und der Abwärme wurden hier nicht berücksichtigt.

Mit den genannten Fördermöglichkeiten und der Vermarktung der Nebenprodukte ergeben sich rechnerisch erhebliche Reduzierungsmöglichkeiten der Wasserstoffgestehungskosten. In den Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit werden keine abnehmerseitigen Kosten, wie z. B. die Umrüstung bzw. Umstellung möglicher Industrieprozesse oder Endgeräte bei Privatkunden und Anpassungen im Gasnetz sowie Aufbau von Traileranlagen, bei den möglichen Wasserstoffabnehmern berücksichtigt, da dies ohne verbindliche Zusage nicht monetär abschätzbar ist. Dies führt zu weiteren Investitionskosten und höheren laufenden Kosten, welche es zu beachten gilt.

Bei der Vermarktung der Abwärme über ein mögliches Wärmenetz müssen auch weitere Punkte beachtet werden. Ein Elektrolyseur, welcher mit Überschussstrom bzw. Strom aus Wind und PV betrieben wird, erreicht in den Wintermonaten geringere Vollbenutzungsstunden als in den Sommermonaten. Damit steht insbesondere in den kalten Monaten weniger Abwärme zur Verfügung. Dennoch herrscht gerade in diesen Monaten ein erhöhter Bedarf an Wärme. Aus diesem Grund muss bei der Realisierung eine redundante Wärmeversorgung aufgebaut werden, um die fehlende Abwärme aus der Elektrolyse zu kompensieren. Neben der Verlegung der Wärmeleitungen sowie Wartung und Betrieb muss ein oder mehrere weitere Wärmeerzeuger installiert werden. Damit fallen weitere Investitionskosten an.

Für die Nutzung des anfallenden Sauerstoffs fallen bei der Realisierung ebenfalls weitere Investitionskosten an. Aufgrund seiner stark oxidativen Eigenschaften ist beim Umgang mit Sauerstoff größte Sorgfalt geboten. Damit gehen weitere Investitionsmaßnahmen einher. Der bei der Elektrolyse anfallende Sauerstoff steht je nach Elektrolysetechnik ebenfalls unter Druck. Im Regelfall wird der Sauerstoff nun über ein Ventil entspannt und an die Umgebung abgelassen.

6.4 Wasserstofferzeugung aus biogenen Reststoffen

Im Rahmen dieser Potenzialanalyse zur Wasserstoffproduktion aus biogenen Reststoffen werden die betrachteten biogenen Reststoffquellen in folgende Herkunftskategorien eingeteilt:

- Landwirtschaft
- Bioabfälle
- Grüngut
- Resthölzer
- Klärschlamm

Eine zusammenfassende Betrachtung dieser Stoffströme sowie etwaige Unterkategorien ist in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Die Datengrundlagen unterscheiden sich zwischen der bayerischen und tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj) sowohl hinsichtlich der räumlichen Auflösung (Landkreis- bzw.

stadtscharf vs. regional aggregiert) als auch hinsichtlich der verfügbaren Zeiträume. Soweit konsistente Zeitreihen vorliegen, werden Potenziale zur Glättung jährlicher Schwankungen auf Basis von Mehrjahresmitteln ausgewiesen. Liegen hingegen keine Zeitreihen vor, sondern ausschließlich Kennwerte oder modellbasierte Abschätzungen, erfolgt die Potenzialermittlung auf Basis dieser Datengrundlage.

Die detaillierten Referenzwerte, Annahmen und Berechnungsschritte sind im Anhang dokumentiert. In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse der einzelnen Stoffströme zusammengefasst und im Hinblick auf ihre Bedeutung für das Regionalkonzept eingeordnet.

6.4.1 Wasserstoffpotenzial aus der Landwirtschaft

Die Potenzialermittlung für landwirtschaftliche Reststoffe wurde an die verfügbaren regionalen Daten der Projektregion angepasst. Betrachtet werden tierische Reststoffe aus der Viehhaltung, da diese grundsätzlich für die Erzeugung von Biogas bzw. für nachgelagerte Wasserstoffpfade genutzt werden können.

Zunächst erfolgt die Ermittlung der Viehbestände jahresweise für jede Teilregion auf Grundlage von Daten aus Statistik Kommunal [108] sowie dem statistischen Jahrbuch der Karlsbader Region [109], [110]. Analog zu [72] umfasst die Betrachtung die Tierarten:

Rinder, Milchkühe, Jungrinder, Kälber, Schweine, Schafe, Hühner und Pferde.

Für die tschechische Projektregion erfolgt in [109] bzw. [110] keine separate Ausweisung von Jungrindern und Kälbern, folglich wird bei den Rindern keine weitere Unterscheidung vorgenommen und der Gesamtbestand „Rinder“ verwendet. Milchkühe werden aufgrund der separaten Erfassung getrennt berücksichtigt und daher nicht in der Kategorie „Rinder“ mitgezählt.

Zur Ermittlung des theoretischen Wasserstoffpotenzials werden die mittleren Tierbestände mit den aus Literatur- und Messdaten bekannten spezifischen jährlichen Methanerträgen verknüpft. Das daraus abgeleitete Energiepotenzial wird anschließend unter Berücksichtigung des Wirkungsgrads der Biogasreformierung in ein theoretisches

Wasserstoffproduktionspotenzial überführt. Die detaillierten Berechnungsschritte, Eingangswerte und tierartspezifischen Ergebnisse sind im Anhang dokumentiert.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **6.900 t/a**, für die tschechische Projektregion (Karlovarský kraj) rund **1.800 t/a**.

Die ausgewiesenen Potenziale aus tierischen Reststoffen sind als theoretische Orientierungswerte zu verstehen. Die Berechnung basiert auf statistisch erfassten Viehbeständen und literaturbasierten Methanerträgen, sodass regionale Unterschiede in Haltungsformen, Fütterung, Stalltechnik und anfallende Mengen tierischer Exkreme nur vereinfacht abgebildet werden. Für die tschechische Projektregion ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass Jungrinder und Kälber in der zugrunde liegenden Statistik nicht separat ausgewiesen sind und daher bei den Rindern keine weitere Differenzierung vorgenommen werden konnte. Zudem stellen die angesetzten Methanerträge vereinfachte Durchschnittswerte dar und können betriebs- und regionsspezifische Unterschiede nur eingeschränkt erfassen. Die Ergebnisse ermöglichen damit vor allem eine Einordnung der Größenordnungen, sind jedoch nicht als exakt bestimmbar oder kurzfristig vollständig mobilisierbare Potenziale zu verstehen.

6.4.2 Wasserstoffpotenzial aus Bioabfällen und Grüngut

Nach § 3 Abs. 7 KrWG umfassen Bioabfälle biologisch abbaubare organische Materialien pflanzlichen, tierischen oder pilzlichen Ursprungs (u. a. Küchen- und Nahrungsabfälle sowie Garten- und Parkabfälle) [113]. In der vorliegenden Untersuchung werden für die Projektregion biogene Abfallströme aus getrennt erfassten Bioabfällen, dem organischen Anteil im Restmüll sowie Grüngut betrachtet.

Für die tschechische Projektregion erfolgt die Abgrenzung der entsprechenden Stoffströme über den regionalen Abfallwirtschaftsplan (Plan odpadového hospodářství, POH) [116] und die dort ausgewiesenen Abfallkatalogcodes des Europäischen Abfallverzeichnisses (European Waste Catalogue, EWC) [117]. Aufgrund der unterschiedlichen statistischen Erfassungssysteme unterscheiden sich die betrachteten Fraktionen zwischen der bayerischen und der tschechischen Projektregion teilweise. Die detaillierte methodische Herleitung ist im Anhang dokumentiert.

Für die bayerische Projektregion basiert die Potenzialermittlung auf den Daten der Abfallbilanz Bayern [118] für den Betrachtungszeitraum 2016 bis 2023. Berücksichtigt werden Abfälle aus der Biotonne, der organische Anteil im Hausmüll sowie Grüngut. Die Berechnung des Wasserstoffpotenzials erfolgt unter der Annahme, dass die erfassten organischen Abfallströme in Biogasanlagen verwertet und das entstehende Biogas anschließend durch Dampfreformierung in Wasserstoff umgewandelt wird.

Bei den Abfällen aus der Biotonne wird die getrennt gesammelte organische Fraktion des Hausmülls berücksichtigt. Gewerbliche Bioabfälle wurden im Rahmen der Berechnung weitgehend ausgeschlossen, da entsprechende Mengen häufig privatwirtschaftlich entsorgt werden und daher nicht vollständig in kommunalen Abfallstatistiken enthalten sind. Für den organischen Anteil im Hausmüll wird auf siedlungsstrukturell zugeordnete Organikanteile zurückgegriffen, da diese Fraktion nicht direkt als getrennt erfasste Menge vorliegt. Die Grüngutfraktion umfasst organische Materialien aus privaten Haushalten, der öffentlichen Grünflächenpflege sowie aus gewerblichen Quellen, soweit diese in der Abfallbilanz erfasst sind.

Für die tschechische Projektregion Karlovarský kraj basiert die Datengrundlage auf dem regionalen Abfallwirtschaftsplan. Im Gegensatz zur bayerischen Projektregion werden die biologisch abbaubaren Abfallströme dort über Abfallkatalogcodes des Europäischen Abfallverzeichnisses ausgewiesen. Eine Aufschlüsselung der Mengen nach Verursacherguppen, z. B. Haushalte oder Gewerbe, ist in dieser Darstellung nicht enthalten. Berücksichtigt werden Küchen- und Kantinenabfälle, der organische Anteil im gemischten kommunalen Restmüll sowie Garten- und Parkabfälle als Grüngut-Äquivalent.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich aus Abfällen aus der Biotonne ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **300 t/a**. Der organische Anteil im Hausmüll weist ebenfalls ein theoretisches Potenzial von rund **300 t/a** auf. Den größten Beitrag innerhalb dieser Stoffgruppe liefert Grüngut mit rund **1.000 t/a**. Insgesamt ergibt sich damit für die bayerische Projektregion ein theoretisches Wasserstoffpotenzial aus Bioabfällen und Grüngut von rund **1.600 t/a**.

Für die tschechische Projektregion ergibt sich aus den betrachteten organischen Abfällen und Grüngut ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **500 t/a**. Dabei entfällt der größte Anteil auf den organischen Anteil im gemischten kommunalen Restmüll sowie auf Garten- und Parkabfälle. Küchen- und Kantinenabfälle leisten demgegenüber nur einen geringen Beitrag.

Die ausgewiesenen Potenziale aus Bioabfällen und Grüngut sind insgesamt als theoretische Orientierungswerte zu verstehen. Zwar basiert die Berechnung in der bayerischen Projektregion auf statistisch erfassten kommunalen Abfallmengen, jedoch bestehen insbesondere bei gewerblichen Bioabfällen und Grüngut Unsicherheiten, da entsprechende Stoffströme teilweise privatwirtschaftlich erfasst und daher nicht vollständig in kommunalen Abfallstatistiken abgebildet werden. Für den organischen Anteil im Hausmüll erfolgt die Potenzialermittlung zudem nicht über direkt ausgewiesene Mengen, sondern über siedlungsstrukturell zugeordnete Organikanteile, wodurch zusätzliche Unsicherheiten entstehen. In der tschechischen Projektregion beruht die Herleitung auf EWC-basierten Stoffströmen, die den in Bayern verwendeten Fraktionen nur näherungsweise entsprechen. Dies betrifft insbesondere Küchen- und Kantinenabfälle, den organischen Anteil im Siedlungsabfall sowie das als Sammelkategorie erfasste Grüngut. Die Ergebnisse beider Projektregionen sind daher nur eingeschränkt direkt vergleichbar und vor dem Hintergrund der jeweiligen Datengrundlagen und Abgrenzungen zu interpretieren.

6.4.3 Wasserstoffpotenzial aus Resthölzern

Im Folgenden wird das theoretische Potenzial der Wasserstofferzeugung aus holzartigen Reststofffraktionen untersucht. Neben Altholz werden forstwirtschaftliche Resthölzer und Industrierestholz betrachtet. Die energetische Verwertung dieser Stoffströme wird vereinfachend über eine thermochemische Holzvergasung mit nachgeschalteter Wassergas-Shift-Reaktion und Wasserstoffabtrennung abgebildet. Die detaillierten Berechnungsschritte, Eingangswerte und regionalen Herleitungen sind im Anhang dokumentiert.

Unter Altholz werden nach § 2 Altholzverordnung Holzabfälle verstanden, die als Industrierestholz oder als Gebrauchtholz anfallen [128]. Obwohl Altholz nach dieser Definition dem Industrierestholz zugeordnet werden kann, erfolgt aufgrund der eigenständigen statistischen Erfassung eine separate Betrachtung dieser Stoffströme. Für die bayerische Projektregion basiert die Potenzialermittlung überwiegend auf den Abfallbilanzen der Jahre 2016 bis 2023. Für die tschechische Projektregion wird das Altholzpotezial über den Abfallkatalogcode EWC 20 01 38 abgebildet, der am ehesten das statistische Äquivalent zur bayerischen Fraktion „Altholz“ darstellt.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich aus Altholz ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **500 t/a**. Für den Karlovarský kraj liegt das entsprechende Potenzial bei rund **40 t/a**. Die Potenzialermittlung für Altholz basiert in der bayerischen Projektregion überwiegend auf statistisch erfassten Abfallmengen, weist jedoch für einzelne Teilregionen Unsicherheiten infolge fehlender bzw. nicht separat ausgewiesener Altholzdaten auf. Darüber hinaus wurde ein potenzieller Holzanteil im Sperrmüll bewusst nicht bilanziert, um Doppelzählungen infolge nicht eindeutig zuordenbarer nachgelagerter Verwertungsströme zu vermeiden. Die ausgewiesenen Wasserstoffpotenziale aus Altholz sind daher insgesamt als konservative Untergrenze zu interpretieren.

Für forstwirtschaftliche Resthölzer werden in der bayerischen Projektregion Waldrestholz und Durchforstungsholz berücksichtigt. Waldrestholz bezeichnet jene Holzanteile, die nach der Holzernte im Bestand verbleiben und üblicherweise energetisch verwertet werden. Durchforstungsholz entsteht im Rahmen geplanter waldbaulicher Pflegemaßnahmen und umfasst insbesondere Schwachholz, das in der Sägeindustrie häufig nicht verwertbar ist. Da für die bayerische Projektregion keine landkreisscharfen Holzeinschlagsdaten vorliegen, wird das Potenzial flächenbasiert über spezifische Aufkommenskennwerte abgeschätzt. Dabei wird ein konservativer Ansatz gewählt, der das Restholzpotenzial ausschließlich aus Staats- und Körperschaftswaldflächen ableitet.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich aus forstwirtschaftlichen Resthölzern ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **4.100 t/a**. Für die tschechische Projektregion wird das Potenzial forstwirtschaftlicher Resthölzer einschlagsbasiert über regionale

Holzeinschlagsdaten abgeschätzt. Daraus ergibt sich für den Karlovarský kraj ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **3.300 t/a**. Die Potenzialermittlung ist aufgrund unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten und methodischer Herleitungen in beiden Projektregionen nur eingeschränkt direkt vergleichbar. Zusätzlich wurde in beiden Regionen bewusst nur Staats- und Körperschaftswald berücksichtigt, um Unsicherheiten hinsichtlich der Mobilisierbarkeit von Restholzpotenzialen aus kleinteilig strukturiertem Privatwald zu reduzieren. Dies führt zugleich zu einer eher defensiven Abschätzung des verfügbaren Potenzials. Insbesondere in Bayern bilden die verwendeten flächenbezogenen Kennwerte standort-, baumart- und bewirtschaftungsabhängige Unterschiede nur vereinfacht ab.

Industrierestholz umfasst Reststoffe, die bei der stofflichen Nutzung von Holz in der holzbe- und -verarbeitenden Industrie anfallen. Hierzu zählen insbesondere Nebenprodukte aus Sägewerken sowie aus der Holzwerkstoff-, Zellstoff-/Papier- und Möbelindustrie, darunter Sägespäne, Sägemehl, Holzhackschnitzel, Rinde oder Schwarzlauge, die energetisch genutzt werden können. In der Abfallstatistik wird Industrierestholz nicht gesondert ausgewiesen, da die Entsorgung und Verwertung überwiegend privatwirtschaftlich erfolgen.

Für die bayerische Projektregion erfolgt die Regionalisierung des bayernweiten Potenzials über die Beschäftigtenanteile im Cluster Forst und Holz. Für die tschechische Projektregion wird das Potenzial aus Industrierestholz über Sägenebenprodukte abgeschätzt, da keine konsistenten, öffentlich zugänglichen Mengenstatistiken zum gesamten Industrierestholzaufkommen vorliegen.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich aus Industrierestholz ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **2.800 t/a**. Für den Karlovarský kraj ergibt sich aus Sägewerksnebenprodukten ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **1.200 t/a**. Die Potenzialermittlung für Industrierestholz ist in beiden Projektregionen mit höheren Unsicherheiten behaftet als die für Altholz oder forstwirtschaftliche Resthölzer, da keine unmittelbar vergleichbaren regionalen Mengenstatistiken für das gesamte Industrierestholzaufkommen vorliegen. Beschäftigtenzahlen sind dabei nicht unmittelbar proportional zu anfallenden Restholzmengen; zudem werden für die tschechische Projektregion lediglich Sägenebenprodukte als statistisch erfassbarer Teilstrom berücksichtigt. Die ausgewiesenen Potenziale sind daher vor dem

Hintergrund der verwendeten Annahmen und Datengrundlagen als näherungsweise Abschätzung einzuordnen.

Insgesamt ergibt sich für die bayerische Projektregion auf Basis der ungerundeten Teilwerte aus den betrachteten Restholzfraktionen ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **7.300 t/a**. Für den Karlovarský kraj liegt das entsprechende Potenzial bei rund **4.500 t/a**. Resthölzer stellen damit innerhalb der betrachteten biogenen Reststoffströme einen besonders relevanten Potenzialblock dar. Gleichzeitig sind die Ergebnisse aufgrund bestehender stofflicher und energetischer Verwertungswege, unterschiedlicher Datenverfügbarkeiten, methodischer Annahmen und eingeschränkter Mobilisierbarkeit nicht als unmittelbar vollständig erschließbare Produktionsmengen zu verstehen.

6.4.4 Wasserstoffpotenzial aus Klärschlamm

Die Eigenschaften von Klärschlamm variieren in Abhängigkeit von Herkunft und Anlagenbetrieb (u. a. Trockensubstanzgehalt/Wasseranteil sowie Asche- und organischer Anteil). Eine rein stoffdatenbasierte Potenzialabschätzung würde daher eine substanzspezifische Parametrisierung erfordern. Im Folgenden wird das Wasserstoffpotenzial aus Klärschlamm technologiespezifisch auf Basis der technischen Kenndaten einer Referenzanlage [150] mit hydrothermaler Vorbehandlung, nachgeschalteter Vergasung sowie H₂-Aufbereitung abgeschätzt. Die Anlage ist für verschiedene organische Reststoffe (u. a. kommunaler Klärschlamm) ausgelegt. Die angegebenen Kennwerte sind konfigurationsabhängige Richtwerte.

Als Datengrundlage dienen für die bayerische Projektregion Klärschlamm-mengen aus den Abfallbilanzen und für die tschechische Projektregion das Statistische Jahrbuch der Karlsbader Region [109], [110]. Beide Datensätze werden auf TS-Basis (100 % TS) herangezogen. Die Herleitung der angesetzten Referenzkennwerte und der regionalen Potenziale ist im Anhang dokumentiert.

Für die bayerische Projektregion ergibt sich aus Klärschlamm ein theoretisches Wasserstoffpotenzial von rund **800 t/a**, für die tschechische Projektregion rund **300 t/a**.

Die ausgewiesenen Potenziale aus Klärschlamm sind als technologiespezifische Orientierungswerte zu verstehen. Die Berechnung basiert nicht auf einer detaillierten stofflichen

Charakterisierung des regional anfallenden Klärschlamm, sondern auf den technischen Richtwerten einer Referenzanlage. Werden dem Klärschlamm zusätzlich holzartige Reststoffe beigemischt, können diese Mengen nicht mehr vollständig den separat bilanzierten Restholzpotenzialen zugerechnet werden und mindern diese entsprechend. Die Ergebnisse sind daher in erster Linie als anlagenspezifische Abschätzung des Wasserstoffpotenzials aus Klärschlamm zu verstehen.

6.4.5 Einordnung der Potenziale im Kontext bestehender Verwertungsstrukturen

Die berechneten Wasserstoffpotenziale aus biogenen Quellen beschreiben zunächst theoretische Größenordnungen auf Basis der jeweils angesetzten Reststoffaufkommen und Konversionsannahmen. Daraus kann jedoch nicht unmittelbar auf ein in gleicher Höhe praktisch mobilisierbares Potenzial geschlossen werden. Zu berücksichtigen ist, dass ein erheblicher Teil der betrachteten biogenen Reststoffe bereits heute bestehenden Verwertungswegen zugeführt wird. Dies betrifft insbesondere Bioabfälle und Grüngut, die bereits kompostiert oder vergoren werden, Klärschlamm, der überwiegend thermisch verwertet wird, sowie holzartige Reststoffe, die teilweise bereits stofflich oder energetisch genutzt werden. Eine wasserstofforientierte Nutzung dieser Stoffströme würde daher vielfach nicht auf einer zusätzlichen Bereitstellung von Reststoffen beruhen, sondern auf einer Umwidmung bzw. Reallokation bereits genutzter Stoffströme. Die tatsächliche Erschließbarkeit der ausgewiesenen Potenziale hängt folglich nicht allein vom Mengenaufkommen ab, sondern auch von bestehenden Nutzungskonkurrenzen, regionalen Erfassungs- und Logistikstrukturen, technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen, rechtlichen und regulatorischen Vorgaben sowie von den jeweiligen reststoffspezifischen Eigenschaften.

6.5 Zusammenfassung Wasserstoffpotenziale

Kapitel 6 des Regionalkonzepts untersucht umfassend das Wasserstoffpotenzial der HyB-aBo-Region und beschreibt die gesamte Wasserstoffwertschöpfungskette von der Erzeugung über Transport und Speicherung bis hin zur Nutzung in Industrie, Mobilität und Wärmeversorgung. Die Analyse stützt sich auf technische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie auf eine detaillierte Datenerhebung bei Unternehmen der Region. Dabei zeigt sich, dass Wasserstoff insbesondere dort eine Schlüsselrolle spielen kann, wo

andere Dekarbonisierungsoptionen wie Elektrifizierung an Grenzen stoßen – etwa in Hochtemperaturprozessen in Glas-, Keramik- und Metallindustrie oder im Schwerlastverkehr.

Für die Wasserstoffherzeugung werden verschiedene technologische Wege betrachtet. Ein Schwerpunkt liegt auf der PEM-Elektrolyse, die aufgrund ihrer hohen Flexibilität und Eignung für erneuerbare Energien besonders relevant ist. Der bestehende 8,75-MW-Elektrolyseur in Wunsiedel kann auf 17,5 MW erweitert werden und bildet damit einen wichtigen Ausgangspunkt für eine regionale Produktion. Darüber hinaus werden weitere potenzielle Standorte auf bayerischer und tschechischer Seite identifiziert, etwa in Hof, im Landkreis Neustadt an der Waldnaab, entlang der Autobahn A6 sowie in Ostrov oder im Raum Sokolov. Ergänzend untersucht das Kapitel die Potenziale biogener Reststoffe, darunter landwirtschaftliche Abfälle, Bioabfälle und Grüngut. Diese Stoffströme könnten in der Region mehrere Tausend Tonnen Wasserstoff pro Jahr bereitstellen und somit eine wichtige Ergänzung zur strombasierten Wasserstoffproduktion sein. In Summe ergibt sich ein beachtliches theoretisches Potenzial, das jedoch nur anteilig (max. 5 %) realistisch nutzbar sein wird.

Beim Transport und der Speicherung von Wasserstoff wird deutlich, dass die Region künftig in das entstehende Wasserstoffkernnetz (deutschlandweit rund 9.040 Kilometer) bzw. den European Hydrogen Backbone eingebunden wird. Das Kernnetz in Deutschland entsteht teilweise durch die Umstellung bestehender Erdgasleitungen und soll bis 2032 voll ausgebaut sein. Von besonderer Bedeutung sind die bayerische Anbindungsleitungen H2-BAL und H2ercules, die direkt durch die Projektregion verlaufen und sowohl Erzeuger als auch industrielle Abnehmer erschließen werden. Zudem wird auf tschechischer Seite der Czech-German Hydrogen Interconnector geplant, der das dortige Netz mit dem deutschen Kernnetz verbindet und damit den grenzüberschreitenden Wasserstofftransport erleichtert. Bis zur Fertigstellung der Leitungsinfrastruktur bleibt der Straßentransport per Trailer ein notwendiger Zwischenschritt.

Die regionale Nutzung von Wasserstoff konzentriert sich vor allem auf energieintensive Industrien, in denen hohe Prozesswärme benötigt wird und eine Elektrifizierung technisch oder wirtschaftlich kaum möglich ist. Zusätzlich wird Wasserstoff im Verkehrssektor betrachtet, insbesondere im Schwerlastverkehr, wo batterieelektrische Lösungen nur begrenzte

Reichweiten ermöglichen. Auch eine zukünftige Einbindung in Wärmenetze oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen wird diskutiert, wobei der Einsatz im Niedertemperaturbereich perspektivisch nur eine ergänzende Rolle spielen dürfte. Die Befragung von Unternehmen zeigt einen klaren Bedarf an Planungssicherheit und an einer abgestimmten regionalen Infrastrukturentwicklung.

Zur Abschätzung der künftigen Wasserstoffnachfrage werden drei Szenarien bis 2050 entwickelt. Im ambitionierten Szenario wächst der Wasserstoffeinsatz sehr schnell und stark, insbesondere durch weitgehende Transformation energieintensiver Industrien und einen tiefgreifenden Umbau des Verkehrssektors. Das Mittelweg-Szenario geht von einer moderateren Entwicklung aus und berücksichtigt teilweise elektrifizierbare Prozesse, wodurch der Wasserstoffbedarf geringer ausfällt. Das konservative Szenario schließlich unterstellt eine deutlich langsamere Transformation und eine stärkere Dominanz der Elektrifizierung, sodass Wasserstoff nur in Nischenanwendungen genutzt wird. Die Bandbreite reicht von rund 2.700 Tonnen Wasserstoff jährlich im konservativen Szenario bis rund 40.000 Tonnen im ambitionierten Szenario. Nach aktuellem Stand liegt der Hochlauf zwischen dem konservativen und Mittelweg-Szenario. Vergleicht man diese Bedarfe mit den regionalen Erzeugungspotenzialen, wird klar, dass die Region ohne zusätzliche Importe nicht auskommen wird. Selbst bei maximalem Ausbau der Elektrolysekapazitäten, die bis 2050 auf rund 57,5 MW anwachsen könnten und im Einklang mit den strengen europäischen Kriterien zur Erzeugung von kohlenstoffarmen und RFNBO-Wasserstoff stehen müssen, lässt sich der Bedarf weder im Mittelweg- noch im ambitionierten Szenario vollständig decken. Der Import über das Wasserstoffkernnetz wird daher ein zentraler Bestandteil der Versorgung. Gleichzeitig können lokale Erzeugungsanlagen – insbesondere solche, die erneuerbaren Strom oder biogene Reststoffe nutzen – wichtige Bausteine für Resilienz, regionale Wertschöpfung und frühe Marktentwicklung sein.

Auch die wirtschaftliche Betrachtung nimmt im Kapitel einen bedeutenden Raum ein. Beispielrechnungen für 5-MW- und 10-MW-Elektrolyseure zeigen Investitionskosten zwischen 22 und 43 Millionen Euro. Die daraus abgeleiteten Wasserstoffgestehungskosten liegen etwa bei 11,00 bis 11,30 € pro Kilogramm. Durch Erlöse aus der Vermarktung von Abwärme

und Treibhausgasminderungsquoten können diese Kosten jedoch deutlich reduziert werden. Das Kapitel zeigt, dass Wirtschaftlichkeit stark von Förderkulissen, Strompreisen und Auslastung abhängt und dass ein koordiniertes Vorgehen entscheidend ist.

Insgesamt kommt das Kapitel zu dem Ergebnis, dass die HyBaBo-Region gute Voraussetzungen besitzt, um eine bedeutende Rolle im zukünftigen Wasserstoffsystem einzunehmen. Allerdings wird der regionale Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft nur gelingen, wenn Erzeugung, Infrastruktur und Nachfrage gemeinsam wachsen und durch politische, rechtliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen unterstützt werden. Eine vollständige Selbstversorgung ist nicht erreichbar, doch eine Mischung aus lokaler Produktion und überregionalen Importen ermöglicht einen stabilen und langfristig tragfähigen Transformationspfad. Für die strategische Einordnung und die nachfolgenden Handlungsempfehlungen wird im Folgenden das Mittelweg-Szenario als Annahme verwendet, da es die absehbaren Infrastruktur- und Importbedarfe der Region am besten abbildet.

7 Abschluss und Ausblick

7.1 Fazit

Die Ergebnisse des Regionalkonzepts zeigen, dass die HyBaBo-Projektregion nicht als autarke Wasserstoffregion verstanden werden sollte. Vielmehr sollte sie sich als grenzüberschreitender Anwendungs-, Verteil- und Innovationsraum positionieren, in dem regionale Erzeugung, überregionale Netzanbindung und eine abgestimmte Nachfrageentwicklung miteinander verbunden werden. Ausgehend vom Mittelweg-Szenario liegt der Wasserstoffbedarf bei rund 2.700 t pro Jahr ab 2030, 8.400 t/a ab 2040 und 14.100 t/a ab 2050. Selbst unter Einbeziehung regionaler Elektrolysekapazitäten und eines begrenzt nutzbaren Anteils biogener Reststoffe verbleibt dabei ein deutliches Versorgungsdefizit. Die Projektregion kann ihren Bedarf damit nur teilweise selbst decken und bleibt auch langfristig auf zusätzliche Importe angewiesen. Daraus ergibt sich zugleich das zentrale Henne-Ei-Problem des Wasserstoffhochlaufs: Potenzielle Abnehmer zögern ohne gesicherte Versorgung, während Erzeuger und Infrastrukturbetreiber ohne belastbare Nachfrage keine Investitionssicherheit haben.

Die künftige Anbindung an das Wasserstoffkernnetz wird die Region langfristig deutlich aufwerten. Bis zur vollständigen Verfügbarkeit der relevanten Leitungsabschnitte bleibt jedoch der Transport per Trailer ein notwendiger Zwischenschritt. Gleichzeitig stellt auch die Kostenstruktur des künftigen Netzbezugs eine Herausforderung dar. Das festgelegte Hochlaufentgelt von 25 €/kWh/h/a (vgl. [151]) kann insbesondere für industrielle Verbraucher zu einem relevanten Kostenblock werden und die Wettbewerbsfähigkeit wasserstoffbasierter Anwendungen beeinflussen.

Auch auf der Erzeugungsseite bestehen wesentliche Unsicherheiten. Der Ausbau erneuerbarer Energien verläuft in den bayerischen Teilräumen nicht überall mit der gleichen Dynamik. Insbesondere beim Windkraftausbau wirken Flächenverfügbarkeit, Genehmigungsdauer und regionale Restriktionen bremsend. Ohne zusätzlichen erneuerbaren Strom lässt sich der geplante Elektrolyse-Hochlauf jedoch nur eingeschränkt realisieren. Hinzu kommt, dass die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren stark von der

Strompreisentwicklung abhängt. Zwar bestehen regulatorische und energiewirtschaftliche Entlastungen, dennoch können hohe Börsenstrompreise die Erzeugungskosten deutlich erhöhen. Darüber hinaus erfordert auch die Nutzung der Nebenprodukte Abwärme und Sauerstoff zusätzliche Investitionen in Wärmeinfrastruktur, Speicher sowie sichere technische Einbindung.

Auf der Nachfrageseite ist der zukünftige Bedarf weiterhin mit Unsicherheiten behaftet. Relevante Unternehmen prüfen derzeit noch, ob sie auf Wasserstoff setzen oder andere Dekarbonisierungspfade, insbesondere Elektrifizierung, verfolgen. Dadurch bleibt offen, wie schnell und in welchem Umfang sich ein stabiler regionaler Absatzmarkt entwickelt. Besonders relevant ist dabei die Rolle möglicher Ankerkunden, da ihr Einstieg maßgeblich zur Auslastung von Erzeugungs- und Verteilinfrastruktur beiträgt. Fallen solche Abnehmer weg oder verschieben sich Investitionen, wirkt sich dies unmittelbar auf die regionale Hochlaufdynamik aus.

Hinzu kommen wirtschaftliche Hemmnisse auf Seiten der Erzeuger und Anwender. Die im Konzept ausgewiesenen Wasserstoffgestehungskosten liegen derzeit bei rund 11 €/kg und damit deutlich über fossilen Alternativen. Zwar können THG-Quoten und die Vermarktung von Abwärme entlastend wirken, beide Größen sind jedoch schwankend und nur begrenzt planbar. Gleichzeitig entstehen auf Abnehmerseite zusätzliche Investitionskosten, etwa für die Umrüstung von Industrieöfen, Brennern oder Gasversorgungsleitungen. Ohne verlässliche Förderbedingungen bleiben viele dieser Investitionen wirtschaftlich schwer darstellbar.

Des Weiteren sind unterschiedliche regulatorische und strukturelle Ausgangsbedingungen in Bayern und der Region Karlsbad vorhanden. Während Deutschland den Fokus stark auf erneuerbaren Wasserstoff legt, bestehen in Tschechien andere Voraussetzungen bei Strommix, Wärmeinfrastruktur und möglichen Pfaden zur Erzeugung kohlenstoffarmen Wasserstoffs. Diese Unterschiede erschweren die Harmonisierung grenzüberschreitender Konzepte und erhöhen den Abstimmungsbedarf bei Infrastruktur, Förderung und Wasserstoffqualitäten.

Insgesamt zeigt das Konzept, dass die Region über gute Voraussetzungen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft verfügt, der Hochlauf jedoch an technische, wirtschaftliche und regulatorische Bedingungen geknüpft bleibt. Erfolgreich kann die Transformation nur dann sein, wenn regionale Erzeugung, Importanbindung, verlässliche Abnahme, geeignete Förderstrukturen und eine koordinierte grenzüberschreitende Entwicklung zusammengeführt werden.

7.2 Handlungsempfehlungen

Auf Basis der dargestellten Ergebnisse und Potenziale werden Handlungsempfehlungen für die Projektregion definiert und dabei ebenfalls die Rolle der Region in den Jahren 2030, 2040 und 2050 dargestellt.

Bis zum Jahr 2030 sollte die HyBaBo-Projektregion die Funktion eines grenzüberschreitenden Startclusters einnehmen. In dieser Phase steht nicht die flächige Versorgung im Vordergrund, sondern der gezielte Aufbau erster tragfähiger Wertschöpfungsketten. Vorrangig sollten bestehende und kurzfristig realisierbare Standorte sowie konkrete Abnehmerbeziehungen entwickelt werden. Dazu zählen insbesondere die Erweiterung des Elektrolyseurs in Wunsiedel, die Entwicklung weiterer dezentraler Erzeugungsansätze in den identifizierten Potenzialräumen sowie der Aufbau einer belastbaren Trailerlogistik bis zum Anschluss an die leitungsgebundene Infrastruktur. Parallel dazu sollte die Region gezielt Abnehmerstrukturen schaffen, damit mit Inbetriebnahme der übergeordneten Netzanbindungen bereits eine belastbare Nachfrage vorhanden ist.

Bis zum Jahr 2040 sollte sich die Projektregion von einem Startcluster zu einem grenzüberschreitenden Industrie- und Logistikkorridor weiterentwickeln. In dieser Phase gewinnt die Verbindung zwischen regionaler Erzeugung, industriellen Ankerkunden und überregionalem Wasserstofftransport deutlich an Bedeutung. Der Aufbau weiterer Elektrolysekapazitäten sollte deshalb nicht flächendeckend, sondern clusterorientiert erfolgen. Besonders geeignet erscheinen dafür die bereits identifizierten Potenzialräume im Norden der Stadt Hof, in Wunsiedel, im Raum Mantel/Weiherhammer, entlang der Autobahn

A6 sowie auf tschechischer Seite im Raum Kraslice/Sokolov und Ostrov. Entscheidend ist, dass jede infrastrukturelle Erweiterung an konkrete Abnahmeoptionen, Standortvorteile und grenzüberschreitende Kooperationsstrukturen gekoppelt wird.

Bis zum Jahr 2050 sollte die Projektregion die Funktion eines regionalen Verteil- und Resilienzknötens im übergeordneten Wasserstoffsystem einnehmen. Die Hauptaufgabe liegt dann nicht in der vollständigen Eigenversorgung, sondern in der sicheren und flexiblen Versorgung grenzüberschreitender Industrie- und Mobilitätsanwendungen. Regionale Elektrolyseure, biogene Reststoffnutzung und leitungsgebundene Importe ergänzen sich dabei zu einem Gesamtsystem. Lokale Erzeugung erhöht die Resilienz, eröffnet regionale Wertschöpfung und stabilisiert frühe Marktsegmente. Die mengenmäßige Versorgung wird jedoch auch langfristig in erheblichem Umfang auf zusätzliche Importe angewiesen bleiben.

Die prioritären Anwendungsfelder für Wasserstoff sollten in der Projektregion dort liegen, wo eine direkte Elektrifizierung technisch oder wirtschaftlich nur eingeschränkt möglich ist. Dies betrifft insbesondere industrielle Hochtemperaturprozesse, Wasserstoff als Prozessgas bzw. Substitution bestehender grauer Wasserstoffnutzungen sowie ausgewählte Mobilitätsanwendungen mit hohen Reichweiten- und Leistungsanforderungen. Für das Mittelweg-Szenario ergeben sich hier vor allem industrielle Anwendungen im Hochtemperaturbereich sowie ein selektiver Einsatz im Schwerlastverkehr und teilweise im öffentlichen Verkehr. Dagegen sollte der Einsatz von Wasserstoff in Niedertemperaturprozessen und in der breiten Gebäudewärme nicht als prioritäres Ziel verfolgt werden. Auch ein großflächiger Einsatz in der Kraft-Wärme-Kopplung erscheint im Mittelweg-Szenario nicht als vorrangiger Entwicklungspfad.

Die regionale Erzeugung sollte konsequent ausgebaut werden, jedoch nicht mit dem Anspruch einer vollständigen Versorgung der Gesamtregion. Vielmehr sollte sie als strategische Ergänzung zu Importen verstanden werden. Ein Schwerpunkt liegt auf der strombasierten Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse, da hierfür in der Region erste Standorte, erneuerbare Erzeugungspotenziale und Abnehmerstrukturen vorhanden sind. Ergänzend dazu können biogene Reststoffe einen wichtigen Beitrag leisten, insbesondere dort, wo regionale Stoffströme sinnvoll genutzt und bestehende Infrastrukturen eingebunden

werden können. Aufgrund der begrenzten realistisch nutzbaren Potenziale sollte dieser Pfad jedoch vor allem als Ergänzung für Resilienz, regionale Wertschöpfung und einzelne Anwendungscluster verstanden werden, nicht als mengenmäßiges Rückgrat der Vollversorgung.

Da die Projektregion auch im Mittelweg-Szenario dauerhaft auf zusätzliche Wasserstoffmengen von außerhalb angewiesen bleibt, muss die Importabhängigkeit frühzeitig als planerische Grundannahme berücksichtigt werden. Der Anschluss an das künftige Wasserstoffkernnetz sowie an grenzüberschreitende Transportkorridore ist daher von zentraler Bedeutung für die langfristige Versorgungssicherheit. Bis zur Verfügbarkeit der Leitungsinfrastruktur bleibt der Transport per Trailer ein notwendiger Zwischenschritt. Daraus folgt, dass schon heute Beschaffungsstrategien, logistische Zwischenlösungen, Speicheroptionen und konkrete Abnahmevereinbarungen mit potenziellen Ankerkunden entwickelt werden sollten. Eine funktionierende Wasserstoffwirtschaft entsteht nur dann, wenn Erzeugung, Import, Infrastruktur und Nachfrage synchron geplant werden.

Für die praktische Umsetzung des Wasserstoffhochlaufs sollte die Region konsequent auf Clusterstrukturen setzen. Einzelne Erzeugungs- oder Tankstellenprojekte entfalten ihre Wirkung nur dann, wenn sie räumlich und funktional mit Abnehmern, Logistik, Energieversorgung und Forschungseinrichtungen verknüpft sind. Die HyBaBo-Projektregion besitzt hierfür gute Voraussetzungen, da sowohl auf bayerischer als auch auf tschechischer Seite geeignete Potenzialräume identifiziert wurden. Daraus ergibt sich die Empfehlung, zunächst wenige, aber belastbare Cluster mit klaren Ankerkunden aufzubauen, statt viele isolierte Einzelvorhaben parallel zu verfolgen. Ein solcher Clusteransatz erhöht die Wirtschaftlichkeit, schafft Planungssicherheit und stärkt die grenzüberschreitende Sichtbarkeit der Region als gemeinsamer Wasserstoffraum.

Die besondere Stärke der Projektregion liegt zudem in ihrer grenzüberschreitenden Struktur. Daraus ergibt sich zugleich die Notwendigkeit einer dauerhaften Koordination zwischen bayerischen und tschechischen Akteuren. Unterschiedliche regulatorische Rahmenbedingungen, verschiedene Förderkulissen und abweichende Anforderungen an Wasserstoffqualitäten erfordern eine enge Abstimmung. Sinnvoll ist daher der Aufbau einer

dauerhaften Koordinierungs- und Projektstruktur, in der Kommunen, Wirtschaft, Netzbetreiber, Forschungseinrichtungen und Multiplikatoren gemeinsam an Projektentwicklung, Datenpflege, Fördermonitoring und Standortvermarktung arbeiten. Nur wenn diese Koordination institutionell abgesichert wird, kann die Region ihre grenzüberschreitenden Standortvorteile tatsächlich in konkrete Investitionen überführen.

Neben Infrastruktur und Erzeugung muss auch der Aufbau von Fachkräften als strategisches Handlungsfeld verstanden werden. Der Wasserstoffhochlauf wird nur gelingen, wenn Planung, Errichtung, Betrieb und Wartung der Anlagen durch ausreichend qualifiziertes Personal abgesichert werden können. Die bestehenden Hochschul-, Bildungs- und Transferstrukturen in Hof, Amberg-Weiden und der Region Karlsbad bieten hierfür eine tragfähige Ausgangsbasis. Diese sollte gezielt genutzt werden, um Weiterbildung, angewandte Forschung, Wissenstransfer und Nachwuchsförderung systematisch auszubauen. Der Fachkräfteaufbau ist damit nicht nur eine flankierende Maßnahme, sondern ein eigenständiger Bestandteil der regionalen Transformationsstrategie.

Zusammenfassend sollte die HyBaBo-Projektregion ihre Rolle im grenzüberschreitenden Wasserstoffsystem nicht als autarke Erzeugungsregion, sondern als koordiniert entwickelten Anwendungs-, Verteil- und Innovationsraum verstehen. Kurzfristig steht der Aufbau erster Cluster und Ankeranwendungen im Vordergrund, mittelfristig die Entwicklung zu einem grenzüberschreitenden Industrie- und Logistikkorridor und langfristig die Etablierung als resilienter Verteilknoten im übergeordneten Wasserstoffsystem. Die Kombination aus gezielter regionaler Erzeugung, klar priorisierten Einsatzfeldern, gesicherter Importanbindung, grenzüberschreitender Koordination und aktivem Fachkräfteaufbau bildet dafür den sinnvollsten Entwicklungspfad.

Anhang A.1 Zeitliche Abgrenzung und Auswertungsansatz der betrachteten Reststoffströme

Die hierfür verwendeten Referenzwerte (insbesondere Referenzjahre) und Annahmen werden in den jeweiligen stoffstrombezogenen Abschnitten ausgewiesen. Tabelle 2 fasst die in der Analyse verwendeten Datenzeiträume und Auswertungsansätze je Reststoffkategorie zusammen.

Tabelle 2: Zeitliche Abgrenzung und Auswertungsansatz der betrachteten Reststoffströme

Reststoffkategorie	Datenzeitraum Bayern	Datenzeitraum Tschechien	Auswertungs- ansatz
Landwirtschaft	2016 – 2023	2020 – 2023	Mehrjahresmittel
Bioabfall & Grüngut	2016 – 2023	2017 – 2021	Mehrjahresmittel
Klärschlamm	2016 – 2023	2020 – 2023	Mehrjahresmittel
Resthölzer	2016 – 2023 / Kennwerte	2017 – 2023 / Kennwerte	Mehrjahresmittel & Kennwerte

Soweit Mehrjahresmittel gebildet werden, erfolgt die Berechnung für jede Teilregion j wie folgt:

$$\bar{M}_j = \frac{1}{N} \sum_y M_{j,y} \quad (1)$$

Die Summe läuft über alle Jahre y des jeweiligen Datenzeitraums (vgl. Tabelle 2); N ist die Anzahl der berücksichtigten Jahre. Abweichende Auswertungsansätze, etwa auf Basis von Kennwerten oder einzeljahresbezogenen Datensätzen, werden in den jeweiligen stoffstrombezogenen Abschnitten erläutert.

Anhang A.2 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung landwirtschaftlicher Reststoffe

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise orientiert sich an der Methodik aus [72], wurde jedoch an die verfügbaren regionalen Daten der Projektregion angepasst und bezieht sich auf die in Tabelle 2 ausgewiesenen Zeiträume. Die einzelnen Berechnungsschritte werden nachfolgend erläutert.

Die Gesamtzahl $n_{i,ges}$ einer Tierart i errechnet sich für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums durch Aggregation der Bestände aus den einzelnen Teilregionen j gemäß Gleichung (2):

$$n_{i,ges} = \sum_j n_{i,j} \quad (2)$$

mit

$i \in \{\text{Rinder, Milchkühe, Jungrinder, Kälber, Schweine, Schafe, Hühner, Pferde}\}$
und

j als Index der jeweils betrachteten Teilregionen der bayerischen bzw. tschechischen Projektregion.

Das Mehrjahresmittel $\bar{n}_{i,ges}$ einer Tierart wird anschließend analog zu Gleichung (1) als arithmetisches Mittel über den jeweiligen Zeitraum gebildet und für die weitere Potenzialermittlung verwendet.

Für die tschechische Projektregion wird aufgrund der Datenlage keine separate Differenzierung von Jungrindern und Kälbern vorgenommen. Die entsprechende methodische Abgrenzung ist im Haupttext erläutert.

Zur Ermittlung des Energiepotenzials Q_i aus tierischen Reststoffen wird anschließend $\bar{n}_{i,ges}$ mit den aus Literatur- und Messdaten bekannten spezifischen jährlichen Methanerträgen V_{i,CH_4} [72], [111] sowie den physikalischen Eigenschaften von Methan multipliziert (vgl. Gleichung (3)).

$$Q_i = H_{u,CH_4} \cdot V_{i,CH_4} \cdot \rho_{CH_4} \cdot \bar{n}_{i,ges} \quad (3)$$

Dabei bezeichnet H_{u,CH_4} den Heizwert von Methan in kWh/kg, ρ_{CH_4} die Normdichte in kg/Nm³ und V_{i,CH_4} den spezifischen jährlichen Methanertrag der jeweiligen Tierart i in Nm³_{CH₄}/(Tier·a). Eine Ausnahme bilden Hühner, für die in der zugrunde gelegten Quelle der Methanertrag auf 100 Tierplätze pro Jahr bezogen ausgewiesen ist. Für die vorliegende Berechnung wurde dieser Wert auf ein Tier bzw. einen Tierplatz pro Jahr umgerechnet. Jungrinder und Kälber wurden mit einem Korrekturfaktor für Großvieheinheiten von 0,4 respektive 0,3 verrechnet [72], [112].

Abschließend werden die Energiepotenziale einer jeden Tiergattung i zu einem gesamten theoretischen Energiepotenzial der Landwirtschaft (LW) $Q_{pot,LW}$ summiert.

$$Q_{pot,LW} = \sum_i Q_i \quad (4)$$

Das daraus resultierende theoretische jährliche Wasserstoffproduktionspotenzial $m_{pot,H_2,LW}$ berechnet sich gemäß:

$$m_{pot,H_2,LW} = \frac{Q_{pot,LW} \cdot \eta_{BG,ref}}{H_{u,H_2}} \quad (5)$$

Dabei werden der in [72] angegebene Wirkungsgrad der Biogasreformierung mit $\eta_{BG,ref} = 0,60$ sowie der untere Heizwert von Wasserstoff mit $H_{u,H_2} = 33,33$ kWh/kg zugrunde gelegt.

Ergebnisse der Potenzialermittlung

In den Tabellen 3 und 4 sind die für die Berechnung verwendeten tierartspezifischen Methanerträge V_{i,CH_4} sowie die aggregierten mittleren Tierbestände $\bar{n}_{i,ges}$ für die bayerische bzw. tschechische Projektregion zusammengestellt.

Tabelle 3: Eingangsgrößen zur Potenzialberechnung - Tierbestände und Methanerträge - Projektregion Bayern

Tiergattung	Methanertrag je Tier V_{i,CH_4} $[Nm^3_{CH_4}/(Tier \cdot a)]$	Gesamtanzahl der Tiere $\bar{n}_{i,ges}$ [-]
Rinder	185	52.330
Milchkühe	289	73.411
Jungrinder	74	15.150
Kälber	55,5	34.575
Schweine	19	110.186
Schafe	81	6.210
Hühner	1,64	219.857
Pferde	388	3.104

Tabelle 4: Eingangsgrößen zur Potenzialberechnung - Tierbestände und Methanerträge - Karlovarský kraj

Tiergattung	Methanertrag je Tier V_{i,CH_4} $[Nm^3_{CH_4}/(Tier \cdot a)]$	Gesamtanzahl der Tiere $\bar{n}_{i,ges}$ [-]
Rinder	185	40.569
Milchkühe	289	2.455
Schweine	19	16.666
Schafe	81	11.422
Hühner	1,64	124.353
Pferde	388	1.264

Auf Basis der Gleichungen (3) bis (5) werden daraus die Energiepotenziale Q_i , die entsprechenden Wasserstoffenergiepotenziale Q_{i,H_2} sowie die daraus abgeleiteten Wasserstoffmassenpotenziale $m_{pot,H_2,i}$ bestimmt. Die Energiepotenziale ergeben sich zunächst in kWh/a und werden in den Tabellen 5 und 6 in GWh/a ausgewiesen. Die Wasserstoffmassenpotenziale werden unter Ansatz von $H_{u,H_2} = 33,33$ kWh/kg berechnet und in t/a dargestellt.

Tabelle 5: Abgeleitete Energie- und Wasserstoffpotenziale je Tierart – Projektregion Bayern

Tiergattung	Energiepotenzial Q_i [GWh/a]	H2-Energiepotenzial Q_{i,H_2} [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot},H_2,i}$ [t/a]
Rinder	97,00	58,20	1.746,26
Milchkühe	212,58	127,55	3.826,88
Jungrinder	11,23	6,74	202,23
Kälber	19,23	11,54	346,13
Schweine	20,98	12,59	377,63
Schafe	5,04	3,02	90,73
Hühner	3,61	2,17	65,04
Pferde	12,07	7,24	217,21
Summe	381,74	229,05	6.872,09

Tabelle 6: Abgeleitete Energie- und Wasserstoffpotenziale je Tierart – Karlovarský kraj

Tiergattung	Energiepotenzial Q_i [GWh/a]	H2-Energiepotenzial Q_{i,H_2} [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot},H_2,i}$ [t/a]
Rinder	75,20	45,12	1353,80
Milchkühe	7,11	4,27	127,98
Schweine	3,17	1,90	57,12
Schafe	9,27	5,56	166,88
Hühner	2,04	1,23	36,79
Pferde	4,91	2,95	88,46
Summe	101,71	61,03	1.831,02

Anhang A.3 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Bioabfällen und Grüngut

Methodik der bayerischen Projektregion

Die Ermittlung der Potenziale für die bayerischen Teilregionen basiert auf den Daten der Abfallbilanz Bayern [118] für den Betrachtungszeitraum 2016 bis 2023².

Die Abfallbilanz Bayern unterscheidet Bioabfälle gemäß § 3 Abs. 7 KrWG in kommunales Grüngut, Grüngut aus Haushalten und Abfälle aus der Biotonne [114]. Letzteres bezeichnet die getrennt gesammelte organische Fraktion des Hausmülls [115]. Für die bayerische Projektregion erfolgt die Potenzialermittlung auf Grundlage dieser in der Abfallbilanz ausgewiesenen Fraktionen.

a) Abfälle aus der Biotonne

Zur Analyse des theoretisch verfügbaren Wasserstoffpotenzials aus Bioabfällen wurde die Fraktion „Abfälle aus der Biotonne“ berücksichtigt. Grundlage der Berechnung bildet das Mehrjahresmittel dieser Abfallart für die jeweiligen Teilregionen.

Gewerbliche Bioabfälle, die in der Abfallstatistik gesondert aufgeführt sind, wurden im Rahmen der Berechnung weitgehend ausgeschlossen. Lediglich in den Jahren 2016-2018 sind für den Landkreis Neustadt a.d.W. geringe Mengen von 2-6 t/Jahr erfasst worden. Diese wurden zur Mittelwertbildung den Abfällen aus der Biotonne zugeordnet, da der Einfluss auf die Gesamtsummen vernachlässigbar ist. In sämtlichen anderen Regionen liegen für gewerbliche Abfälle aus der Biotonne keine Einträge vor.

Für kleinere Gewerbebetriebe bzw. Betriebe mit nur geringen Mengen organischer Abfälle ist die Nutzung einer Biotonne wie bei privaten Haushalten üblich. In diesen Fällen lassen sich

²Die PDF-Dateien wurden am 17.06.2025 über Direktlinks unter [abfallbilanz.bayern.de](https://www.abfallbilanz.bayern.de) (z. B. <https://www.abfallbilanz.bayern.de/doc/2022/KSDaten.pdf>; analog für die übrigen Jahre 2016–2023) abgerufen und lokal archiviert. Zum Zeitpunkt der Texterstellung sind die damaligen Direktlinks nicht mehr erreichbar (Weiterleitung auf die Startseite).

die Abfälle nicht eindeutig nach privater oder gewerblicher Herkunft differenzieren. Fallen größere Mengen an, wie etwa in Gastronomie- oder Lebensmittelbetrieben, erfolgt die Entsorgung in der Regel privatwirtschaftlich. Diese Mengen sind in kommunalen Abfallstatistiken häufig nicht enthalten.

Die Berechnung des Wasserstoffpotenzials erfolgt unter der Annahme, dass der erfasste Bioabfall in Biogasanlagen verwertet und das entstehende Biogas anschließend durch Dampfreformierung in Wasserstoff umgewandelt wird.

Zur Ermittlung des theoretischen Energiepotenzials Q_{pot} aus Bioabfällen werden die Mehrjahresmittel $\bar{M}_{\text{Bioabfall},j}$ mit den spezifischen Energiekennwerten von Methan verrechnet.

Der spezifische Gasertrag pro Tonne Bioabfall beträgt nach [119] $123 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{Input}}$. Anders als in Gleichung (3) muss hier das Methanvolumen aus dem Biogasertrag unter Berücksichtigung des Methangehalts x_{CH_4} bestimmt werden, sodass sich das Energiepotenzial einer Teilregion j über

$$Q_{\text{pot,Bioabfall},j} = \bar{M}_{\text{Bioabfall},j} \cdot V_{\text{Biogas}} \cdot x_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot H_{u,\text{CH}_4} \quad (6)$$

mit $x_{\text{CH}_4} = 0,60$ [119] berechnen lässt.

Auf Basis des so ermittelten Energiepotenzials lässt sich anschließend gemäß Gleichung (5) das theoretische Wasserstoffpotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{Bioabfall},j}$ bestimmen.

b) Organik im Hausmüll

Zusätzlich gibt es nativ-organische Reststoffe, die von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern über den Haus- bzw. Restmüll erfasst werden. Eine Untersuchung des Umweltbundesamts zeigt, dass der Hausmüll in Deutschland durchschnittlich zu etwa 39 % aus organischen Bestandteilen besteht, darunter Küchen-, Nahrungs- und Gartenabfälle [120].

Zur Ermittlung der im Hausmüll enthaltenen organischen Abfallmenge wird eine siedlungsstrukturelle Differenzierung gemäß [121] angewendet. Zunächst erfolgte eine Einteilung der

Landkreise und kreisfreien Städte in unterschiedliche Siedlungsstrukturtypen anhand ihrer Einwohnerdichte d_j gemäß Gleichung (6):

$$d_j = \frac{E_j}{A_j} \quad (6)$$

Hierbei bezeichnet E_j die Einwohnerzahl und A_j die Fläche der jeweiligen Gebietseinheit. Für diese strukturellen Daten wird auf eine Mehrjahresmittelbildung verzichtet, da die jährlichen Schwankungen der Einwohnerzahlen und Gebietsflächen im Vergleich zu den Abfallmengen als vernachlässigbar eingestuft werden. Die hierfür verwendeten Daten werden der Abfallstatistik 2023 entnommen [122].

Die zur Ermittlung der Einwohnerdichte verwendeten Eingangsparameter sowie die daraus resultierende Einwohnerdichte sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Eingangsparameter zur Bestimmung der Siedlungsstrukturtypen in der bayerischen Projektregion

Stadt / Landkreis	Einwohner [Ew]	Fläche [km²]	Einwohnerdichte [Ew/km²]
Stadt & Landkreis Hof	141.134	950	148,56
Landkreis Wunsiedel	72.036	607	118,68
Stadt Weiden	43.093	68	633,72
Landkreis Neustadt a.d.W.	96.220	1430	67,29
Landkreis Tirschenreuth	72.121	1085	66,47

In Anlehnung an [121] wurde anschließend jeder Strukturklasse auf Basis der Einwohnerdichte ein typischer Organikanteil o_j im Hausmüll zugewiesen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Klassifizierung der Siedlungsstruktur und zugeordnete Organikanteile im Hausmüll

Stadt / Landkreis	Siedlungsstruktur	Organikanteil o_j [Gew.-%]
Stadt & Landkreis Hof	ländlich	39,6
Landkreis Wunsiedel	ländlich	39,6
Stadt Weiden	ländlich-dicht	35
Landkreis Neustadt a.d.W.	ländlich	39,6
Landkreis Tirschenreuth	ländlich	39,6

Auf Basis der siedlungsstrukturellen Einordnung und der zugeordneten Organikanteile o_j wird im folgenden Schritt das theoretische Wasserstoffpotenzial aus dem Restmüllaufkommen berechnet.

Grundlage bilden die Mehrjahresmittel der Hausmüllmenge $\bar{M}_{\text{Hausmüll},j}$ in den Teilregionen. Die Menge des organischen Anteils im Hausmüll $\bar{M}_{\text{Organik},j}$ wird über die Hausmüllmenge und den entsprechenden Organikanteil o_j aus Tabelle 8 gemäß Gleichung (7) bestimmt:

$$\bar{M}_{\text{Organik},j} = \bar{M}_{\text{Hausmüll},j} \cdot \frac{o_j}{100} \quad (7)$$

Das Energie- und Wasserstoffpotenzial dieses Anteils wird anschließend analog zur Berechnung für Abfälle aus der Biotonne unter Verwendung der entsprechenden Organikmenge und der bekannten Gasertrags- und Methanparameter ermittelt.

c) Grüngut

Die Grüngutfraktion umfasst organische Materialien aus privaten Haushalten, der öffentlichen Grünflächenpflege sowie aus gewerblichen Quellen. Letztere sind nicht in allen Teilregionen vollständig in der Abfallstatistik abgebildet, da die Entsorgung (analog zu den gewerblichen Bioabfällen) häufig privatwirtschaftlich organisiert ist. Zudem ist eine Anlieferung

an öffentliche Entsorgungsstellen wie Wertstoffhöfe ebenfalls möglich. Eine eindeutige Trennung zwischen privaten und gewerblichen Mengen ist daher nicht möglich.

Für die Potenzialermittlung wird die in der Abfallbilanz Bayern ausgewiesene Gesamtsumme aus „Grüngut aus Haushalten“, „kommunalem Grüngut“ und „Grüngut aus Gewerbe“ herangezogen. Die Ermittlung des theoretischen Energiepotenzials erfolgt analog zu der für Bioabfälle beschriebenen Methodik. Abweichungen ergeben sich ausschließlich aus den substratspezifischen Kennwerten, konkret durch den spezifischen Gasertrag sowie den Methananteil des erzeugten Biogases.

Nach [123] liegt der spezifische Biogasertrag von Grüngut (für die vorliegende Betrachtung mit den Parametern von Landschaftspflegegras angesetzt) in einer Spannweite von 200–400 m³ Biogas pro Tonne organischer Trockenmasse (t_{oTM}). Die breite Spanne ist primär auf den variierenden Ligningehalt des Substrats zurückzuführen: Ein höherer Ligningehalt reduziert die vergärbare organische Substanz und damit den Biogasertrag. Der Methangehalt des Biogases wird für die Berechnung mit 50 Vol.-% angenommen.

Für die Umrechnung auf Frischmassebasis wird ein mittlerer Ertrag von 300 Nm³/t_{oTM} gewählt und über den Trockenmasseanteil TM (in % der Frischmasse) sowie den Anteil organischer Trockenmasse oTM (in % der TM) umgerechnet:

$$V_{\text{Biogas,FM}} = V_{\text{Biogas,oTM}} \cdot \frac{TM}{100} \cdot \frac{oTM}{100} \quad (8)$$

mit $TM = 50 \%$ und $oTM = 85 \%$ ergibt sich:

$$V_{\text{Biogas,FM}} = 300 \cdot 0,50 \cdot 0,85 = 127,5 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{FM}}. \quad (9)$$

Der daraus resultierende Annahmewert von 127,5 Nm³/t_{FM} wird ebenfalls im *Biogaspotenzialbericht Bayern* verwendet [121].

Für Grüngut gilt ein spezifischer Biogasertrag von $V_{\text{Biogas}} = 127,5 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{FM}}$ sowie ein Methangehalt von $x_{\text{CH}_4} = 0,50$. Das theoretische Energiepotenzial der Teilregion j ergibt sich analog zur Berechnung des Bioabfallpotenzials zu:

$$Q_{\text{pot,Grüngut},j} = \bar{M}_{\text{Grüngut},j} \cdot V_{\text{Biogas}} \cdot x_{\text{CH}_4} \cdot \rho_{\text{CH}_4} \cdot H_{u,\text{CH}_4} \quad (10)$$

Das daraus resultierende theoretische Wasserstoffpotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{Grüngut},j}$ wird anschließend gemäß Gleichung (5) aus dem berechneten Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Grüngut},j}$ bestimmt.

Methodik der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)

Für die tschechische Projektregion Karlovarský kraj basiert die Datengrundlage auf dem regionalen Abfallwirtschaftsplan (Plan odpadového hospodářství, POH) [116].

Im Gegensatz zur bayerischen Projektregion werden die biologisch abbaubaren Abfallströme dort über Abfallkatalogcodes des Europäischen Abfallverzeichnisses (European Waste Catalogue, EWC) [117] ausgewiesen, die Abfallarten eindeutig klassifizieren. Eine Aufschlüsselung der Mengen nach Verursacherguppen (z. B. Haushalte vs. Gewerbe/Gastronomie) ist in dieser Darstellung nicht enthalten.

Biologisch abbaubare kommunale Abfälle (biologický rozložitelný komunální odpad, BRKO) werden in der Region seit dem 01.04.2015 getrennt erfasst. Die Umsetzung erfolgt je nach Kommune unterschiedlich, u. a. über getrennte Sammlung und Abfuhr (insbesondere in Bereichen mit Einfamilienhäusern) sowie über die Anlieferung an Sammel- und Recyclinghöfe. Größere Gemeinden kombinieren mehrere Sammelsysteme. Bioabfälle tierischen Ursprungs aus Küchen und Verpflegungseinrichtungen dürfen gemeinsam mit der pflanzlichen Fraktion nur dann erfasst werden, wenn die anschließende Behandlung in einer Biogasanlage oder in einer Kompostierungsanlage mit Hygienisierung erfolgt.

Für separat gesammeltes Grüngut als eigenständigen Teilstrom liegen in öffentlich zugänglichen Statistiken keine eindeutig abgrenzbaren Mengen vor, da die Erfassung teilweise aggregiert innerhalb von BRKO erfolgt und keine weitere Differenzierung nach Teilfraktionen (z. B. Gras, Laub, Schnittgut) verfügbar ist. Im POH ist Grüngut daher über den EWC-Code 20 02 01 („biologisch abbaubare Abfälle“ innerhalb der Garten- und Parkabfälle) als Sammelkategorie abgebildet.

a) Küchen- und Kantinenabfälle

Küchen- und Kantinenabfälle (im Folgenden **KK**; EWC 20 01 08) werden in der Praxis häufig über kommerzielle Entsorgungs- und Sammelstrukturen erfasst. Im regionalen Abfallwirtschaftsplan (Plan odpadového hospodářství, POH) werden die Mengen jedoch gemeinsam ausgewiesen (Haushalte, Kommunen und gewerbliche Anfallstellen), sodass eine Differenzierung nach Verursachergruppen nicht möglich ist. Dieser Stoffstrom wird daher nicht als Äquivalent zur bayerischen Kategorie „Abfälle aus der Biotonne“ interpretiert, sondern als eigenständiger biogener Reststoffstrom der tschechischen Projektregion in die Potenzialermittlung einbezogen. Zur Glättung jährlicher Schwankungen wird das Mehrjahresmittel der Küchen- und Kantinenabfälle $\bar{M}_{KK}$ für den Zeitraum 2017–2021 gebildet:

$$\bar{M}_{KK} = \frac{1}{N} \sum_y M_{KK,y} \quad (11)$$

Hierbei entspricht N der Anzahl der betrachteten Jahre (*hier* $N = 5$) innerhalb des gewählten Datenzeitraums.

b) Organik im Siedlungsabfall

Trotz Getrenntsammlung verbleibt ein erheblicher Anteil organischer Bestandteile im gemischten kommunalen Restmüll (směsný komunální odpad, SKO). Die SKO-Menge wird im regionalen Abfallwirtschaftsplan über den Abfallkatalogcode EWC 20 03 01 (gemischte Siedlungsabfälle) ausgewiesen und für die Potenzialabschätzung als Mehrjahresmittel angesetzt:

$$\bar{M}_{SKO} = \frac{1}{N} \sum_y M_{SKO,y} \quad (12)$$

Die im POH zusätzlich ausgewiesene Organikmenge unter EWC 20 03 01 entspricht (bis auf Rundung) einem pauschalen Anteil von 30 % der jährlichen SKO-Menge und wird daher als Näherung für den organischen Anteil im Restmüll angesetzt. Für die Potenzialabschätzung gilt:

$$\bar{M}_{\text{Organik,SKO}} = \bar{M}_{\text{SKO}} \cdot o_{\text{SKO}} \quad (13)$$

mit $o_{\text{SKO}} = 0,30$.

c) Grüngut

Als Grüngut-Äquivalent werden für die tschechische Projektregion Garten- und Parkabfälle herangezogen, die im regionalen Abfallwirtschaftsplan unter dem Code EWC 20 02 01 („biologisch abbaubare Abfälle“ innerhalb der Garten- und Parkabfälle) ausgewiesen sind. Die Mengen liegen in der verwendeten Statistik als Sammelkategorie vor, weshalb eine weitere Unterteilung (z. B. Gras, Laub, Schnittgut) nicht verfügbar ist. Für das Mehrjahresmittel $\bar{M}_{\text{Grüngut}}$ gilt:

$$\bar{M}_{\text{Grüngut}} = \frac{1}{N} \sum_y M_{\text{Grüngut},y} \quad (14)$$

Ergebnisse der Potenzialermittlung

Bevor die regionalen Potenziale ausgewiesen werden, fasst Tabelle 9 die substratspezifischen Kennwerte (Biogasertrag V_{Biogas} und Methananteil x_{CH_4}) zusammen. Diese bilden die Grundlage, um aus den zuvor ermittelten Mehrjahresmitteln der Reststoffmengen $\bar{M}$ das theoretische Energiepotenzial Q_{pot} gemäß den Gleichungen (6) bzw. (10) zu berechnen. Die aus den Mehrjahresmitteln der Reststoffmengen berechneten Energiepotenziale ergeben sich zunächst in kWh/a und werden in den Ergebnistabellen in GWh/a ausgewiesen. Die daraus berechneten Wasserstoffpotenziale ergeben sich zunächst in kg/a und werden in den Tabellen in t/a dargestellt. Für Küchen- und Kantinenabfälle (KK) werden die Kennwerte der KTBL-Datenbank (Substrat: Speisereste) angesetzt [124]. Das daraus resultierende Wasserstoffpotenzial $m_{\text{pot,H}_2}$ wird anschließend unter Berücksichtigung des Referenzwirkungsgrads $\eta_{\text{BG,ref}}$ nach Gleichung (5) ermittelt. Die in Tabelle 9 angegebenen Biogaserträge werden

entsprechend der jeweiligen Quellenangaben übernommen. Unterschiede in der Schreibweise und Bezugsbasis der Volumeneinheiten (m^3/t_{Input} , Nm^3/t_{FM}) ergeben sich aus der zugrunde liegenden Literatur.

Tabelle 9: Substratspezifische Kennwerte zur Potenzialberechnung

Reststofffraktion	Biogasertrag V_{Biogas}	Einheit	Methananteil x_{CH_4} [Vol.-%]
Abfälle aus der Biotonne	123	$\frac{m^3}{t_{Input}}$	60
Organik im Hausmüll	123	$\frac{m^3}{t_{Input}}$	60
Grüngut	127,5	$\frac{Nm^3}{t_{FM}}$	50
Küchen-/Kantinenabfälle	94,7	$\frac{m^3}{t_{Input}}$	60

Die Ergebnisse für die bayerischen Teilregionen sind in den Tabellen 10 bis 13 dargestellt. Tabelle 10 zeigt die ermittelten Bioabfallmengen sowie die daraus abgeleiteten Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 10: Bioabfallmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der Teilregionen

Stadt / Landkreis	Bioabfall $\bar{M}_{Bioabfall,j}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{pot,Bioabfall,j}$ [GWh/a]	H ₂ -Massenpotenzial $m_{pot,H_2,Bioabfall,j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	14.145,38	10,44	187,93
Landkreis Wunsiedel	4874,63	3,60	64,76
Stadt Weiden	1.429,63	1,06	18,99
Landkreis Neustadt a.d.W.	2.993,29	2,21	39,77
Landkreis Tirschenreuth	1.087,71	0,80	14,45
Summe	24.530,64	18,10	325,90

Für den organischen Anteil im Hausmüll werden die Hausmüllmengen, die zugeordneten Organikanteile sowie die daraus berechneten Organikmengen je Teilregion in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Hausmüllmengen sowie Organikanteile und -mengen der Teilregionen

Stadt / Landkreis	Hausmüllmenge $\bar{M}_{\text{Hausmüll},j}$ [t/a]	Organikanteil o_j [Gew.-%]	Organikmenge $\bar{M}_{\text{Organik},j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	16.045,13	39,6	6.353,87
Landkreis Wunsiedel	7.986,75	39,6	3.162,75
Stadt Weiden	6.401,75	35	2.240,61
Landkreis Neustadt a.d.W.	14.067,13	39,6	5.570,58
Landkreis Tirschen- reuth	9.476	39,6	3.752,50
Summe	53.976,75	-	21.080,31

Aus der so ermittelten Organikmenge werden anschließend Energie- und Wasserstoffpotenziale berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 enthalten.

Tabelle 12: Organikmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der Teilregionen

Stadt / Landkreis	Organikmenge $\bar{M}_{\text{Organik},j}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Organik},j}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2, \text{Organik},j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	6.353,87	4,69	84,41
Landkreis Wunsiedel	3.162,75	2,33	42,02
Stadt Weiden	2.240,61	1,64	29,50
Landkreis Neustadt a.d.W.	5.570,58	4,11	74,01
Landkreis Tirschen- reuth	3.752,50	2,77	49,85
Summe	21.080,31	15,54	279,79

Tabelle 13 zeigt die Grüngutmengen sowie die daraus abgeleiteten Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 13: Grüngutmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen

Stadt / Landkreis	Grüngut $\bar{M}_{\text{Grüngut},j}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Grüngut},j}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2, \text{Grüngut},j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	36.194,50	27,69	498,45
Landkreis Wunsiedel	15.455,38	11,82	212,84
Stadt Weiden	6.257,50	4,79	86,17
Landkreis Neustadt a.d.W.	13.880,13	10,62	191,15
Landkreis Tirschen- reuth	2.456,88	1,88	33,83
Summe	74.244,38	56,80	1.022,45

Die resultierenden jährlichen Energiepotenziale sowie die daraus abgeleiteten Wasserstoffpotenziale der einzelnen Stoffströme in der tschechischen Projektregion sind in

Tabelle 14 dargestellt. Die Berechnung erfolgt analog zur bayerischen Projektregion auf Basis der hergeleiteten Mehrjahresmittel $\bar{M}$ sowie der substratspezifischen Kennwerte aus Tabelle 9.

Tabelle 14: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Bioabfällen und Grüngut der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)

Reststofffraktion	Reststoff- menge $\bar{M}$ [t/a]	Energiepotenzial Q_{pot} [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2}$ [t/a]
Küchen-/Kantinenabfälle	563,80	0,32	5,77
Organik im Hausmüll	22.211,20	16,39	295,08
Grüngut	17.572	13,47	242,48
Summe	–	30,18	543,33

Anhang A.4 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Resthölzern

Für alle holzartigen Fraktionen wird ein unterer Heizwert von $H_{u,Holz} = 4 \text{ kWh/kg}$ zugrunde gelegt, der einem für aufbereitete, vergasungsg geeignete Holzbrennstoffe typischen Wassergehalt von etwa 10-20 % entspricht [125], [126]. Die Bestimmung der daraus theoretisch erzeugbaren Wasserstoffmasse erfolgt unter Verwendung des unteren Heizwerts von Wasserstoff H_{u,H_2} sowie des Referenzwirkungsgrads $\eta_{Konv,ref}$. Dieser fasst vereinfachend die Konversionskette aus Holzvergasung, Wassergas-Shift-Reaktion und Wasserstoffabtrennung zusammen. Für die vorliegende Abschätzung wird konservativ mit $\eta_{Konv,ref} = 0,35$ gerechnet. Der Wert orientiert sich an den im *BiDRoGen*-Abschlussbericht für marktverfügbare Luftvergaser mit nachgeschalteter Shift-Stufe und Wasserstoffabtrennung ausgewiesenen Kaltgaswirkungsgraden von rund 35 bis 37 % [127].

Methodik der bayerischen Projektregion

Die methodische Herleitung der Potenziale in der bayerischen Projektregion erfolgt getrennt für (a) Altholz, (b) forstwirtschaftliche Resthölzer und (c) Industrierestholz.

a) Altholz

Zunächst wird aus den jährlichen Altholzmengen das Mehrjahresmittel $\bar{M}_{Altholz,j}$ jeder Gebietseinheit nach Gleichung (1) gebildet. Die zugrunde liegenden Daten der bayerischen Teilregionen basieren auf den Abfallbilanzen der Jahre 2016-2023.

Für zwei Gebietseinheiten liegen im betrachteten Zeitraum keine durchgängigen Altholzdaten vor:

Stadt Weiden: Im gesamten Betrachtungszeitraum sind keine spezifischen Altholzmengen in der Abfallbilanz ausgewiesen. Die Berechnung erfolgt über die regierungsbezirksweiten Pro-Kopf-Altholzaufkommen der Oberpfalz $m_{Altholz,Opf,y}$ des jeweiligen Jahres y , multipliziert mit der jährlichen Einwohnerzahl $P_{Weiden,y}$ der Stadt laut Abfallbilanz.

$$M_{Altholz,Weiden,y} = m_{Altholz,Opf,y} \cdot P_{Weiden,y} \quad (15)$$

Landkreis Tirschenreuth (TR): Seit 2020 wird keine separate Altholzfraktion mehr ausgewiesen; die Mengen sind dort in der Kategorie „Sortierrest“ enthalten [129]. Zur Approximation der fehlenden Altholzmengen wird zunächst das mittlere Pro-Kopf-Aufkommen $\bar{m}_{\text{Altholz,TR}}$ der Jahre 2016–2019 bestimmt:

$$\bar{m}_{\text{Altholz,TR}} = \frac{1}{N} \sum_{y=2016}^{2019} \frac{M_{\text{Altholz,TR},y}}{P_{\text{TR},y}} \quad (16)$$

Für die fehlenden Jahre ($y \geq 2020$) wird die jährliche Altholzmenge $M_{\text{Altholz,TR},y}$ anschließend durch Multiplikation mit der jeweiligen Einwohnerzahl $P_{\text{TR},y}$ abgeschätzt. Dabei wird angenommen, dass sich das Pro-Kopf-Aufkommen nur marginal verändert:

$$M_{\text{Altholz,TR},y} = \bar{m}_{\text{Altholz,TR}} \cdot P_{\text{TR},y} \quad (17)$$

Nach der Ermittlung von $\bar{M}_{\text{Altholz},j}$ ergibt sich das theoretische Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Altholz},j}$ durch Multiplikation mit dem angenommenen Heizwert. Für die Berechnung mit Massen in t/a wird der Heizwert $H_{u,\text{Holz}} = 4 \text{ kWh/kg}$ äquivalent als 4 MWh/t verwendet.

$$Q_{\text{pot,Altholz},j} = \bar{M}_{\text{Altholz},j} \cdot H_{u,\text{Holz}} \quad (18)$$

Das nach Gleichung (19) berechnete Energiepotenzial ergibt sich zunächst in MWh/a und wird in den Ergebnistabellen in GWh/a ausgewiesen.

Die theoretisch erzeugbare Wasserstoffmasse ergibt sich damit in t/a zu:

$$m_{\text{pot,H2,Altholz},j} = \frac{Q_{\text{pot,Altholz},j} \cdot \eta_{\text{Konv,ref}}}{H_{u,\text{H2}}} \quad (19)$$

Sperrmüll kann eine weitere Quelle für Altholz darstellen. Nach Angaben des Umweltbundesamts wird der Altholzanteil auf etwa 45 % geschätzt [130]. In Anlehnung an den *Energieholzmarktbericht 2022* [131] wird dieses Aufkommen jedoch nicht mit bilanziert, da nachgelagerte Verwertungsströme nicht eindeutig zuordenbar sind und eine statistische Mehrfacherfassung nicht ausgeschlossen werden kann.

b) Forstwirtschaftliche Resthölzer

Für die bayerische Projektregion liegen keine landkreisscharfen Holzeinschlagsdaten vor. Das Potenzial wird daher flächenbasiert über spezifische Aufkommenskennwerte abgeschätzt. Berücksichtigt werden zwei Hauptkategorien forstwirtschaftlicher Resthölzer: Waldrestholz (WRH) und Durchforstungsholz (DFH). Beide Holzarten fallen als Nebenprodukte der Waldbewirtschaftung an und gelten als energetisch nutzbar.

Waldrestholz bezeichnet jene Holzanteile, die nach der Holzernte im Bestand verbleiben und üblicherweise energetisch verwertet werden. Dazu zählen vor allem Baumkronen, Äste, kurze oder nicht verkaufsfähige Stammabschnitte sowie Reißig und Nadeln. Während Teile dieses sogenannten Schlagabraums, wie Kronenmaterial und kurze Stammstücke, zu Hackschnitzeln oder Scheitholz aufgearbeitet werden können, verbleiben feinere Bestandteile wie Reisholz und Nadeln meist im Wald [132], [133], [134]. Da Waldrestholz für die stoffliche Nutzung kaum geeignet ist, bietet es theoretisch ein hohes Potenzial für die energetische Verwertung [134].

Durchforstungsholz entsteht im Rahmen geplanter waldbaulicher Pflegemaßnahmen, wie Jungbestandspflege, Jung- oder Altdurchforstung. Ziel dieser Maßnahmen ist die Stabilisierung und Förderung der Qualität des verbleibenden Bestands durch das Entfernen von konkurrierenden, kranken oder minderwertigen Bäumen. Das dabei anfallende Holz wird meist als Schwachholz bezeichnet und umfasst in der Regel Stämme mit einem Brusthöhendurchmesser von etwa 7 bis 20 Zentimetern, die in der Sägeindustrie häufig nicht verwertbar sind. Je nach Aufbereitung kann dieses Holz entweder als Hackschnitzel oder, nach Entfernung der Feinanteile, als stückiges Brennholz genutzt werden [133], [135].

Für Waldrestholz werden in [133] spezifische Aufkommen von 400–800 kg/(ha·a) angegeben. Für Durchforstungsholz liegen die Werte dort bei 700–1100 kg/(ha·a). [136] nennt 400 kg/(ha·a) (Waldrestholz) sowie 550–800 kg/(ha·a) (Durchforstungsholz). In [137] wird für Waldrestholz ein Aufkommen von 1000 kg/(ha·a) ausgewiesen. Die Angaben hängen u. a. von Standort, Baumart und Bewirtschaftung ab. Die spezifischen Aufkommenswerte werden als flächenbezogene Jahresmittelwerte je Hektar und Jahr angesetzt. Aus den angegebenen

Quellen wurden zunächst Mittelwerte gebildet und anschließend auf 10 kg/(ha·a) gerundet. Für die weitere Berechnung dienten daher 670 kg/(ha·a) bzw. äquivalent 0,67 t/(ha · a) für Waldrestholz und 790 kg/(ha·a) bzw. 0,79 t/(ha · a) für Durchforstungsholz als Grundlage.

Zudem wurde ein konservativer Ansatz gewählt, der das Restholzpotenzial als Untergrenze ausschließlich aus Staats- und Körperschaftswaldflächen ableitet. Hintergrund ist, dass Restholzpotenziale aus Privatwald aufgrund kleinteiliger Besitzstrukturen und der damit verbundenen erschwerten Mobilisierbarkeit mit deutlich höheren Unsicherheiten behaftet sind.

Die hierfür maßgebliche prozentuale Verteilung der Eigentumsarten (Staats-, Körperschafts- und Privatwald) wurde mangels landkreisscharfer Daten auf Regierungsbezirksebene [138] entnommen und auf die Landkreise sowie kreisfreien Städte übertragen, unter der Annahme, dass diese jeweils vergleichbare Verhältnisse aufweisen. Für die weitere Auswertung wurde der Staatswald des Bundes und des Landes gemeinsam als Staatswald zusammengefasst. Tabelle 15 zeigt die absolute Verteilung der Waldflächen in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz nach Eigentumsarten, während Abbildung 17 die entsprechenden prozentualen Anteile darstellt.

Tabelle 15: Verteilung der Waldflächen in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz nach Eigentumsarten

Regierungs- bezirk	Staatswald [ha]	Körperschafts- wald [ha]	Privatwald [ha]	Gesamtwald- fläche [ha]
Oberfranken	98.221	23.204	171.832	293.257
Oberpfalz	131.627	19.604	268.653	419.884
Summe	229.848	42.808	440.485	713.141

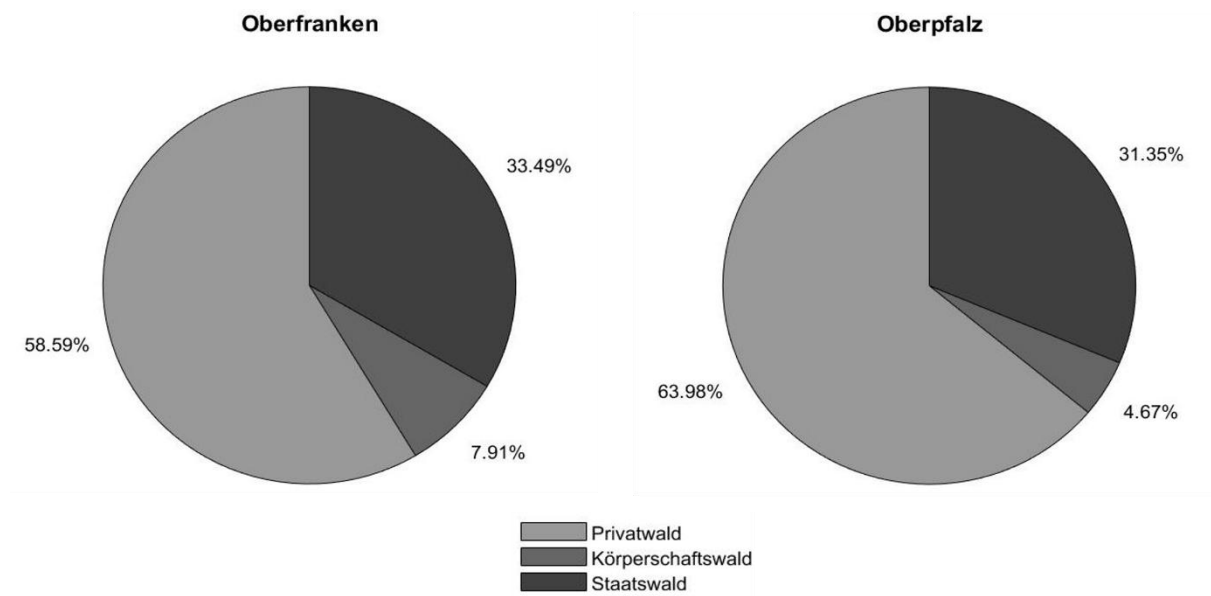


Abbildung 17: Prozentuale Verteilung der Waldflächen nach Eigentumsarten in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz

Auf dieser Grundlage wurde für jede Teilregion j die berücksichtigte Waldfläche A_j [ha] als Summe aus Staats- und Körperschaftswald berechnet. Die entsprechenden Eingangsgrößen und die daraus abgeleiteten angesetzten Waldflächen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Waldflächen der Teilregionen und für die Potenzialabschätzung berücksichtigte Flächen

Stadt / Landkreis	Gesamt- waldfläche [ha]	Staatswald [ha]	Körperschafts- wald [ha]	angesetzte Waldfläche [ha]
Stadt Hof	743	248,8	58,8	307,6
Landkreis Hof	30.852	10.332,3	2.440,4	12.772,7
Landkreis Wunsie- del	27.428	9.185,6	2.169,6	11.355,2
Stadt Weiden	2.099	658,0	98,0	756,1
Landkreis Neustadt a.d.W.	65.369	20.493,2	3.052,7	23.545,9
Landkreis Tirschen- reuth	50.249	15.753,1	2.346,6	18.099,7
Summe	176.740	56.671,1	10.166,1	66.837,2

Die jeweiligen Restholzmengen $M_{WRH,j}$ und $M_{DFH,j}$ ergeben sich durch Multiplikation der Fläche mit den gemittelten Aufkommenswerten.

$$M_{WRH,j} = A_j \cdot m_{WRH} \quad (20)$$

$$M_{DFH,j} = A_j \cdot m_{DFH} \quad (21)$$

Die Gesamtmenge an forstwirtschaftlichem Restholz $M_{ges,FRH,j}$ einer Teilregion resultiert schließlich aus der Summe der beiden Restholzarten gemäß:

$$M_{ges,FRH,j} = M_{WRH,j} + M_{DFH,j} \quad (22)$$

Die Energiemenge $Q_{pot,FRH,j}$ aus forstwirtschaftlichen Resthölzern (FRH) berechnet sich aus dem Produkt der Holzmasse $M_{ges,FRH,j}$ und dem Heizwert $H_{u,Holz}$, der hierbei in MWh/t verwendet wird.

$$Q_{pot,FRH,j} = M_{ges,FRH,j} \cdot H_{u,Holz} \quad (23)$$

$Q_{\text{pot,FRH},j}$ wurde anschließend zur Bestimmung des Wasserstoffproduktionspotenzials herangezogen. Analog zu Gleichung (19) ergibt sich die theoretisch erzeugbare Wasserstoffmasse $m_{\text{pot,H2,FRH},j}$ für jede Teilregion zu:

$$m_{\text{pot,H2,FRH},j} = \frac{Q_{\text{pot,FRH},j} \cdot \eta_{\text{Konv,ref}}}{H_{u,\text{H2}}} \quad (24)$$

c) Industrierestholz (IRH)

In der Abfallstatistik wird Industrierestholz nicht gesondert ausgewiesen, da die Entsorgung und Verwertung überwiegend privatwirtschaftlich erfolgen. Laut Potenzialatlas „*BIOENERGIE in den Bundesländern*“ [139] wird das verfügbare Industrierestholzpotenzial in Bayern mit 23.400 TJ beziffert, das im Folgenden als jährliches energetisches Potenzial $Q_{\text{pot,IRH,Bay}}$ in TJ/a angesetzt wird. Die stoffliche Nutzung (z. B. für die Herstellung von Spanplatten) ist hiervon bereits abgezogen.

Zur regionalen Aufteilung dieses Potenzials wird angenommen, dass die Verteilung des Industrierestholzes näherungsweise der regionalen Verteilung der holzbasierten Wertschöpfungskette folgt.

Als Grundlage dient die Zahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten im sogenannten *Cluster Forst und Holz*. Das Cluster umfasst verschiedene Teilbranchen, darunter Sägewerke, die Möbelindustrie sowie die Zellstoff- und Papierindustrie. Eine detaillierte Beschreibung des Clusters findet sich in Kapitel 3 von [140] und basiert auf der „Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)“ [141].

Da keine öffentlich verfügbaren Zahlen zur Cluster-Beschäftigung auf Ebene der Landkreise und kreisfreien Städte vorliegen, erfolgt die Abschätzung auf Basis des Anteils der Cluster-Beschäftigten an der Gesamtbeschäftigung in den jeweiligen Gebietseinheiten. Datenbasis hierfür ist eine Analyse der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) [142], in der für jeden Landkreis und jede kreisfreie Stadt der prozentuale Anteil der Beschäftigten im Cluster Forst und Holz an der Gesamtbeschäftigung ausgewiesen ist (vgl. Abbildung 18).

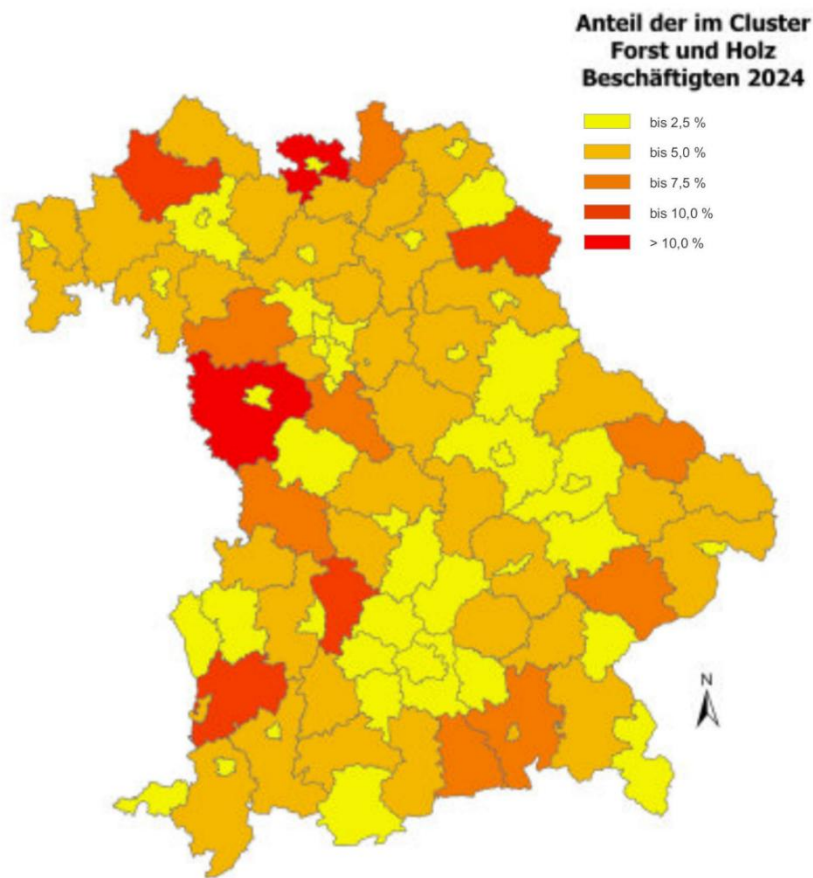


Abbildung 18: Anteil der Beschäftigten des Clusters Forst und Holz an der Gesamtbeschäftigung in den Landkreisen und kreisfreien Städten 2024, nach [142], Legende grafisch überarbeitet

Die Gesamtzahl der Beschäftigten im Cluster Forst und Holz in Bayern beträgt $C_{\text{Bay}} = 154.800$. Für die Regierungsbezirke Oberfranken und Oberpfalz werden nach [41] $C_{\text{Reg}} = 13.500$ bzw. $C_{\text{Reg}} = 13.100$ Beschäftigte ausgewiesen.

Zunächst wird das bayernweite energetische Potenzial $Q_{\text{pot,IRH,Bay}}$ an Industrierestholz auf die Ebene der Regierungsbezirke $Q_{\text{pot,IRH,Reg}}$ zugeteilt. Hierzu wird das Verhältnis der Cluster-Beschäftigten auf Regierungsebene C_{Reg} zur bayernweiten Gesamtzahl C_{Bay} der Beschäftigten im Cluster Forst und Holz bestimmt.

$$Q_{\text{pot,IRH,Reg}} = \frac{C_{\text{Reg}}}{C_{\text{Bay}}} \cdot Q_{\text{pot,IRH,Bay}} \quad (25)$$

Diese Größe dient im weiteren Verlauf als Grundlage für die Verteilung auf Kreisebene.

Im nächsten Schritt wird für jeden Landkreis bzw. jede kreisfreie Stadt j die Zahl der im Cluster Forst und Holz Beschäftigten C_j aus der Gesamtzahl der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten B_j im jeweiligen Gebiet und den aus [142] angegebenen Prozentsätzen p_j berechnet. Die in der Karte dargestellten Klassen werden als Intervalle interpretiert. Für p_j werden die jeweiligen Klassenmittelwerte verwendet. Für den Landkreis Coburg wird abweichend der in [142] angegebene exakte Wert von 10,7 % angesetzt.

$$C_j = \frac{p_j}{100} \cdot B_j \quad (26)$$

mit j als Index für die Landkreise und kreisfreien Städte der Regierungsbezirke Oberfranken und Oberpfalz.

Die Werte für B_j wurden den Daten der Bundesagentur für Arbeit entnommen und für die Landkreise und kreisfreien Städte der Regierungsbezirke Oberfranken und Oberpfalz einzeln erhoben [143].

Da die Summe aller C_j aufgrund der aus den Klassen abgeleiteten Näherungswerte von der bekannten Gesamtzahl $C_{\text{gesamt,Reg}}$ aller Cluster-Beschäftigten im jeweiligen Regierungsbezirk abweicht, wird ein einheitlicher Skalierungsfaktor s bestimmt, um die relativen Gewichte beizubehalten und gleichzeitig die Summe an die bekannte Gesamtzahl anzupassen. Die Gesamtzahl $C_{\text{gesamt,Reg}}$ basiert auf den Angaben in [142].

$$s = \frac{C_{\text{gesamt,Reg}}}{\sum_j C_j} \quad (27)$$

Mit diesem Faktor wird jede ermittelte Beschäftigtenzahl C_j skaliert:

$$\tilde{C}_j = s \cdot C_j \quad (28)$$

Dabei ist $\tilde{C}_j$ die angepasste bzw. skalierte Zahl der Beschäftigten im Cluster Forst und Holz im Gebiet j , sodass gilt:

$$\sum_j \tilde{C}_j = C_{\text{gesamt,Reg}} \quad (29)$$

Abschließend wird das auf Regierungsbezirksebene ermittelte energetische Potenzial $Q_{\text{pot,IRH,Reg}}$ proportional zur skalierten Beschäftigtenzahl $\tilde{C}_j$ auf die Landkreise und kreisfreien Städte verteilt. Für jedes Gebiet j ergibt sich das Teilpotenzial $Q_{\text{pot,IRH},j}$ zu:

$$Q_{\text{pot,IRH},j} = \frac{\tilde{C}_j}{C_{\text{gesamt,Reg}}} \cdot Q_{\text{pot,IRH,Reg}} \quad (30)$$

Die beschriebene Vorgehensweise wurde äquivalent auf die Regierungsbezirke Oberfranken und Oberpfalz angewendet.

Das Wasserstoffproduktionspotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{IRH},j}$ der jeweiligen Teilregion kann gemäß

$$m_{\text{pot,H}_2,\text{IRH},j} = \frac{Q_{\text{pot,IRH},j} \cdot \eta_{\text{Konv,ref}}}{H_{u,\text{H}_2}} \quad (31)$$

berechnet werden. Für den unteren Heizwert von Wasserstoff wurde der Wert von 33,33 kWh/kg einheitlich zu 0,12 TJ/t umgerechnet.

Methodik der tschechischen Projektregion

Aufgrund der unterschiedlichen statistischen Erfassungssysteme erfolgt die methodische Herleitung für die tschechische Projektregion getrennt von der bayerischen Vorgehensweise. Im Folgenden werden die Potenziale für (a) Altholz, (b) forstwirtschaftliche Resthölzer und (c) Industrierestholz jeweils separat hergeleitet. Grundlage bilden der regionale Abfallwirtschaftsplan sowie weitere spezifische Fach- und Statistikquellen.

a) Altholz

Für die tschechische Projektregion wird das Altholzpotezial über den Abfallkatalogcode EWC 20 01 38 (getrennt gesammelte Fraktion – Holz) abgebildet. Dieser Code stellt am ehesten das statistische Äquivalent zur bayerischen Fraktion „Altholz“ dar. Analog zur bayerischen Vorgehensweise wird zunächst das Mehrjahresmittel $\bar{M}_{\text{Altholz}}$ für den Zeitraum 2017-2021 gebildet:

$$\bar{M}_{\text{Altholz}} = \frac{1}{N} \sum_y M_{\text{Altholz},y} \quad (32)$$

Anschließend wird über die Gleichungen (18) und (19) das theoretische Wasserstoffproduktionspotenzial berechnet. Ein potenzieller Holzanteil im Sperrmüll (EWC 20 03 07) wird aus den zuvor genannten Gründen nicht bilanziert.

b) Forstwirtschaftliche Resthölzer

Für die tschechische Projektregion (Karlovarský kraj) liegen regionale Holzeinschlagsstatistiken vor, weshalb das theoretische Wasserstoffproduktionspotenzial aus Waldrestholz (WRH) einschlagsbasiert abgeschätzt werden kann.

Nach Auskunft der Universität Westböhmen in Pilsen [144] fallen nach dem Holzeinschlag typischerweise 15–25 % als Waldrestholz (insbesondere Kronenmaterial und Stubben) an. Eine vergleichbare Größenordnung weist der FNR-Leitfaden „Feste Biobrennstoffe“ aus: Als Rückstände bei der Stammholzgewinnung werden insbesondere Reisholz mit 11–17 % sowie Kronenderbholz mit 2–8 % des Derbholzaufkommens genannt (Definition inkl. Rinde) [145]. Daraus ergibt sich eine Bandbreite von ca. 13–25 %. Ergänzend weist das CELEBIO-Dossier, das S2BIOM-Daten (EU-weite Biomassepotenziale, „Base potential 2020“) auswertet, für den Karlovarský kraj einen Waldrestholzanteil von rund 15 % relativ zur Stammholzernte (logging residues / stemwood harvest) aus [146]. Im Folgenden wird daher für die Abschätzung ein konservativer Ansatz von 15 % angesetzt, bezogen auf das berichtete Einschlagsvolumen ohne Rinde ($V_{\text{Einschlag,o. R.}}$). Dieses wird aus [110] entnommen und repräsentiert das Jahr 2023.

$$V_{\text{WRH}} = 0,15 \cdot V_{\text{Einschlag,o. R.}} \quad (33)$$

Analog zur bayerischen Projektregion wird im Folgenden ebenfalls nur Staats- und Körperschaftswald berücksichtigt. Der Anteil von Staats- und Körperschaftswald wird mit s_{SK} bezeichnet. Für den Karlovarský kraj wird nach [147] $s_{\text{SK}} = 0,922$ angesetzt. Der Privatwaldanteil umfasst dabei auch kirchlichen Besitz. Die prozentuale Verteilung der Waldflächen nach Eigentumsarten ist in Abbildung 19 dargestellt.

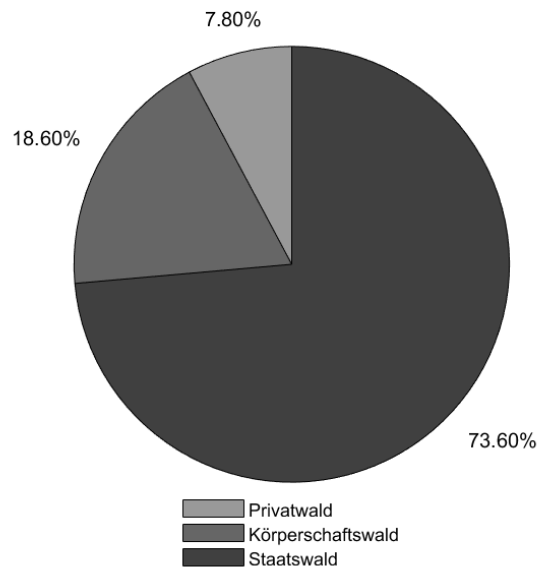


Abbildung 19: Prozentuale Verteilung der Waldflächen nach Eigentumsarten im Karlovarský kraj

Die Umrechnung des Waldrestholzvolumens V_{WRH} in eine Masse M_{WRH} erfolgt über eine angenommene Rohdichte von $\rho_{WRH} = 500 \text{ kg/m}^3$, die für die weitere Berechnung äquivalent als $0,5 \text{ t/m}^3$ verwendet wird sowie über den Anteil von Staats- und Körperschaftswald.

$$M_{WRH} = \rho_{WRH} \cdot V_{WRH} \cdot s_{SK} \quad (34)$$

Das energetische und theoretische Wasserstoffpotenzial wird nach den Gleichungen (23) und (24) ermittelt. Eine separate Bilanzierung von Durchforstungsholz erfolgt nicht, da davon ausgegangen wird, dass entsprechende Aufkommen bereits in der zugrunde gelegten Einschlagsmenge enthalten sind und andernfalls Doppelzählungen nicht ausgeschlossen werden können.

c) Industrierestholz (Sägenebenprodukte)

Für die Karlsbader Region (Karlovarský kraj, KVK) liegen nach derzeitigem Stand keine konsistenten, öffentlich zugänglichen Mengenstatistiken zum Industrierestholzaufkommen (IRH) vor. Als Datengrundlage wird daher die von Lesy ČR bereitgestellte Datenbank zur Holzverarbeitung herangezogen, welche die national verarbeitete Holzmenge $V_{\text{verarb,CZ,2024}}$ (in m^3) ausweist [148]. Die Datenbank basiert auf einer Befragung (2022) und wurde im Mai 2025

auf Grundlage neu bereitgestellter Unternehmensangaben aktualisiert. Der Aktualisierungsprozess wurde zum 31.08.2025 abgeschlossen. Die Datenbank enthält ausschließlich Angaben, die von den Unternehmen freiwillig bereitgestellt wurden. Als Referenzjahr wird 2024 gewählt, da dies zum Zeitpunkt der Auswertung das zuletzt vollständig verfügbare Jahr in der Datenbank darstellt.

Da die Datenbank keine regional aufgeschlüsselten Werte ausweist, erfolgt die Zuordnung auf die Projektregion über einen regionalen Anteil, der aus einer Erhebung zu Sägewerkskapazitäten aus dem Jahr 2015 abgeleitet wird [149]. Für den Karlovarský kraj ergibt sich daraus ein Anteil von $w_{\text{KVK}} = 1,10 \%$ an der nationalen Sägewerksverarbeitung (Rundholzeinschnitt), was für die Berechnung einem Dezimalwert von 0,011 entspricht. Mit diesem Anteil wird die national verarbeitete Holzmenge näherungsweise für das Jahr 2024 auf die Projektregion übertragen.

$$V_{\text{verarb,KVK,2024}} = w_{\text{KVK}} \cdot V_{\text{verarb,CZ,2024}} \quad (35)$$

Das potenzielle Aufkommen an Sägewerksnebenprodukten V_{SNP} wird über einen Nebenproduktfaktor y_{SNP} als Anteil am verarbeiteten Holz abgeschätzt. Der Faktor beschreibt den Anteil des Holzinputs, der nicht als Schnittholzprodukt abgeführt wird, sondern als Nebenprodukte (z. B. Hackschnitzel/Schwarten/Abschnitte sowie Sägespäne/Sägemehl) anfällt. Da für den Karlovarský kraj keine regionalen Mengenstatistiken zum gesamten Industrierestholzaufkommen vorliegen, werden Sägenebenprodukte im Folgenden als statistisch erfassbarer Teilstrom des regionalen Industrierestholzpotenzials verwendet. Auf Basis von Konversionsfaktoren der UNECE/FAO (UN Economic Commission for Europe / Food and Agriculture Organization) wird für die Tschechische Republik (Nadelholz) eine Schnittholzausbeute von rund 60 % ausgewiesen, woraus sich ein Nebenproduktfaktor von $y_{\text{SNP}} = 0,40$ ergibt [147].

Die Bilanzierung umfasst Nebenprodukte der ersten Verarbeitungsstufe (Rundholzeinschnitt). Nachgelagerte Verarbeitungsstufen (z. B. Holzwerkstoff-, Möbel- oder Papierindustrie) werden mangels konsistenter regionaler Daten und zur Vermeidung potenzieller Doppelzählungen entlang der Wertschöpfungskette nicht separat berücksichtigt.

$$V_{\text{SNP,KVK,2024}} = y_{\text{SNP}} \cdot V_{\text{verarb,KVK,2024}} \quad (36)$$

Die Umrechnung des Volumens $V_{\text{SNP,KVK,2024}}$ in eine Masse $M_{\text{SNP,KVK,2024}}$ erfolgt über eine ebenfalls angenommene mittlere Rohdichte von $\rho_{\text{SNP}} = 500 \text{ kg/m}^3 (= 0,5 \text{ t/m}^3)$ (Holzäquivalent/Festvolumen).

$$M_{\text{SNP,KVK,2024}} = \rho_{\text{SNP}} \cdot V_{\text{SNP,KVK,2024}} \quad (37)$$

Die weiteren Umrechnungsschritte zur Bestimmung des energetischen Potenzials sowie des daraus abgeleiteten theoretischen Wasserstoffpotenzials erfolgen in Anlehnung an die für die bayerische Projektregion dargestellte Vorgehensweise.

Ergebnisse der Potenzialermittlung

a) Altholz

Die Ergebnisse der Potenzialermittlung für Altholz in den bayerischen Teilregionen sind in Tabelle 17 dargestellt. Ausgewiesen sind die Mehrjahresmittel der Altholzmengen sowie die daraus abgeleiteten Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 17: Altholzmengen sowie Energie- und Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen

Stadt / Landkreis	Altholzmenge $\bar{M}_{\text{Altholz},j}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Altholz},j}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{Altholz},j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	6.314,38	25,26	265,23
Landkreis Wunsiedel	1.759,13	7,04	73,89
Stadt Weiden	560,88	2,24	23,56
Landkreis Neustadt a.d.W.	1.176,13	4,70	49,40
Landkreis Tirschen- reuth	1.064,86	4,26	44,73
Summe	10.875,38	43,50	456,81

Die Ergebnisse für die tschechische Projektregion sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Dargestellt sind das Mehrjahresmittel der Altholzmenge $\bar{M}_{\text{Altholz}}$ sowie die daraus berechneten Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 18: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Altholz der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)

Altholzmenge $\bar{M}_{\text{Altholz}}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,Altholz}}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{Altholz}}$ [t/a]
1.020,60	4,08	42,87

b) Forstwirtschaftliche Resthölzer

Die für die bayerischen Teilregionen ermittelten Potenziale aus forstwirtschaftlichen Resthölzern sind in den Tabellen 19 und 20 zusammengefasst. Tabelle 19 weist die berechneten Mengen an Waldrestholz, Durchforstungsholz sowie die Gesamtmenge an forstwirtschaftlichen Resthölzern aus. Tabelle 20 zeigt die daraus abgeleiteten Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 19: Mengen an forstwirtschaftlichen Resthölzern in den bayerischen Teilregionen

Stadt / Landkreis	Durchforstungsholz $M_{\text{DFH},j}$ [t/a]	Waldrestholz $M_{\text{WRH},j}$ [t/a]	Gesamtrestholz $M_{\text{ges,FRH},j}$ [t/a]
Stadt Hof	243,00	206,09	449,10
Landkreis Hof	10.090,43	8.557,71	18.648,14
Landkreis Wunsiedel	8.970,61	7.607,98	16.578,59
Stadt Weiden	597,32	506,59	1.103,91
Landkreis Neustadt a.d.W.	18.601,26	15.775,75	34.377,01
Landkreis Tirschenreuth	14.298,76	12.126,80	26.425,56
Summe	52.801,39	44.780,92	97.582,31

Tabelle 20: Energie- und Wasserstoffpotenziale aus forstwirtschaftlichen Resthölzern in den bayerischen Teilregionen

Stadt / Landkreis	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,FRH},j}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{FRH},j}$ [t/a]
Stadt Hof	1,80	18,86
Landkreis Hof	74,59	783,30
Landkreis Wunsiedel	66,31	696,37
Stadt Weiden	4,42	46,37
Landkreis Neustadt a.d.W.	137,51	1.443,98
Landkreis Tirschenreuth	105,70	1.109,98
Summe	390,33	4.098,87

Für die tschechische Projektregion wird das Potenzial forstwirtschaftlicher Resthölzer einschlagsbasiert über das abgeleitete Waldrestholzvolumen V_{WRH} bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 zusammengefasst.

Tabelle 21: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus forstwirtschaftlichen Resthölzern der tschechischen Projektregion (Karlovarský kraj)

Reststoff- fraktion	Waldrestholz- volumen V_{WRH} [m³/a]	Waldrestholz- masse M_{WRH} [t/a]	Energie- potenzial $Q_{\text{pot,WRH}}$ [GWh/a]	H2-Massen- potenzial $m_{\text{pot,H}_2,\text{WRH}}$ [t/a]
Waldrestholz	169.261,05	78.029,40	312,12	3.277,56

c) Industrierestholz

Die für die bayerischen Teilregionen ermittelten Potenziale aus Industrierestholz sind in den Tabellen 22 bis 29 zusammengefasst. Zunächst werden für die Regierungsbezirke Oberfranken und Oberpfalz die aus den Beschäftigtenanteilen im Cluster Forst und Holz abgeleiteten regionalen Verteilungsschlüssel sowie die daraus berechneten energetischen Teilpotenziale

ausgewiesen. Tabelle 29 zeigt anschließend die auf die Projektteilregionen entfallenden energetischen Potenziale sowie die daraus abgeleiteten theoretischen Wasserstoffpotenziale. Die energetischen Potenziale auf Regierungsbezirksebene sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Beschäftigte im Cluster Forst und Holz und daraus abgeleitete energetische Potenziale in den Regierungsbezirken Oberfranken und Oberpfalz

Regierungs- bezirk	Cluster-Beschäftigte C_{Reg} [-]	Anteil am Bayernwert $\frac{C_{\text{Reg}}}{C_{\text{Bay}}}$ [-]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,IRH,Reg}}$ [TJ/a]
Oberfranken	13.500	0,0872	2.040,70
Oberpfalz	13.100	0,0846	1.980,23

Tabelle 23: Beschäftigtenbezogene Eingangsgrößen und abgeleitete Cluster-Beschäftigte in Oberfranken

Stadt / Landkreis	Gesamtbeschäftigte B_j [-]	Cluster-Anteil p_j [%]	Cluster-Beschäftigte C_j [-]
Stadt Hof	24.928	1,25	311,60
Landkreis Hof	39.652	3,75	1.486,95
Landkreis Wunsiedel	30.455	1,25	380,69
Stadt Bamberg	57.179	1,25	714,74
Landkreis Bamberg	39.784	3,75	1.491,90
Stadt Bayreuth	50.508	1,25	631,35
Landkreis Bayreuth	24.323	3,75	912,11
Stadt Coburg	33.815	1,25	422,69
Landkreis Coburg	26.693	10,7	2.856,15
Landkreis Forchheim	34.903	3,75	1.308,86
Landkreis Kronach	25.231	6,25	1.576,94
Landkreis Lichtenfels	27.650	3,75	1.036,88
Landkreis Kulmbach	29.264	3,75	1.097,40
Summe	444.385	-	14.228,26

Für Oberfranken ergibt sich ein einheitlicher Skalierungsfaktor von $s = 0,95$. Tabelle 24 zeigt die daraus resultierenden skalierten Cluster-Beschäftigten der Landkreise und kreisfreien Städte.

Tabelle 24: Cluster-Beschäftigte und skalierte Cluster-Beschäftigte in Oberfranken

Stadt / Landkreis	Cluster-Beschäftigte c_j [-]	Cluster-Beschäftigte (skaliert) $\tilde{c}_j$ [-]
Stadt Hof	311,60	296,02
Landkreis Hof	1.486,95	1.412,60
Landkreis Wunsiedel	380,69	361,65
Stadt Bamberg	714,74	679,00
Landkreis Bamberg	1.491,90	1.417,31
Stadt Bayreuth	631,35	599,78
Landkreis Bayreuth	912,11	866,51
Stadt Coburg	422,69	401,55
Landkreis Coburg	2.856,15	2.713,34
Landkreis Forchheim	1.308,86	1.243,42
Landkreis Kronach	1.576,94	1.498,09
Landkreis Lichtenfels	1.036,88	985,03
Landkreis Kulmbach	1.097,40	1.042,53
Summe	14.228,26	13.516,84

Aufgrund der Verwendung gerundeter Skalierungsfaktoren können geringfügige Abweichungen zwischen der Summe der ausgewiesenen skalierten Cluster-Beschäftigten und der zugrunde gelegten Gesamtzahl auftreten.

Tabelle 25 zeigt die Anteile am Bezirkscluster sowie die daraus abgeleiteten energetischen Teilpotenziale in Oberfranken.

Tabelle 25: Anteile am Bezirkscluster und energetische Teilpotenziale in Oberfranken

Stadt / Landkreis	Anteil am Bezirkscluster [%]	Potenzial P_j [TJ/a]
Stadt Hof	2,19	44,69
Landkreis Hof	10,45	213,27
Landkreis Wunsiedel	2,68	54,60
Stadt Bamberg	5,02	102,51
Landkreis Bamberg	10,49	213,98
Stadt Bayreuth	4,44	90,55
Landkreis Bayreuth	6,41	130,82
Stadt Coburg	2,97	60,62
Landkreis Coburg	20,07	409,65
Landkreis Forchheim	9,20	187,72
Landkreis Kronach	11,08	226,17
Landkreis Lichtenfels	7,29	148,71
Landkreis Kulmbach	7,71	157,40
Summe	100	2.040,70

Für den Regierungsbezirk Oberpfalz wurde die Berechnung in gleicher Weise durchgeführt. Die beschäftigtenbezogenen Eingangsgrößen und die daraus abgeleiteten Cluster-Beschäftigten sind in Tabelle 26 dargestellt. Der einheitliche Skalierungsfaktor beträgt $s = 1,03$.

Tabelle 27 zeigt die skalierten Cluster-Beschäftigten, während Tabelle 28 die Anteile am Bezirkscluster sowie die daraus abgeleiteten energetischen Teilpotenziale zusammenfasst.

Tabelle 26: Beschäftigtenbezogene Eingangsgrößen und abgeleitete Cluster-Beschäftigte in Oberpfalz

Stadt / Landkreis	Gesamtbeschäftigte B_j [-]	Cluster-Anteil p_j [%]	Cluster-Beschäftigte C_j [-]
Stadt Weiden	27.865	1,25	348,31
Landkreis Neustadt a.d.W.	32.847	3,75	1.231,76
Landkreis Tirschen- reuth	28.270	8,75	2.473,63
Stadt Amberg	28.342	1,25	354,28
Landkreis Amberg- Sulzbach	29.912	3,75	1.121,70
Stadt Regensburg	133.030	1,25	1.662,88
Landkreis Regensburg	54.214	1,25	677,68
Landkreis Cham	55.820	3,75	2.093,25
Landkreis Neumarkt i. d. Opf.	53.931	3,75	2.022,41
Landkreis Schwandorf	59.276	1,25	740,95
Summe	503.507	-	12.726,85

Tabelle 27: Cluster-Beschäftigte und skalierte Cluster-Beschäftigte in der Oberpfalz

Stadt / Landkreis	Cluster-Beschäftigte c_j [-]	Cluster-Beschäftigte (skaliert) $\tilde{c}_j$ [-]
Stadt Weiden	348,31	358,76
Landkreis Neustadt a.d.W.	1.231,76	1.268,72
Landkreis Tirschenreuth	2.473,63	2.547,83
Stadt Amberg	354,28	364,90
Landkreis Amberg-Weizbach	1.121,70	1.155,35
Stadt Regensburg	1.662,88	1.712,76
Landkreis Regensburg	677,68	698,01
Landkreis Cham	2.093,25	2.156,05
Landkreis Neumarkt i. d. Opf.	2.022,41	2.083,08
Landkreis Schwandorf	740,95	763,18
Summe	12.726,84	13.108,64

Tabelle 28: Anteile am Bezirkscluster und energetische Teilpotenziale in der Oberpfalz

Stadt / Landkreis	Anteil am Bezirkscluster [%]	Potenzial P_j [TJ/a]
Stadt Weiden	2,74	54,20
Landkreis Neustadt a.d.W.	9,68	191,66
Landkreis Tirschenreuth	19,44	384,88
Stadt Amberg	2,78	55,12
Landkreis Amberg-Weizbach	8,81	174,53
Stadt Regensburg	13,07	258,74
Landkreis Regensburg	5,32	105,44
Landkreis Cham	16,45	325,70
Landkreis Neumarkt i. d. Opf.	15,89	314,68
Landkreis Schwandorf	5,82	115,29
Summe	100	1980,23

Die auf die bayerischen Teilregionen entfallenden energetischen Potenziale sowie die daraus berechneten theoretischen Wasserstoffproduktionspotenziale sind in Tabelle 29 dargestellt. Die im Rahmen der Berechnung zunächst in TJ/a vorliegenden energetischen Teilpotenziale P_j wurden für die Ergebnistabelle in GWh/a umgerechnet.

Tabelle 29: Energetische Potenziale und theoretische Wasserstoffpotenziale aus Industrierestholz in den Teilregionen der bayerischen Projektregion

Stadt / Landkreis	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,IRH},j}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H2,IRH},j}$ [t/a]
Stadt Hof	12,41	130,36
Landkreis Hof	59,24	622,09
Landkreis Wunsiedel	15,17	159,27
Stadt Weiden	15,05	158,09
Landkreis Neustadt a.d.W.	53,24	559,05
Landkreis Tirschenreuth	106,91	1.122,69
Summe	262,02	2.751,55

Für die tschechische Projektregion wird das Potenzial aus Industrierestholz über Sägenebenprodukte abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 30 und 31 zusammengefasst. Ausgewiesen sind die aus der nationalen Holzverarbeitung abgeleitete regionale Verarbeitungsmenge, das daraus berechnete Volumen und die Masse der Sägewerksnebenprodukte sowie die entsprechenden Energie- und Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 30: Verarbeitete Holzmengen und Sägenebenprodukte in der tschechischen Projektregion

Verarbeitete Holzmenge Tschechien $V_{\text{verarb,CZ,2024}}$ [m³/a]	Verarbeitete Holzmenge Karlovarský kraj $V_{\text{verarb,KVK,2024}}$ [m³/a]	Sägenebenprodukte Karlovarský kraj $V_{\text{SNP,KVK,2024}}$ [m³/a]
13.274.673,00	146.021,40	58.408,56

Tabelle 31: Energie- und Wasserstoffpotenzial aus Sägenebenprodukten in der tschechischen Projektregion

Sägenebenproduktmasse $M_{\text{SNP,KVK,2024}}$ [t/a]	Energiepotenzial $Q_{\text{pot,SNP}}$ [GWh/a]	H2-Massenpotenzial $m_{\text{pot,H2,SNP}}$ [t/a]
29.204,28	116,82	1.226,70

Anhang A.5 Methodik und Eingangsdaten zur Potenzialermittlung aus Klärschlamm

Die Bildung des Mehrjahresmittels $\bar{M}_{TS,KS,j}$ erfolgt gemäß Gleichung (1).

Die Referenzkennwerte der Anlage beziehen sich auf einen Eingangsstrom mit 30 % TS. Da die regionalen Daten als Masse bei 100 % TS vorliegen, wird zur besseren Vergleichbarkeit zusätzlich die entsprechende Nassmasse bei 30 % TS berechnet.

$$\bar{M}_{30,KS,j} = \frac{\bar{M}_{TS,KS,j}}{0,30} \quad (38)$$

Aus den technischen Richtwerten der Referenzanlage wird ein TS-bezogener spezifischer Wasserstoffertrag abgeleitet. Die Richtwerte umfassen den Jahresinput $M_{30,ref}$ sowie die jährliche Wasserstoffenergiemenge $Q_{H_2,ref}$. Zunächst wird die zugehörige TS-Jahresmenge bestimmt.

$$M_{TS,ref} = 0,30 \cdot M_{30,ref} \quad (39)$$

Die jährliche Wasserstoffmasse ergibt sich aus der Energiemenge über den unteren Heizwert von Wasserstoff H_{u,H_2} .

$$m_{H_2,ref} = \frac{Q_{H_2,ref}}{H_{u,H_2}} \quad (40)$$

Damit folgt der TS-bezogene Ertrag:

$$Y_{H_2,TS} = \frac{m_{H_2,ref}}{M_{TS,ref}} \quad (41)$$

Aufgrund konfigurationsabhängiger Angaben sowie der variablen Substratqualität wird ein konservativer Ansatz über einen Minderungsfaktor $f_{kon} = 0,8$ angesetzt.

$$Y_{H_2,TS,kon} = f_{kon} \cdot Y_{H_2,TS} \quad \text{mit } f_{kon} = 0,8 \quad (42)$$

Das theoretische Wasserstoffpotenzial der Gebietseinheit j ergibt sich zu:

$$m_{pot,H_2,KS,j} = \bar{M}_{TS,KS,j} \cdot Y_{H_2,TS,kon} \quad (43)$$

Ergebnisse der Potenzialermittlung

Die Berechnung der regionalen Wasserstoffpotenziale erfolgt auf Basis der in [150] angegebenen technischen Richtwerte der Referenzanlage. Unter Verwendung des Referenzinputs $M_{30,ref} = 18.500 \text{ t/a}$ bei 30 % TS ergibt sich nach Gleichung (39) eine TS-bezogene Referenzmasse von $M_{TS,ref} = 5.550 \text{ t/a}$. Aus dem angegebenen Wasserstoffoutput von $Q_{H_2,ref} = 18,8 \text{ GWh/a}$ folgt eine jährliche Wasserstoffmasse von $m_{H_2,ref} = 564,06 \text{ t/a}$. Daraus resultiert ein TS-bezogener Wasserstoffenergieertrag von $Y_{H_2,TS} = 0,1016 \text{ t H}_2/\text{t TS}$. Unter Ansatz des Mindefaktors $f_{kon} = 0,8$ wird für die weitere Berechnung ein konservativer Ertrag von $Y_{H_2,TS,kon} = 0,0813 \text{ t H}_2/\text{t TS}$ verwendet.

Die Ergebnisse der Potenzialermittlung für Klärschlamm in den bayerischen Teilregionen sind in Tabelle 32 dargestellt. Ausgewiesen sind die Mehrjahresmittel der Klärschlammmenge in Trockensubstanz, die daraus abgeleitete äquivalente Nassmasse bei 30 % TS sowie die auf Basis des konservativen TS-bezogenen Wasserstoffenergieertrags $Y_{H_2,TS,kon} = 0,0813 \text{ t H}_2/\text{t TS}$ berechneten theoretischen Wasserstoffpotenziale.

Tabelle 32: Klärschlamm-mengen und theoretische Wasserstoffpotenziale der bayerischen Teilregionen

Stadt / Landkreis	Klärschlamm- menge $\bar{M}_{TS,KS,j}$ [t/a]	äquivalente Nassmasse $\bar{M}_{30,KS,j}$ [t/a]	H ₂ -Massen- potenzial $m_{pot,H_2,KS,j}$ [t/a]
Stadt & Landkreis Hof	4.017,13	13.390,43	326,59
Landkreis Wunsiedel	1.487,13	4.957,10	120,90
Stadt Weiden	885,50	2.951,67	71,99
Landkreis Neustadt a.d.W.	1.496,13	4.987,10	121,64
Landkreis Tirschenreuth	1.992,50	6.641,67	161,99
Summe	9.878,39	32.927,97	803,11

Die Ergebnisse für die tschechische Projektregion sind in Tabelle 33 zusammengefasst.

Tabelle 33: Klärschlamm-mengen und theoretische Wasserstoffpotenziale der tschechischen Projekt-region (Karlovarský kraj)

Klärschlamm-menge $\bar{M}_{TS,KS}$ [t/a]	äquivalente Nass-masse $\bar{M}_{30,KS}$ [t/a]	H ₂ -Massenpotenzial $m_{pot,H2,KS}$ [t/a]
3.421,50	11.405,00	278,17

8 Literaturverzeichnis

- [1] United Nations, „The Paris Agreement“. Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- [2] Europäische Kommission, „REPowerEU“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_de
- [3] Europäische Union, *Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj/deu>
- [4] Europäische Kommission, „Der europäische Grüne Deal“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de
- [5] „Kommission begrüßt Fertigstellung der wichtigsten ‚Fit für 55‘-Rechtsvorschriften – EU nun auf Kurs, die Ziele für 2030 zu übertreffen“. 9. Oktober 2023. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_23_4754
- [6] „Die Europäische Initiative für Wasserstoff-Backbone (EHB)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://ehb.eu/>
- [7] Europäische Kommission, „National energy and climate plans“. Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/implementation-eu-countries/energy-and-climate-governance-and-reporting/national-energy-and-climate-plans_en?prefLang=de
- [8] Ministerstvo průmyslu a obchodu, „Vodíková strategie ČR aktualizace 2024 schválena vládou“. 18. Juli 2024. Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://mpo.gov.cz/cz/prumysl/strategieke-projekty/vodikova-strategie-cr-aktualizace-2024-schvalena-vladou--282165/>
- [9] „Die Nationale Wasserstoffstrategie“. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Wasserstoff/Dossiers/wasserstoffstrategie.html>
- [10] „Zentrum Wasserstoff Bayern“. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.bayern/>
- [11] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Wasserstoffstrategie“. Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stmwi.bayern.de/energie/energiewende/wasserstoffstrategie/>
- [12] Europäische Union, *Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung)*, Bd. L 328. Europäische Union, 2018, S. 82–209.
- [13] Europäische Union, *Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates*, Nr. 2023/2413. 2023.

- [14] *Verordnung zur Neufassung der Siebenunddreißigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Anrechnung von strombasierten Kraftstoffen und mitverarbeiteten biogenen Ölen auf die Treibhausgasquote): 37. BImSchV.* 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bim-schv_37_2024/BJNR0830A0024.html
- [15] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg, *Delegierte Verordnung (EU) 2023/1184 der Kommission vom 10. Februar 2023 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates durch die Festlegung einer Unionsmethode mit detaillierten Vorschriften für die Erzeugung flüssiger oder gasförmiger erneuerbarer Kraftstoffe nicht biogenen Ursprungs für den Verkehr.* 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1184>
- [16] NOW GmbH, „Erneuerbare-Energien-Richtlinie III (RED III) - Ziele für erneuerbare Kraftstoffe im Verkehr“. Zugriffen: 14. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2024/04/NOW-Factsheet_REDIII.pdf
- [17] „Electricity Maps“. Zugriffen: 1. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://app.electricitymaps.com/map/all/monthly>
- [18] Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, L-2985 Luxemburg, *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) 2025/2359 DER KOMMISSION vom 8. Juli 2025 zur Ergänzung der Richtlinie (EU) 2024/1788 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung einer Methode zur Bewertung der Einsparungen an Treibhausgasemissionen durch kohlenstoffarme Brennstoffe.* Zugriffen: 12. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202502359
- [19] Europäische Kommission, „National plan of the Czech Republic in the area of energy and climate.“ Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://commission.europa.eu/publications/czechia-final-updated-necp-2021-2030-submitted-2024_en
- [20] „ReFuelEU aviation - Mobility and Transport - European Commission“. Zugriffen: 8. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueeu-aviation_en
- [21] „FAQ on ReFuelEU Aviation - Mobility and Transport - European Commission“. Zugriffen: 8. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/air/environment/refueeu-aviation/faq-refueeu-aviation_en
- [22] Ministerium für Umwelt CZ, *Gesetz zur Änderung des Gesetzes Nr. 201/2012 Sb., über den Schutz der Luft.* 2025. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2025-42>
- [23] Ministerstvo průmyslu a obchodu, *Gesetz zu unterstützten Energiequellen und zu Änderungen bestimmter Gesetze.* Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>
- [24] *Entwurf eines Gesetzes zur Beschleunigung der Verfügbarkeit von Wasserstoff und zur Änderung weiterer rechtlicher Rahmenbedingungen für den Wasserstoffhochlauf und weiterer energierechtlicher Vorschriften.* Zugriffen: 30. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://dserver.bundestag.de/btd/21/025/2102506.pdf>
- [25] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in*

- Gebäuden* (Gebäudeenergiegesetz - GEG). 2020. Zugriffen: 7. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/geg/inhalts_bersicht.html
- [26] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetz für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze (Wärmeplanungsgesetz - WPG)*. 2024. Zugriffen: 7. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/wpg/>
- [27] Bundesnetzagentur, „In dem Verwaltungsverfahren zur Festlegung vom Format der Fahrpläne für die Umstellung der Netzinfrastruktur auf die vollständige Versorgung der Anschlussnehmer mit Wasserstoff gemäß § 71k Gebäudeenergiegesetz (FAUNA)“. 2025. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Fahrplaene/_DL/FAUNA.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [28] „IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>
- [29] Europäische Kommission, „Large-scale Hydrogen Valley“. Zugriffen: 1. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/HORIZON-JU-CLEANH2-2025-06-01?isExactMatch=true&status=31094501,31094502,31094503&callIdentifier=HORIZON-JU-CLEANH2-2025&order=DESC&pageNumber=1&pageSize=50&sortBy=startDate>
- [30] Europäische Kommission, „Small-scale Hydrogen Valley“. Zugriffen: 1. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/HORIZON-JU-CLEANH2-2025-06-02?isExactMatch=true&status=31094501,31094502&callIdentifier=HORIZON-JU-CLEANH2-2025&order=DESC&pageNumber=1&pageSize=50&sortBy=startDate>
- [31] Czech Hydrogen Technology Platform, „Czech Hydrogen Technology Platform (HYTEP)“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hytep.cz/en/>
- [32] Odbor komunikace 01400, „Clean and sustainable transport. Government approves the update to the National Action Plan for Clean Mobility“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://mpo.gov.cz/en/guidepost/for-the-media/press-releases/clean-and-sustainable-transport--government-approves-the-update-to-the-national-action-plan-for-clean-mobility---282798/>
- [33] Ministry of Regional Development CZ, „Programmes“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dotaceeu.cz/en/evropske-fondy-v-cr/kohezni-politika-po-roce-2020/programy>
- [34] Ministry of Transport CZ, „New OPD calls for the support of construction of hydrogen filling stations for urban projects“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://md.gov.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Nove-vyzvy-OPD-na-podporu-vystavby-plnicich-stanic?lang=en-GB>
- [35] Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien, „Bundesförderung Industrie und Klimaschutz“. Zugriffen: 7. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/>

- [36] BMV, „Aufruf zur Antragseinreichung für die Förderung von Wasserstofftankstellen im Straßenverkehr in Verbindung mit Nutzfahrzeugen mit wasserstoffbasierten Antrieben (01/2026)“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ptj.de/foerdermoeglichkeiten/nip/hrs_nfz_2026
- [37] BMW, „CO₂-Differenzverträge (Klimaschutzverträge) für die Industrie“. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.co2-differenzvertraege.info/>
- [38] „Bayerisches Förderprogramm zum Aufbau einer Elektrolyseur-Infrastruktur in Bayern: BayFELI“. 12. Juli 2023. Zugriffen: 7. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.verkuendung-bayern.de/baymbf/2023-358/>
- [39] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stmwi.bayern.de/foerderungen/wasserstoffbetriebene-nutzfahrzeuge/>
- [40] Bayerisches Landesamt für Statistik, „Rund sieben von zehn Haushalte in Bayern heizen im Jahr 2022 mit Gas oder Öl“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistik.bayern.de/presse/mitteilungen/2023/pm105/index.html>
- [41] Czech Statistical Office, „Die zentrale Fernwärme erwärmt fast jede zweite bewohnte Wohnung in unserer Region, Gas wird von mehr als einem Viertel der bewohnten Wohnhäuser als Hauptwärmequelle genutzt“. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://csu.gov.cz/kvk/ustredni-dalkove-topeni-vytapi-v-nasem-kraji-temer-kazdy-druhy-obydleny-byt-plyn-vyuziva-jako-hlavni-zdroj-tepla-vice-nez-ctvrtina-obydlenych-bytu-v-regionu>
- [42] Institut für Energietechnik IfE GmbH, „Digitaler Energienutzungsplan Landkreis Neustadt a. d. Waldnaab“. 2022. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.neustadt.de/landratsamt/abteilungen-und-sachgebiete/kreisentwicklung-wirtschaftsfoerderung-und-naturpark/kreisentwicklung/energie/energieprojekte/energienutzungsplan/abschlussbericht-denp-lkr-new.pdf?cid=xm>
- [43] Lukas Faltenbacher und Energie-Technologisches Zentrum Nordoberpfalz GmbH, „Integriertes Klimaschutzkonzept für die Kommunen des Landkreises Tirschenreuth“. 2025. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kreis-tir.de/fileadmin/user_upload/Landkreis/Energie___Klima/250130_Klimaschutzkonzept.pdf
- [44] ENERGIEAGENTUR nordbayern GmbH, „Energie- und Klimaschutz Bericht Landkreis Wunsiedel i. Fichtelgebirge“. 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://freiraum-fichtelgebirge.de/app/uploads/2024/09/Zwischenbericht-EEA-2023.pdf>
- [45] EGS-plan Ingenieurgesellschaft für Energie-, Gebäude- und Solartechnik mbH, „Kommunale Wärmeplanung Hof“. 27. Mai 2025. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.hof.de/fileadmin/user_upload/umwelt-wirtschaft/klimaschutz/2025-05-27_HP_UPA__Zielszenario_Hof_E24023.pdf
- [46] Julian Hollstegge, David Kienle, Matthias Rösch, Wolfgang Seitz, und TEAM 4 Bauernschmitt & Wehner, „Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Weiden i.d.OPf.“ Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.weiden.de/fileadmin/user_upload/C_Umwelt-Gesundheit-Verbraucher/C08_Klimaschutz/klimaschutzkonzept_barrierearm.pdf
- [47] Stadt Wunsiedel, „Klimaneutrale Wärmeversorgung“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wunsiedel.de/seite/826819/klimaneutrale-w%C3%A4rmeversorgung.html>

- [48] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, „Struktur der Stromerzeugung in Deutschland 2025“. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/AGEB_Infografik_02_2025_Stromerzeugung_2025.pdf
- [49] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Energiedaten“. Zugriffen: 4. Mai 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stmwi.bayern.de/energie/energiedaten/>
- [50] Czech Statistical Office, „Grundlegende Trends der demografischen, sozialen und wirtschaftlichen Entwicklung des Karlsbader Kreises 2024“. 2024. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://csu.gov.cz/docs/107508/2e20a1b0-3152-4885-82cd-02f76f4ee483/33012425c.pdf?version=1.0>
- [51] „Wasserstoffkernnetz“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html>
- [52] CGHI, „CGHI vision“. Zugriffen: 9. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.cghi.eu/cghi-project/>
- [53] NET4GAS, s.r.o., „Czech Hydrogen Backbone WEST“. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.net4gas.cz/en/projects/hydrogen-projects/czech-hydrogen-backbone-west>
- [54] Karlovarský kraj, „Workshop představil možnosti využití plynárenské soustavy pro zásobování Karlovarského kraje vodíkem“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kr-karlovarsky.cz/aktuality/workshop-predstavil-moznosti-vyuziti-plynarenske-soustavy-pro-zasobovani-karlovarskeho-kraje-vodikem>
- [55] Stadt Weiden, „Der Wirtschaftsstandort Weiden“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.weiden.de/wirtschaft/wirtschaftsstandort/wirtschaftsstandort-weiden?>
- [56] Karlovarský kraj, „Strategie, koncepte a plány“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kr-karlovarsky.cz/karlovarsky-kraj/strategie-koncepce-plany>
- [57] Institut für Wasserstoff- und Energietechnik der Hochschule Hof (iwe), „HyBaBo“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://iwe.hof-university.de/institut-fuer-wasserstoff-und-energietechnik/projekte/hybabo/>
- [58] Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden, „Projekt HyBaBo“. Zugriffen: 26. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oth-aw.de/forschung/forschungsprofil/forschungs-und-entwicklungsprojekte/hybabo/hybabo/>
- [59] T. Gollwitzer u. a., „NEW HyPerspectives“, Jan. 2023. Zugriffen: 7. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://wasserstoff.new-perspektiven.de/wp-content/uploads/2023/07/20230705_NEW_Abschlussbericht-HyPerspectives-Web-DS-mit-Anhaengen.pdf
- [60] Bayerische Vermessungsverwaltung, „BayernAtlas“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://atlas.bayern.de>
- [61] Ředitelství silnic a dálnic s.p., „Pro úsek D6 Olšová Vrata – Žalmanov bylo zahájeno řízení o povolení záměru“. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://kraje.rsd.cz/karlovarsky/pro-usek-d6-olsova-vrata-zalmanov-bylo-zahajeno-rizeni-o-povoleni-zameru/>
- [62] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „Seit dem 1. Oktober tanken Kundinnen und Kunden an den H2 MOBILITY-Stationen in Dresden und Berg bei Hof regenerativen

- Wasserstoff (H₂). Der Wasserstoff stammt von Rießner Gase und wird in einer PEM-Elektrolyse hergestellt.“ Zugriffen: 30. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.live/press/gruener-wasserstoff-aus-wind-und-sonnenergieh2-mobility-deutschland-erhaelt-erste-lieferung-von-riessner-gase/>
- [63] Europäische Union, *Verordnung (EU) 2024/1679 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über Leitlinien der Union für den Aufbau des Transeuropäischen Verkehrsnetzes, zur Änderung der Verordnungen (EU) 2021/1153 und (EU) Nr. 913/2010 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 1315/2013*Text von Bedeutung für den EWR. Zugriffen: 25. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1679/corrigendum/2025-11-14/oj>
- [64] Schnellmann, S., Gafner, K., Tschumi, J., Müller, D., Coleman, D., und Bärtsch, C., „Machbarkeitsstudie über den Einsatz von emissionsfreien Fahrzeugen für das Expressverkehrsnetz Nordostbayern und das Regionalverkehrsnetz Oberfranken“. 2024. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://beg.bahnland-bayern.de/de/medien/themen/Machbarkeitsstudie-zum-Einsatz-emissionsfreier-Fahrzeuge-auf-der-Oberfranken-Achse>
- [65] Federico Zenith; Andreas D. Landmark; Line Skeidsvoll, „Regional Hydrogen Trains on Czech Railways – Techno-economic study (RegioHyt)“. 2024. Zugriffen: 9. April 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ujv.cz/file/edee/2024/07/1_regiohyt_complete_final.pdf
- [66] A. Brinner und Witt Ulrike, „Elektrolyse – Basics III: Funktionsprinzip der Elektrolyse“. Zugriffen: 7. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.zsw-bw.de/uploads/media/20210331_ZSW_Elektrolyse_Basics_III_Funktionsprinzip.pdf
- [67] Zösch, Norbert, „Sonne, Wind & mehr“. 30. März 2023.
- [68] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Biomasse im Fokus“, [energieforschung.de](https://www.energieforschung.de). Zugriffen: 23. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/news/2022/biomasse-start-wasserstoff-projekte-bmwk-kreislaufwirtschaft-wertschoepfung>
- [69] R. Kumar, A. Kumar, und A. Pal, „Overview of hydrogen production from biogas reforming: Technological advancement“, *Int. J. Hydrog. Energy*, Bd. 47, Nr. 82, S. 34831–34855, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.059.
- [70] „Fraunhofer-Verfahren erhöht Methanausbeute von Biogasanlagen“, Fraunhofer-Gesellschaft. Zugriffen: 9. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2022/juni-2022/fraunhofer-verfahren-erhoeht-methanausbeute-von-biogasanlagen.html>
- [71] G. Langhans, F. Scholwin, M. Nelles, und S. Weinrich, *Handbuch zur Bilanzierung von Biogasanlagen für Ingenieure - Band II: Grundlagen und Methoden für die Bewertung und Bilanzierung in der Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025. doi: 10.1007/978-3-658-44323-8.
- [72] Gradel, A., Seibert, T., Oertel, E., und Gretsche, L., „Potenzialstudie für Biomethan- oder Wasserstoffproduktion aus biogenen Reststoffen aus der Tierhaltung in der Region Hochfranken“, BtX energy GmbH, Hof, Potenzialstudie, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://btx-energy.de/wp-content/uploads/2024/02/Potenzialstudie-Hochfranken.pdf>

- [73] J. Böttcher, Hrsg., *Management von Biogas-Projekten: Rechtliche, technische und wirtschaftliche Aspekte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-20956-7.
- [74] D. Singh, P. Sirini, und L. Lombardi, „Review of Reforming Processes for the Production of Green Hydrogen from Landfill Gas“, *Energies*, Bd. 18, Nr. 1, S. 15, Dez. 2024, doi: 10.3390/en18010015.
- [75] S. Gellert, *Thermochemische Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse unter besonderer Berücksichtigung der Rohgasreformierung*, 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2013.
- [76] J. R. C. Rey u. a., „Renewable Hydrogen from Biomass: Technological Pathways and Economic Perspectives“, *Energies*, Bd. 17, Nr. 14, S. 3530, Juli 2024, doi: 10.3390/en17143530.
- [77] L. Jara-Cobos, M. Abril-González, und V. Pinos-Vélez, „Production of Hydrogen from Lignocellulosic Biomass: A Review of Technologies“, *Catalysts*, Bd. 13, Nr. 4, S. 766, Apr. 2023, doi: 10.3390/catal13040766.
- [78] Lundgren, Joakim; Vreugdenhil, Berend; Ganjkhanlou, Yadi; Baldwin, Robert, „Biomass gasification for hydrogen production“, IEA Bioenergy, Technical report, Feb. 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/biomass-gasification-for-hydrogen-production/>
- [79] A. Briones-Hidrovo, J. Copa, L. A. C. Tarelho, C. Gonçalves, T. Pacheco Da Costa, und A. C. Dias, „Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion“, *J. Clean. Prod.*, Bd. 289, S. 125680, März 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125680.
- [80] J. Alvarado-Flores u. a., „Thermochemical Production of Hydrogen from Biomass: Pyrolysis and Gasification“, *Energies*, Bd. 17, Nr. 2, S. 537, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17020537.
- [81] K. Zayer Kabeh, M. Prussi, und D. Chiaramonti, „Advances in Bio-Hydrogen Production: A Critical Review of Pyrolysis Gas Reforming“, *Appl. Sci.*, Bd. 15, Nr. 7, S. 3995, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15073995.
- [82] C. Synwoldt und D. Novak, *Wasserstoff: Technik - Projekte - Politik*. Weinheim: Wiley-VCH, 2023.
- [83] „Working Group Hydrothermal Processes“, Deutsches Biomasseforschungszentrum. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dbfz.de/en/working-group-hydrothermal-processes>
- [84] M. Abawalo, K. Pikoń, M. Landrat, und W. Ścierański, „Hydrogen Production from Bio-waste: A Systematic Review of Conversion Technologies, Environmental Impacts, and Future Perspectives“, *Energies*, Bd. 18, Nr. 17, S. 4520, Aug. 2025, doi: 10.3390/en18174520.
- [85] M. Cavali u. a., „Hydrothermal carbonization – A critical overview of its environmental and economic sustainability“, *J. Clean. Prod.*, Bd. 491, S. 144838, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.144838.
- [86] G. Ciceri, M. Hernandez Latorre, F. Fionnuala, und M. Kumar Mediboyina, „Hydrothermal Carbonization (HTC) : Valorisation of organic waste and sludges for hydrochar production of biofertilizers“, IEA BIOENERGY, 978-1-910154-90-8 (ISBN), 2021.

- Zugegriffen: 4. November 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-79093>
- [87] bluefl_webmaster-25, „blueFLUX-Prozess: Energie aus Reststoffen erzeugen“, blueFLUX Energy AG - Wirklich nachhaltige Energie. Zugegriffen: 8. Dezember 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://bluefluxenergy.de/prozess/>
- [88] M. Kuhnert und FORVIA, „Hydrogen Storage Container“. 8. Dezember 2022.
- [89] Anlagenbau Neundörfer GmbH, „Trailerabfüllung Hydrosponder“. 23. April 2021.
- [90] BMW, „Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie: NWS 2023“. 26. Juli 2023. Zugegriffen: 30. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschreibung-nationale-wasserstoffstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [91] Czech Statistical Office, „STATISTICAL YEARBOOK OF THE KARLOVARSKÝ REGION“. 2024. Zugegriffen: 24. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://csu.gov.cz/docs/107508/6f21bc5a-2392-1716-de90-f5fb3735bc36/33008324.pdf?version=1.8>
- [92] Kraftfahrt-Bundesamt, „Zulassungsbezirke und Gemeinden 2024“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html
- [93] Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, „Klimapolitik in Bayern“. Zugegriffen: 4. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stmuv.bayern.de/themen/klimaschutz/klimaschutzpolitik/index.htm>
- [94] Die Bundesregierung, „Nachhaltige Mobilität“. Zugegriffen: 4. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/nachhaltige-mobilitaet-2044132>
- [95] Umweltbundesamt, Hrsg., „Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt“. März 2024. Zugegriffen: 4. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2024-ergebnisse-kompakt>
- [96] Umweltbundesamt, „Fahrleistungen, Verkehrsleistung und Modal Split“. Zugegriffen: 4. April 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/fahrleistungen-verkehrsaufwand-modal-split#fahrleistung-im-personen-und-guterverkehr>
- [97] Prognos, Öko-Institut, und Wuppertal-Institut, „Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann“. Juni 2021. Zugegriffen: 13. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_231_KNDE2045_Langfassung_DE_WEB.pdf
- [98] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „EU legt klare Regeln für die Senkung des Energieverbrauchs fest“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/03/20230310-eu-legt-klare-regeln-fur-die-senkung-des-energieverbrauchs-fest.html>
- [99] HORN Glass Industries, „Melting process in HORN hybrid furnaces“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.hornglass.com/company/news/detail/melting-process-in-horn-hybrid-furnaces#:~:text=This%20increases%20the%20energy%20flexibility,be%20reduced%20up%20to%2050>

- [100] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI und Consentec GmbH, „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 Kurzbericht: 3 Hauptszenarien“. 21. Juni 2021. Zugriffen: 28. Mai 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2021/LFS_Kurzbericht.pdf
- [101] Kraftfahrt-Bundesamt, „Fahrzeuge - Bestand“. Zugriffen: 20. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html
- [102] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „H2 tanken“. Zugriffen: 20. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://h2.live/>
- [103] WUN H2 GmbH, „Willkommen bei der größten Elektrolyseanlage Bayerns“. Zugriffen: 20. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wun-h2.de/>
- [104] Radio Prague International, „Westböhmisches Hranice wird erste Gemeinde mit Wasserstoffversorgung“. [Online]. Verfügbar unter: <https://deutsch.radio.cz/westboehmisches-hranice-wird-erste-gemeinde-mit-wasserstoffversorgung-8821451>
- [105] Bayernwerk Netz GmbH, „Baukostenzuschuss 2026“. 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bayernwerk-netz.de/content/dam/revu-global/bayernwerk-netz/files/energie-anschiessen/anschluss-mittel-und-hochspannung/bayernwerk_netz_baukostenzuschuss_2026.pdf
- [106] BMWK, „Richtlinie für Beihilfen für Unternehmen in Sektoren beziehungsweise Teilspektoren, bei denen angenommen wird, dass angesichts der mit den EU-ETS-Zertifikaten verbundenen Kosten, die auf den Strompreis abgewälzt werden, ein erhebliches Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen besteht (Beihilfen für indirekte CO₂-Kosten) für die Abrechnungsjahre 2023 bis 2030“. 13. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/dphpaDtrbve3zAhLMUF/content/dphpaDtrbve3zAhLMUF/BAnz%20AT%2026.03.2024%20B2.pdf?inline>
- [107] emobility.energy GmbH, „THG-Quote: Preisentwicklung und aktueller Preis“. Zugriffen: 16. April 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.emobility.energy/thg/thg-quote-preisentwicklung?seo_lead=aHR0cHM6Ly93d3cuZ29vZ2xLLmNvbS98MTc0NDgxODE3MDU0OA%3D%3D#
- [108] „Statistik kommunal für Bayern“. Zugriffen: 4. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.statistik.bayern.de/produkte/statistik_kommunal/
- [109] Český statistický úřad, „Statistická ročenka Karlovarského kraje 2023 / Statistical Yearbook of the Karlovarský Region 2023“, Český statistický úřad, Karlovy Vary, 978-80-250-3335-7, Dez. 2023.
- [110] Český statistický úřad, *Statistická ročenka Karlovarského kraje 2024 / Statistical Yearbook of the Karlovarský Region 2024*. Karlovy Vary: Český statistický úřad, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://csu.gov.cz/docs/107508/6f21bc5a-2392-1716-de90-f5fb3735bc36/33008324.pdf?version=1.8>
- [111] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Faustzahlen. Zugriffen: 11. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen>
- [112] KTBL, „Großvieheinheitenrechner“, KTBL Daten. Zugriffen: 11. Dezember 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://daten.ktbl.de/gvrechener/gvHome.do>

- [113] Bundesrepublik Deutschland, *Kreislaufwirtschaftsgesetz*. 2012. Zugriffen: 8. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/___3.html
- [114] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), „Hausmüll in Bayern - Bilanzen 2023“, Augsburg, LfU, Referat 31, Nov. 2024.
- [115] Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), „Behandlung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern“, Bayerisches Landesamt für Umwelt. Zugriffen: 5. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.lfu.bayern.de/abfall/bioabfall_gruengut/index.htm#:~:text=Definition%20Bioabf%C3%A4lle,Fraktion%20des%20Hausm%C3%BClls%20%3D%20Biotonneninhalte\).](https://www.lfu.bayern.de/abfall/bioabfall_gruengut/index.htm#:~:text=Definition%20Bioabf%C3%A4lle,Fraktion%20des%20Hausm%C3%BClls%20%3D%20Biotonneninhalte).)
- [116] Krajský úřad Karlovarského kraje, „Plán odpadového hospodářství Karlovarského kraje: Analytická část. Na období 2016–2025 s výhledem do roku 2035. Aktualizace 2023“, Krajský úřad Karlovarského kraje, Odbor životního prostředí a zemědělství, Karlovy Vary, 2023.
- [117] *Commission Decision of 3 May 2000 replacing Decision 94/3/EC establishing a list of wastes pursuant to Article 1(a) of Council Directive 75/442/EEC on waste and Council Decision 94/904/EC establishing a list of hazardous waste pursuant to Article 1(4) of Council Directive 91/689/EEC on hazardous waste (notified under document number C(2000) 1147) (Text with EEA relevance) (2000/532/EC)*. 2015. Zugriffen: 19. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/532/2015-06-01>
- [118] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2022: Struktur- und abfallwirtschaftliche Daten der Körperschaften“, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Germany, 2022. Zugriffen: 17. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.abfallbilanz.bayern.de/doc/2022/KSDaten.pdf>
- [119] ARCHEA Service GmbH, „Gaserträge und Nährstoffgehalte - Abfall“. Zugriffen: 19. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.archea-biogas.de/_mediafiles/9-substrate.pdf
- [120] H.-J. Dornbusch u. a., „Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestimmung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Abschlussbericht, Juni 2020.
- [121] B. Krautkremer u. a., „Biogaspotenzial Bayern: Endbericht“, Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE; Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL); Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Kassel; Freising; Witzenhausen, Mai 2024.
- [122] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2023: Struktur- und abfallwirtschaftliche Daten der Körperschaften“, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, Germany, 2023. Zugriffen: 17. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.abfallbilanz.bayern.de/doc/2023/KSDaten.pdf>
- [123] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2018.
- [124] „KTBL-Biogasrechner“. Zugriffen: 16. Juni 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do>

- [125] Y. Gao u. a., „Syngas Production from Biomass Gasification: Influences of Feedstock Properties, Reactor Type, and Reaction Parameters“, *ACS Omega*, Bd. 8, Nr. 35, S. 31620–31631, Sep. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c03050.
- [126] S. Mishra und R. K. Upadhyay, „Review on biomass gasification: Gasifiers, gasifying mediums, and operational parameters“, *Mater. Sci. Energy Technol.*, Bd. 4, S. 329–340, 2021, doi: 10.1016/j.mset.2021.08.009.
- [127] BtX energy GmbH und A.H.T. Syngas Technology N.V., „BiDRoGen (Biomasse Dezentral Refomieren zur oertlichen Wasserstoff-Gewinnung)“, BtX energy GmbH, Bindlach, BMW-Fkz-03EI5438A, Feb. 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://btx-energy.de/wp-content/uploads/2026/02/BMW-Fkz-03EI5438A_BiDRoGen.pdf
- [128] „§ 2 AltholzV - Einzelnorm“. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/__2.html
- [129] Landkreis Tirschenreuth, „Abfallwirtschaft – Jahresbericht 2021 (Stand: Februar 2022)“, Feb. 2022. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.awz-tir.de/fileadmin/user_upload_awz/Verwaltung/Abfallbericht_2021.pdf
- [130] S. Flamme, S. Hams, J. Bischoff, und C. Fricke, „Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung: Abschlussbericht“, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 1862–4804, Juni 2020.
- [131] J. Metsch, S. Hiendlmeier, H. Borchert, und M. Genßler, „Energieholzmarkt Bayern 2022: Untersuchung des Energieholzmarktes in Bayern – Eine Analyse von Aufkommen und Verbrauch“, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Freising, Abschlussbericht 07/2024, Juli 2024. Zugegriffen: 24. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://s.bayern.de/energieholzmarktbericht_2022
- [132] Umweltbundesamt, „Waldrestholz — SNS UMTHEs“, Umweltthesaurus (UMTHES). Zugegriffen: 27. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://sns.uba.de/umthes/de/labels/TH_00607772.html
- [133] H. Hartmann, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, und Deutschland, Hrsg., *Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen: Leitfaden*, 3., Vollst. überarb. Aufl. in bioenergie.fnr.de. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, 2013.
- [134] Drossart, Inga und Mühlhoff, Jörg, „Holzenergie: Bedeutung, Potenziale, Herausforderungen“, Agentur für Erneuerbare Energien e. V., Berlin, 66, Apr. 2013.
- [135] „Schwachholz und Durchforstungsholz“, HOLZ VON HIER. Zugegriffen: 27. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.holz-von-hier.eu/waldvielfalt/holzvermarktung/schwachholz-und-durchforstungsholz/>
- [136] Fischer, Ute, Schrammek, Alexander, Seitz, Wolfgang, Stenglein, Christian, und Ruckdeschel, Markus, „Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Hof 2020“, Stadt Hof, Hof, Kulmbach, Nürnberg, Dez. 2020.
- [137] T. Schröder, *Simultane Planung von Standort, Kapazität und Konfiguration von Bio-raffinerien*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2017.
- [138] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, „Waldfläche und Holzbodenfläche insgesamt und nach Eigentumsarten (Bayern und Regierungsbezirke)“. Zugegriffen: 27. August 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundeswaldinventur.bayern.de/114701/index.php>

- [139] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., „Potenzialatlas Bioenergie in den Bundesländern“, Gülzow, Deutschland, Jan. 2013. Zugriffen: 22. Januar 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/240.AEE_Potenzialatlas_Bioenergie_Einleitung_jan13.pdf
- [140] M. Knauf, R. Hunkemöller, S. Friedrich, W. Mai, H. Borchert, und J. Bauer, „Clusterstudie Forst, Holz und Papier in Bayern 2015: Abschlussbericht, Langfassung“, Freising, Juni 2016.
- [141] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008)“, Statistisches Bundesamt (Destatis). Zugriffen: 26. Mai 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2008.html>
- [142] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, „Beschäftigte und Umsätze“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/betriebswirtschaft/050299/index.php>
- [143] Bundesagentur für Arbeit, „Faktencheck zum Arbeitsmarkt - Arbeitsmarktmonitor“. Zugriffen: 13. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://arbeitsmarktmonitor.arbeitsagentur.de/faktencheck/regionalstruktur/tabelle/515/2024/employrate/?r=>
- [144] Universität Westböhmen in Pilsen (ZČU Pilsen), „Auskünfte zu biogenen Reststoffen in der Region Karlsbad (Karlovarský kraj); (E-Mail-Auskunft, unveröffentlicht; im Projektkontext weitergeleitet)“, Jan. 2026.
- [145] L. Eltrop, Universität Stuttgart, und Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Hrsg., *Leitfaden feste Biobrennstoffe: Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen im mittleren und großen Leistungsbereich*, 4., Vollst. überarb. Aufl. Gülzow-Prüzen: FNR, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., 2014.
- [146] M. Dettenhofer, P. Zedníček, D. Milerová Prášková, und G. Sakellaris, „National Bioeconomy Dossier: Czech Republic“, CEITEC, Dez. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cei.int/sites/default/files/2022-04/CELEBIO_%20Bioeconomy%20Dossier_Czech%20Republic.pdf
- [147] Vereinte Nationen, *Forest product conversion factors for the UNECE region*. in Geneva timber and forest discussion paper, no. 49. Geneva: United Nations, 2010.
- [148] Lesy České republiky, „Dřezozpracující kapacity v ČR (podle informací LČR)“. Lesy České republiky, s. p., Hradec Králové, 31. August 2025. Zugriffen: 5. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://lesy.cz/wp-content/uploads/2025/11/tabulka-databaze-web-24112025.xlsx>
- [149] s. p. Lesy České republiky, „Zjištění potenciálu dřezozpracujících podniků“, Lesy České republiky, s.p., Nov. 2015. Zugriffen: 5. Februar 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://lesy.cz/wp-content/uploads/2016/12/zajisteni-potencialu-drezozpracujicich-podniku-11-2015.pdf>
- [150] blueFLUX Energy AG, „Grüner Wasserstoff mit FLUXone Hydro“, blueFLUX. Zugriffen: 24. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://bluefluxenergy.de/anlage/fluxone-hydro/>
- [151] Bundesnetzagentur, „Bundesnetzagentur legt Hoch-lauf-ent-gelt für das Wasserstoff-Kern-netz fest“. Zugriffen: 27. März 2026. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/20250714_Hochlauf.html

