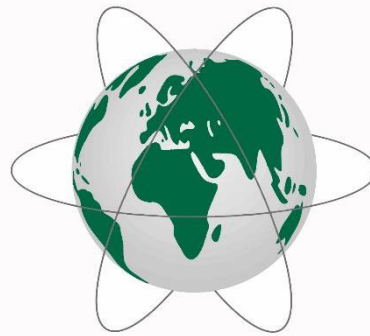




UNIGIS

Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

„Räumliche Analyse des Fernleitungsnetzes Erdgas zur Identifikation integrativer Standorte für die Einspeisung von grünem Wasserstoff“

vorgelegt von

Patric Wöhrle

103604, UNIGIS MSc Jahrgang 2014

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Gutachter:

Ao. Univ. Prof. Dr. Josef Strobl

Wiesbaden, 19.08.2016

Dr. Thomas Nietsch
ABO Wind AG
Unter den Eichen 7
65195 Wiesbaden
Deutschland
Tel. +49 (0)611/ 26 765 - 0
Fax +49 (0)611/ 26 765 – 599
Durchwahl: 0611 / 26765-576
Thomas.Nietsch@abo-wind.de

17. August 2016

Sperrvermerk

Sehr geehrte Damen und Herren,

Die vorliegende Arbeit beinhaltet interne vertrauliche Informationen der Firma ABO Wind AG. Die Weitergabe des Inhalts der Arbeit im Gesamten oder in Teilen sowie das Anfertigen von Kopien oder Abschriften - auch in digitaler Form - sind grundsätzlich untersagt. Ausnahmen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der Firma ABO Wind AG. Dieser Sperrvermerk gilt für die nächsten 5 Jahre. Die sich aus diesem Sperrvermerk ergebenden Einschränkungen entfallen nach Ablauf dieses Zeitraums.

Mit freundlichen Grüßen



Dr. Thomas Nietsch
Abteilungsleiter Zukunftsenergien
ABO Wind AG

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der H2BZ-Initiative Hessen finanziell gefördert, hierfür vielen herzlichen Dank.

Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen, als die im Literaturverzeichnis angegebenen, Quellen benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht. Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Querverweis versehen. Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

Wiesbaden, den 19.08.2016

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation von Standorten zur Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien (grünem Wasserstoff) mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) auf Grundlage von vier Szenarien. An diesen Standorten soll eine Weiterverwendung des grünen Wasserstoffs sowohl in der Mobilität als auch in Form einer Energiespeicherung durch eine Einspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas ermöglicht werden. Damit kann der Ausbau der Stromnetze im Rahmen der Energiewende entlastet und zugleich die Emissionen im Verkehr reduziert werden.

Des Weiteren wird das Einspeise- und Transportpotenzial entlang ausgewählter von Norden nach Süden führender Erdgas-Pipelines ermittelt. Darüber hinaus wird ein Konzept über eine an der Bundesautobahn A7 entlang führende Wasserstoff-Pipeline, deren Tankstellen mit lokal erzeugtem grünem Wasserstoff versorgt werden, entworfen.

Insgesamt kommen 431 Standorte für den oben dargelegten Zweck in Frage. Mit Hilfe dieser Standorte ist ein Wasserstofftransport über die zwei ausgewählten Erdgas-Pipelines von 22.410 Nm³/h und 34.380 Nm³/h möglich. Entlang der Bundesautobahn A7 können bis zu 150 Tankstellen mit grünem Wasserstoff versorgt werden, wobei lediglich an 78, bedingt durch die Entfernung der Tankstellen zueinander, ein Elektrolyseur installiert werden müsste.

Inhalt

Danksagung	3
Erklärung der eigenständigen Abfassung der Arbeit.....	4
Zusammenfassung.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis	11
1. Einleitung.....	12
1.1. Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	13
1.2. Planung von Windenergieanlagen.....	15
1.3. Wasserstoffanwendungen	17
1.4. Rechtliche und technische Hintergründe der Wasserstoffeinspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas	19
1.5. Transport von Wasserstoff	22
1.6. Wasserstoff für die Mobilität	23
1.7. Gegenstand dieser Arbeit	25
2. Methodik.....	26
2.1. Kriterien zur Identifikation von Standorten zur Einspeisung von Wasserstoff aus Windenergie in das Fernleitungsnetz Erdgas	26
2.1.1. Darstellung und Definition eines integrativen Konzeptes.....	26
2.1.2. Darstellung und Definition der Szenarien	28
2.1.3. Aufbau der Datengrundlage	34
2.2. Identifikation potenzieller Power to Gas– Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	38
2.2.1. Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas.....	38
2.2.2. Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas.....	47

2.3.	Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes ...	52
2.3.1.	Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden	53
2.3.2.	Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7 ...	56
3.	Darstellung der Ergebnisse	58
3.1.	Identifikation potenzieller Power to Gas-Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	58
3.1.1.	Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	58
3.1.2.	Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	66
3.2.	Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes ...	88
3.2.1.	Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden	88
3.2.2.	Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7 ...	89
4.	Diskussion	94
4.1.	Identifikation potenzieller Power to Gas-Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	94
4.1.1.	Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	97
4.1.2.	Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas	98
4.2.	Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes ...	99
4.2.1.	Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden	99
4.2.2.	Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7.	100
4.3.	Ausblick	100
Literaturverzeichnis.....		Fehler! Textmarke nicht definiert.
Anhang		111

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer PEM- Elektrolysezelle (Smolinka et al. 2011), verändert von Wöhrle	14
Abbildung 2: Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff, (Deutsche Energie- Agentur GmbH (dena) 2015).....	18
Abbildung 3: Physischer Lastfluss am Netzknoten Basel RC Exit in kWh/h, (terranets BW GmbH 2014), eigene Darstellung	21
Abbildung 4: Physischer Lastfluss in kWh/h der MEGAL- Pipeline in Medelsheim, (Open Grid Europe GmbH 2016), eigene Darstellung	22
Abbildung 5: Standorte der im Rahmen der NIP geförderten ersten 50 Wasserstofftankstellen, (NOW GmbH 2016)	24
Abbildung 6: Schema integratives Energiekonzept (ABO Wind AG 2015, S. 2), verändert von Wöhrle	26
Abbildung 7: Mindestkriterien der integrativen Standorte in Abhängig nach dem Standorttyp, eigene Darstellung	29
Abbildung 8: Darstellung einer 5-/3-Ellipse mit sieben Windenergieanlagen (Kopp 2015).....	33
Abbildung 9: Schema INNER JOIN (Obe und Hsu 2015), eigene Darstellung	39
Abbildung 10: Schema LEFT JOIN (Obe und Hsu 2015), eigene Darstellung.....	40
Abbildung 11: Vereinfachtes Flussdiagramm zur Identifikation integrativer Standorte, eigene Darstellung.....	43
Abbildung 12: Vereinfachtes Flussdiagramm zur Klassifikation der integrativen Standorte und zur Auswahl des optimalen Standortes im Fall räumlicher Konkurrenz, eigene Darstellung.....	48
Abbildung 13: Verlauf ausgewählter Erdgas- Pipelines, eigene Darstellung	53
Abbildung 14: Verlauf der Bundesautobahn A7, eigene Darstellung.....	56
Abbildung 15: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario A.1, eigene Darstellung	59
Abbildung 16: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario A.2, eigene Darstellung	61
Abbildung 17: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario B.1, eigene Darstellung.....	63

Abbildung 18: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario B.2, eigene Darstellung	65
Abbildung 19: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.1, eigene Darstellung	68
Abbildung 20: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario A.1, eigene Darstellung	70
Abbildung 21: Exemplarische Darstellung zweier integrativer Tankstellen entlang der A45 in Hessen, eigene Darstellung	71
Abbildung 22: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.2, eigene Darstellung	73
Abbildung 23: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario A.2, eigene Darstellung	75
Abbildung 24: Exemplarische Darstellung einer integrativen Biogaseinspeiseanlage, die gleichzeitig neben der Wasserstoffeinspeisung auch eine Tankstelle mit Wasserstoff versorgen kann, eigene Darstellung	77
Abbildung 25: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.2, eigene Darstellung	79
Abbildung 26: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario B.1, eigene Darstellung	81
Abbildung 27: Exemplarische Darstellung einer integrativen Tankstelle mit einer Kläranlage in angrenzender Kläranlage, eigene Darstellung	82
Abbildung 28: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.2, eigene Darstellung	84
Abbildung 29: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario B.2, eigene Darstellung	86
Abbildung 30: Exemplarische Darstellung einer integrativen Tankstelle angrenzend an eine Bundesautobahn in Bau, eigene Darstellung	87
Abbildung 31: Netzwerk integrativer Standorte entlang der Bundesautobahn A7 nach Szenario B.2, eigene Darstellung	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten Referenzanlage (SIEMENS AG 2016)	29
Tabelle 2: Darstellung der Szenarien	34
Tabelle 3: Klassifikation der Standorte, eigene Darstellung.....	49
Tabelle 4: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario A.1.....	60
Tabelle 5: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario A.2.....	62
Tabelle 6: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario B.1	64
Tabelle 7: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario B.2.....	66
Tabelle 8: Anzahl der Standorte nach Szenario A.1 gruppiert nach Typ und Klasse	67
Tabelle 9: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario A.1	69
Tabelle 10: Anzahl der Standorte nach Szenario A.2 gruppiert nach Typ und Klasse	72
Tabelle 11: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario A.2	74
Tabelle 12: Anzahl der Standorte nach Szenario B.1 gruppiert nach Typ und Klasse	78
Tabelle 13: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario B.1	80
Tabelle 14: Anzahl der Standorte nach Szenario B.2 gruppiert nach Typ und Klasse	83
Tabelle 15: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario B.2	85
Tabelle 16: Lastfluss und Einspeisepotenzial der MIDAL- und OPAL-Pipeline.....	88
Tabelle 17: Einspeisepotenzial und Standortanzahl, dargestellt in den Klammern, je Szenario für die OPAL- und MIDAL-Pipeline	89
Tabelle 18: Tankstellenanzahl je Szenario vor und nach der Filterung aufgrund der räumlichen Konkurrenz.....	90

Abkürzungsverzeichnis

DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
GIS	Geographisches Informationssystem
H ₂	Wasserstoff
kWel	Kilowatt elektrische Leistung
kWhel	Kilowattstunden elektrische Leistung
MW _{el}	Megawatt elektrische Leistung
Nm ³	Normkubikmeter
O ₂	Sauerstoff
PEM- Elektrolyseur	Proton Exchange Membran- Elektrolyseur
PtG	Power to Gas

1. Einleitung

Mit Hilfe der Energiewende soll Deutschland zu einem der energiesparsamsten und umweltschonendsten Staaten werden. Bis zum Jahr 2035 sollen die erneuerbaren Energien einen Anteil von 55-60 % an der Stromerzeugung haben (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2016a). Die letzten deutschen Kernkraftwerke gehen Ende 2022 vom Netz.

Eine Herausforderung der Energiewende ist der notwendige Ausbau des deutschen Stromnetzes (Merten und Krüger 2015). Strom aus Windenergie soll in Zukunft von Norden Richtung Süden transportiert werden, wobei die Stromerzeugung starken Schwankungen unterliegt (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2016b). Bei Überlastungen im Stromnetz oder wenn der Strombedarf geringer als die Erzeugung ist, kann es zu negativen Strompreisen oder zum Abregeln von Windenergieanlagen kommen (Sterner und Stadler 2014).

Um dieses Problem zu lösen kann die Power to Gas-(PtG)-Technologie genutzt werden, bei dieser wird Strom durch Elektrolyse in Wasserstoff (H_2) oder Methan (CH_4) umgewandelt, als Nebenprodukt entsteht dabei Sauerstoff (O_2). Im Anschluss kann der Wasserstoff begrenzt in das Gasnetz eingespeist werden, für die Einspeisung von Methan gibt es dagegen keine Obergrenze (Wurster und Albrecht 2013).

Wasserstoff, der aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, wird auch als grüner Wasserstoff bezeichnet (e-mobil GmbH et al. 2013).

PtG in Verbindung mit dem Fernleitungsnetz Erdgas hat das Potenzial, den Ausbau der Stromnetze zu entlasten, diese zu stabilisieren und ein Abregeln von Windenergieanlagen zu vermeiden (Merten und Krüger 2015; Sterner und Stadler 2014). Gleichzeitig ist grüner Wasserstoff für die Mobilität der Zukunft eine mögliche Lösung zur Erreichung des emissionsfreien Verkehrs (e-mobil GmbH et al. 2013). Die H2MOBILITY, ein von Daimler, Air Liquide, Linde, Shell, OMV und Total gegründetes Unternehmen, hat sich zum Ziel gesetzt, bis 2023 bis zu 400 Wasserstofftankstellen in Deutschland zu errichten (NOW GmbH 12.04.2016).

Mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) soll ein übertragbares Modell kreiert werden, das entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas und Deutschlands Bun-

des Autobahnen geeignete Standorte an Wasserstoff- und Sauerstoffsinken identifiziert. An diesen integrativen Standorten kann der erzeugte grüne Wasserstoff sowohl für die Mobilität bereitgestellt als auch in das Gasnetz eingespeist und im Anschluss Richtung Süden transportiert werden.

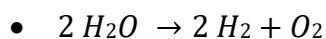
1.1. Wasserstoff aus erneuerbaren Energien

Die Erzeugung von Strom aus Windenergie und Photovoltaik unterliegt witterungsbedingten Schwankungen und stellt gemeinsam mit dem im Norden größeren Ausbaupotenzial an Windenergie, das Energiesystem der Zukunft vor neue Herausforderungen (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2016a).

Eine Möglichkeit, um die Abregelung von Windenergieanlagen zu vermeiden und den Stromnetzausbau zu entlasten, bietet die Erzeugung von grünem Wasserstoff (Merten und Krüger 2015).

Erzeugung von Wasserstoff

Die Herstellung von Wasserstoff geschieht über Elektrolyse. Bei dieser wird Wasser (H_2O) durch die Zuführung von Strom in Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zerlegt.



Dabei gibt es zwei unterschiedliche marktreife Technologien:

1. Die Alkalische Elektrolyse
2. Die Proton Exchange Membran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse)

PEM-Elektrolyseure sind für Teillastbetrieb und dynamische Stromschwankungen, die bei erneuerbaren Energien auftreten, besser geeignet als alkalische Elektrolyseure und werden daher im Folgenden vorgestellt (Wurster und Albrecht 2013).

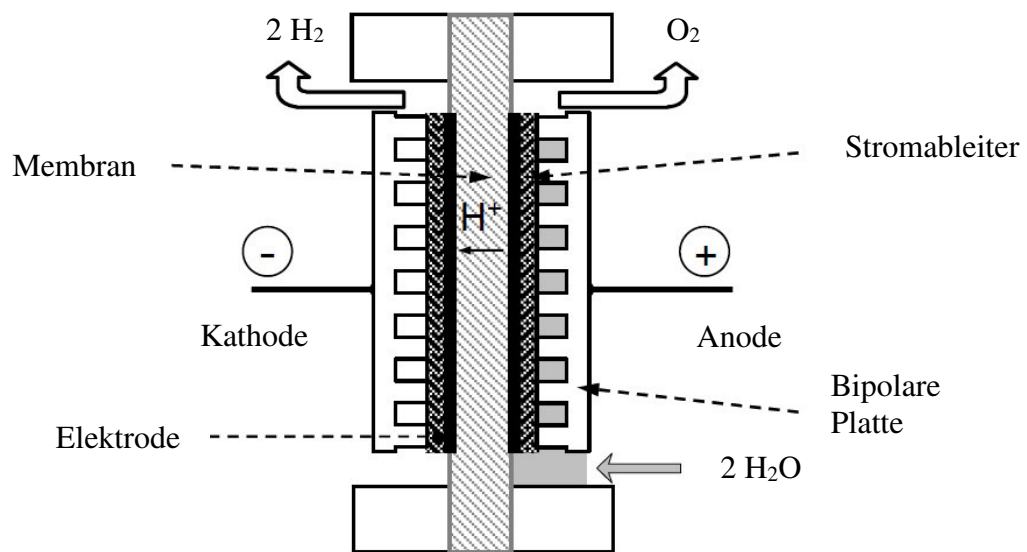


Abbildung 1: Aufbau einer PEM- Elektrolysezelle (Smolinka et al. 2011), verändert von Wöhrle

Bei einer PEM-Elektrolysezelle, dargestellt in Abbildung 1, trennt eine saure Protonenaustauschmembran die Anode (Sauerstoffproduktion) von der Kathode (Wasserstoffproduktion). Die Elektrode liegt in der Regel direkt an der Membran an. Beidseitig dazu liegen die für den Stromfluss zu den Elektroden notwendigen Stromableiter. Die bipolaren Platten ermöglichen den Transport des Wassers zu der Zelle und sorgen dafür, dass sowohl der Wasserstoff als auch der Sauerstoff entweichen (Smolinka et al. 2011).

Der spezifische Energiebedarf des Systems soll in den kommenden Jahren zwischen 4,3 und 5,5 kWh_{el}/Nm^3 liegen, langfristig soll er sogar gegen 4 kWh_{el}/Nm^3 tendieren. Auch der Wirkungsgrad soll sich zukünftig stetig bessern und in der Zukunft bis zu 93 % erreichen (Smolinka et al. 2011). Smolinka et al. (2011) erwartet für die nächsten Jahre 74 bis 87 %. Derzeit erreicht die in Frankfurt am Main errichtete PtG-Anlage der Thüga-Gruppe für den Pfad von der Stromentnahme bis zu der Einspeisung in das Gasnetz einen Wirkungsgrad bis 77 % (Thüga AG 11.02.2015).

Im Energiepark Mainz befindet sich derzeit ein PEM-Elektrolyseursystem bestehend aus drei Elektrolyseeinheiten und einer Maximalleistung von rund 6 MW_{el} (Energiepark Mainz; Stadtwerke Mainz AG; Linde AG; Siemens AG; Hochschule RheinMain 15.04.2016). Dieses System belegt, dass die PEM-Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien bereits in größerem Maßstab realisierbar ist.

1.2. Planung von Windenergieanlagen

Elektrolyseure können entweder direkt an den Windpark oder an das allgemeine Stromnetz angeschlossen werden.

Ein Anschluss an einen nahegelegenen Windpark bietet im Gegensatz zu einer netzintegrierten Anlage den Vorteil, dass die eigens dafür errichteten Stromleitungen extra für den Zweck dimensioniert werden. Des Weiteren ist der netzintegrierte Elektrolyseur abhängig von der Auslastung sowie der Kapazität der Stromnetze vor Ort (Wurster und Albrecht 2013).

Bei der Planung von Windenergieanlagen wird zwischen harten und weichen Tabuzonen unterschieden. Weiche Tabuzonen sind Gebiete in welchen die Errichtung von Windenergieanlagen zwar rechtlich möglich ist, die eine Gemeinde aber auf Grundlage selbst festgelegter Kriterien als Tabuzone für Windkraft definieren kann. Hierzu können beispielsweise Abstände zu Siedlungen, Naturparks oder FFH-Gebiete zählen. Damit werden Vorkehrungen unter dem Aspekt des Umwelt- oder Naturschutzes getroffen, die über die gesetzlichen Vorschriften hinausgehen.

Als harte Tabuzonen werden Gebiete definiert, in denen die Errichtung von Windenergieanlagen aus rechtlichen Gründen nicht möglich ist (Söfker und Fachagentur Windenergie an Land 2015).

Hierzu zählen beispielsweise verschiedene Schutzgebiete, deren Schutz im Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG (Deutscher Bundestag 01.03.2010) geregelt ist (Lütkehus, Insa, et al. 2013):

Schutzgebiete

- In Naturschutzgebieten sind nach BNatSchG § 23 Abs. 2 Handlungen, die Veränderungen, Beschädigungen, nachhaltigen Störungen oder Zerstörung zur Folge haben, verboten.
- Nationalparke sind nach BNatSchG § 24 Abs. 3 wie Naturschutzgebiete zu schützen, wobei es aufgrund ihrer Großräumigkeit und Besiedlung zu Ausnahmen kommen kann.
- Biosphärenreservate sind nach § 25 BNatSchG geschützt. Das Bundesland Hessen empfiehlt die Kernzonen von Biosphärenreservaten als harte Tabuzone

zu werten (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2010). Der Grundsatz einer Entwicklungszone ist den Ansprüchen von Natur und Mensch gerecht zu werden (Deutsches Nationalkomitee für das UNESCO Programm 2007), weshalb diese Zone nicht als hartes Tabukriterium gewertet wird.

Gewässer

Des Weiteren ist für bauliche Anlagen im BNatSchG § 61 Abs. 1 ein Mindestabstand von 50 m zu Gewässern erster Ordnung, Bundeswasserstraßen und stehenden Gewässern festgelegt.

Straßen

Auch Straßen gelten als hartes Tabukriterium, da im Bundesfernstraßengesetz – FStrG § 9 Abs. 1 geregelt ist, dass Hochbauten nicht innerhalb eines Abstandes von 40 m zu Bundesautobahnen und 20 m zu Bundesstraßen errichtet werden dürfen. In FStrG § 9 Abs. 2 ist zudem festgelegt, dass die Errichtung baulicher Anlagen längs zu Bundesautobahnen von der obersten Landesstraßenbaubehörde genehmigt werden müssen (Deutscher Bundestag 2007).

Bahnstrecken

Nach Bund-Länder-Initiative Windenergie BLWE (2012) gibt es für die Errichtung von Windenergieanlagen an Bahnstrecken keine rechtliche Vorgaben. Das Eisenbahnbundesamt fordert hingegen, dass mindestens die Gesamtanlagenhöhe als Abstand eingehalten werden sollte.

Freileitungen

Für Freileitungen gelten nach der Norm DIN EN 50 341-3-4 (VDE 0210-3) ein Abstand von mindestens einem Rotordurchmesser (Bund-Länder-Initiative Windenergie BLWE 2012).

Radaranlagen

Für Drehfunkfeuer bzw. VOR- Anlagen, das für Very High Frequency Omnidirectional Radio Range steht, sieht die Internationale Zivilluftfahrtorganisation (2009) einen Schutzbereich von 15 km vor, in dem Einzelfallprüfungen vollzogen werden müssen. Innerhalb eines 3 km Radius sind sogar eingehendere Prüfungen erforderlich. Als gesetzliche Grundlage dient das Luftverkehrsgesetz §18a, wonach Bauwerke nicht dort errichtet werden dürfen, wo sie Flugsicherungseinrichtungen stören.

Der nationale Wetterdienst besteht auf einen Mindestabstand von fünf Kilometern für die Errichtung von Windenergieanlagen zu Wetterradaren des Deutschen Wetterdienstes (DWD), um Signalabschwächungen und Stör-Echos zu vermeiden. Für Windenergieanlagen, die in einem Abstand von bis zu 15 Kilometern um den Wetterradar errichtet werden sollen, gelten Höhenbeschränkungen (Deutscher Wetterdienst 2015).

In der Sechsten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, der Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) sind einzuhaltende Immissionsrichtwerte für Bereiche außerhalb von Gebäuden getrennt nach Tag und Nacht definiert. Für reine Wohngebiete gelten beispielsweise tagsüber 50 dB(A) und nachts 35 dB(A) (Deutscher Bundestag). Zur Einhaltung dieser 35 dB(A) sind nach Lütkehus, Insa, et al. (2013) mindestens ein Abstand von 900 m erforderlich. Da für andere Gebietstypen wie Gewerbegebiete höhere Immissionsrichtwerte gelten, reichen für diese bereits kleinere Abstände aus.

1.3. Wasserstoffanwendungen

Wasserstoff kann auf Grund seiner vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten im Energiesystem der Zukunft eine tragende Rolle übernehmen, wobei es sich anbietet mehrere Nutzungsmöglichkeiten zu kombinieren.

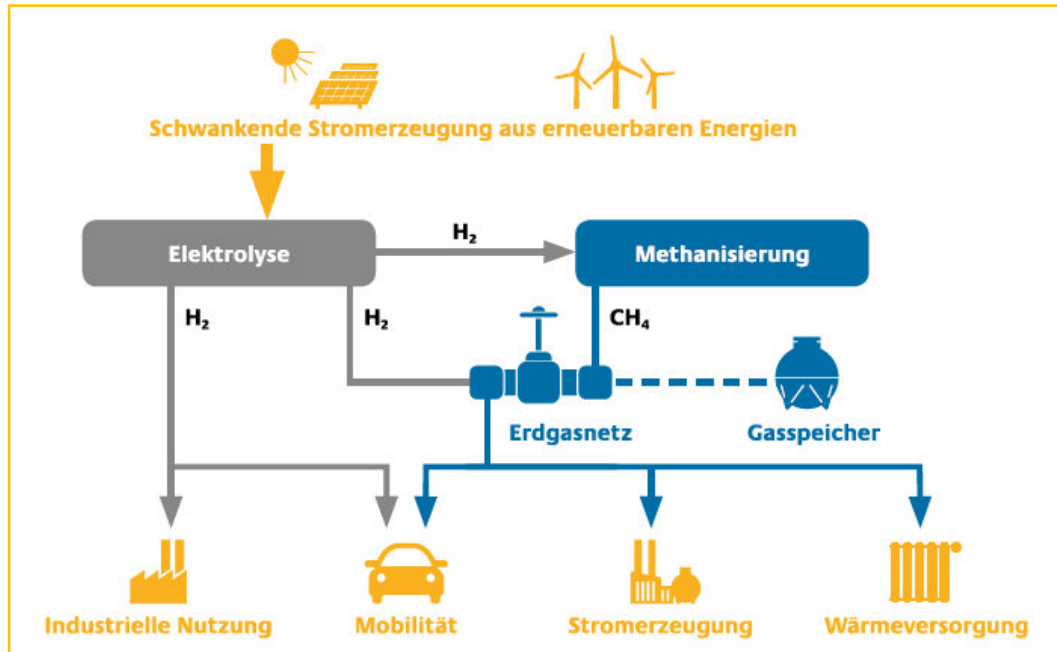


Abbildung 2: Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff, (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) 2015)

Abbildung 2 bietet einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff:

- In der Industrie ist Wasserstoff beispielsweise bei metallurgischen und petrochemischen Prozessen gefragt.
- In der Mobilität kann Wasserstoff als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt werden.
- Nach der Einspeisung in das Erdgasnetz vermischt sich der Wasserstoff mit dem Erdgas und kann entweder erneut an einem anderen Ort zeitlich verschoben verstromt, als Wärme genutzt oder als Kraftstoff zur Verfügung gestellt werden.
- In Verbindung mit Kohlenstoffdioxid kann Wasserstoff als Methan unbegrenzt in das Erdgasnetz eingespeist werden und wie oben dargestellt genutzt werden.
- Bei einer Einspeisung in das Erdgasnetz bietet sich ebenso die langfristige Speicherung in Poren- und Kavernenspeichern an (Ausfelder et al. 2015).

Neben dieser Anwendungsmöglichkeiten für Wasserstoff, kann auch der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff, der eine sehr hohe Reinheit aufweist, als medizinischer Sauerstoff oder in Kläranlagen eingesetzt werden um die Effizienz zu erhöhen. Als problematisch wird jedoch die Vermarktung gesehen, da noch weitere Arbeitsschritte

notwendig sind. Beispielsweise muss der Sauerstoff noch verdichtet oder in Trailer abgefüllt werden (Graf et al. 2014).

Auf Grundlage der Werte von Sterner und Stadler (2014) ergeben sich unter dem Aspekt der Abwärmenutzung folgende Wirkungsgrade für die Erzeugung und weitere Verwendung von Wasserstoff:

- Verwendung des Wasserstoffs im Brennstoffzellenfahrzeug: 38-53 %.
- Strom zu Wasserstoff inklusive Kompression des Wasserstoffs für die Einspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas: 57-80 %.
- Mit anschließender Verbrennung im Gas- und Dampf-Kraftwerk (Wirkungsgrad 60 %) nach der Einspeisung und der Vermischung des Wasserstoffs mit dem Methan im Gasnetz: 34-48 %.
- Nutzung als Wärme im Brennwertkessel (Nutzungsgrad 105 %): 60-84 %.

1.4. Rechtliche und technische Hintergründe der Wasserstoffeinspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas

Bis 1990 waren im sogenannten Stadtgas Wasserstoff-Konzentrationen von bis zu 50 % vorhanden. Dies beweist, dass höhere Konzentrationen an Wasserstoff in einer Gasinfrastruktur möglich sind (Hüttenrauch und Müller-Syring 2010).

Einspeisung von Wasserstoff in das Gasnetz

Wasserstoff gilt nach der Definition des Energiewirtschaftsgesetzes EnWG § 3 Abs. 10c (Deutscher Bundestag 2005) als Biogas, sofern er nachweisbar zum größten Teil aus erneuerbaren Energien stammt.

Für die Einspeisung von Biogas gelten nach der Gasnetzzugangsverordnung GasNZV § 36 Abs. 1 (Deutscher Bundestag 2010) die Qualitätsanforderungen der Arbeitsblätter des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e.V. DVGW G 260 und G 262.

Nach der technischen Regel DVGW G 262 ist derzeit die Einspeisegrenze von Wasserstoff auf einen Anteil von 5 % begrenzt, ist eine Erdgastankstelle an das Gasnetz angeschlossen gelten 2 % (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches 2011).

In Bezug auf die Verträglichkeit der verschiedenen Bestandteile der Gasnetzinfrastruktur auf den Wasserstoffanteil bestehen aktuell unterschiedliche Auffassungen. Mehrere Institute wie der DVGW oder die DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH führen Studien zu dieser Fragestellung durch. Beispielsweise wird befürchtet, dass sich bei hohen Wasserstoff-Konzentrationen schneller Risse bilden. Vor allem muss die Messtechnik der Gas-Infrastruktur in Bezug auf die Mengenummessung und Brennwertbestimmung mit Wasserstoff angepasst werden (Hüttenrauch und Müller-Syring 2010).

Nach Müller-Syring und Henel (2014) ist für Ferngasleitungen ein Anteil von 10 % Wasserstoff problemlos möglich. Auf eine Anfrage der Zeitung für Kommunale Wirtschaft (ZfK) gab die DVGW bekannt *„Ausgehend von einer H₂-Einspeisung ins Erdgasverteilnetz ohne Erdgastankstellen und komplexer Industrie kann von einer Verträglichkeit von 10 Vol.-% H₂ heute schon ausgegangen werden“* (ZfK 2015). Derzeit gelten Gasturbinen und die Erdgas-Tanks der Erdgasfahrzeuge als kritische beschränkende Faktoren für eine Erhöhung der Wasserstoff-Konzentration im Gasnetz.

Die maximal mögliche Wasserstoff-Konzentration in Gasturbinen liegt je nach Hersteller zwischen 1 und 5 %. Jedoch sollen nach unverbindlichen Angaben der Turbinenhersteller künftig höhere Wasserstoff-Konzentrationen in Turbinen möglich sein (ZfK 2015).

Für Erdgas-Tanks ist in der DIN 51624 sowie in der ECE-Regelung 110 der Wasserstoff-Anteil im Erdgas auf 2 % beschränkt (ZfK 2015; Müller-Syring und Henel 2014).

Speicherpotenzial des Fernleitungsnetzes Erdgas

Die Kavernen- und Porenspeicher des Gasnetzes bieten ein großes Speicherpotenzial. Nach Ausfelder et al. (2015) besitzen Deutschlands Porenspeicher eine Kapazität von 10,6 Mrd. m³ und die Kavernenspeicher eine Kapazität von 13,2 Mrd. m³.

Nach ersten Untersuchungen und auf Grundlage der Erfahrungen der Gasspeicherunternehmen eignen sich Kavernenspeicher besser zur Wasserstoff-Speicherung. Als Grund wird beispielsweise die geringere verfügbare spezifische Oberfläche genannt, auf der Bakterienwachstum stattfinden kann.

Weitere Erkenntnisse soll zudem der Gasspeicher der VNG-Gasspeicher GmbH in Bad Lauchstädt liefern, für den HYPOS e.V. eine Umrüstung zur Speicherung grünen Wasserstoffs plant (HYPOS e.V. 09.10.2015).

Das Einspeisepotenzial von Wasserstoff in das Gasnetz unterliegt saisonalen Schwankungen, die größtenteils durch den geringeren Gasabsatz und damit auch geringeren Lastfluss im Sommer, wie in Abbildung 3 dargestellt, entstehen.

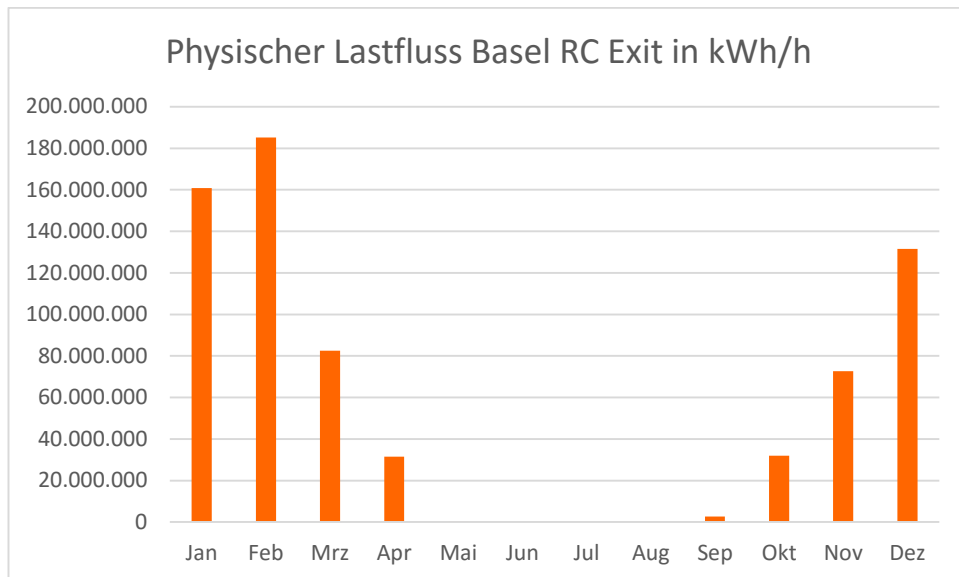


Abbildung 3: Physischer Lastfluss am Netzknoten Basel RC Exit in kWh/h, (terraneis BW GmbH 2014), eigene Darstellung

An manchen Netzknoten findet im Sommer sogar überhaupt kein Lastfluss statt, wobei die meisten Erdgas-Pipelines des Fernleitungsnetzes Erdgas, wie in Abbildung 4 am Standort Medelsheim (MEGAL-Pipeline) dargestellt, einen gewissen Mindestdurchfluss aufweisen.

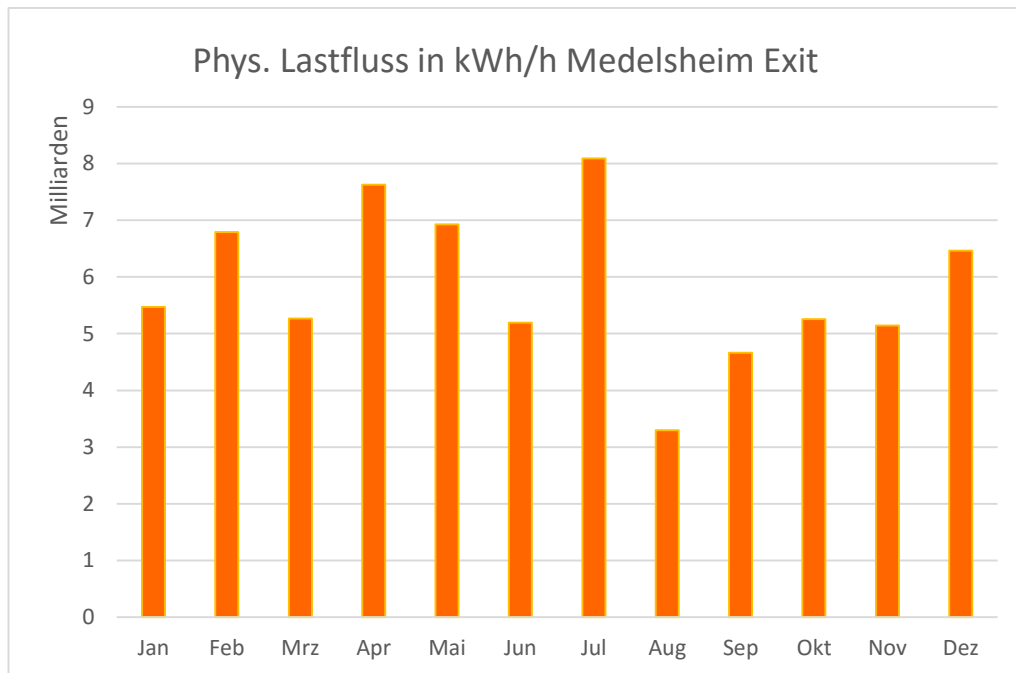


Abbildung 4: Physischer Lastfluss in kWh/h der MEGAL-Pipeline in Medelsheim, (Open Grid Europe GmbH 2016), eigene Darstellung

Der monatliche Mindestlastfluss am Standort in Medelsheim von über 3 Mrd. kWh/h im Monat August verdeutlicht das große Speicherpotenzial des Fernleitungsnetzes Erdgas.

Kosten

Auf Grundlage der GasNZV § 33 Abs. 1 ist der Netzbetreiber dazu verpflichtet, 75 % der Kosten für den Netzanschluss zu bezahlen. Die weiteren 25 % der Kosten sind vom Anschlussnehmer zu tragen. Diese 25 % sind jedoch im Fall einer Verbindungsleitung bis zu einer Länge von einem Kilometer auf maximal 250.000 € begrenzt.

1.5. Transport von Wasserstoff

Neben der bereits vorhandenen Gasnetzinfrastruktur können auch zukünftig Wasserstoff-Pipelines den Transport von Wasserstoff übernehmen.

Die Kosten für den Bau von Wasserstoff-Pipelines steigen mit der Größe des Durchmessers. Nach Krieg (2012) liegen die zu erwartenden mittleren Kosten einer Pipeline mit einem Durchmesser von 100 mm bei 352 €/m und steigen auf bis zu 1.300 €/m bei einem Durchmesser von 600 mm.

Derzeit existieren Wasserstoff-Pipelines lediglich als Inselsysteme. Air Liquide betreibt die längste Wasserstoff-Pipeline Deutschlands im Ruhrgebiet, die eine Ausdehnung von etwa 240 km besitzt. Der Wasserstoff für die Pipeline wird im Chemiepark Marl erzeugt und zu den Endpunkten Castrop-Rauxel sowie Leverkusen transportiert. Bei einem Druck von bis zu 25 bar fließen bis 40.000 m³/h durch die Pipeline (EnergieAgentur.NRW 2013).

Die zweitgrößte Wasserstoff-Pipeline Deutschlands wird von Linde betrieben und verfügt über eine Länge von über 100 km. An der Pipeline befinden sich die Standorte Rodleben, Bitterfeld, Leuna, Schkopau, Böhlen und Zeitz (Linde AG 2004). Diese zwei Pipelines belegen, dass ein Transport von größeren Mengen an Wasserstoff auch über längere Entfernung und nicht nur über eine Einspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas möglich ist. Neben dem Transport über Pipelines, die für den Transport größerer Mengen gut geeignet sind, kann Wasserstoff auch mit dem Lastkraftwagen befördert werden, was besonders bei kleineren Mengen über kurze Strecken in Frage kommt.

Die vor Ort-Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse hat zusammen mit der Wasserstoffanlieferung mit dem Lastkraftwagen das Potenzial, eine zukünftige Wasserstoff-Pipelineinfrastruktur zu entlasten, zu ergänzen und eine zuverlässige Versorgung für Wasserstoff-Tankstellen (siehe Kapitel 1.6) sowie Industrie zu gewährleisten (Krieg 2012).

1.6. Wasserstoff für die Mobilität

Mit grünem Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenfahrzeuge sind neben Elektrofahrzeugen eine mögliche Lösung auf dem Weg zu der emissionsfreien Mobilität. Die Vorteile von Brennstoffzellenfahrzeuge sind ihre hohe Reichweite von 400-500 km und vor allem der schnelle Tankvorgang, der nur wenige Minuten in Anspruch nimmt. In der Zukunft könnten daher beide Fahrzeugkonzepte ihren Anwendungsbereich finden: Brennstoffzellenfahrzeuge für Langstreckenfahrer und Elektrofahrzeuge im städtischen Raum (Koch 2014).

In Hinblick auf den Aufbau einer deutschlandweiten Wasserstofftankstelleninfrastruktur wurden mehrere Ausbauschritte definiert. Der erste Schritt sieht die Errichtung von 50 Wasserstofftankstellen in Deutschlands Metropolen und entlang der Hauptverkehrswege vor. Diese ersten 50 Tankstellen werden im Rahmen der Clean Energy Partnership (CEP), zu der sich verschiedene Industriepartner zusammengeschlossen haben, errichtet und von dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) gefördert.

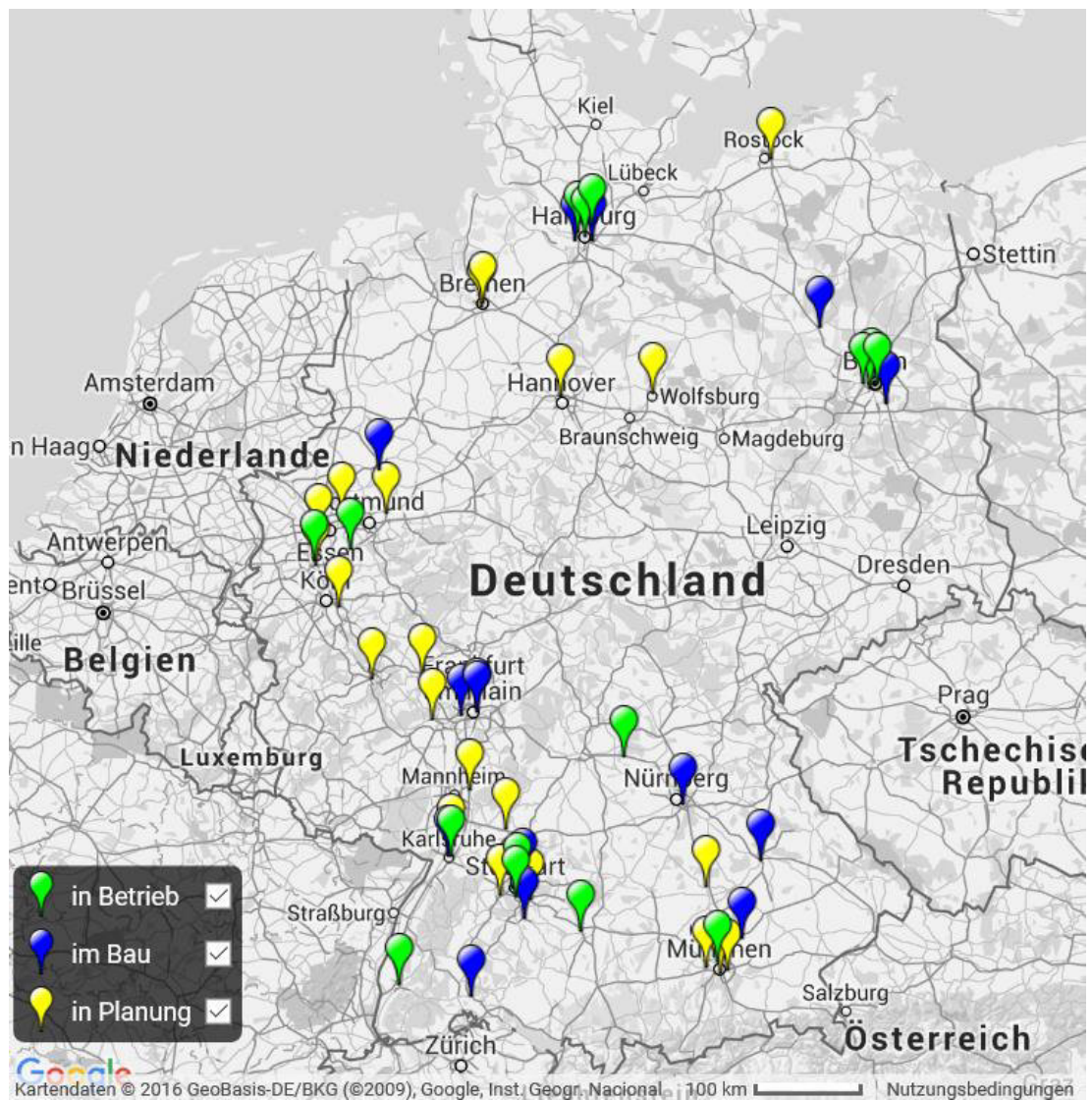


Abbildung 5: Standorte der im Rahmen der NIP geförderten ersten 50 Wasserstofftankstellen, (NOW GmbH 2016)

Abbildung 5 zeigt die Standorte dieser Tankstellen, die sich noch in unterschiedlichen Phasen: Bau, Betrieb und Planung, befinden. Ab 2017 sollen die Tankstellen

von der H2Mobility, die aus den Unternehmen Air Liquide, Linde, OMV, Shell, Total und Daimler besteht, geplant, errichtet und betrieben werden. Das große Ziel der H2Mobility ist die Errichtung von 400 Wasserstofftankstellen bis 2023. Anschließend soll die Errichtung von Wasserstofftankstellen wirtschaftlich sein (NOW GmbH 12.04.2016).

1.7. Gegenstand dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Kreierung eines übertragbaren Modells mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen (GIS) zur Identifikation integrativer Standorte an Wasserstoff- und Sauerstoffsinken entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas und Deutschlands Bundesautobahnen. Dabei soll der Wasserstoff aus vor Ort erzeugter Windenergie stammen. Diese integrativen Standorte können die Kombinationsmöglichkeiten der PtG-Technologie nutzen und den grünen Wasserstoff sowohl für die Mobilität bereitstellen als auch in das Gasnetz einspeisen, von wo aus dieser Richtung Süden transportiert werden kann. Auf diese Weise kann das allgemeine Stromnetz sowie der Stromnetzausbau von Norden nach Süden entlastet werden.

In weiteren Schritten wird ermittelt, wie hoch das Einspeisepotenzial an Standorten ist, die sich für eine Wasserstoffeinspeisung mit anschließendem Transport nach Süden eignen.

2. Methodik

2.1. Kriterien zur Identifikation von Standorten zur Einspeisung von Wasserstoff aus Windenergie in das Fernleitungsnetz Erdgas

In den folgenden Kapiteln wird zunächst das Konzept der integrativen Standorte und die verschiedenen Szenarien vorgestellt. Im Anschluss wird mit PostgreSQL und der PostGIS-Erweiterung die Umsetzung dargelegt.

2.1.1. Darstellung und Definition eines integrativen Konzeptes

Die Nutzung der PtG-Technologie bietet eine Vielzahl an synergetischen Möglichkeiten.

Diese entstehen zum einen unter dem Aspekt der Verwendung des Wasserstoffs als Treibstoff oder als Energiespeicher, zum anderen durch den bei der Elektrolyse entstehenden Sauerstoff (ABO Wind AG 2015).

Ein integratives Konzept kombiniert diese synergetischen Möglichkeiten in räumlicher Nähe an Wasserquellen sowie an Wasser- und Sauerstoffsinken. Abbildung 6 zeigt ein vereinfachtes Schema des integrativen Wind-Wasserstoff-Energiekonzeptes.

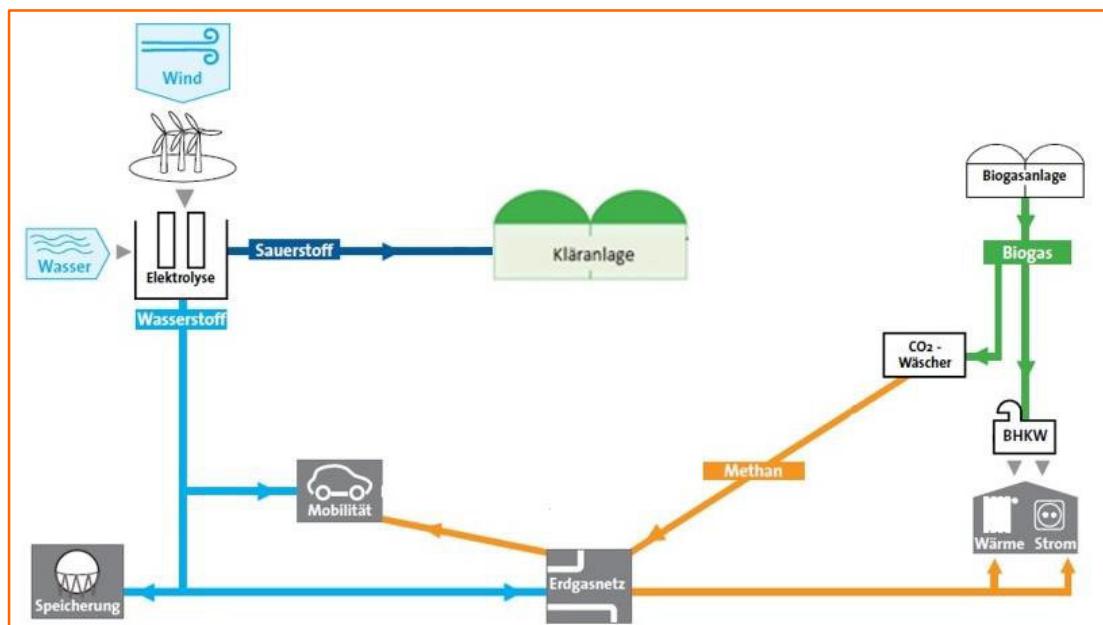


Abbildung 6: Schema integratives Energiekonzept (ABO Wind AG 2015, S. 2), verändert von Wöhrle

In Bezug auf eine Verwendung des Wasserstoffs als Treibstoff für die Mobilität wird in dieser Studie auf die Methodik von Walther (2016) aufgebaut. In dieser wird definiert, dass eine Wind-Wasserstofftankstelle, die mit vor Ort erzeugten Wasserstoff aus Windenergie versorgt wird, von einer Bundesautobahnauf- oder -abfahrt nicht mehr als ein Kilometer entfernt sein darf. Der Standort des Elektrolyseurs ist an oder nahe der Wasserstoff- und/ oder Sauerstoffsene, der Tankstelle, Biogaseinspeiseanlage oder Kläranlage, welche aufgrund ihrer Lage an einer Bundesautobahn eine gute Erreichbarkeit bieten. Ein Teil des vor Ort produzierten grünen Wasserstoffs wird für die Brennstoffzellenautos bereitgestellt, während die verbleibende Menge über eine Wasserstoffpipeline in das Gasnetz eingespeist wird.

Der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff kann in einer Kläranlage zur Effizienzsteigerung bei der biologischen Abwasserreinigung verwendet werden (Schmid-Schmieder 2007).

Bei dem Belebtschlammverfahren, dem gebräuchlichsten Verfahren bei der biologischen Abwasserreinigung, wird Sauerstoff über ein Gebläse dem Belebungsbecken zugeführt. Bakterien und Kleinlebewesen nutzen die Inhaltsstoffe des Abwassers als Nahrung und wandeln diese in „Belebtschlamm“ um. Anschließend setzt sich der Schlamm im Nachklärbecken ab und das geklärte Wasser kann abfließen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg (Hg)).

An einer Biogaseinspeiseanlage kann parallel zur Biomethaneinspeisung, auch grüner Wasserstoff dem Gasnetz beigemischt werden. Vor einer Einspeisung in das Erdgasnetz muss jedoch das Rohbiogas zu Biomethan mit der im DVGW Arbeitsblatt G260 definierte Gasqualität aufbereitet werden (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) 2014).

Als potenzielle Standorte sollen daher auch Kläranlagen oder Biogaseinspeiseanlagen an Autobahnauf- oder -abfahrten untersucht werden. Dort können neue Wasserstofftankstellen oder Stand-Alone Lösungen, also alleinstehende Zapfsäulen mit Tankautomat, errichtet werden.

Die Verbindung zwischen dem Windpark und dem Standort des Elektrolyseurs erfolgt über eine Stromleitung. Im Anschluss wird der erzeugte Wasserstoff über eine Wasserstoffpipeline in das bestehende Erdgasnetz eingespeist.

2.1.2. Darstellung und Definition der Szenarien

Parameter

Für die Analyse der Ermittlung eines geeigneten Standortes zur Installation eines Elektrolyseurs zur Erzeugung grünen Wasserstoffs gelten folgende obligatorischen sowie optionalen Parameter:

Obligatorische Parameter

- Windpotenzialfläche
- Fernleitungsnetz Erdgas
- Entweder eine Bundesautobahnauf- oder -abfahrt oder eine Bundesautobahntankstelle

Optionale Parameter

- Kläranlage
- Biogaseinspeiseanlage

Für die Parameter gelten folgende obligatorische Optionen:

- Am Standort muss entweder eine Bundesautobahntankstelle, eine Kläranlage oder eine Biogaseinspeiseanlage vorhanden sein.
- Für die Bundesautobahntankstellen gilt nicht die Einschränkung der Bundesautobahnauf- oder -abfahrten, ist keine Tankstelle vorhanden, müssen sich die Kläranlage oder Biogaseinspeiseanlage an einer Auf- oder Abfahrt befinden.
- Für die Biogaseinspeiseanlagen gilt nicht der obligatorische Parameter des Fernleitungsnetzes Erdgas, da sie direkt in das Gasnetz einspeisen.

Abbildung 7 zeigt die Mindestkriterien der integrativen Standorte in Abhängigkeit nach dem Standorttyp.

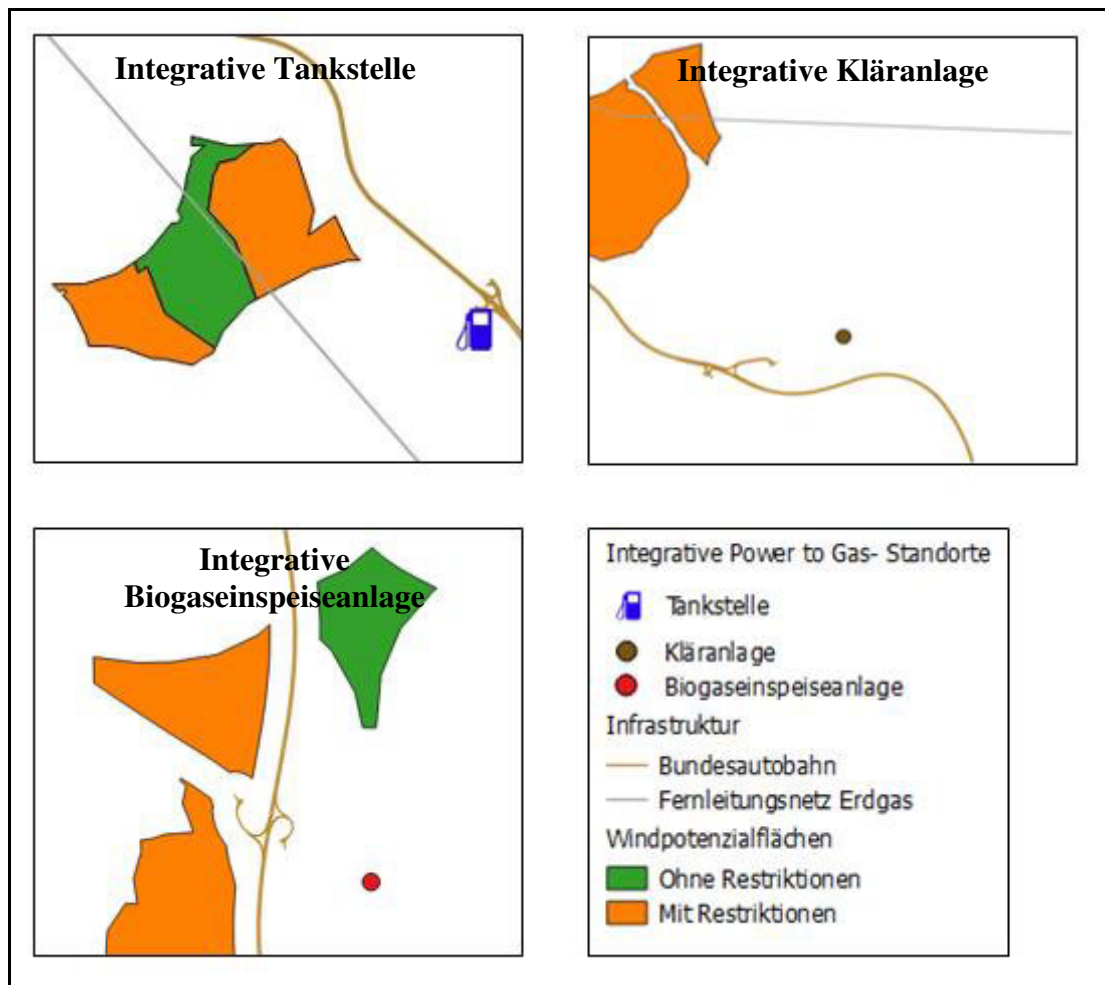


Abbildung 7: Mindestkriterien der integrativen Standorte in Abhängig nach dem Standorttyp, eigene Darstellung

Referenzanlage Windenergie

Als Referenzanlage für die Analysen wird eine Windenergieanlage mit folgenden wesentlichen technischen Daten definiert:

Tabelle 1: Technische Daten Referenzanlage (SIEMENS AG 2016)

Eigenschaft	Wert
Rotordurchmesser (m)	101
Nennleistung (kW _{el})	3.000
Nabenhöhe (m)	74,5

Die Anlage SWT-3.0-101 der Siemens AG entspricht diesen Angaben und kann als Referenzanlage herangezogen werden (Siemens AG 2016).

Darstellung der variierenden Kriterien

Für die Analyse werden verschiedene Szenarien definiert, die nach folgenden Kriterien variieren:

- Dem maximalen Abstand von der Potenzialfläche zum Elektrolyseurstandort und
- Dem Restriktionstyp (restriktionsfreie Flächen und Flächen mit Restriktionen).

Definition des Abstands

Für den maximalen Abstand vom potenziellen Windpark zum Elektrolyseurstandort und Einspeisepunkt in das Gasnetz sind zwei Szenarien definiert:

- Die Vor-Ort-Erzeugung („On-site production“)
- Eine Analyse mittels eines dynamischen Abstandes, der je nach Flächengröße der Potenzialfläche variiert.

Vor-Ort-Erzeugung

Bei dem Konzept der Vor-Ort-Erzeugung wird die Energie aus Windkraft in direkter Nachbarschaft erzeugt, in Wasserstoff umgewandelt und an der Tankstelle für die Wasserstoffmobilität zur Verfügung gestellt sowie der überschüssige Wasserstoff in das Gasnetz eingespeist.

Als maximaler Abstand, für die im Rahmen dieser Studie als Vor-Ort-Erzeugung bezeichneten Abstandskriterien, gelten sowohl für den Transport über eine Stromleitung als auch den Transport über eine Wasserstoff-Pipeline zwei Kilometer (siehe Szenarien A.1 und A.2).

Auf diese Weise kann das allgemeine Stromnetz entlastet werden und gleichzeitig die Kosten für den Netzanschluss minimiert werden.

Dynamischer Abstand

Die Idee hinter der Analyse mit dynamischen Abstand ist, dass bei steigender Größe der Potenzialfläche, sich die Anzahl der Windenergieanlagen und somit neben dem Gewinn auch die Wirtschaftlichkeit der Kosten in Bezug auf den Leitungsbau erhöhen. Der dynamische Abstand orientiert sich damit an der maximal möglichen Entfernung von Elektrolyseur zu Windpark unter dem Aspekt der Einhaltung der Wirtschaftlichkeit für den Windpark.

Die unten dargestellte Formel zur Ermittlung des dynamischen Abstandes variiert daher mit der Anzahl der Windenergieanlagen die je nach Flächengröße errichtet werden können (siehe Szenarien B.1 und B.2).

Als Faktoren zur Ermittlung des dynamischen Abstandes wurden folgende Werte, die aus betriebsinternen Erfahrungswerten stammen, miteinbezogen:

- Die Anzahl der Windenergieanlagen je nach Flächengröße (x), siehe Kapitel 2.1.3.
- Die Investitionskosten in Abhängigkeit von der Leistung a in €/kW_{el}. Nach den Erfahrungswerten der Deutschen WindGuard GmbH (Deutsche WindGuard GmbH et al. 2015) variieren die Investitionskosten für Windenergieanlagen je nach Standortqualität zwischen 1.463 und 1.711 €/kW_{el}. Fraunhofer ISE (Fraunhofer ISE 2013) gibt als Rahmen für die Investitionskosten 1.000 bis 1.800 €/kW_{el} an. Für diese Studie werden auf Grundlage von Erfahrungswerten der ABO Wind AG a = 1.750 €/kW_{el} festgelegt.
- Die Kosten für den Bau der Stromleitung - von Windpark zu Elektrolyseur - als Anteil der gesamten Investitionskosten b werden für diese Studie auf Basis von Erfahrungswerten der ABO Wind AG auf b = 5 % festgesetzt.
- Die Leistung pro Windenergieanlage (c = 3.000 kW_{el}/WEA, siehe Referenzanlage Windenergie).
- Die Kosten für den Bau der Stromleitung pro Meter (d in €/m) sind auf Grundlage von Erfahrungswerten der ABO Wind AG d = 90 €/m und beinhalten bereits einen Puffer.
- Ein Umwegfaktor, um realitätsnähere Werte zu erzeugen, da der Bau von Stromleitungen oder Pipelines nicht über die kürzeste Luftlinie erfolgt. Nach KRIEG wird für diese Analyse der Erwartungswert (e = 1,4) verwendet (Krieg 2012).

$$\begin{aligned} \text{Dynamischer Abstand (m)} &= \frac{x * a * b * c}{d * e} & (2.1) \\ &= \frac{x * 1750 \text{ €/kW} * 0,05 * 3000 \text{ kW}}{90 \text{ €/m} * 1,4} \end{aligned}$$

Aus wirtschaftlichen Gründen sollte jedoch dennoch vermieden werden, dass die Kosten für den Leitungsbau einen gewissen Wert überschreiten. Zudem hat die ABO Wind AG nur selten Stromleitungen über eine Strecke von mehr als zehn Kilometern gelegt. Für diese Thesis wird daher der sich ergebende Abstand für sieben Windenergieanlagen, der 8.431 m Luftlinie bzw. 11.803 m mit Umwegfaktor entspricht, als Maximalwert festgelegt.

Mindestkriterien zur Auswahl der Potenzialflächen

Im Anschluss an die Flächenanalyse mit den in Kapitel 1.2 beschriebenen harten und weichen Tabukriterien sind weitere Filter nach Windgeschwindigkeit und Flächengröße, welche mit der Anzahl errichtbarer Windenergieanlagen korreliert, möglich.

Als Mindestwindgeschwindigkeit wird, auf Basis des Kriteriums zur Ermittlung von Vorranggebieten zur Nutzung von Windenergie des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, 5,75 m/s in 140 m Höhe gewählt und auf ganz Deutschland einheitlich angewandt (Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung 2012).

Die benötigte Fläche für mehrere Windenergieanlagen ist in erster Linie abhängig von dem Abstand der von Anlage zu Anlage zu halten ist, um Energieverlust durch gegenseitige Windwegnahme zu vermeiden. Als Abstandskriterium hat sich die 5-/3-Ellipse durchgesetzt. Dies bedeutet, dass in Hauptwindrichtung von Anlage zu Anlage als Abstand der fünffache und in Nebenwindrichtung der dreifache Rotordurchmesser einzuhalten ist (Piorr 2011). Die Ellipsen dürfen sich jedoch überschneiden, sofern die festgelegten Abstände, wie in Abbildung 8 dargestellt, zu den benachbarten Anlagen eingehalten werden (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hg) 2016).

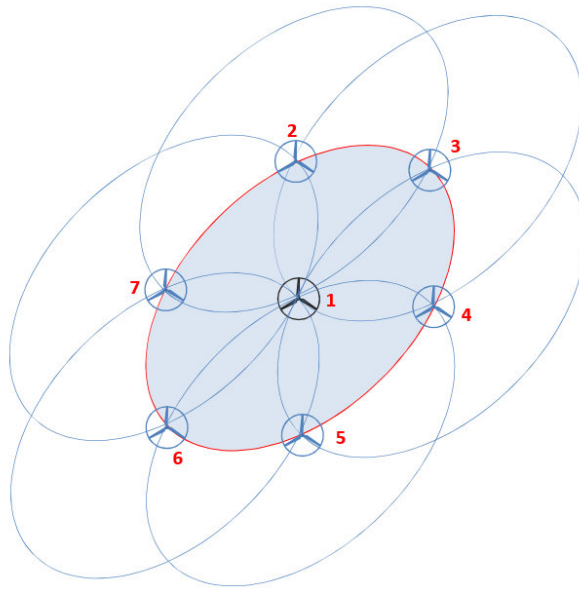


Abbildung 8: Darstellung einer 5-/3-Ellipse mit sieben Windenergieanlagen (Kopp 2015)

Nach KOPP (Kopp 2015) passen in eine 5-/3-Ellipse sieben Windenergieanlagen (siehe Abbildung 8), ausgehend von der gewählten Referenzanlage (siehe Tabelle 1) mit einem Rotordurchmesser von 101 m beträgt die Fläche der Ellipse etwa 48 ha. Bei einer Belegung von sieben Windenergieanlagen ergibt sich aufgerundet ein Flächenbedarf von 7 ha pro Anlage.

Auf Grundlage betriebsinterner Erfahrungswerte der ABO Wind AG werden 21 ha als Mindestflächengröße festgelegt, dies entspricht einer Anzahl von drei Windenergieanlagen in Bezug auf die oben genannten Werte.

Definition der Potenzialflächen Wind

Im Rahmen der Analyse werden zwei verschiedene Datensätze der Potenzialflächen Wind verwendet. Diese variieren nach dem Restriktionstyp, der die Flächen nach Vorhandensein oder Fehlen von weichen Tabukriterien (siehe Kapitel 1.2) folgenderweise unterteilt:

- Restriktionsfreie Flächen, wo weder harte noch weiche Tabukriterien vorhanden sind.
- Flächen mit Restriktionen, bei diesen Flächen obliegt es der Gemeinde festzulegen, ob die Flächen für die Nutzung der Windenergie freigegeben werden.

Für die Untersuchung werden die restriktionsfreien (siehe unten Szenario A.1 und B.1) und die Flächen mit und ohne Restriktionen, also der gesamte Datensatz, analysiert (siehe unten Szenario A.2 und B.2).

Bildung der Szenarien

Für die Analyse der integrativen Standorte am Fernleitungsnetz Erdgas werden folgende Szenarien in Abhängigkeit des Abstands von Windpark zu Elektrolyseur – Vor Ort-Wasserstoff (H₂)-Erzeugung sowie mit dynamischem Abstand - und des Datensatzes der Potenzialflächen (siehe Tabelle 2) definiert:

Tabelle 2: Darstellung der Szenarien

Abstand Potenzialflächen	Vor Ort-H₂- Erzeugung	Mit dynamischem Abstand
Ohne Restriktionen	A.1	B.1
Mit Restriktionen	A.2	B.2

Dimensionierung des Elektrolyseurs und Kalkulation des Einspeisepotenzials

Da für die Untersuchung das Einspeisepotenzial des grünen Wasserstoffs je Standort berechnet werden soll, ist eine Kalkulation der Anzahl der errichtbaren Windenergieanlagen je Fläche notwendig um die installierbare Leistung zu erhalten. In Abhängigkeit zu der Größe des Windparks lässt sich die mögliche Leistung des Elektrolyseurs dimensionieren, woraus sich wiederum das Einspeisepotenzial in Nm³/h berechnen lässt.

2.1.3. Aufbau der Datengrundlage

Verwendete Software

Für die Analyse werden pGAdmin III und QGIS mit der Erweiterung DB Manager verwendet. Das Open-Source-Datenbankmanagementsystem pGAdmin bietet Zugriff auf PostgreSQL und beinhaltet eine PostGIS-Erweiterung.

PostGIS erweitert das relationale Datenbanksystem PostgreSQL zu einer räumlichen Datenbank und verfügt über mehr als 300 Funktionen. Analysen für die eine Vielzahl

von Schritten in Desktop-GIS nötig sind, können mit Hilfe der Sprache SQL und der PostGIS-Erweiterung in Text umgeschrieben und automatisiert werden (Obe und Hsu 2015).

Für die Visualisierung der Daten wird das geographische Informationssystem QGIS genutzt, das als Open-Source-Software zur Verfügung steht (QGIS 2016).

Geodatenaufbereitung

Als Koordinatenbezugssystem wird EPSG: 25832 verwendet.

Für die Analyse werden verschiedene Geodaten benötigt. Die Datensätze der Kläranlagen, Bundesautobahntankstellen sowie der Autobahnauf- und -abfahrten stammen von OpenStreetMap.

Der Datensatz der Bundesautobahntankstellen enthält alle Tankstellen, die direkt an den Bundesautobahnen oder bis zu 1.000 m entfernt der Autobahnauf- und -abfahrten liegen.

Die Geodaten der Biogaseinspeiseanlagen sowie des Fernleitungsnetzes Erdgas sind durch eine Internetrecherche erstellt und digitalisiert worden. Geodaten für das Gasnetz sind in Deutschland derzeit nicht frei zugänglich, sondern können lediglich bei einer geringen Anzahl von Unternehmen käuflich erworben werden. Die Geodateninfrastruktur Deutschland GDI-DE fordert zwar im Zuge der Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie in Deutschland, Geodaten der Sektoren Wasser und Energie zu veröffentlichen. Dies wird aber von dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, der DVGW sowie dem Forum Netztechnik/Netztechnik im Verband für Elektrotechnik und Elektronik VDE/FNN als unzumutbare Gefährdung angesehen. In einer Stellungnahme weisen diese Verbände darauf hin, dass die Veröffentlichung kritischer Infrastrukturen eine Gefährdung für die Bevölkerung zur Folge haben kann. Aus diesem Grund lehnt die Energie- und Wasserwirtschaft die Veröffentlichungspflicht von Informationen, die kritische Infrastrukturen betreffen, ab und haben Unternehmen aus diesen Sektoren bislang keine Veröffentlichung vorgenommen (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW et al. 2015).

Die von Walther (2016) im Rahmen einer Weißkartierung für Deutschland erstellten Geodaten der Windpotenzialflächen sind nach dem Restriktionstyp in Flächen mit und

ohne Restriktionen unterteilt. Die dazu verwendeten harten wie weichen Tabukriterien sind im Anhang 1 zu finden.

Zur Anwendung der festgelegten Mindestanforderungen werden zunächst alle Flächen mit einer Windgeschwindigkeit $< 5,75$ m/s entfernt. Anschließend werden für die Auswahl der Flächen mit Mindestflächengröße alle aneinandergrenzenden und benachbarten Flächen als Multipart verbunden, d.h. sie werden aggregiert.

Mit Hilfe der PostGIS Funktion ST_Union lassen sich die erstellten Puffer, erzeugt mit ST_Buffer (PostGIS 2016a), auflösen und als neue Geometrie darstellen (PostGIS 2016c). Um die Puffer als einteilige Geometrien zu erhalten, muss ST_Dump durchgeführt werden, path[1] erstellt dazu eine ID-Spalte (PostGIS 2016f).

Als maximale Entfernung für die Aggregation werden 456 m festgesetzt (Lütkehus, Insa, et al. 2013).

Aggregation der Windpotenzialflächen

```
CREATE TABLE "Potenzialflaechen_Wind_Puffer228m" AS  
SELECT a.path[1] AS Multi_ID,  
(a.geom)::geometry(Polygon,25832) AS geom  
      FROM (SELECT (st_dump(st_union(st_buffer  
("Potenzialflaechen_Wind".geom, (228)::double precision))))).path AS path,  
      (st_dump(st_union(st_buffer("Potenzialflaechen_Wind".geom, (228)::double  
precision))))).geom AS geom  
      FROM "Potenzialflaechen_Wind") AS a;
```

Über ST_Intersects lässt sich die erstellte ID-Spalte auf den Datensatz der Potenzialflächen übertragen (PostGIS 2016e).

```
CREATE TABLE "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS  
SELECT a.*, b.Multi_ID  
      FROM "Potenzialflaechen_Wind" AS a,  
      "Potenzialflaechen_Wind_Puffer228m" AS b  
      WHERE ST_Intersects(a.geom, b.geom);
```

Im Anschluss müssen die Flächen von Singleparts in Multiparts umgewandelt und die Flächengröße summiert oder neu berechnet werden. Da für die Untersuchung das Einspeisepotenzial grünen Wasserstoffs je Standort berechnet werden soll, ist eine Kalkulation der Anzahl der errichtbaren Windenergieanlagen x je Fläche A notwendig um die installierbare Leistung zu erhalten. Für diese Berechnung wird der Wert für den Flächenbedarf pro Windenergieanlage von 7 ha - siehe Kapitel 2.1.2 – verwendet. Da im Datensatz der Windpotenzialflächen Flächen mit über 700 ha - ergibt einen Windpark mit über 100 Anlagen - enthalten sind, wird die Anlagenzahl x begrenzt. Der Windpark Havelland ist nach Angaben der ENTEGA AG (ENTEKA AG 2016) mit 83 Windenergieanlagen einer der größten Windparks in Deutschland und wird als Obergrenze für die Analyse verwendet ($x \leq 83$).

Die Leistung des Windparks P_{Windpark} wird ermittelt, indem das Ergebnis mit der Leistung der Referenzanlage $P_{\text{WEA}} = 3.000 \text{ kW}_{\text{el}}$ (siehe Kapitel 2.1.1) multipliziert wird.

$$x = \frac{A \text{ (ha)}}{7 \text{ ha/WEA}} \quad (2.2)$$

$$P_{\text{Windpark}} \text{ (kW}_{\text{el}}) = x \times P_{\text{WEA}} \text{ (kW}_{\text{el}}) \quad (2.3)$$

In Abhängigkeit zu der Größe des Windparks und der Windparkvollaststundenzahl pro Jahr lässt sich mit Hilfe eines Faktors f die mögliche Leistung des Elektrolyseurs dimensionieren.

Für die Kalkulation wird eine Windparkvollaststundenzahl von 2.000 h/a angenommen, woraus sich der Faktor 0,15 ergibt (Hofmann 2015):

$$P_{\text{Elektrolyseur}} \text{ (kW}_{\text{el}}) < f \times P_{\text{Windpark}} \text{ (kW}_{\text{el}}) \quad (2.4)$$

Mit der ermittelten Elektrolyseurleistung $P_{\text{Elektrolyseur}} \text{ (kW}_{\text{el}})$ lässt sich das Einspeisepotenzial, der Volumenstrom, Q in Nm^3/h berechnen.

Nach Smolinka et al. (2011) wird in den folgenden Jahren der spezifische Energiebedarf für PEM-Elektrolysesysteme zwischen 4,3 und 5,5 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{Nm}^3$ Wasserstoff liegen. Für die Studie wird ein Mittelwert von 5,0 $\text{kWh}_{\text{el}}/\text{Nm}^3$ angesetzt.

$$Q \left(\text{Nm}^3/\text{h} \right) = \frac{P_{\text{Elektrolyseur}} (\text{kW}_{\text{el}})}{5 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{Nm}^3} \quad (2.5)$$

Aufgrund der definierten Obergrenze für den Windpark gelten demnach als maximale Einspeisemenge Q 7.400 Nm^3/h bei einer Elektrolyseurleistung von 37,35 MW_{el} .

2.2. Identifikation potenzieller Power to Gas– Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Ziel dieser Methodik ist es, aufbauend auf den in deutschlandweit ermittelten Windpotenzialflächen, geeignete Standorte und Streckenabschnitte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas zu identifizieren, die sich für eine Nutzung der PtG – Technologie und eine anschließende Einspeisung eignen.

2.2.1. Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Mit Hilfe von PostgreSQL und der PostGIS-Erweiterung sollen entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas identifiziert werden. Hierfür werden Autobahntankstellen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen mit Hilfe eines Modells auf Synergien untersucht.

Für die Identifikation der integrativen Standorte soll jeweils nur eine SQL-Abfrage getrennt nach Typ - Tankstellen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen - und Szenario erstellt werden.

Für die Szenarien, welche sich nur nach Auswahl des Restriktionstyps unterscheiden, gelten dieselben Abfragen, da die weiteren Parameter dieselben sind. Sie variieren nur in Bezug auf den Geodatensatz der Windpotenzialflächen.

Dadurch ergeben sich sechs unterschiedliche SQL-Abfragen. Insgesamt werden jedoch aufgrund der zwei unterschiedlichen Geodatensätze für Windpotenzialflächen zwölf Abfragen ausgeführt.

Szenario A.1 und A.2

Das Ergebnis dieser Abfragen soll alle potenziellen integrativen Standorte anzeigen, die zum Fernleitungsnetz Erdgas sowie zu den Potenzialflächen Wind maximal zwei Kilometer entfernt sind.

Entwurf der SQL-Abfragen

Die SQL-Abfragen berechnen mit Hilfe räumlicher PostGIS-Funktionen Distanzen von Punkten zu Punkten, Polygonen sowie Linien und filtern den Punktdatensatz gleichzeitig.

Die Fragestellung „Was ist das nächste Geoobjekt?“ wird als *Nächste-Nachbarn-Anfrage* (engl. *Nearest Neighbour Query*) bezeichnet. *Abstandsanfragen* (engl. *Distance Query*) dienen dazu zu ermitteln, welche Standorte innerhalb einer festgelegten Entfernung liegen (Brinkhoff 2013).

Nächste-Nachbarn-Anfragen werden in PostGIS mit der Funktion `ST_Distance(a.geom, b.geom)` durchgeführt, das Ergebnis gibt die minimale Distanz zwischen den Objekten der verschiedenen Tabellen a und b wieder (PostGIS 2016d). Eine Abstandsanfrage lässt sich mit `ST_DWithin(a.geom, b.geom, Angabe der maximalen Entfernung)` bis zu einer angegebenen Entfernung begrenzen (Obe und Hsu 2015).

Für die obligatorischen Daten, Fernleitungsnetz Erdgas, Potenzialflächen Wind und Bundesautobahnauf- bzw. -abfahrten, ist ein `INNER JOIN` auf `ST_DWithin(a.geom, b.geom, 2000)` notwendig, um lediglich die Übereinstimmungen der Mengen a und b (siehe orangene Schnittfläche in Abbildung 9) auszuwählen.

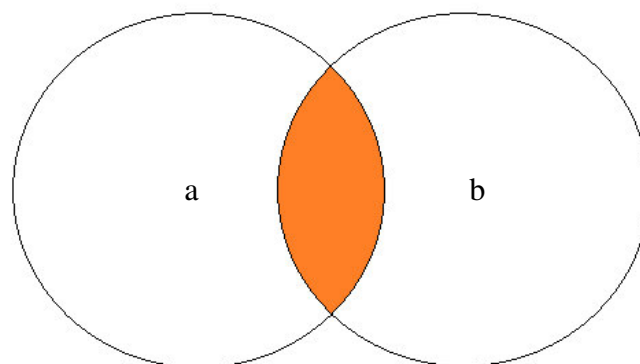


Abbildung 9: Schema `INNER JOIN` (Obe und Hsu 2015), eigene Darstellung

Während für die optionalen Datensätzen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen, ein LEFT JOIN auf ST_DWithin(a.geom, b.geom, 2000) angewandt wird (PostGIS 2016b). Dabei bleiben die Objekte aus der ersten Tabelle a erhalten und für die Schnittmenge (orangene Fläche in Abbildung 10) wird der berechnete Abstand eingefügt, während das Ergebnis „Null“ erzeugt wird, wenn die Daten aus der zweiten optionalen Tabelle b außerhalb der angegebenen Distanz liegen (Obe und Hsu 2015).

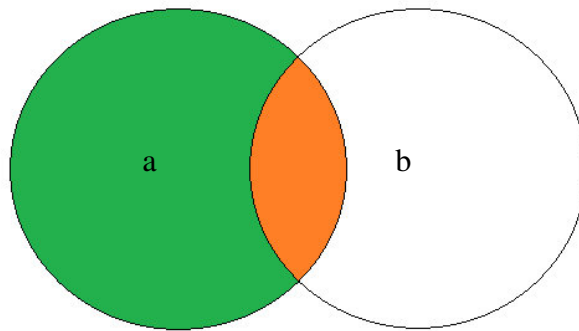


Abbildung 10: Schema LEFT JOIN (Obe und Hsu 2015), eigene Darstellung

Dabei soll lediglich der Abstand zur nächstgelegenen Windpotenzialfläche bzw. dem nächstgelegenen Objekt im Geodatenatz Fernleitungsnetz Erdgas berechnet werden und nicht zu allen Objekten im Umkreis von zwei Kilometern. SELECT DISTINCT ON fragt nur ein Objekt ab, auf welches die definierten Voraussetzungen zutreffen. Dieser SQL-Befehl gibt jedoch ohne die Verwendung von ORDER BY ein zufälliges Objekt wieder, das die Anforderungen erfüllt (The PostgreSQL Global Development Group 2016).

Durch ORDER BY a.id, ST_Distance(a.geom, b.geom) wird das nächstgelegene Objekt der Tabelle b zur der Tabelle a ausgewählt (Obe und Hsu 2015).

Aufgrund der hohen Kosten für den Bau von Pipelines (siehe Kapitel 1.5) wird hierzu als Regelfall die Distanz vom Elektrolyseur-Standort, Tankstelle oder Kläranlage, zum Gasnetz ausgewählt, welche durch eine Wasserstoff-Pipeline verbunden werden sollen. Einen Sonderfall stellen die Biogaseinspeiseanlagen dar (siehe unten). Weiter spielt auch die Distanz zum Windpark insbesondere bezüglich des dynamischen Abstandes eine wichtige Rolle und wird der ORDER BY Funktion beigefügt.

Für die in Kapitel 2.2.2 folgende Klassifikation der Standorte soll in dieser Abfrage bereits die Grundlage geschaffen werden. Zum einen werden hierzu die Distanzanalysen zu den optionalen Objekten verwendet. Zum anderen werden die Kosten für den Bau der Stromleitung, von Windpark zu Elektrolyseur-Standort, mit den Kosten von Elektrolyseur-Standort zum Fernleitungsnetz Gas addiert, da diese einen wesentlichen Teil der Netzanschlusskosten darstellen.

Für die Berechnung der Kosten für den Bau der Stromleitung von Windpark zu Elektrolyseur-Standort wird die ermittelte Distanz $L_{\text{Stromleitung}}$ in m mit den angegebenen Kosten K in €/m und dem Umwegfaktor e (siehe Kapitel 2.1.2) multipliziert.

Derselbe Rechenweg gilt für die Kostenberechnung der Wasserstoff (H_2)-Pipeline von Elektrolyseur-Standort zum Fernleitungsnetz Erdgas mit den entsprechenden Kosten in €/m. Für diese Studie werden unabhängig zur Größe des Windparks und des Elektrolyseurs die Kosten für eine Pipeline mit einem Durchmesser d von 100 mm verwendet (Kapitel 1.5).

$$K_{\text{Gesamt}} = e \times (L_{\text{Stromleitung}} \times K_{\text{Stromleitung}} + L_{H_2\text{-Pipeline}} \times K_{H_2\text{-Pipeline}}) \quad (2.6)$$

Eine solche Wasserstoff-Pipeline kann nach Krieg (2012) unter der Verwendung der Formel für den Massenfluss $\dot{m}$ in kg/s folgenden Mengenfluss Q in Nm^3/h an Wasserstoff gewährleisten:

$$\dot{m} = \rho \times u \times \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (2.7)$$

$$Q = \dot{m} \times 3600 \text{ s/h} \times \frac{1}{0,0899 \text{ kg/Nm}^3} \quad (2.8)$$

Dabei werden die Dichte ρ auf $5,3 \text{ kg/m}^3$ und die Geschwindigkeit u auf 15 m/s festgesetzt. Um den Mengenfluss Q in Nm^3/h zu erhalten muss der Massenfluss $\dot{m}$ durch die Dichte von Wasserstoff unter Normbedingungen, die $0,0899 \text{ kg/Nm}^3$ beträgt (Linde Gas GmbH 2016), dividiert sowie von Sekunden in Stunden umgerechnet werden. Für den Mengenfluss Q ergeben sich auf Grundlage dieser Werte $24.990 \text{ Nm}^3/h$. Unter dem Aspekt des maximalen Einspeisepotenzials von $7.400 \text{ Nm}^3/h$ pro Standort ist demnach die Möglichkeit gegeben, noch weitere Wasserstoffquellen an die Pipeline anzuschließen.

Abbildung 11 zeigt den Schritt zur Identifikation der integrativen Standorte vereinfacht in einem Flussdiagramm. Das Diagramm soll verdeutlichen, dass die Auswahl der in Frage kommenden Standorte über den INNER JOIN getroffen wird. Als Standorte sind dabei die Datensätze der Tankstellen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen zu sehen. Durch den INNER JOIN auf die obligatorischen Datensätze werden die Standorte gefiltert. Die weiteren Formulierungen wie der LEFT JOIN auf die optionalen Datensätze stellen den Grundbaustein für die in Kapitel 2.2.2 folgende Klassifikation dar. Das erzeugte Ergebnis des Flussdiagramms bzw. der SQL-Abfragen sind daher je Szenario:

1. Integrative Tankstellen mit Kriteriengrundlage
2. Integrative Kläranlagen mit Kriteriengrundlage
3. Integrative Biogaseinspeiseanlagen mit Kriteriengrundlage

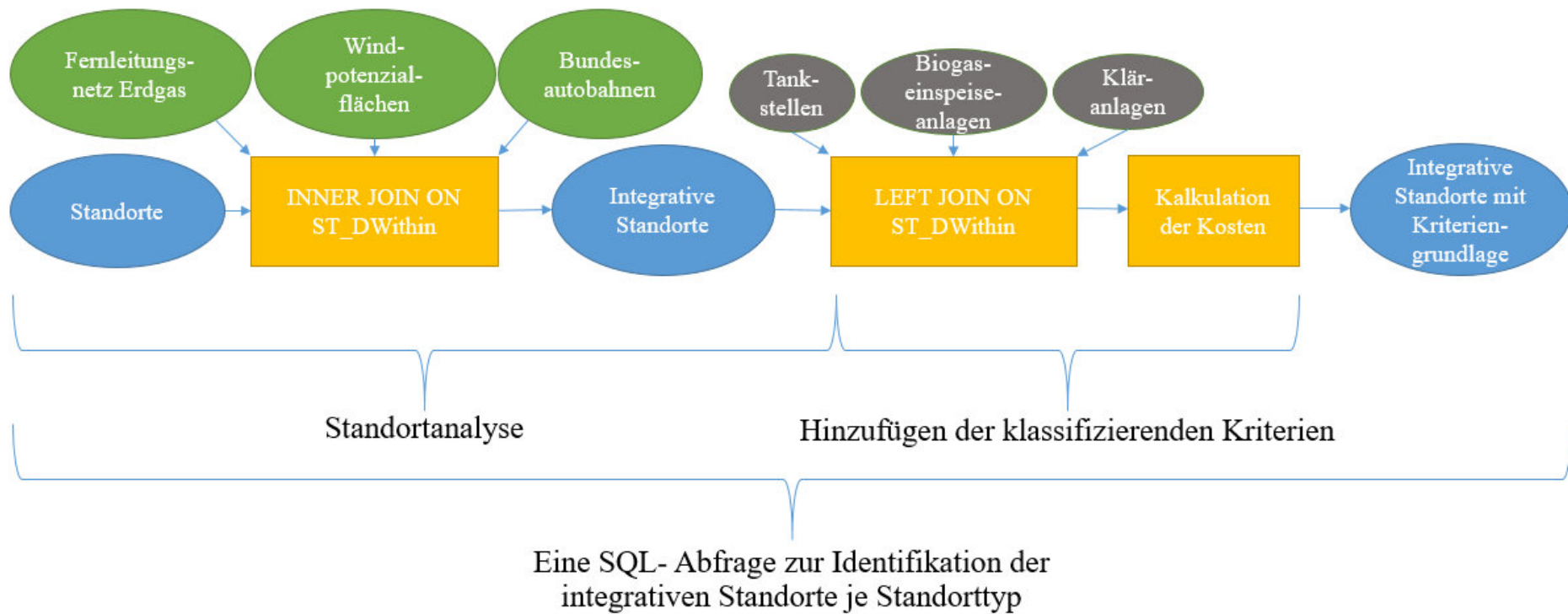


Abbildung 11: Vereinfachtes Flussdiagramm zur Identifikation integrativer Standorte, eigene Darstellung

Folgende SQL-Abfrage mit PostGIS-Funktionen stellt den Grundaufbau für die Standortanalyse, am Beispiel der Autobahntankstellen dar. Da es sich bereits um den Geodatenatz der Tankstellen an Deutschlands Bundesautobahnen handelt, ist ein INNER JOIN auf Deutschlands Bundesautobahnen nicht notwendig. Die SQL-Abfragen sind im Detail in Anhang 2-7 zu finden.

Grundaufbau der SQL-Abfragen

```
CREATE TABLE "Alle_PtG_Autobahntankstellen_Szenario_A"
SELECT DISTINCT ON (a.id) a.id, a.geom,
ST_Distance(a.geom, Wind.geom) AS distance_to_wind,
ST_Distance(a.geom, Gas.geom) AS distance_to_gas,
ST_Distance(a.geom, Klaer.geom) AS distance_to_klaer,
ST_Distance(a.geom, Bio.geom) AS distance_to_bio,
1,4 × (ST_Distance(a.geom, Gas.geom) × 352 + ST_Distance(a.geom, Wind.geom)
× 90) AS Kosten
FROM "Alle_Autobahntankstellen" AS a
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind
ON ST_DWithin(a.geom, Wind.geom, 2000)
INNER JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas
ON ST_DWithin(a.geom, Gas.geom, 2000)
LEFT JOIN "Alle_Klaeranlagen" AS Klaer
ON ST_DWithin(a.geom, Klaer.geom, 2000)
LEFT JOIN "Alle_Biogaseinspeiseanlagen" AS Bio
ON ST_DWithin(a.geom, Bio.geom, 2000)
ORDER BY T.id, ST_Distance(a.geom, Gas.geom),
ST_Distance(a.geom, Wind.geom);
```

Analyse der Kläranlagen

Da der Geodatenatz der Kläranlagen noch nicht nach der Lage an Bundesautobahnauf- und -abfahrten gefiltert ist, muss dies als obligatorischer Parameter mit Hilfe eines INNER JOIN auf ST_DWithin in die Abfrage miteingebaut werden.

Um eine doppelte Aufnahme von Standorten zu vermeiden, werden die Kläranlagen über eine WHERE-Klausel gefiltert, die nicht an einer identifizierten PtG-Tankstelle liegen (Momjian 2001):

- **WHERE ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL**

Auf diese Weise wird bei einem Standort mit Tankstelle und Kläranlage nur die Tankstelle als Standort angezeigt. Anhand der Attributdaten ist jedoch im Ergebnis der Tankstellenabfrage beispielsweise über das Feld „distance_to_klaer“ erkennbar, ob sich in der Nähe der Tankstelle eine Kläranlage befindet.

Um Standorte in die Abfrage miteinzubeziehen, bei der sich eine Kläranlage innerhalb des festgesetzten maximalen Abstandes von ST_DWithin(a.geom, b.geom, Angabe der maximal mögliche Entfernung) zu einem obligatorischen Datensatz und einer Tankstelle befindet, letztere aber den maximal zugelassenen Abstand beispielsweise zum Gasnetz nicht einhält, wird die oben genannte WHERE-Klausel mit Hilfe eines OR weiter variiert:

- **ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL
OR ST_Distance(T.geom, Gas.geom) >=2000.**

Eine Tankstelle mit benachbarter Kläranlage wird im Ergebnis daher ohne die Klassifikation, nur als Tankstelle dargestellt.

Analyse der Biogaseinspeiseanlagen

Der signifikante Unterschied zum Geodatensatz der Kläranlagen besteht darin, dass die Biogaseinspeiseanlagen über einen direkten Zugang an das Gasnetz verfügen, weshalb der INNER JOIN auf die maximale Entfernung zum Fernleitungsnetz Erdgas in einen LEFT JOIN umgeschrieben wird.

Zudem wird für SELECT DISTINCT ON bei ORDER BY der Abstand zur Bundesautobahnauf- bzw. -abfahrt gewählt, bei der eine Stand Alone-Zapfsäule errichtet werden könnte, da dies der Verbindung Tankstelle-Gasnetz über eine Wasserstoff-Pipeline entspricht.

Szenario B.1 und B.2

Das Ergebnis dieser Abfragen soll alle potenziellen integrativen Standorte, getrennt nach Tankstellen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen, anzeigen, die zum Fernleitungsnetz Erdgas maximal zwei Kilometer entfernt sind. Wobei als maximale Entfernung von dem Elektrolyseur-Standort - Tankstelle, Kläranlage oder Biogaseinspeiseanlage - zum Windpark der dynamische Abstand gilt.

Für diese drei Abfragen muss daher abweichend zum Grundaufbau in Szenario A für die Vor-Ort-Wasserstoff-Erzeugung der Abstand zu den Windpotenzialflächen bei ST_DWithin auf den ermittelten maximalen dynamischen Abstand gesetzt werden.

Über eine WHERE-Klausel

- **WHERE** Wind.dynamischerAbstand >= **ST_Distance**(a.geom, Wind.geom)

lassen sich die Standorte filtern, an welchen der ermittelte dynamische Abstand größer oder gleich der mit PostGIS berechneten Distanz zur Windpotenzialfläche ist (Momjian 2001).

Um die WHERE-Klausel für die Abfrage der Biogaseinspeiseanlagen und der Kläranlagen zu erweitern, muss ein AND miteingebaut werden:

- **WHERE** Wind.dynamischerAbstand >= **ST_Distance**(a.geom, Wind.geom)
AND (**ST_Distance**(T.geom, Gas.geom) **IS NULL**
OR **ST_Distance**(T.geom, Gas.geom) >=2000)

Verteilung der Standorte über die Bundesländer

Im Anschluss soll mit Hilfe der COUNT-, GROUP BY- und ST_Intersects-Funktion untersucht werden, wie sich die Standorte über die Bundesländer verteilen. Dabei sollen die Bundesländer absteigend mit Hilfe von ORDER BY nach der Anzahl der vorhandenen Standorte sortiert werden (Obe und Hsu 2015)

```
SELECT b.Bundesland, COUNT(b.Bundesland)
FROM "Alle_PtG-Tankstellen_SzenarioA.1" AS a, "Bundeslaender" AS b
WHERE ST_Intersects(a.geom, b.geom)
GROUP BY b.Bundesland
ORDER BY COUNT(b.Bundesland) DESC;
```

2.2.2. Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Im Anschluss an die Identifikation der Standorte, sollen diese auf Grundlage der vorhandenen Infrastruktur klassifiziert werden und die drei verschiedenen Datensätze der Standorttypen zu einem Datensatz vereinigt werden. Der Aufbau der SQL-Abfragen zur Klassifikation der Standorte ist für alle Szenarien derselbe. Ab der Vereinigung wird daher mit einem Datensatz je Szenario gearbeitet.

Als Filterkriterium wird festgesetzt, dass die identifizierten Standorte mindestens 1.000 m voneinander entfernt sein müssen. Auf diese Weise soll vermieden werden, dass in direkter Nachbarschaft mehrere Elektrolyseure stehen. Vielmehr ist das Ziel, an dem bestgeeigneten Standort den Elektrolyseur zu installieren und die bis zu 1.000 m entfernten Standorte über eine Wasserstoff-Pipeline mit Wasserstoff versorgen. Dabei gelten die nach GasNZV § 33 Abs. 1 auf 250.000 € begrenzten Kosten für die Errichtung von Pipelines bis 1.000 m Länge (siehe Kapitel 1.4).

Im Fall einer solchen räumlichen Konkurrenz wird der beste Standort unter Verwendung folgender Faktoren ausgewählt:

1. Der Standort mit der besseren Klasse wird immer bevorzugt, beispielsweise erhält also ein Standort der Klasse 1 stets Vorzug vor einem Standort der Klasse 2.
2. Sind die Standorte gleichwertig klassifiziert, wird der kostengünstigere bevorzugt. Die Auswahl erfolgt dabei über das in Kapitel 2.2.1 erstellte Attributfeld „Kosten“, dem die Kriterien Abstand zum Fernleitungsnetz Erdgas und Abstand zum Windpark zugrunde liegen.

Als Ergebnis wird daher je Szenario ein Datensatz erzeugt, dessen Standorte nicht in räumlicher Konkurrenz stehen.

Die einzelnen Schritte zur Bildung des Netzwerkes sind in Abbildung 12 veranschaulicht und werden anschließend im Text zusammen mit den SQL-Abfragen genauer beschrieben.

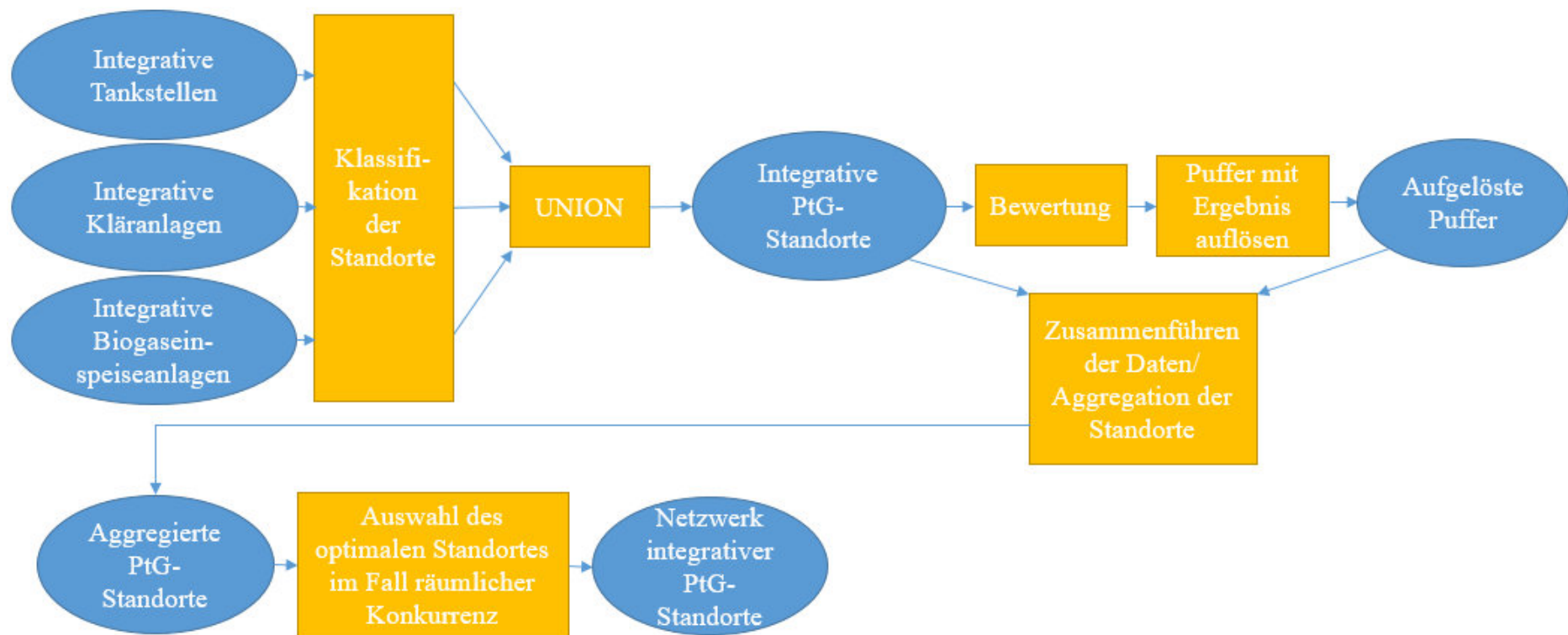


Abbildung 12: Vereinfachtes Flussdiagramm zur Klassifikation der integrativen Standorte und zur Auswahl des optimalen Standortes im Fall räumlicher Konkurrenz, eigene Darstellung

Klassifikation der Standorte

Im Rahmen der Klassifizierung werden zwei Attributfelder – „Typ“ und „Klasse“ – angelegt. Das Attributfeld Typ gibt die Infrastruktur wieder, also handelt es sich um eine Tankstelle, Kläranlage oder Biogaseinspeiseanlage.

Das Feld „Klasse“ klassifiziert die Standorte auf Basis der vorhandenen Infrastruktur. Tabelle 3 zeigt die Kriterien der drei verschiedenen Klassen.

Tabelle 3: Klassifikation der Standorte, eigene Darstellung

Klasse	Kriterien
1	Tankstelle mit Kläranlage oder Biogaseinspeiseanlage
2	Tankstelle
3	Kläranlage oder Biogaseinspeiseanlage

Die Einteilung in eine der Klassen erfolgt über eine WHERE-Klausel, die die in Kapitel 2.2.1 mit Hilfe von ST_Distance(a.geom, b.geom) erstellten Attributfelder nach dem NULL-Wert abfragt.

Die folgende Formulierung setzt den Wert „Klasse“ für den Datensatz der potenziellen PtG-Tankstellen auf 1:

```
UPDATE "PtG-Tankstellen_SzenarioA.1"  
  SET klasse= 1  
    WHERE distance_to_klaer IS NOT NULL  
    OR distance_to_bio IS NOT NULL;
```

Vereinigung und Bewertung der Daten

Damit die Datensätze der potenziellen PtG-Kläranlagen mit den Datensätzen der PtG-Tankstellen und PtG-Biogaseinspeiseanlagen verglichen werden können, müssen diese in einem Datensatz zusammengeführt werden.

Dies geschieht mit Hilfe der Funktion UNION ALL, die mehrere SELECT-Abfragen zu einem Datensatz zusammenführt, wobei alle Daten erhalten bleiben (Obe und Hsu 2015).

```

CREATE TABLE "PtG-Alle_Standorte_SzenarioA.1" AS
SELECT T.id, T.geom, T.typ, T.klasse, T.leistungmw, T.kosten
FROM "PtG-Tankstellen_SzenarioA.1" AS T
UNION ALL
SELECT K.cat, K.geom, K.typ, K.klasse, K.leistungmw, K.kosten
FROM "PtG-Klaeranlagen_SzenarioA.1" AS K
UNION ALL
SELECT B.id, B.geom, B.klasse, B.leistungmw, B.kosten
FROM "PtG-Biogaseinspeiseanlagen_SzenarioA.1" AS B;

```

Wie oben dargestellt, sollen Standorte mit mehr Infrastruktur vor Tankstellen und Tankstellen vor Biogaseinspeiseanlagen oder Kläranlagen bevorzugt werden.

Für dieses Ziel wird das Attributfeld „Bewertung“ erstellt, das das Attributfeld „Kosten“ anhand der drei Klassen unterteilt. Als Wert für die Unterteilung werden die maximal möglichen Kosten je nach Szenario A oder B festgelegt.

Die maximal möglichen Kosten für die Stromleitung und Wasserstoff-Pipeline für Szenario A errechnen sich aus (vgl. Kapitel 1.5 und 2.2.1) und ergeben somit 1.237.000 €:

$$K_{\text{max. Gesamt}} = 1,4 \times (2000 \text{ m} \times 90 \text{ €/m} + 2000 \text{ m} \times 352 \text{ €/m}) \quad (2.9)$$

Das Attributfeld „Bewertung“ wird für Szenario A Klasse 2 mit folgenden Befehlen berechnet:

```

UPDATE "Alle_PtG-Standorte"
SET Bewertung= Kosten + 1237000
WHERE Klasse = 2;

```

Für Klasse 1 wird Bewertung = Kosten und für Klasse 3 Bewertung = Kosten + 2 × 1.237.000 festgesetzt.

Für Szenario B ergeben sich maximale Kosten von 2.047.906 €.

Aggregation der in räumlicher Konkurrenz befindlichen Standorte

Zur Erreichung des Ziels, der Auswahl des optimalen Standorts im Fall räumlicher Konkurrenz, wird entsprechend der Vorgehensweise und der SQL-Abfragen aus Kapitel 2.1.3 (Aggregation der Windpotenzialflächen) den in Konkurrenz befindlichen Standorten eine gemeinsame ID (ptg_id) zugewiesen.

Auswahl des optimalen Standortes im Fall räumlicher Konkurrenz

Mit Hilfe des erstellten Feldes Bewertung wird nun für die Standorte mit derselben ID stets der Standort mit den geringsten Kosten ausgewählt, wobei die Einteilung in eine höhere Klasse immer Vorrang hat.

Dies geschieht mit einer verschachtelten SQL-Abfrage, die die minimale Bewertung, mit der identischen ID, abfragt.

```
CREATE TABLE "Netzwerk_PtG-Standorte_SzenarioA.1" AS  
SELECT *  
FROM "Alle_PtG-Standorte_aggregiert" AS a  
WHERE Bewertung = (SELECT Min(Bewertung)  
FROM "Alle_PtG-Standorte_aggregiert" AS b  
WHERE b.ptg_id = a.ptg_id);
```

Verteilung der Standorte nach Typ und Klasse

Die Verteilung der Standorte über die Attribute Typ und Klasse lässt sich über die Aggregatfunktion COUNT und GROUP BY aufrufen. Die Anwendung von ORDER BY auf COUNT(klasse) DESC sortiert die Anzahl in absteigender Reihenfolge (Obe und Hsu 2015).

```
SELECT a.typ, a.klasse, COUNT(a.klasse)  
FROM „Netzwerk_PtG-Standorte_SzenarioA.1" AS a  
GROUP BY a.typ, a.klasse  
ORDER BY COUNT(a.klasse) DESC;
```

Darstellung der Standorte mit den geringsten zu erwartenden Kosten und mit der besten Bewertung

Als Ergebnis sollen für jedes Szenario

1. die zehn Standorte mit den geringsten zu erwartenden Kosten und
2. die zehn Standorte mit der besten Bewertung

kartographisch präsentiert und tabellarisch aufsteigend sortiert werden.

Über ORDER BY werden daher die integrativen Standorte nach den Kosten und in einer weiteren Abfrage nach der Bewertung aufsteigend mit ASC sortiert. Über LIMIT lässt sich die Antwort auf zehn Objekte begrenzen (Momjian 2001).

```
SELECT *  
FROM "Netzwerk_PtG-Standorte_SzenarioA.1"  
ORDER BY Bewertung ASC LIMIT 10;
```

2.3. Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes

Im Rahmen der Energiewende soll im Strom nachfrageschwachen, aber windreichen Norden Deutschlands, die Windkraft weiter ausgebaut werden, während im nachfragestarken Süden durch die Abschaltung der Atomkraftwerke eine Energiesenke entsteht. Die Folge ist der unvermeidbare Ausbau des Stromnetzes, vor allem von Norden nach Süden, um den im Norden erzeugten erneuerbaren Strom Richtung Süden zu transportieren. Die PtG-Technologie und das bereits bestehende Gasnetz kann zur Entlastung der Stromnetze genutzt werden und deren Ausbau reduzieren, indem im Norden erzeugte erneuerbare Energie in Wasserstoff umgewandelt und über das Fernleitungsnetz Erdgas als Energieträger in Richtung Süden transportiert wird (Merten und Krüger 2015).

2.3.1. Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden

Auf Grundlage der in Kapitel 2.2 identifizierten Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas wird ermittelt, welche dieser Standorte sich für einen derartigen Energietransport eignen und welche Menge grünen Wasserstoffs sie potenziell für den Transport Richtung Süden einspeisen könnten.

Für einen solchen Energietransport Richtung Süden bieten sich vor allem die Erdgas-Pipelines MIDAL und OPAL an, welche wie in Abbildung 13 dargestellt in den Süden führen.

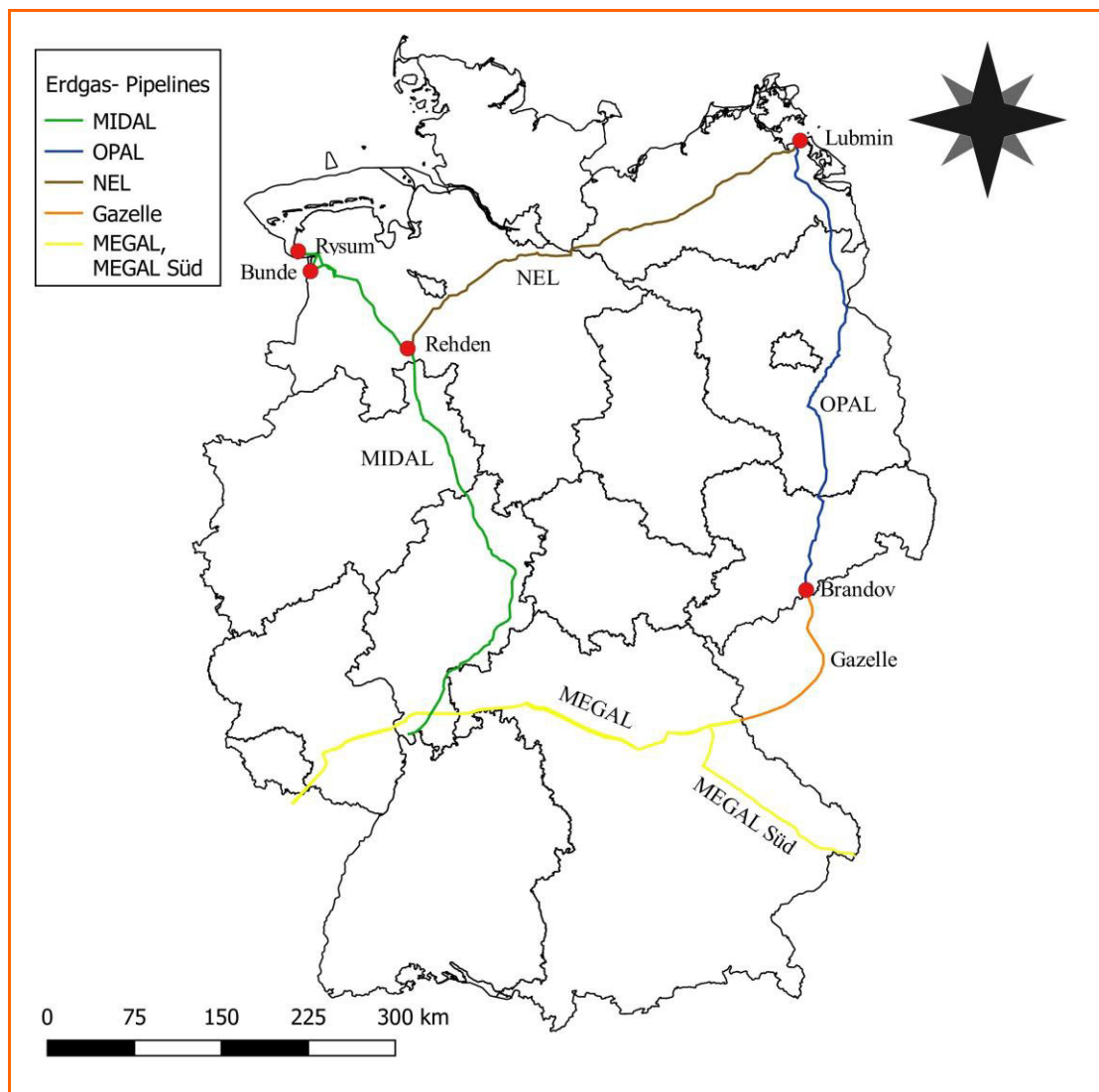


Abbildung 13: Verlauf ausgewählter Erdgas-Pipelines, eigene Darstellung

Die MIDAL-Pipeline hat in Bunde und Rysum ihren Startpunkt und führt Richtung Ludwigshafen (GASCADE Gastransport GmbH 2016a). Sie bezieht ihr Erdgas aus der britischen Nordsee und aus Norwegen (GASCADE Gastransport GmbH 2016b). Das Erdgas für die OPAL- und NEL-Pipeline wird über das Nord Stream-Pipelinesystem aus Russland durch die Ostsee in der Anlandestation Lubmin den beiden Pipelines zugeführt (Nord Stream AG 2016). An der Verdichterstation Rehden trifft die NEL-Pipeline auf die MIDAL-Pipeline (GASCADE Gastransport GmbH 2016c). Die tschechische Pipeline Gazelle verbindet die OPAL- mit der MEGAL-Pipeline, welche den Süddeutschland und Frankreich mit Erdgas versorgt (RWE AG 14.01.2013). Für diese Studie soll das Einspeisepotenzial der MIDAL- und OPAL-Pipeline untersucht werden.

Sowohl die OPAL- als auch die MIDAL-Pipeline transportieren große Mengen an Erdgas. Auf Grundlage der Daten der physischen Lastflüsse des Jahres 2015 für die Verdichterstationen Bunde - MIDAL - (GASCADE Gastransport GmbH 2016d) und Brandov – OPAL - (OPAL Gastransport GmbH 2016) werden folgende Daten berechnet:

- Der maximale Lastfluss in Nm^3/h ,
- Das daraus resultierende maximale Einspeisepotenzial für Wasserstoff ausgehend von einem 5 % Anteil von Wasserstoff im Gasnetz (siehe Kapitel 1.3)
- Das 1. Dezil entspricht dem p-Quantil für $p = 0,1$ (Bankhofer und Vogel 2008) und bedeutet, dass $(1-p) * 100 \%$ der Werte größer des Ergebnisses sind (Pruscha 2006). Innerhalb von 90 % der Stunden des Jahres, also 7884 h/a, fließt dementsprechend mehr Erdgas durch die entsprechende Verdichterstation.
- Das aus dem 1. Dezil resultierende Einspeisepotenzial für Wasserstoff ausgehend von einem 5 % Anteil von Wasserstoff im Gasnetz. Dieser Wert gibt an, dass innerhalb von 7.884 h/a mindestens diese Menge an Wasserstoff pro Stunde eingespeist werden kann.

In Microsoft Excel lassen sich die p-Quantile für $p = 0,1$ mit Hilfe folgender Funktion berechnen (Microsoft 2016):

- =QUANTIL.INKL(C5:C8764; 0,1).

Die Abfragen für diese Analyse werden auf den Netzwerk-Datensatz durchgeführt, um realitätsnähere Ergebnisse zu erhalten. Durch die Verwendung des Netzwerk-Datensatzes wird vermieden, dass Standorte, die unterhalb eines Kilometers voneinander entfernt sind, aufgenommen werden.

Der Datensatz des Fernleitungsnetzes Erdgas enthält ein Feld mit dem Namen der Pipeline, dieses wird nun nach MIDAL und OPAL abgefragt. Mit Hilfe einer WHERE-Klausel lassen sich diese Standorte mit einer Abfrage anzeigen.

```
SELECT *  
FROM "Netzwerk_PtG-Standorte_SzenarioA1" AS a  
WHERE a.pipeline = 'MIDAL' OR a.pipeline = 'OPAL';
```

Das gesamte Einspeisepotenzial in Nm³/h entlang der Pipelines wird über folgende Abfrage angezeigt:

```
SELECT a.Pipeline, COUNT(a.Einspeisung) AS Anzahl, SUM(a.Einspeisung) AS  
Einspeisung  
FROM "Netzwerk_PtG-Standorte_SzenarioA1" AS a  
WHERE a.Pipeline = 'MIDAL' OR a.Pipeline = 'OPAL'  
GROUP BY a.Pipeline;
```

Die Funktion SUM(Feldname) innerhalb einer SELECT-Abfrage gibt als Ergebnis die Summe eines Feldes wieder. Da das Ergebnis die Antwort aggregiert nach den Pipeline-Namen anzeigen soll, wird GROUP BY auf das entsprechende Feld angewandt. Zusätzlich wird mit Hilfe der COUNT-Funktion die Anzahl der Objekte angezeigt (Momjian 2001).

Als Ergebnis sollen neben den Daten der Pipeline auf Grundlage des physischen Lastflusses die Anzahl der in Frage kommenden Standorte mit der Summe der potenziellen Einspeisemenge grünen Wasserstoffs in Nm³/h wiedergegeben werden.

2.3.2. Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7

Die Projektinitiative „Energieallee A7“ ist ein Konzept von Dr. Hermann Scheer (Energieallee A7 2012a) und verfolgt das Ziel entlang der Bundesautobahn A7 Windparks zu errichten. Ein Gutachten identifizierte 1.251 Standorte mit einer potenziellen Leistung von 6.255 MW_{el}, ausgehend von der Verwendung von Windenergieanlagen der 5 MW_{el}-Klasse (Energieallee A7 2012b).

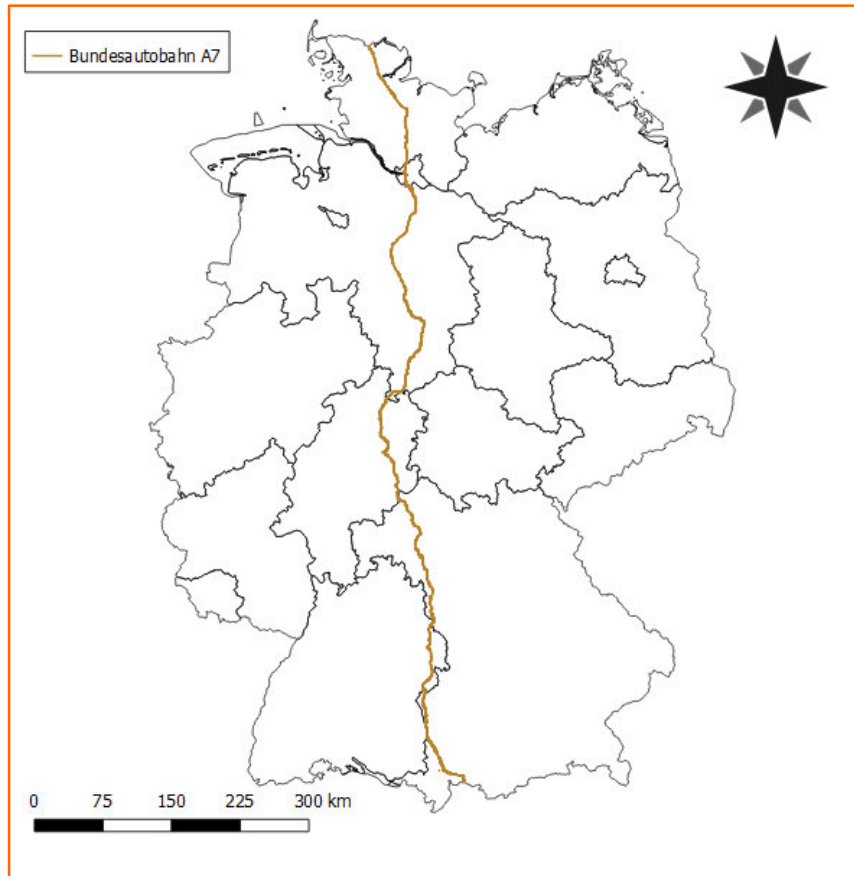


Abbildung 14: Verlauf der Bundesautobahn A7, eigene Darstellung

An der Bundesautobahn A7, die von Norden nach Süden führt (siehe Abbildung 14), könnte entlang ihres Verlaufs auch eine Wasserstoff-Pipeline errichtet werden. Eine solche Wasserstoff-Pipeline könnte wie die MIDAL- oder OPAL-Pipeline (siehe Kapitel 2.3.1) Wasserstoff als Energieträger von Norden Richtung Süden transportieren und gleichzeitig die im Zuge der H2Mobility entlang der A7 entstehenden Wasserstoff-Tankstellen mit grünem Wasserstoff versorgen.

Die Methodik aus Kapitel 2.2 und 2.3.1 lässt sich auch auf den nach der Bundesautobahn A7 gefilterten Datensatz anwenden. Damit lässt sich ermitteln, welche der Tankstellen entlang der A7 sich für eine vor Ort-Erzeugung von Wasserstoff auf Grundlage der Szenarien eignen. Der an diesen Tankstellen erzeugte grüne Wasserstoff aus Windenergie kann mit Hilfe der Pipeline die weiteren Tankstellen versorgen. Für dieses Konzept wird daher eine vereinfachte Methodik angewandt, die sich lediglich auf die Tankstellen entlang der A7 in der Nähe von Windpotenzialflächen bezieht.

Dabei soll als Ergebnis die Gesamtanzahl der integrativen Tankstellen zusammen mit der Anzahl der nicht in räumlicher Konkurrenz stehenden Tankstellen und dem daraus resultierenden Einspeisepotenzial an Wasserstoff in Nm³/h getrennt nach den Szenarien tabellarisch präsentiert werden.

Mit Hilfe der Dichte von Wasserstoff unter Normbedingungen, die sich auf 0,0899 kg/Nm³ beläuft (Linde Gas GmbH 2016), lässt sich die Anzahl der maximal möglichen Tankfüllungen pro Tag berechnen, wo der erzeugte grüne Wasserstoff verwendet wird. Für diese Kalkulation wird der Hyundai ix35 Fuel Cell zu Grunde gelegt, der einen Wasserstofftank besitzt, der 5,64 kg fasst und auf der Autobahn pro 100 km 0,9868 kg verbraucht (Hyundai Motor Deutschland GmbH 2016).

Mit Hilfe der COUNT-Funktion und ST_DWithin lässt sich zudem die gesamte Anzahl der Autobahntankstellen entlang der A7 berechnen und dem Ergebnis gegenüberstellen.

```
SELECT COUNT(a.id)
FROM "Autobahntankstellen" as a, "BAB_A7" as b
WHERE ST_DWithin(a.geom, b.geom, 1000);
```

3. Darstellung der Ergebnisse

3.1. Identifikation potenzieller Power to Gas-Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Im Folgenden werden die identifizierten Standorte, getrennt nach den vier Szenarien, als Karten dargestellt und beschrieben.

Aufgrund der Darstellung als Deutschlandkarte im kleinen Kartenmaßstab sind die Windpotenzialflächen, die Flächengrößen von 20 bis über 1.000 ha aufweisen, in diesen Karten nicht enthalten.

An den in Kapitel 3.1.1. präsentierten Standorten befinden sich zum Teil an den Tankstellen Kläranlagen oder Biogaseinspeiseanlagen. Die Ergebnisse über diese Verteilung werden mit Hilfe der Klassifikation in Kapitel 3.1.2 dargelegt.

3.1.1. Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Szenario A.1

Insgesamt ergeben sich für Szenario A.1 63 potenzielle integrative Standorte für die vor Ort-Erzeugung von grünem Wasserstoff mit anschließender Verwendung in der Mobilität auf Autobahnen und gleichzeitiger Einspeisung in das Fernleitungsnetz Erdgas. Die Standorte sind in Abbildung 15 deutschlandweit zusammen mit dem Fernleitungsnetz Erdgas und den Bundesautobahnen dargestellt.

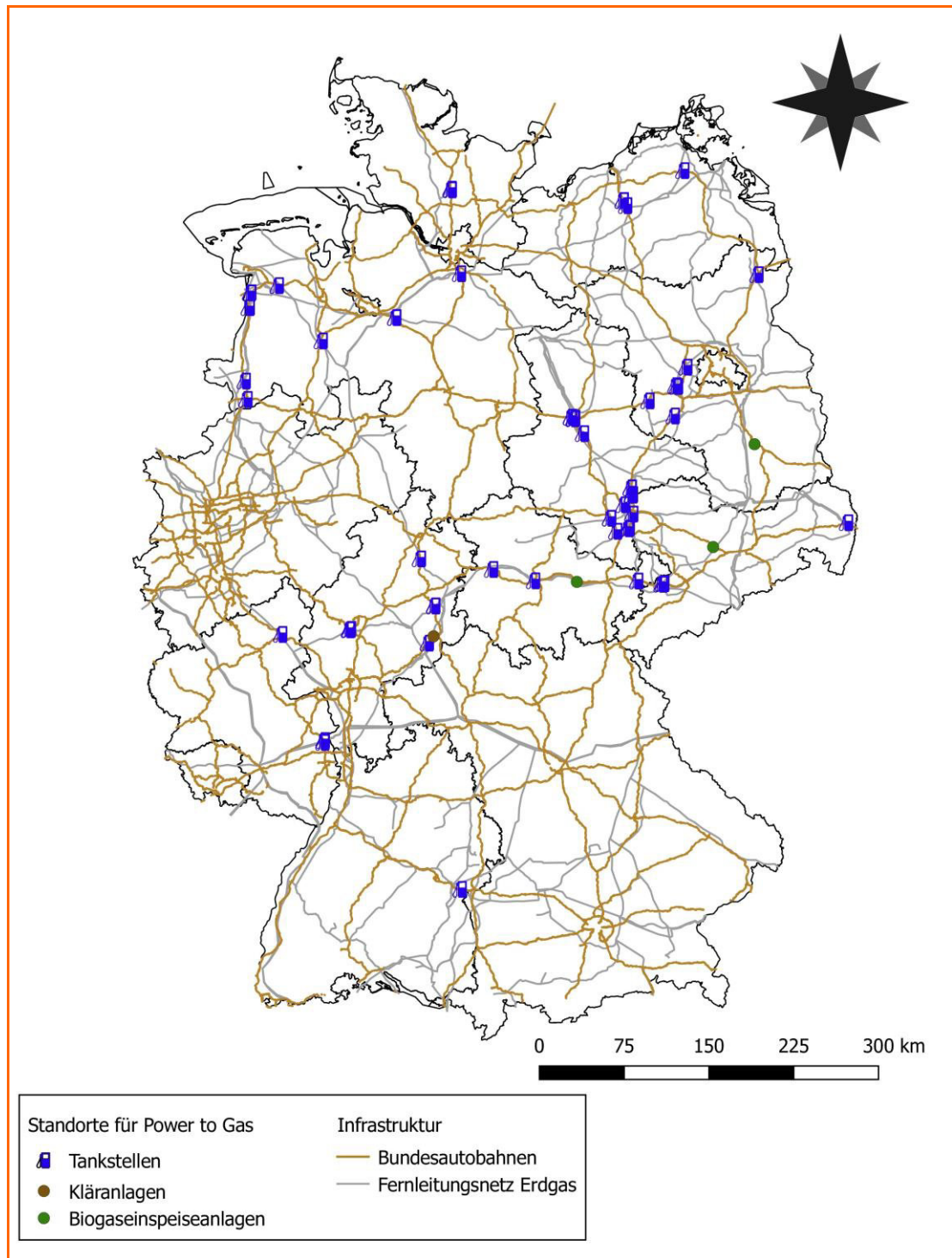


Abbildung 15: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario A.1, eigene Darstellung

Bei 59 der identifizierten Standorte handelt es sich um eine Autobahntankstelle, bei drei Standorten um eine Kläranlage und bei einem Standort um eine Biogaseinspeiseanlage.

Verteilung über die Bundesländer Deutschlands

In Tabelle 4 wird die Verteilung der integrativen Standorte auf die Bundesländer absteigend sortiert nach der Anzahl präsentiert.

Tabelle 4: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario A.1

Bundesland	Anzahl Standorte
Sachsen-Anhalt	17
Niedersachsen	10
Brandenburg	7
Sachsen	7
Hessen	7
Rheinland-Pfalz	4
Mecklenburg-Vorpommern	4
Thüringen	4
Schleswig-Holstein	2
Baden-Württemberg	1
Gesamt Deutschland	63

Dabei sind die südlichen Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg, bei denen zukünftig eine Energiesenke entstehen wird, gar nicht oder im Fall von Baden-Württemberg mit lediglich einem Standort vertreten. Über die meisten potenziellen Standorte verfügen die nördlicheren Bundesländer Sachsen-Anhalt und Niedersachsen. Dem Konzept entsprechend kann aus diesen Bundesländern der erzeugte Wasserstoff in Richtung Süden transportiert werden.

Szenario A.2

Nach den Kriterien von Szenario A.2, das Standorte an Windpotenzialflächen mit und ohne Restriktionen untersucht, eignen sich insgesamt 160 Standorte für das integrative Konzept. Abbildung 16 zeigt diese Standorte zusammen mit dem Fernleitungsnetz Erdgas und den Bundesautobahnen für ganz Deutschland.

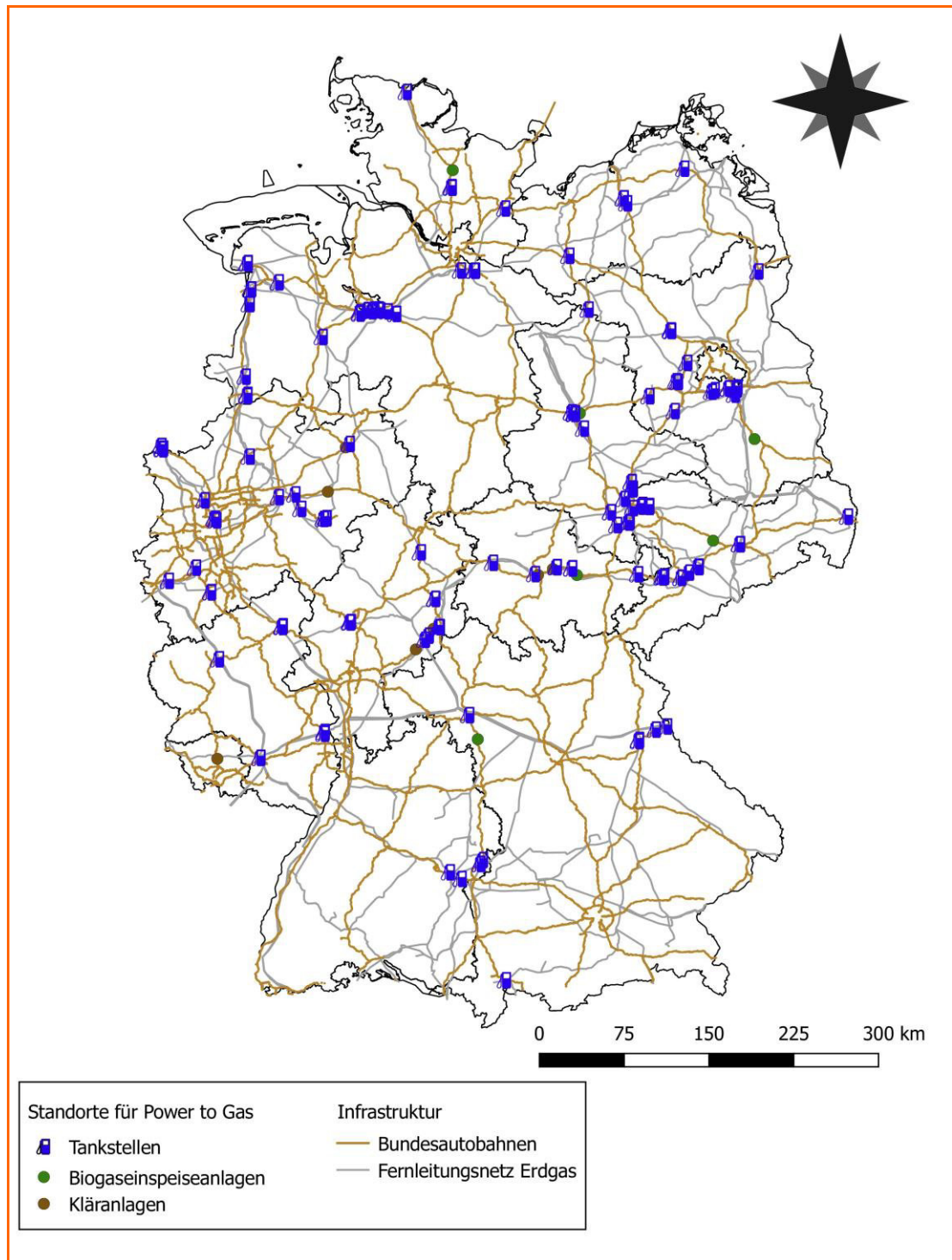


Abbildung 16: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario A.2, eigene Darstellung

Zu den identifizierten Standorten zählen 147 Tankstellen, sieben Kläranlagen und sechs Biogaseinspeiseanlagen.

Verteilung über die Bundesländer Deutschlands

Die Verteilung über die Bundesländer ist wie folgt (Tabelle 5). Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen verfügen über die meisten potenziellen Standorte. In den südlichen Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg befinden sich insgesamt 12 Standorte.

Tabelle 5: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario A.2

Bundesland	Anzahl Standorte
Niedersachsen	27
Nordrhein-Westfalen	22
Brandenburg	19
Sachsen	19
Sachsen-Anhalt	18
Hessen	11
Thüringen	10
Rheinland-Pfalz	9
Bayern	7
Baden-Württemberg	5
Schleswig-Holstein	5
Mecklenburg-Vorpommern	5
Bremen	2
Saarland	1
Gesamt Deutschland	160

Szenario B.1

Für die Standortanalyse auf Grundlage der Kriterien von Szenario B.1 mit dynamischem Abstand kommen 179 Standorte an Windpotenzialflächen ohne Restriktionen in Frage. Die Lage dieser Standorte werden in Abbildung 17 zusammen mit dem Fernleitungsnetz Erdgas und Deutschlands Bundesautobahnen auf einer Karte veranschaulicht.

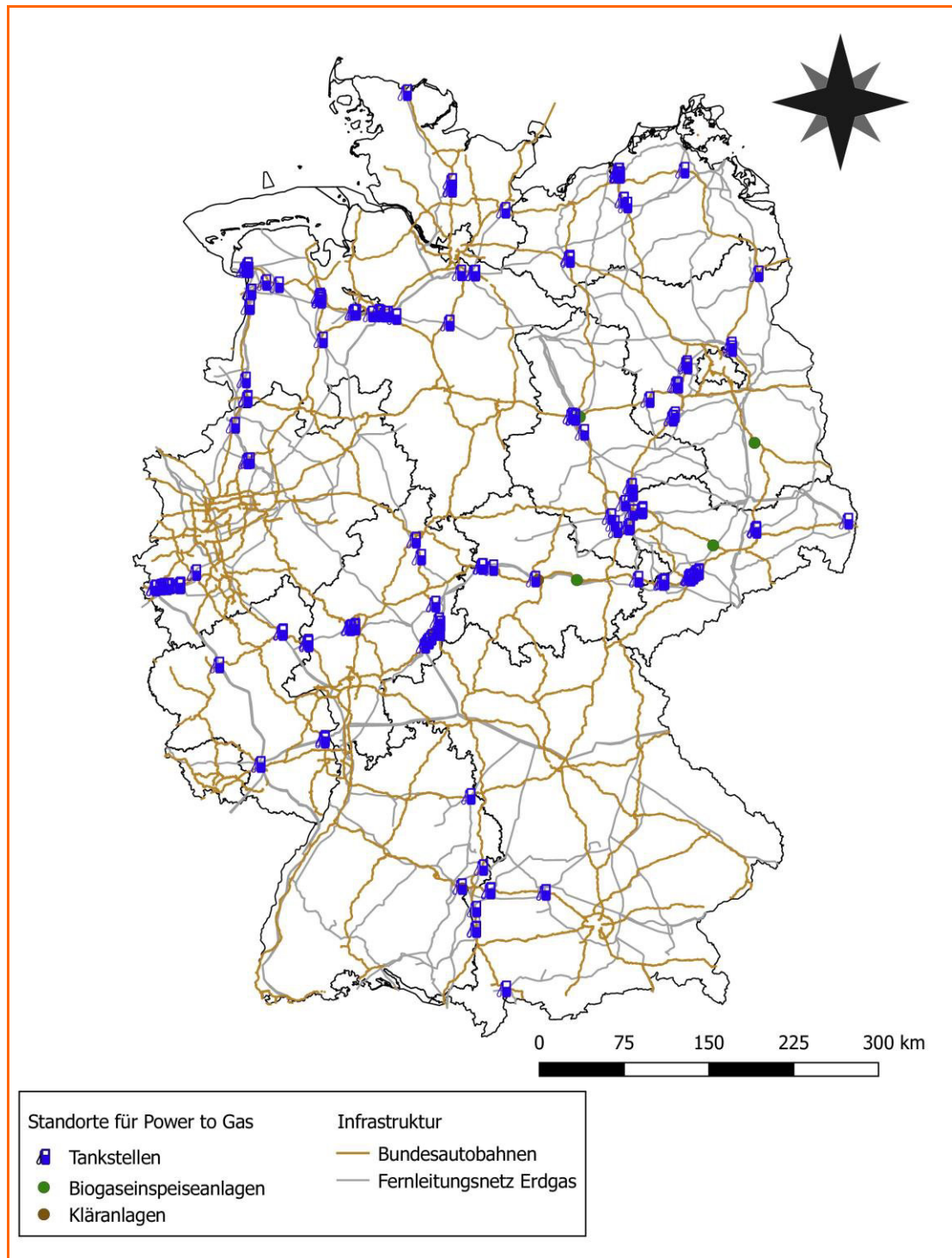


Abbildung 17: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario B.1, eigene Darstellung

Die Standorte setzen sich aus 172 Tankstellen, drei Kläranlagen und vier Biogaseinspeiseanlagen zusammen.

Verteilung über die Bundesländer Deutschlands

Tabelle 6 zeigt die Verteilung der Standorte über die Bundesländer, dabei befindet sich die größte Anzahl in Niedersachsen, Hessen und Sachsen. In den südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg liegen insgesamt 12 Standorte.

Tabelle 6: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario B.1

Bundesland	Anzahl Standorte
Niedersachsen	34
Hessen	23
Sachsen	23
Sachsen-Anhalt	19
Nordrhein-Westfalen	18
Mecklenburg-Vorpommern	14
Brandenburg	12
Rheinland-Pfalz	9
Thüringen	8
Baden-Württemberg	6
Schleswig-Holstein	6
Bayern	6
Bremen	1
Gesamt Deutschland	179

Szenario B.2

Die Analyse mit den Kriterien von Szenario B.2 ergibt insgesamt 431 potenzielle integrative Standorte, die in Abbildung 18 dargestellt sind.

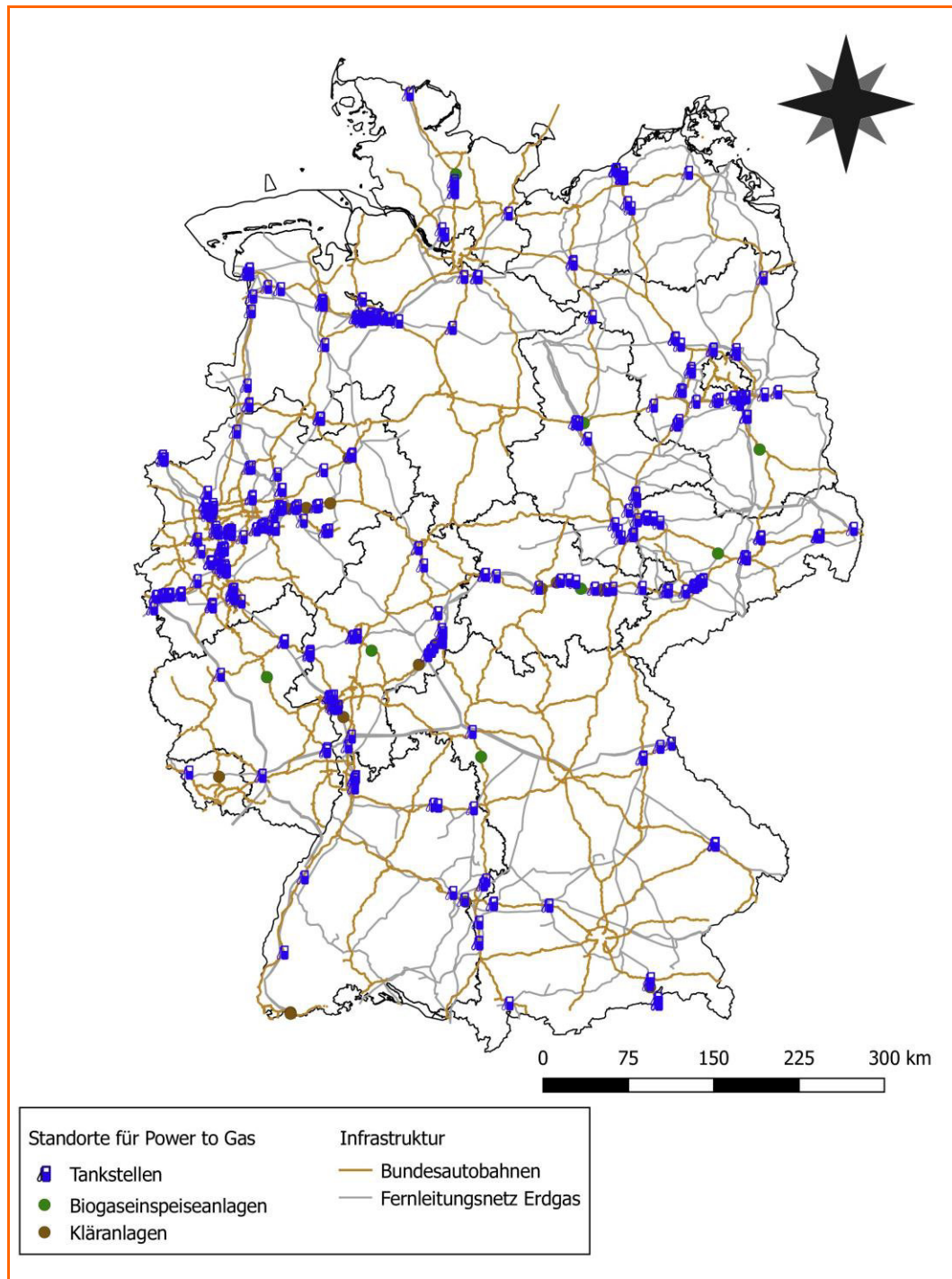


Abbildung 18: Deutschlandkarte mit den integrativen Standorten nach den Kriterien für Szenario B.2, eigene Darstellung

Hierbei handelt es sich um 402 Tankstellen, die den größten Anteil ausmachen, 21 Kläranlagen und acht Biogaseinspeiseanlagen.

Verteilung über die Bundesländer Deutschlands

In Tabelle 7 ist die Verteilung der integrativen Standorte auf die Bundesländer aufgelistet. Auf Grundlage der Kriterien für Szenario B.2 sind die meisten Standorte in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. In Bayern und Baden-Württemberg befinden sich 24 und 20 Standorte.

Tabelle 7: Verteilung der Standorte auf die Bundesländer für Szenario B.2

Bundesland	Anzahl Standorte
Nordrhein-Westfalen	133
Niedersachsen	48
Hessen	43
Brandenburg	36
Sachsen	35
Bayern	24
Thüringen	23
Baden-Württemberg	20
Sachsen-Anhalt	19
Mecklenburg-Vorpommern	18
Schleswig-Holstein	11
Rheinland-Pfalz	10
Bremen	9
Saarland	2
Gesamt Deutschland	431

3.1.2. Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Zunächst werden die identifizierten Standorte klassifiziert und anschließend, im Fall räumlicher Konkurrenz, der am besten geeignete Standort ausgewählt. Dadurch wird die Anzahl der Standorte reduziert.

Die in diesem Kapitel folgenden Tabellen zeigen die Anzahl der Standorte gruppiert nach Typ und Klasse aller Standorte, wie in Kapitel 2.2.2 und Tabelle 3 definiert, neben der Anzahl der verbleibenden Standorte nach Filterung der in Konkurrenz stehenden Standorte.

Szenario A.1

Tabelle 8 zeigt die Anzahl der integrativen Standorte gruppiert nach Typ und Klasse.

Tabelle 8: Anzahl der Standorte nach Szenario A.1 gruppiert nach Typ und Klasse

Typ	Klasse	Anzahl aller Standorte	Anzahl nach Auswahl
Tankstelle	2	45	34
Tankstelle	1	14	10
Biogaseinspeiseanlage	3	2	2
Biogaseinspeiseanlage	1	1	1
Kläranlage	3	1	1
Insgesamt		63	48

Bei der Analyse nach den Kriterien von Szenario A.1 sind Wind-Wasserstoff-Tankstellen am Fernleitungsnetz Erdgas der häufigste identifizierte Standortstyp. An bis zu 15 Standorten ist zusätzlich neben der Wind-Wasserstoff-Tankstelle eine Vermarktung des Sauerstoffs an eine Kläranlage oder eine direkte Einspeisung an einer Biogaseinspeiseanlage möglich. Diese Standorte entsprechen den Standorten der ersten Klasse. Bei den Standortstypen mit der geringsten Häufigkeit handelt es sich um die integrativen Biogaseinspeiseanlagen und Kläranlagen, mit insgesamt vier Standorten. Die Anzahl der Standorte reduziert sich nach der Filterung, der sich in räumlicher Konkurrenz befindenden Objekte, auf 15 integrative Tankstellen.

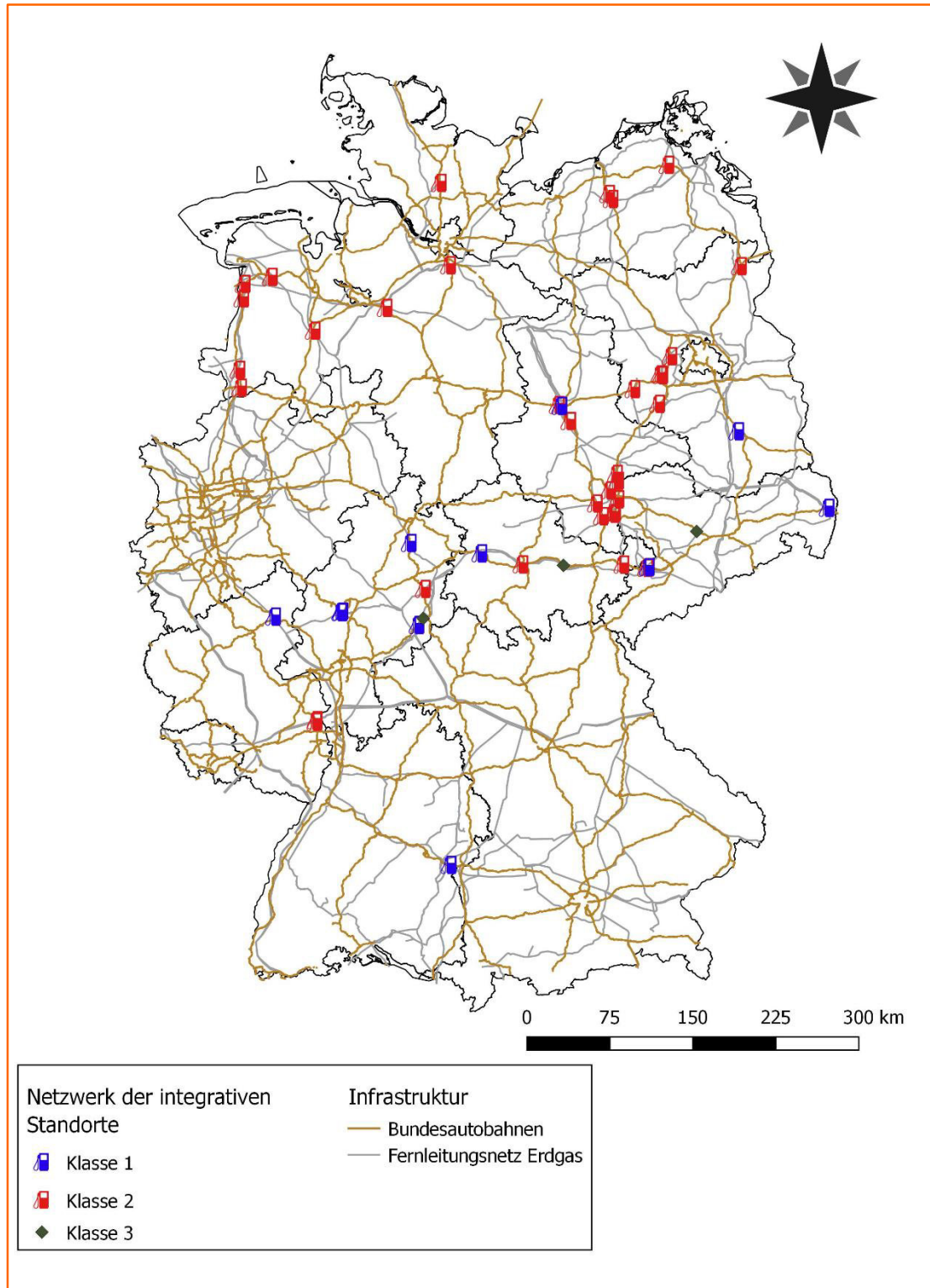


Abbildung 19: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.1, eigene Darstellung

Die integrativen Standorte, die nicht in räumlicher Konkurrenz stehen, sind in Abbildung 19 getrennt nach den drei Klassen dargestellt. Dabei ist eine räumliche Verteilung

lung in Bezug auf die Klassen erkennbar. Im Norden, wo sich vor allem Wind-Wasserstofftankstellen der zweiten Klasse befinden, fehlen Standorte der Klasse 1 und 3. Im zentralen Bereich von Deutschland sind hingegen alle drei Klassen vertreten.

Darstellung der Standorte mit der besten Bewertung

Tabelle 9 sortiert die zehn besten Standorte aufsteigend auf Grundlage der Bewertung. Dies bedeutet, dass im Fall einer Anzahl von über zehn Standorten der ersten Klasse lediglich Standorte aus dieser dargestellt werden. Zudem entspricht bei der ersten Klasse die Bewertung den Kosten in Euro für den Leitungsbau.

Tabelle 9: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario A.1

Rang	Typ	P _{Windpark} in MW _{el}	P _{Elektrolyseur} in MW _{el}	Einspeisung in Nm ³ /h	Kosten in €
1	Biogaseinspeiseanlage	249	37	7.400	94.551
2	Tankstelle	21	3	600	169.448
3	Tankstelle	21	3	600	204.916
4	Tankstelle	51	8	1.600	287.038
5	Tankstelle	12	2	400	322.101
6	Tankstelle	33	5	1.000	341.101
7	Tankstelle	249	37	7.400	382.132
8	Tankstelle	42	6	1.200	384.971
9	Tankstelle	12	2	400	405.606
10	Tankstelle	60	9	1.800	451.099
Summe		750	112	22.400	3.042.963

Die zehn besten Standorte von Szenario A.1 sortiert nach der Bewertung gehören alle der ersten Klasse an und verfügen über eine Einspeisepotenzial von insgesamt 22.400 Nm³/h erzeugt aus zehn Windparks mit 750 MW in Summe. Die geringsten Kosten für den Bau der Stromleitungen und der Wasserstoff-Pipeline belaufen sich auf 94.551 €. Dabei handelt es sich um eine Biogaseinspeiseanlage mit einer Autobahntankstelle. Die Gesamtkosten für die Errichtung der Stromleitungen und Wasserstoff-Pipelines werden mit 3.042.963 € kalkuliert.

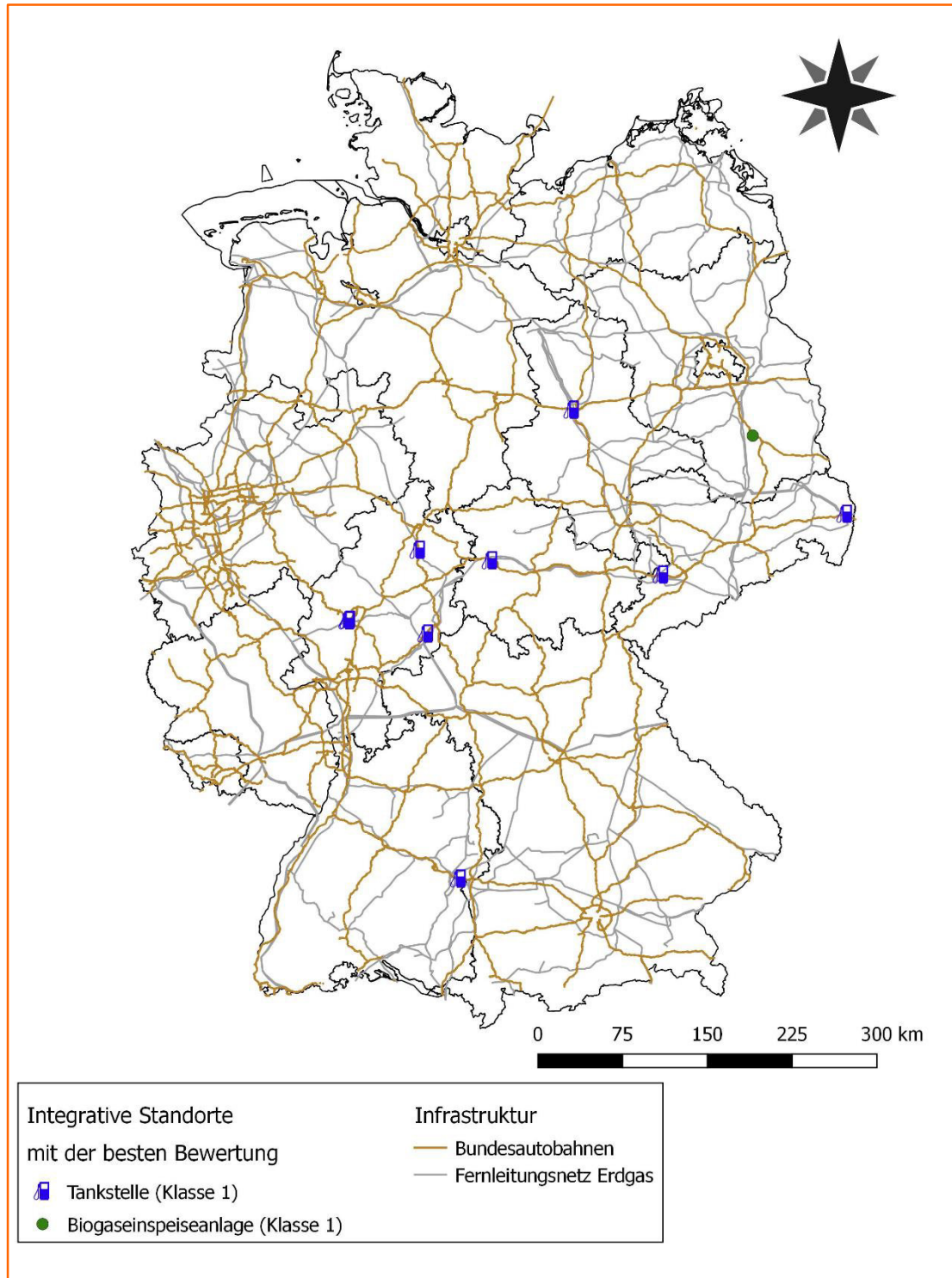


Abbildung 20: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario A.1, eigene Darstellung

Die Lage der zehn Standorte mit der besten Bewertung ist in Abbildung 20 kartographisch dargestellt. Dabei befindet sich der Großteil der Standorte weder südlich noch nördlich in Deutschland. Im Bundesland Hessen befindet sich mit vier integrativen Tankstellen die größte Anzahl der Standorte mit der besten Bewertung. Dabei befinden

sich die zwei Tankstellen mit den geringsten zu erwartenden Kosten, wovon eine ein Autohof ist, an der A45 in Hessen. Der entstehende Sauerstoff kann einer vor Ort bestehenden Kläranlage zugeführt werden. Diese möglichen Elektrolyseur-Standorte sind exemplarisch in Abbildung 21 dargestellt.

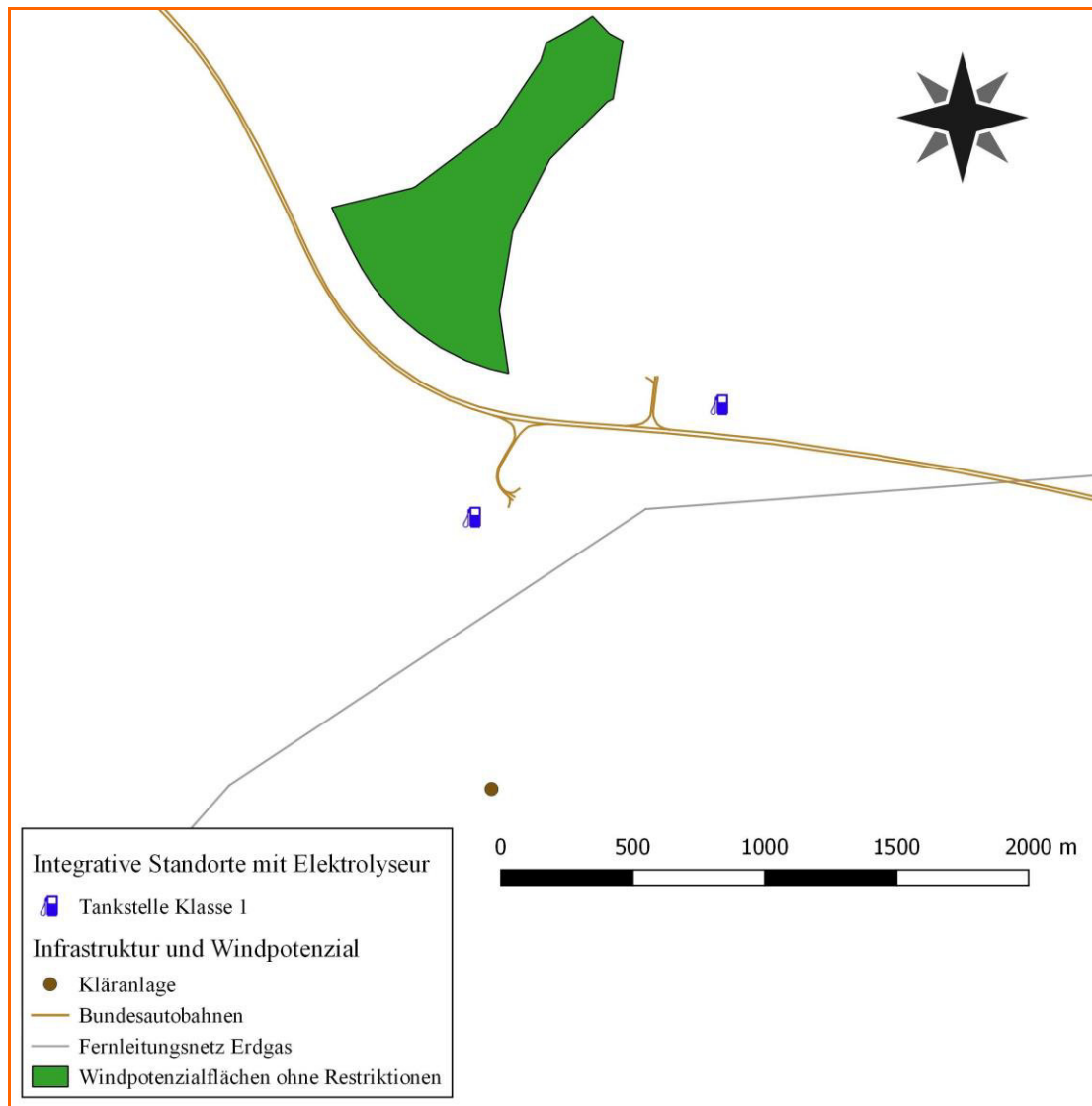


Abbildung 21: Exemplarische Darstellung zweier integrativer Tankstellen entlang der A45 in Hessen, eigene Darstellung

Ein weiterer Standort, wo eine Versorgung einer Kläranlage mit Sauerstoff möglich ist, liegt an der A7 in Hessen. Die Tankstelle befindet sich an einem Autohof mit einer größeren Anzahl an Parkplätzen. Das angrenzende Gewerbegebiet kann in Hinblick auf den Bedarf von Wasserstoff oder innovativer Wasserstoffkonzepte untersucht werden. Der vierte Standort im Bundesland Hessen ist an der A66 unmittelbar an einem

Gewerbepark. Die Biogaseinspeiseanlage befindet sich in Brandenburg an der A13 und in der Nähe eines bereits bestehenden Windparks. Über eine Wasserstoff-Pipeline ist dort die Versorgung einer Autobahnraststätte möglich.

Szenario A.2

Die Verteilung der Standorte auf die verschiedenen Typen und Klassen für Szenario A.2 ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Anzahl der Standorte nach Szenario A.2 gruppiert nach Typ und Klasse

Typ	Klasse	Anzahl aller Standorte	Anzahl nach Auswahl
Tankstelle	2	109	75
Tankstelle	1	38	27
Biogaseinspeiseanlage	3	7	7
Biogaseinspeiseanlage	3	3	3
Kläranlage	1	3	3
Insgesamt		160	115

Wie in Szenario A.1 stellen die integrativen Tankstellen der zweiten Klasse die meisten Standorte. Insgesamt gibt es 41 Standorte der ersten Klasse, wovon sich 30 nicht in räumlicher Konkurrenz befinden.

Die Filterung auf Grundlage der räumlichen Konkurrenz reduziert die Gesamtzahl der Standorte von 160 auf 115.

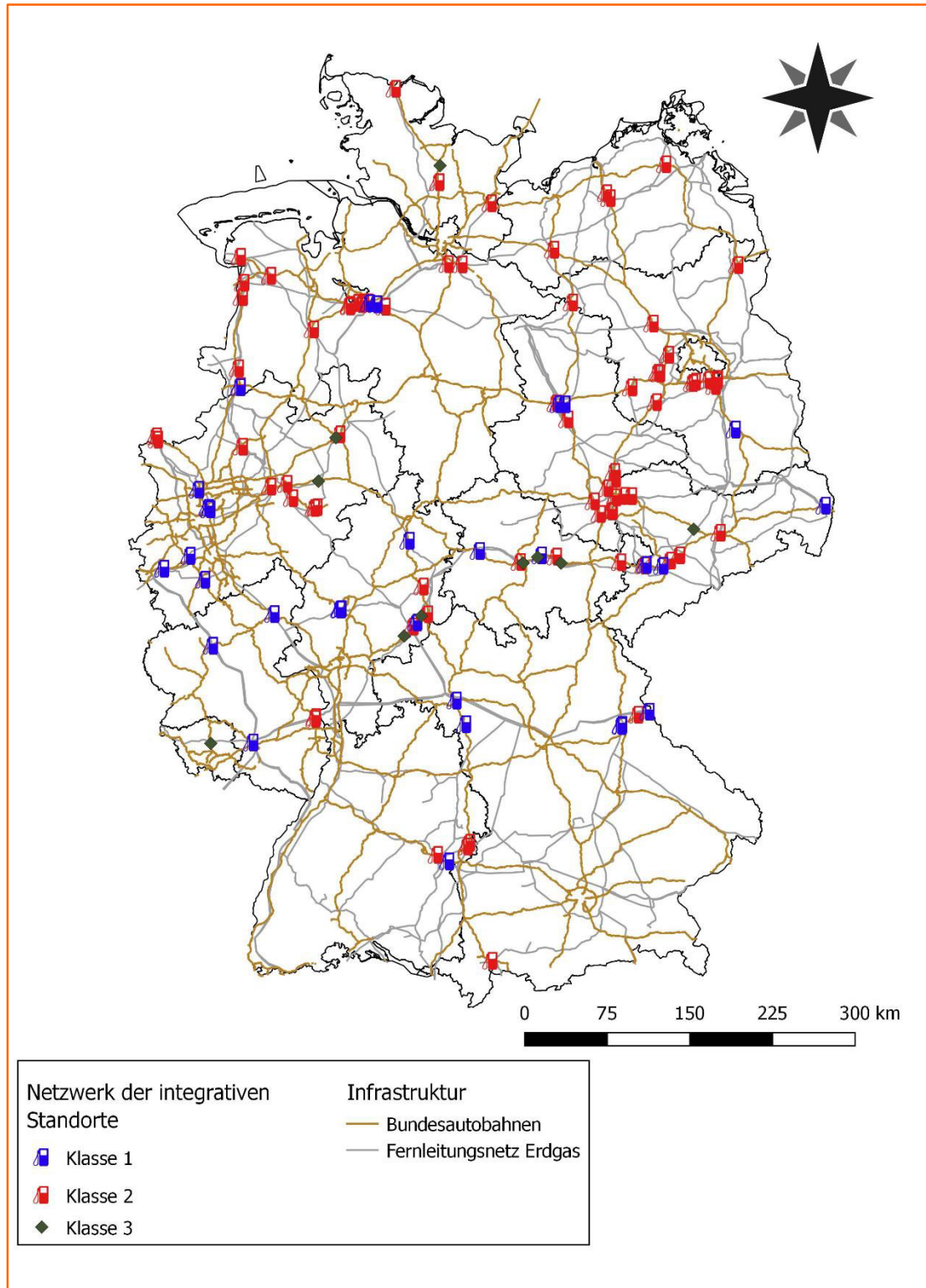


Abbildung 22: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario A.2, eigene Darstellung

Die Karte des Netzwerks der integrativen Standorte für Szenario A.2 (Abbildung 22) zeigt im Norden ein großes Potenzial an Wind-Wasserstoff-Tankstellen, bei denen eine Einspeisung von Wasserstoff in das Fernleitungsnetz Erdgas möglich ist (Klasse

2). Im zentralen Bereich von Deutschland ist dazu vermehrt vor Ort eine Vermarktung des Sauerstoffs an einer Kläranlagen oder die Einspeisung parallel zum Biome-
than an einer Biogaseinspeiseanlage möglich (Klasse 1). Auch die Standorte der
Klasse 3, die sich für die Errichtung einer Stand-Alone-Tankstelle in der Nähe einer
Bundesautobahnauf- oder -abfahrt an einer Biogaseinspeise- oder Kläranlage eignen,
sind vor allem im zentralen Bereich Deutschlands, wie beispielsweise in Nordrhein-
Westfalen oder Hessen, gelegen. Dabei sind die Standorte bis auf Teile Niedersach-
sens und dem Süden Deutschlands gleichmäßig über Deutschland verteilt.

Darstellung der Standorte mit der besten Bewertung

Tabelle 11 zeigt die besten zehn Standorte unter dem Aspekt der Bewertung.

Tabelle 11: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario A.2

Rang	Typ	P _{Windpark} in MW _{el}	P _{Elektrolyseur} in MW _{el}	Einspeisung in Nm³/h	Kosten in €
1	Biogasein- speiseanlage	15	2	400	75.960
2	Biogasein- speiseanlage	15	2	400	85.891
3	Biogasein- speiseanlage	249	37	7.400	94.551
4	Tankstelle	249	37	7.400	169.448
5	Tankstelle	111	17	3.400	171.844
6	Tankstelle	159	24	4.800	191.176
7	Tankstelle	24	4	800	204.916
8	Tankstelle	249	37	7.400	287.038
9	Tankstelle	12	2	400	310.965
10	Tankstelle	36	5	1.000	314.773
Summe		1.119	167	33.400	1.906.562

Unter den Standorten befindet sich neben sieben Tankstellen mit einer Biogasein-
speise- oder Kläranlage auch drei Biogaseinspeiseanlage mit Autobahntankstellen, die
weiter als zwei Kilometer vom Fernleitungsnetz Erdgas entfernt sind. Letztere drei
stellen die Standorte mit den geringsten zu erwartenden Kosten bezüglich des Lei-
tungsbaus.

Das Einspeisepotenzial an allen zehn Standorten beträgt insgesamt 33.400 Nm³/h er-
zeugt aus zehn Windparks mit einer Leistung von insgesamt fast 1.119 MW_{el}.

Im Vergleich zu Szenario A.1 reduzieren sich die Gesamtkosten für den Bau der Stromleitungen und der Wasserstoff-Pipelines um über eine Million auf 1.906.562 €. Insbesondere die Biogaseinspeiseanlagen mit einer Tankstelle stellen durch den bereits vorhandenen Anschluss an das Gasnetz eine kostengünstige Möglichkeit dar.

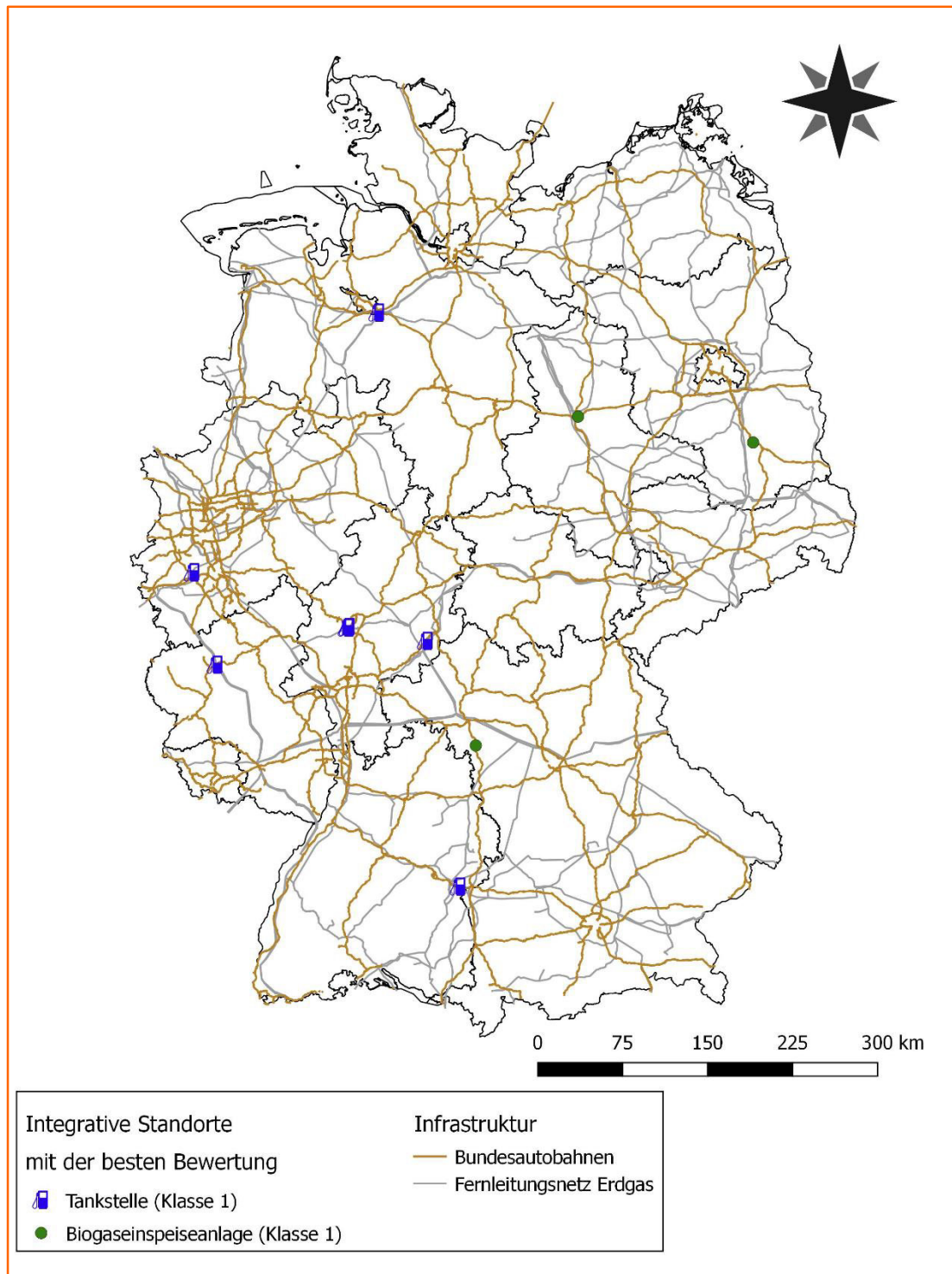


Abbildung 23: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario A.2, eigene Darstellung

Die zehn integrativen Standorte mit den besten Bewertungen sind in Abbildung 23 dargestellt und beinhalten vier Standorte, die auch nach Szenario A.1 zu den besten Standorten gehören. Die meisten Standorte mit der besten Bewertung – drei integrative Tankstellen - finden sich in Hessen. Darin sind drei der bereits vorgestellten Standorte aus Szenario A.1 enthalten, die sich an der A45 und der A66 befinden.

Eine der zwei hinzugekommenen Biogaseinspeiseanlagen befindet sich an der A2 nahe der Mercedes Benz Niederlassung, an der sich eine Tankstelle befindet. In der Niederlassung besteht demnach die Möglichkeit der Betreibung eines Fuhrparks aus Wasserstofffahrzeugen, die mit grünem Wasserstoff versorgt werden. Zudem können die zukünftigen zum Verkauf angebotenen Brennstoffzellenfahrzeuge dort exemplarisch mitsamt der Wasserstoff-Tankstelle vorgeführt und zum Probefahren angeboten werden. Abbildung 24 zeigt den potenziellen Standort.



Abbildung 24: Exemplarische Darstellung einer integrativen Biogaseinspeiseanlage, die gleichzeitig neben der Wasserstoffeinspeisung auch eine Tankstelle mit Wasserstoff versorgen kann, eigene Darstellung

Szenario B.1

Tabelle 12 zeigt die Verteilung der integrativen Standorte gruppiert nach Typ und Klasse für das Szenario B.1.

Tabelle 12: Anzahl der Standorte nach Szenario B.1 gruppiert nach Typ und Klasse

Typ	Klasse	Anzahl aller Standorte	Anzahl nach Auswahl
Tankstelle	2	119	78
Tankstelle	1	53	33
Kläranlage	3	3	3
Biogaseinspeiseanlage	3	2	2
Biogaseinspeiseanlage	1	2	2
Insgesamt		179	118

Dabei stellen die integrativen Wind-Wasserstoff-Tankstellen den häufigsten Standortstyp dar. Insgesamt ergeben sich nach Szenario B.1 174 integrative Tankstellen und 55 Standorte der ersten Klasse, wovon 35 nach der Filterung auf Grundlage der räumlichen Konkurrenz bestehen bleiben.

Die Gesamtzahl der Objekte reduziert sich dabei von 179 auf 118.

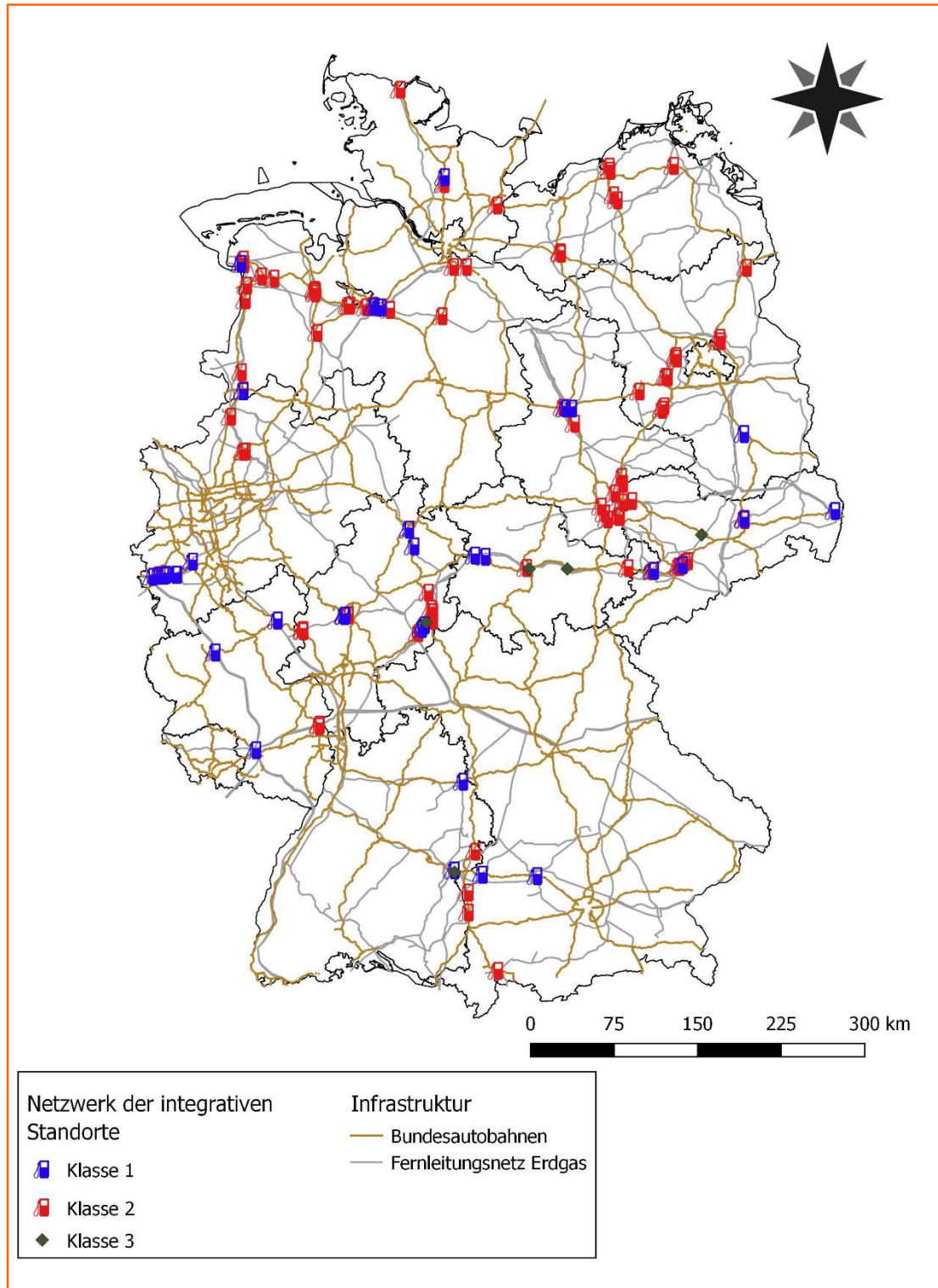


Abbildung 25: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario B.1, eigene Darstellung

Die Karte (Abbildung 25) mit dem Netzwerk der integrativen Standorte nach Szenario B.1 weist im Vergleich zu Szenario A.2 trotz ähnlicher Standortanzahl große Flächen ohne potenzielle Standorte wie in Nordrhein-Westfalen auf. Integrative Tankstellen

der Klasse 2 befinden sich vor allem im Norden Deutschlands, Brandenburg und Sachsen-Anhalt, wobei sie in letzterem räumlich sehr konzentriert auftreten. Die Standorte der Klasse 1 sind über ganz Deutschland verteilt. Lediglich im Südwesten Nordrhein-Westfalens befindet sich eine größere Anzahl auf kleinerem Raum.

Darstellung der Standorte mit der besten Bewertung

Tabelle 13 ordnet die besten zehn Standorte unter dem Aspekt der Bewertung.

Tabelle 13: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario B.1

Rang	Typ	P_{Windpark} in MW_{el}	$P_{\text{Elektrolyseur}}$ in MW_{el}	Einspeisung in Nm^3/h	Kosten in €
1	Biogaseinspeiseanlage	249	37	7.400	94.551
2	Tankstelle	21	3	600	169.448
3	Tankstelle	21	3	600	204.916
4	Tankstelle	12	2	400	272.082
5	Tankstelle	60	9	1.800	283.329
6	Tankstelle	51	8	1.600	287.038
7	Tankstelle	12	2	400	322.101
8	Tankstelle	198	30	6.000	328.185
9	Tankstelle	249	37	7.400	339.503
10	Tankstelle	249	37	7.400	341.101
Summe		1.122	168	33.600	2.642.254

Szenario B.1 liegt mit den zu erwartenden Kosten von 2.642.254 € für den Bau der Wasserstoff-Pipelines und Stromleitungen zwischen Szenario A.1 und A.2. Insgesamt ist an den Standorten eine Einspeisung von 33.600 Nm^3/h erzeugt aus Windparks mit einer Leistung von 1.122 MW_{el} in Summe möglich.

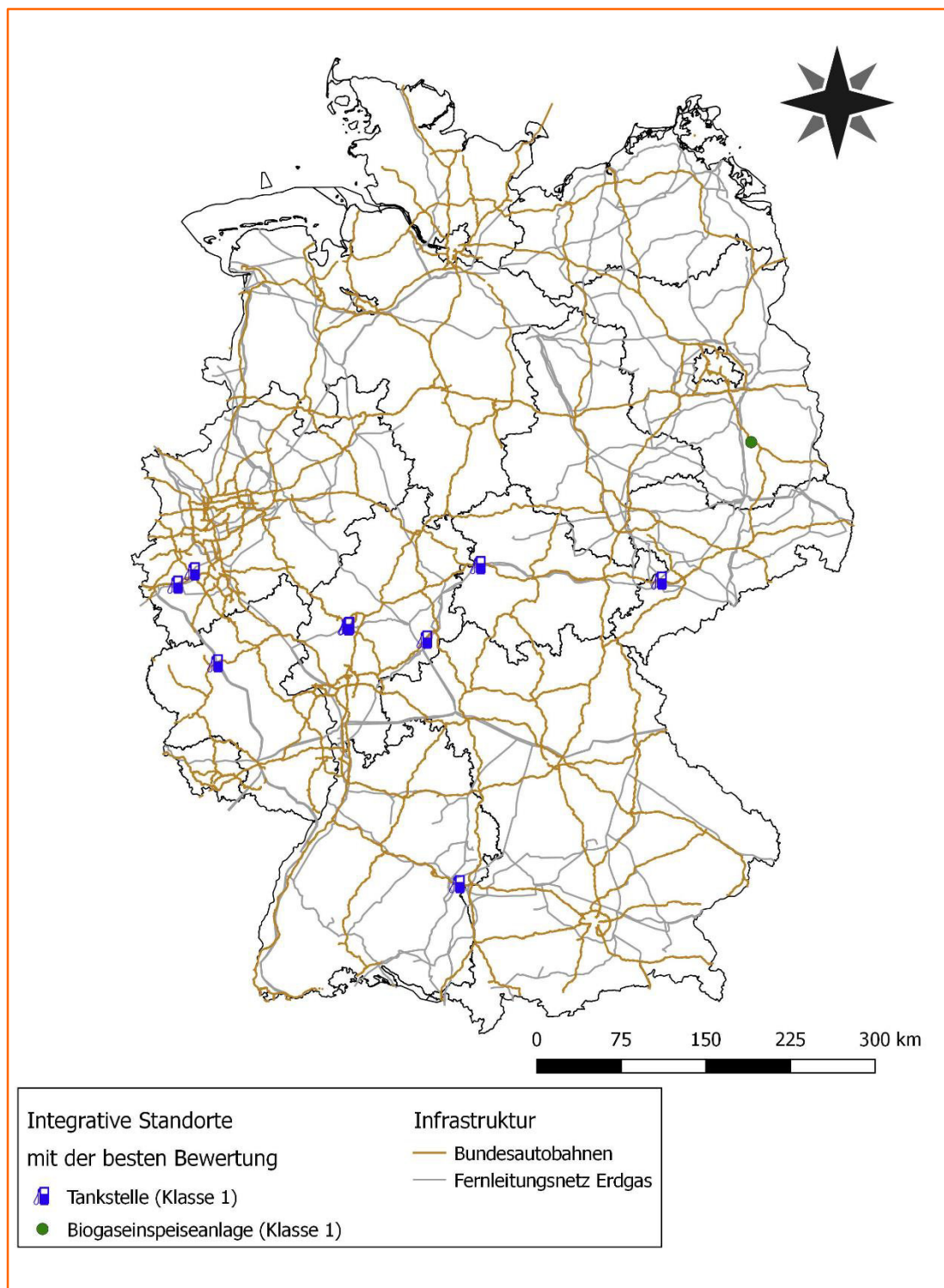


Abbildung 26: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario B.1, eigene Darstellung

Abbildung 26 stellt die zehn Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario B.1 kartographisch dar. Darunter befinden sich fünf Standorte, die auch nach Szenario A.1 zu den besten Standorten gehören. Mit drei integrativen Tankstellen stellt das Bundesland Hessen die größte Anzahl der zehn besten Standorte.

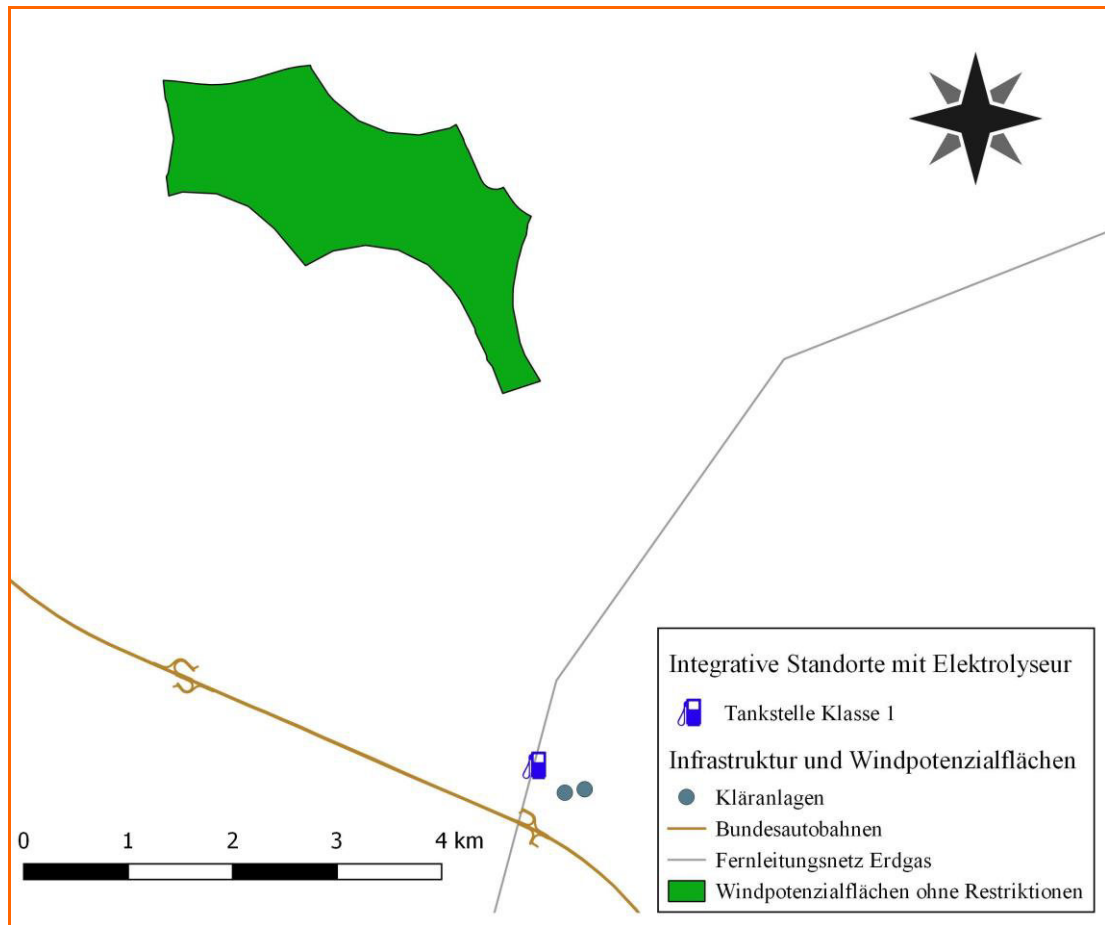


Abbildung 27: Exemplarische Darstellung einer integrativen Tankstelle mit einer angrenzenden Kläranlage, eigene Darstellung

Abbildung 27 veranschaulicht eine integrative Tankstelle in Nordrhein-Westfalen entlang der A61. Die Entfernung des Standortes zu der nächstgelegenen Windpotenzialfläche ohne Restriktionen ist zwar mit 3.578 m größer als die in Szenario A definierten 2.000 m, aber bedingt durch die unmittelbare Lage am Fernleitungsnetz Erdgas befindet sich die Tankstelle dennoch unter den zehn besten Standorten. Zudem ist mit der direkt angrenzenden Kläranlage eine Möglichkeit gegeben den erzeugten Sauerstoff vor Ort zu verwenden.

Szenario B.2

Die integrativen Standorte verteilen sich auf die Typen und Klassen auf Grundlage von Szenario B.2 wie in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 14: Anzahl der Standorte nach Szenario B.2 gruppiert nach Typ und Klasse

Typ	Klasse	Anzahl aller Standorte	Anzahl nach Auswahl
Tankstelle	2	282	173
Tankstelle	1	120	75
Kläranlage	3	16	13
Kläranlage	1	5	4
Biogaseinspeiseanlage	3	4	4
Biogaseinspeiseanlage	1	4	4
Insgesamt		431	273

Die 129 integrativen Standorte der ersten Klasse werden durch die Filterung mittels der räumlichen Konkurrenz auf 83 verringert. Insgesamt verringert sich die Anzahl der Geoobjekte von 431 auf 273. Dies ist vor allem bedingt durch die Filterung der 282 Tankstellen, die der zweiten Klasse angehören und auf 173 reduziert werden.

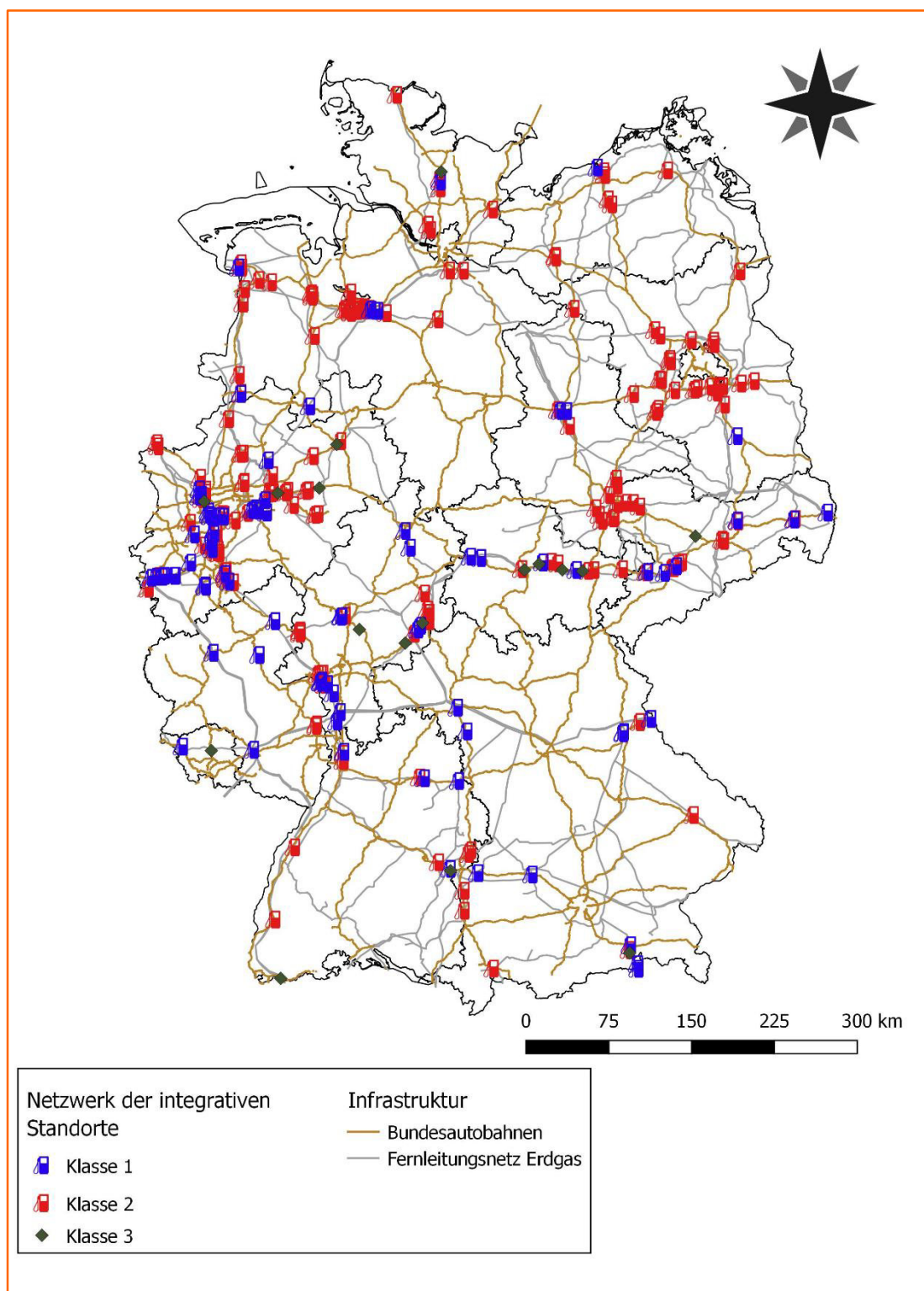


Abbildung 28: Netzwerk der integrativen Standorte getrennt nach den drei Klassen für Szenario B.2, eigene Darstellung

Abbildung 28 zeigt das Netzwerk der integrativen Standorte nach Szenario B.2 und die größte Anzahl der Standorte, die sich über weite Strecken Deutschlands verteilen. Lediglich Gebiete in Niedersachsen - aufgrund des Fehlens des Fernleitungsnetzes

Erdgas - und der Süden Deutschlands - bedingt durch geringere Windgeschwindigkeiten - weisen keine Potenziale auf.

Ein Großteil der Standorte der zweiten Klasse befindet sich im Norden Deutschland, Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Nordrhein-Westfalen, wohingegen die Standorte der ersten Klasse vereinzelt, aber mit dem Schwerpunkt Nordrhein-Westfalen, über Deutschland verteilt sind.

Darstellung der Standorte mit der besten Bewertung

Nach den Kriterien für Szenario B.2 ergeben sich die in Tabelle 15 gelisteten zehn Standorte mit der besten Bewertung.

Tabelle 15: Rangliste der zehn besten Standorte auf Grundlage der Bewertung für Szenario B.2

Rang	Typ	P _{Windpark} in MW _{el}	P _{Elektrolyseur} in MW _{el}	Einspeisung in Nm ³ /h	Kosten in €
1	Biogasein-speiseanlage	15	2	400	75.960
2	Biogasein-speiseanlage	15	2	400	85.891
3	Biogasein-speiseanlage	249	37	7.400	94.551
4	Tankstelle	249	37	7.400	169.448
5	Tankstelle	111	17	3.400	171.844
6	Tankstelle	159	24	4.800	191.176
7	Tankstelle	24	4	800	204.916
8	Tankstelle	48	7	1.400	220.517
9	Tankstelle	21	3	600	259.960
10	Tankstelle	249	37	7.400	283.329
Summe		1.140	170	34.000	1.757.592

Demnach stellt Szenario B.2 die zehn kostengünstigsten integrativen Standort in Bezug auf den Bau der Stromleitungen und Wasserstoff-Pipelines. Insgesamt besteht an den Standorten ein Einspeisepotenzial von 34.000 Nm³/h, die aus zehn Windparks mit einer Leistung von 1.140 MW_{el} in Summe gewonnen werden.

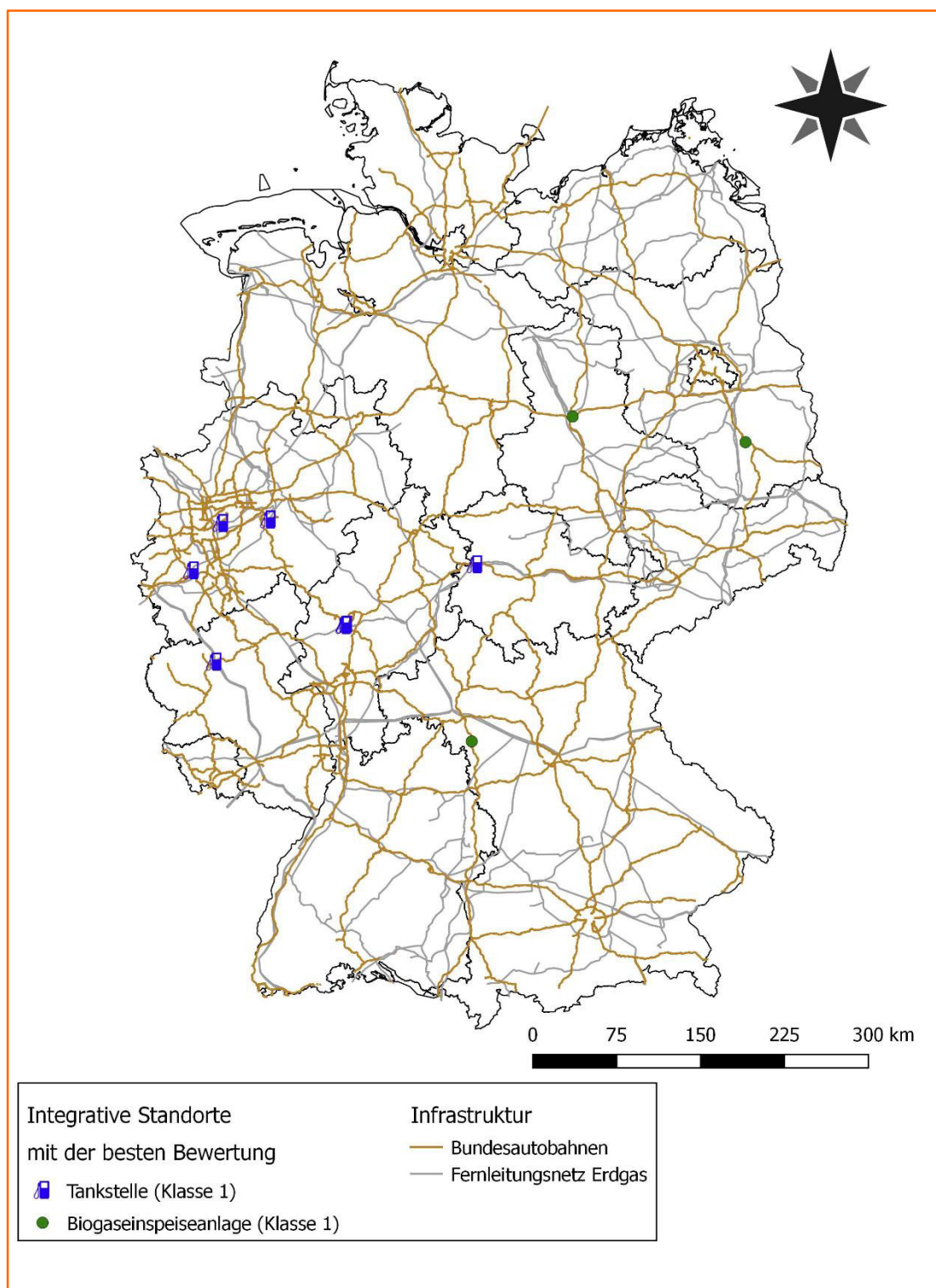


Abbildung 29: Integrative Standorte mit der besten Bewertung nach Szenario B.2, eigene Darstellung

Abbildung 29 gibt die Lage der zehn Objekte wieder, wovon sieben auch nach Szenario A.2 zu den besten Standorten gehören. Im Bundesland Nordrhein-Westfalen findet sich mit einer Anzahl von drei Standorten die größte Häufigkeit pro Bundesland.

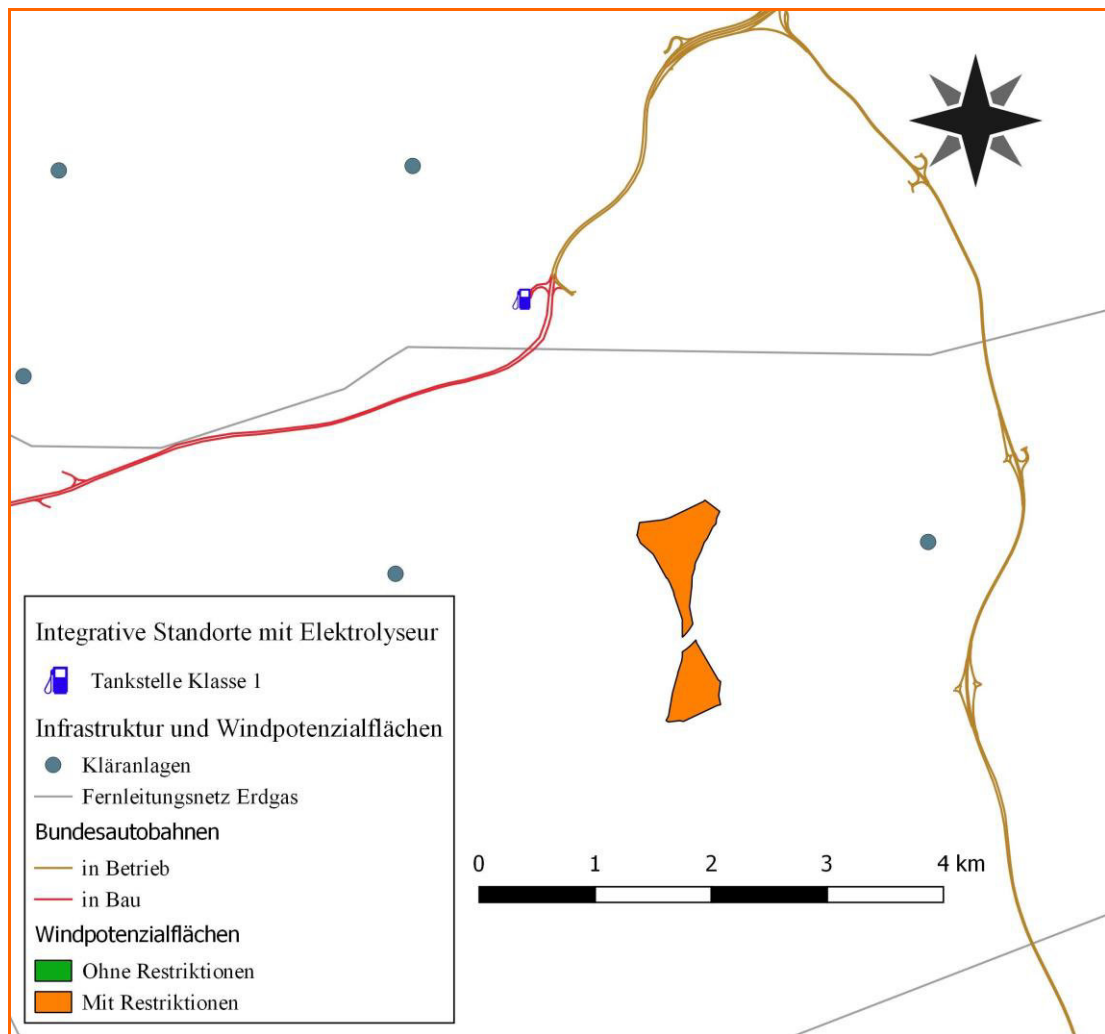


Abbildung 30: Exemplarische Darstellung einer integrativen Tankstelle angrenzend an eine Bundesautobahn in Bau, eigene Darstellung

Derzeit befinden sich in Deutschland verschiedene Autobahnabschnitte in Bau oder Planung. In Hinblick auf eine flächendeckende Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur gilt es auch dort rechtzeitig Wasserstoff als Treibstoff bereitzustellen. Die integrative Tankstelle in Abbildung 30 befindet sich an einem Streckenabschnitt der A44, der derzeit in Bau ist. In der Umgebung sind mehrere Kläranlagen ansässig, wovon jedoch lediglich eine weniger als zwei Kilometer entfernt ist. Die Distanz von der Windpotenzialfläche zu der Tankstelle beträgt 2.174 m, womit diese knapp aus dem Raster der Analyse nach Szenario A.2 fiel.

3.2. Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes

3.2.1. Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden

Im Folgenden soll anhand der Erdgas-Pipelines MIDAL und OPAL das Einspeise- und Transportpotenzial mit Hilfe der integrativen Standorte von grünem Wasserstoff aus Windenergie in Richtung Süden präsentiert werden.

Aufnahmepotenzial der MIDAL- und OPAL-Pipeline

Dazu wird zunächst das Aufnahmepotenzial der Pipelines anhand der in Kapitel 2.3.1 dargelegten Methodik in Tabelle 16 aufgezeigt. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage der Daten der OPAL Gastransport GmbH (2016) und der GASCADE Gastransport GmbH (2016d).

Tabelle 16: Lastfluss und Einspeisepotenzial der MIDAL- und OPAL-Pipeline

	MIDAL	OPAL
Max. Lastfluss in Nm ³ /h	2.401.592	4.059.960
Max. Einspeisepotenzial von Wasserstoff in Nm ³ /h	120.080	202.998
1. Dezil: Mind. Lastfluss in Nm ³ /h für 7884 h/a	101.653	2.834.265
1. Dezil: Mind. Einspeisepotenzial Wasserstoff in Nm ³ /h für 7884 h/a	5.083	141.713

Sowohl die MIDAL- als auch die OPAL-Pipeline haben mit einem max. Einspeisepotenzial von 120.080 Nm³/h (MIDAL) sowie 202.998 Nm³/h (OPAL) an Wasserstoff unter dem Aspekt der 5 % Einspeisegrenze die Möglichkeit große Mengen davon in Richtung Süden zu transportieren. Auch die Kalkulation über das 1. Dezil belegt, dass in den Pipelines über einen Zeitraum von 7.884 h/a, was 90 % der Stunden des Jahres entspricht, ein entsprechender Lastfluss herrscht, der einen Transport an Wasserstoff von mindestens 5.083 Nm³/h im Fall der MIDAL und 141.713 Nm³/h im Fall der OPAL zulässt.

Tabelle 17 legt das Einspeisepotenzial grünen Wasserstoffs in Nm³/h auf Grundlage der integrativen Standorte je Szenario dar. Die Werte in den Klammern geben die Anzahl der nicht in Konkurrenz stehenden Standorte wieder.

Tabelle 17: Einspeisepotenzial und Standortanzahl, dargestellt in den Klammern, je Szenario für die OPAL- und MIDAL-Pipeline

	A.1	A.2	B.1	B.2
OPAL	7.490 (1)	14.490 (2)	7.490 (1)	22.410 (3)
MIDAL	2.790 (2)	15.210 (3)	11.700 (8)	34.380 (8)

Dabei weist die MIDAL-Pipeline größere integrative Potenziale auf als die OPAL-Pipeline, die von einem großem Potenzialgebiet für Windenergie profitiert. Im Gegensatz dazu verteilt sich die potenzielle Einspeisemenge grünen Wasserstoffs im Fall der MIDAL-Pipeline auf bis zu acht verschiedene integrative Standorte.

Bei der OPAL-Pipeline sind auf Grundlage der aktuellen Gesetzeslage und der in Tabelle 17 wiedergegebenen Ergebnisse in Bezug auf die Einspeisemenge grünen Wasserstoffs keine Probleme zu erwarten, da die höchste potenzielle Einspeisemenge aus Szenario B.2 mit 22.410 Nm³/h deutlich unter den oben beschriebenen 141.713 Nm³/h liegt. Anders gestaltet sich dies bei der MIDAL-Pipeline, bei der unter dem Aspekt der potenziellen Einspeisemenge der Szenarien A.2, B1 und B.2 keine Einspeisung des Wasserstoffs über 7.884 h/a möglich ist, da diese lediglich eine Einspeisung von bis zu 5.083 Nm³/h zulässt. Das maximale physische Einspeisepotenzial der MIDAL-Pipeline weist jedoch darauf hin, dass weitaus größere Einspeisemengen möglich sind. Zudem ist im Winter als synergetischer Effekt neben höheren Windgeschwindigkeiten auch ein größerer Lastfluss des Gases wie in Kapitel 1.4 veranschaulicht zu erwarten.

3.2.2. Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7

Angelehnt an das Konzept der Projektinitiative „Energieallee A7“ kommen für eine vor Ort-Erzeugung grünen Wasserstoffs je nach Szenario die in Tabelle 18 präsentierte Anzahl von Wind-Wasserstoff-Tankstellen als Elektrolyseurstandort und Einspeisepunkt in Frage. Das Einspeisepotenzial in Nm³/h wird auf Grundlage der nicht in räumlicher Konkurrenz stehenden Standorte berechnet. Die Anzahl der Tankfüllungen/ Tag

bezieht sich auf die Anzahl der Brennstoffzellenfahrzeuge des Typs Hyundai ix35 Fuel Cell, die pro Tag volltanken können.

Tabelle 18: Tankstellenanzahl je Szenario vor und nach der Filterung aufgrund der räumlichen Konkurrenz

Tankstellenanzahl	Anzahl aller Standorte	Anzahl nach Auswahl	Einspeisepotenzial in Nm³/h	Anzahl Tankfüllungen/ Tag
nach Szenario A.1	38	24	50.200	19.204
nach Szenario A.2	96	54	176.600	67.559
nach Szenario B.1	105	56	164.000	62.739
nach Szenario B.2	150	78	274.400	104.973

Maximal ergeben sich nach Szenario B.2 150 Tankstellen entlang der A7. Dabei können im Hinblick auf das Konzept der räumlichen Konkurrenz nach Szenario B.2 78 Tankstellen, die über einen Elektrolyseur verfügen, über Wasserstoff-Pipelines mit den weiteren 72 Tankstellen, die maximal einen Kilometer entfernt sind, verbunden werden. Dies bedeutet, dass für den Bau der Pipeline zu diesen Tankstellen maximal die in Kapitel 1.4 beschriebenen 250.000 € notwendig sind. Auf diese Weise wäre es möglich auf Grundlage von Szenario B.2 ohne die Errichtung der großen Wasserstoff-Pipeline entlang der A7 bis zu 150 Autobahntankstellen mit grünem vor Ort erzeugtem Wasserstoff zu versorgen. Insgesamt ergeben die Kalkulationen für die 78 Standorte ein Wasserstoff-Einspeisepotenzial von 274.400 Nm³/h, was bedeutet, dass 104.973 Brennstoffzellenfahrzeuge pro Tag entlang der A7 einmal volltanken können. Auch für das Szenario B.1 ist nach diesem Konzept die Versorgung von bis zu 105 Tankstellen und 62.739 Brennstoffzellenfahrzeugen über 56 Tankstellen mit einem installierten Elektrolyseur möglich. Das potenzielle Einspeisepotenzial beträgt dabei 164.000 Nm³/h.

Die manuelle Straßenverkehrszählung 2010 ergab am Kirchheimer Dreieck, das an der A7 liegt, ein Verkehrsaufkommen in Summe von 186.100 Kraftfahrzeugen (Bundesanstalt für Straßenwesen BaSt 2011). In Hinblick auf Szenario B.2 könnte also in Zukunft ein Großteil der Brennstoffzellenfahrzeuge, die die A7 entlang fahren, mit lokal erzeugtem Wind-Wasserstoff versorgt werden.

Insgesamt weist die Bundesautobahn A7 auf Grundlage des Geodatenatzes 1697 Autobahntankstellen auf, die über eine neu errichtete Wasserstoff-Pipeline mit Wasserstoff versorgt werden können. Demnach könnten etwa 9 % der Tankstellen über das integrative Konzept mit Wasserstoff, zum Teil auch über direkte Wasserstoff-Pipelines vom Elektrolyseur an einer Tankstelle bis zur benachbarten Tankstelle, versorgt werden. An allen weiteren Standorten, wo Wasserstoff als Treibstoff angeboten werden sollte, müsste die Tankstelle an die Wasserstoff-Pipeline, die entlang der A7 führt, angeschlossen werden.

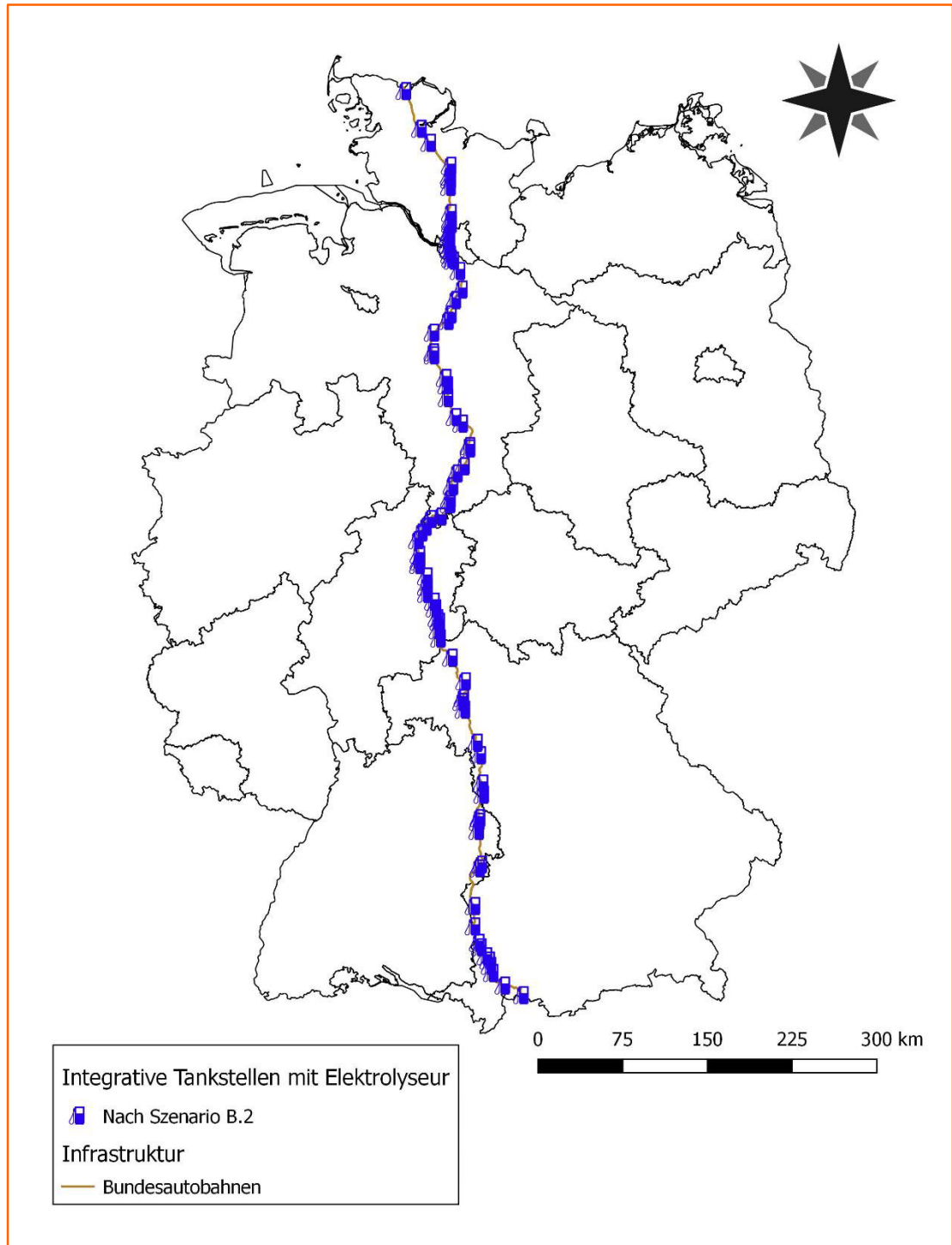


Abbildung 31: Netzwerk integrativer Standorte entlang der Bundesautobahn A7 nach Szenario B.2, eigene Darstellung

Dabei verteilen sich die integrativen Tankstellen nach Szenario B.2 gleichmäßig wie in Abbildung 31 kartographisch veranschaulicht entlang der Bundesautobahn A7 und würden als Wasserstoff-Tankstellennetz, aufgrund der hohen Reichweite bei Brenn-

stoffzellenfahrzeugen, bereits ausreichen um die gesamte A7 zu befahren. Der verbleibende Wasserstoff könnte weiteren Wasserstoff-Tankstellen zugeführt werden, die Industrie versorgen oder verstromt werden.

4. Diskussion

4.1. Identifikation potenzieller Power to Gas-Standorte an Windparks entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Diskussion des Konzeptes

Das erstellte Konzept lässt weiteren Spielraum zu. Die in dieser Arbeit untersuchten Standorte, die sich sowohl in der Nähe zur Bundesautobahn als auch zum Fernleitungsnetz Erdgas befinden müssen, können sich stattdessen auch beispielsweise an Bundesstraßen oder dem Verteilungsnetz Gas befinden. Letzteres weist jedoch, wie bereits in Kapitel 1.4 am Beispiel des Fernleitungsnetzes Erdgas dargelegt, im Sommer teilweise keinen Durchfluss auf. Unter diesem Aspekt müsste untersucht werden, an welchen Standorten sich in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit bzw. des Wirkungsgrades eine anschließende Methanisierung des Wasserstoffes, der nicht für die Wasserstoff-Mobilität oder die Industrie bedingt durch zu geringe Nachfrage genutzt werden kann, zweckmäßig ist. Die Methanisierung mit dem Hintergrund der Einspeisung in das Gasnetz senkt als zusätzlicher Schritt den Wirkungsgrad nach Sterner und Stadler (2014) auf 50-78 %. Eine Wasserstoff-Pipelineinfrastruktur mit angeschlossenen Salzkavernen könnte wiederum den erzeugten Wasserstoff langfristig speichern.

Auch die Wahl der in Frage kommenden Wasserstoffsinken, für die in dieser Thesis Tankstellen, Kläranlagen und Biogaseinspeiseanlagen untersucht wurden, ist flexibel. Als weitere Senken können beispielsweise die Industrie, Bahnstrecken sowie Logistikunternehmen untersucht werden. Für letztere bieten sich mit Wasserstoff betriebene Flurförderzeuge an. Dieses System wurde bereits im Rahmen des H2IntraDrive-Projektes im Bereich des Karosseriebaus der BMW i-Fahrzeuge in Leipzig eingesetzt. Dabei dauert eine Betankung je nach Flurförderzeugtyp zwischen 1,5 und 2,2 Minuten, denen ein Batteriewechsel mit einer Dauer von fünf bis zu zehn Minuten bei konventionellen Batterie-Flurförderfahrzeugen gegenüberstehen (Linde Material Handling 24.11.2015). In Zukunft planen die Bundesländer Baden-Württemberg, Hessen, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen zusammen mit der Alstom Transport Deutschland GmbH den Betrieb von Brennstoffzellenzügen auf ausgewählten Strecken. Die mit Wasserstoff betriebenen Züge sollen nicht nur emissionsfrei sein, son-

dern mit Hilfe eines intelligenten Energiemanagementsystems auch geringere Energiekosten sowie eine höhere Energieeffizienz als Dieseltriebzüge besitzen (ALSTOM 19.03.2015).

Verwendete Software

Zunächst sollte das Konzept mit Hilfe der QGIS Werkzeuge und Erweiterungen, falls möglich durch ein Modell in Form aufeinanderfolgender Geo-Algorithmen umgesetzt werden.

Probleme entstanden jedoch durch die in QGIS zur Verfügung stehenden Distanzanalysen, welche beispielsweise wie der Geoalgorithmus des MMQGIS-Plugins „Distance to nearest hub“ die Entfernung zum Zentroid einer Fläche anstelle zu der äußeren Umgrenzung berechnen. Dies hat bei den Potenzialflächen, die aufgrund der definierten Kriterien mindestens 21 ha groß sind, in Bezug auf die bis zu einer bestimmten Entfernung begrenzten Distanzanalysen zur Folge, dass wesentlich weniger Standorte für das Konzept in Frage kommen. Möglich ist die Nutzung von Puffern zur Auswahl der geeigneten Standorte, dies stellt jedoch einen umfangreicheren Rechenprozess sowie zusätzliche Schritte dar. Zur Kalkulation der Kosten und der Bewertung eignet sich „Distance to nearest hub“ nur bedingt, da die Werte schlechter vergleichbar sind, als bei einer Kalkulation des Abstandes zur Umrandung. So werden bei einer Kalkulation der Distanz zum Zentroid einer Fläche meist kleinere Flächen bevorteilt.

Mit Hilfe des GRASS GIS Werkzeuges v.distance lässt sich zwar die kürzeste Entfernung zur Umrandung des nächstgelegenen Objekt berechnen, aber das Werkzeug funktionierte zum Zeitpunkt der Erstellung der Methodik bei einer Anwendung auf shape-Dateien im Modell nicht zuverlässig. Dies hatte wiederum zur Folge, dass ein manueller Zwischenschritt mit Integration der Dateien in ein GRASS-Mapset notwendig war, wo v.distance erfolgreich durchgeführt werden konnte.

pgAdmin III bzw. die QGIS-Erweiterung DB-Manager bieten Zugriff auf die PostGIS-Funktionen mit deren Hilfe, wie anhand der Methodik und Ergebnisse gezeigt, sich das Konzept innerhalb einer Software und wesentlich schneller als in QGIS umsetzen lässt. Zudem haben SQL-Abfragen den Vorteil, dass mehrere Schritte wie die verschiedenen Distanzberechnungen zu den nächstgelegenen Objekten in einer Abfrage

durchgeführt werden können. Mit kleinen Veränderungen wie das Ersetzen eines INNER JOINS durch einen LEFT JOIN können große Veränderungen auf das Ergebnis herbeigeführt werden, wodurch die Abfragen sehr flexibel sind. QGIS wird letztendlich lediglich zur Visualisierung und Kontrolle der Ergebnisse verwendet.

Diskussion der Geodatengrundlage

Der auf Grundlage definierter harter und weicher Tabukriterien erstellte Geodatenatz der Windpotenzialflächen wurde bundesländerübergreifend für ganz Deutschland erstellt. Dies bedeutet, dass bestimmte bundesländerspezifische Tabukriterien, bei der Erzeugung des Datensatzes nicht berücksichtigt wurden.

So gelten beispielsweise derzeit in acht Bundesländern Waldflächen als hartes Tabukriterium (Quentin und Tucci 2016) oder in Bayern die 10-H-Regelung. Letztere definiert als Mindestabstand die zehnfache Anlagenhöhe von Windenergieanlagen zu allgemein zulässigen Wohngebäuden. Nach Angaben der Antragsteller der am 09. Mai 2016 abgewiesenen Popularklage gegen diese Regelung, kommen bei einem Mindestabstand von 2.000 m, der im Fall einer 200 m hohen Windenergieanlage der zehnfachen Höhe entspricht, unter Berücksichtigung der Windhöffigkeit lediglich etwa 0,01 % der Landesfläche von Bayern für eine Windenergienutzung in Frage (Bayrischer Verfassungsgerichtshof 09.05.2016).

Aufgrund der bundesländerübergreifenden Analyse bedeutet dies insbesondere für das Bundesland Bayern, dass die im Rahmen dieser Studie erzeugten Ergebnisse sich einer weiteren Analyse unterziehen müssen.

Darüber hinaus können im Geodatenatz des Fernleitungsnetzes Erdgas gewisse Abweichungen im Datensatz vorhanden sein, die im Fall einer Über- oder Unterschreitung der festgesetzten maximalen zwei Kilometer Entfernung das Ergebnis beeinflussen.

Da ein Großteil der Daten direkt, beispielsweise die Tankstellen oder indirekt, beispielsweise die Windpotenzialflächen, auf Open Street Map-Daten basieren, ist auch hier eine mögliche Fehlerquelle gegeben. Dies bedeutet, dass jedes erzeugte Ergebnis einer weiteren genauen Untersuchung beispielsweise in QGIS unterzogen werden muss.

4.1.1. Identifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Diskussion der Methodik

Die in Kapitel 4.1 erwähnte Flexibilität der Abfragen kann in Bezug auf weitere Analysen gewinnbringend eingesetzt werden. Auf diese Weise kann beispielsweise der Abstand verändert, Datensätze ausgetauscht oder INNER JOINS zu LEFT JOINS umfunktioniert werden.

Der Aufbau der SQL-Abfragen ist so konstruiert, dass lediglich das nächstgelegene Objekt aus dem Datensatz der Potenzialflächen abgefragt wird. Alle weiteren Objekte, die sich im Fall von Szenario A innerhalb von `ST_DWithin(a.geom, b.geom, 2000)` befinden, werden daher nicht berücksichtigt. Auf der einen Seite wird dadurch zwar weniger Leistung in MW_{el} , als möglich ist, für den Standort kalkuliert, auf der anderen Seite werden in der Praxis des Öfteren Windparks entweder gar nicht oder mit weniger Anlagen errichtet. Zudem würden sich je nach Lage und Entfernung der anderen potenziellen Windparks zu dem integrativen Standort weitere Kosten ergeben. Auf Grundlage der präsentierten Methodik wird immer der nächstgelegene Windpark ausgewählt. Unter dem Aspekt der direkten Stromlieferung, ohne der Nutzung des öffentlichen Netzes, wird stets der Windpark mit den geringsten zu erwartenden Kosten für den Bau der Stromleitungen genommen.

Die Summe der erzeugbaren Leistung in MW_{el} , sowie die potenzielle Einspeisemenge in Nm^3/h aller in Frage kommenden Windparks, lässt sich am Beispiel des Netzwerk-Datensatzes der Standorte entlang der Bundesautobahn A7 nach Szenario A.2 über folgende Formel mit Hilfe der SUM-Funktion aufrufen:

```
SELECT SUM(b.leistungmw), SUM(b.einspeisung)  
FROM "Netzwerk_PtG-Tankstellen_A7_A.2" AS a,  
"Windpotenzialflächen_Gesamt" AS b  
WHERE ST_DWithin(a.geom, b.geom, 2000);
```

Dabei ergibt sich nach dieser Abfrage ein mögliches Einspeisepotenzial von 293.600 Nm³/h statt wie in Kapitel 3.2.2 dargelegt lediglich 176.600 Nm³/h.

Diskussion der Ergebnisse

Diese ersten Ergebnisse je Szenario entsprechen den Erwartungen und erscheinen realistisch, da sie zum einen im windstarken Norden Deutschlands viel Potenzial zeigen, während im windschwachen Süden nur wenige Standorte identifiziert wurden. Dabei müssen, wie bereits in Kapitel 4.1 erwähnt, insbesondere die Standorte in Bayern einer weiteren Analyse mit den Abstandskriterien auf Grundlage der 10-H-Regelung unterzogen werden.

Die identifizierten Standorte zeigen ein großes Potenzial entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas und Deutschlands Autobahnen, wobei sich der Großteil der Standorte in den Bundesländern nördlich von Baden-Württemberg und Bayern befindet, was dem Konzept entspricht, da von dort aus der Wasserstoff Richtung Süden transportiert werden kann.

4.1.2. Klassifikation integrativer Standorte entlang des Fernleitungsnetzes Erdgas

Diskussion der Methodik

Auch die Klassifikation weist eine hohe Flexibilität auf. Beispielsweise kann die Klassifikation auf anderen Kriterien basieren oder die Kosten bzw. verschiedene Distanzen als Auswahlkriterium gewählt werden.

Allerdings werden die Windgeschwindigkeit sowie die Größe des Windparks nicht berücksichtigt. Gerade die Windgeschwindigkeit ist in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ein entscheidender Faktor. In dieser Analyse werden alle Flächen mit einer Windgeschwindigkeit über 5,8 m/s gleich gewertet.

Für die Erstellung des Netzwerkes sind ohne großen Aufwand auch andere Mindestabstände darstellbar. Dabei ist auch die Darstellung des am besten geeigneten Standortes je Bundesland möglich.

Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen für jedes Szenario stets eine deutlich höhere Anzahl integrativer Tankstellen als integrativer Biogaseinspeise- und Kläranlagen. Die größte Anzahl der Biogaseinspeise- oder Kläranlagen befindet sich an integrativen Autobahntankstellen (siehe Tankstellen mit Klasse 1). Die maximale Anzahl der Standorte, der 3. Klasse nach Szenario B.2, beträgt lediglich 20. Demnach ist in den meisten Fällen, bedingt durch eine geringe Anzahl von Biogaseinspeise- und Kläranlagen in der Nähe von Bundesautobahnauf- oder -abfahrten sowie mangels Windpotenzialflächen, die Errichtung einer Stand-Alone-Zapfsäule oder neuen Tankstelle nicht notwendig. Weitere Standorte nach diesem Konzept, das insbesondere für Gemeinden interessant sein sollte, könnten jedoch entlang der Bundesstraßen Deutschlands ermittelt werden.

4.2. Identifikation von Potenzialen zur Entlastung des Stromleitungsnetzes

4.2.1. Einspeise- und Transportpotenzial grünen Wasserstoffs von Norden nach Süden

Insgesamt ergeben sich lediglich drei integrative Standorte für die OPAL- und acht integrative Standorte für die MIDAL-Pipeline. Unter dem Aspekt, dass stets eine gewisse Anzahl von Standorten nicht realisiert werden kann, die beiden Pipelines aber ein großes Potenzial für den Transport von Wasserstoff von Norden nach Süden darstellen, besteht hier weiterer Analysebedarf auf Basis anderer Kriterien.

Im Hinblick auf weitere Analysen bietet sich zunächst eine Untersuchung der Tankstellen an Bundesstraßen entlang der Pipelines an. Dazu muss in Bezug auf die Identifikation der Standorte nach Kapitel 2.2.1 zur der dort angegebenen SQL-Abfrage lediglich die in Kapitel 2.3.1 angegebene WHERE-Klausel hinzugefügt und die Abfrage auf die Datensätze der Bundesstraßen und Tankstellen durchgeführt werden. Auch eine Analyse der Wasserstoffsenken in Bezug auf die Industrie oder des in Kapitel 4.1 erwähnten Konzeptes für Wasserstoff-Flurförderfahrzeuge könnten potenzielle Standorte ergeben.

Des Weiteren kann eine Untersuchung im Norden Deutschlands an den bereits bestehenden Windparks durchgeführt werden mit dem Ziel in Zukunft ein Abregeln der dortigen Windenergieanlagen zu vermeiden. Hierzu müsste jedoch zunächst recherchiert werden, welche Windparks derzeit abgeregelt werden und wo ein noch zu definierender Schwellenwert an Energie dadurch verloren geht, ab dem es sich lohnt in das Fernleitungsnetz Erdgas einzuspeisen.

Da die in der Anlandestation Greifswald ankommende Ostseepipeline Nord Stream erweitert wird, ist parallel zur der OPAL-Pipeline eine neue Pipeline, die Eugal-Pipeline, in Planung. Die Eugal-Pipeline soll im Jahr bis zu 51 Milliarden m³ Erdgas transportieren (Schroeter 2016) und bietet damit viel Potenzial für die Einspeisung von Wasserstoff.

4.2.2. Entwurf einer Wasserstoff-Pipeline entlang der Bundesautobahn A7

Im Zuge der Entwicklung einer emissionsfreien Mobilität mit Hilfe Wasserstoff betriebener Brennstoffzellenfahrzeuge bietet eine Wasserstoff-Pipeline-Infrastruktur entlang der Bundesautobahnen synergetische Möglichkeiten.

Durch die Verwendung bestehender Trassen wie dem Autobahnnetz wird beispielsweise bereits vorab größtenteils vermieden, dass die Pipeline durch Naturschutzgebiete oder Gemeinden führt. Neben dem Autobahnnetz bietet sich für die Planung einer Wasserstoff-Pipeline-Infrastruktur auch das Fernleitungsnetz Erdgas und das Schienennetz an. Als problematisch ist dabei anzusehen, dass das Schienen- und Autobahnnetz die Städte Deutschlands verbindet, was zu höheren Kosten führen kann (Krieg 2012). Das auf die A7 angewandte Konzept bietet sich demnach unter dem Aspekt der vermehrten Nutzung von Brennstoffzellenzügen nicht nur für andere Bundesautobahnen, sondern auch für Bahnstrecken an.

4.3. Ausblick

Für die Einspeisung von lokal erzeugtem Wind-Wasserstoff mit anschließendem Transport über das Gasnetz in Richtung Süden bieten sich eine Vielzahl integrativer Standorte an, bei denen der Wasserstoff gleichzeitig der Mobilität zur Verfügung steht.

Dadurch können neben der Unterstützung der Energiewende durch die Entlastung und Stabilisierung der Stromleitungsnetze, indem das Gasnetz als Speicher sowie Transportnetz genutzt wird, auch Deutschlands Emissionen durch das Bereitstellen des grünen Wasserstoffs an den identifizierten Tankstellen im Verkehr gesenkt werden.

Die flexiblen SQL-Abfragen mit ihren PostGIS-Funktionen liefern innerhalb weniger Sekunden Ergebnisse auf vergleichbare Fragestellungen. Auf diese Weise kann nach der Analyse der Autobahnen, die Untersuchung der Bahnstrecken oder Bundesstraßen folgen. Das Konzept sowie die SQL-Abfragen lassen sich auch auf andere Länder übertragen, wo die Wasserstoff-Mobilität oder die Speicherung sowie der Transport von Energie in Form von Wasserstoff zukünftig eine Rolle spielen wird. Dabei stellt die vorab auszuführende Identifizierung der Potenzialflächen für Windenergie, die teilweise wegen der unterschiedlich ausgelegten Abstandskriterien sogar innerhalb eines Staates stark variieren, neben der Beschaffung des Geodatenatzes für das Gasnetz die große Herausforderung dar. Je nach Umsetzung der INSPIRE-Richtlinie kann es aus Sicherheitsgründen schwierig sein, Geodaten des Gasnetzes anderer Staaten zu erhalten. Zumindest ist in Deutschland eine Veröffentlichung derzeit nicht absehbar (siehe Kapitel 2.1.3).

Im Fall eines solchen Konzeptes, wo es durch Änderungen des Gesetzes sowie die Errichtung neuer Erdgas-Pipelines zu weiteren oder anderen Ergebnissen kommen kann, ist eine Automatisierung der SQL-Abfragen sinnvoll, um Aufwand zu sparen. Das Ziel ist hierbei bei einer Änderung der Geodaten, zum Beispiel der Windpotenzialflächen oder im Fall neuer Standorte, nicht jede SQL-Abfrage erneut ausführen zu müssen. Durch die Verwendung von Triggern, Regeln und Views lassen sich Veränderungen in den Datensätzen automatisieren. Regeln können dazu genutzt werden, SQL-Abfragen hinzuzufügen und Trigger, um im Fall einer veränderten Zeile eine serverseitige Funktion aufzurufen (Momjian 2001). Views sehen für den Nutzer zwar wie eine eigenständige Tabelle aus, jedoch wird bei einem Zugriff auf eine View stets eine SQL-Abfrage ausgeführt (Hartwig 2001). Dahingehend kann die Methodik in Hinblick auf eine Automatisierung untersucht werden, wobei insbesondere Views gezielt platziert werden müssen, da diese bei jedem Zugriff eine SQL-Abfrage auslösen. Zeitaufwändige Views, die viel Arbeitsspeicher benötigen, sind daher zu vermeiden.

In Hinblick auf das kommende „Erneuerbare Energien Gesetz 2017“ ist nach § 61a Abs. 1 eine Befreiung von der Zahlungspflicht der EEG-Umlage für Strom, der an einen chemischen Stromspeicher unter dem Aspekt der Zwischenspeicherung, geliefert wird, geplant. Die Befreiung der EEG-Umlage gilt nach Abs. 2 auch für die Erzeugung von Speichergas und die anschließende Einspeisung in das Erdgasnetz, wovon die Einspeisung von Wasserstoff fällt. In beiden Fällen ist die Zahlung der EEG-Umlage im Anschluss, wenn der Strom dem Speicher entnommen oder das Gas wiederverstromt wird, verpflichtend vorgeschrieben (Deutscher Bundestag 08.07.2016). Die DVGW schlägt unter anderem darüber hinaus vor, dass PtG-Anlagen in der Markteinführungsphase weitestgehend von Steuern oder Gebühren, wie der EEG-Umlage, befreit werden. Demnach soll das erzeugte Gas im Fall einer Verwendung in anderen Bereichen, wie der Mobilität, von der EEG-Umlage befreit werden. Auf diese Weise könnte beispielsweise in der Mobilität die Reduzierung der CO₂-Emissionen beschleunigt werden (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches 2016).

Nach Ansicht von ENERGIE INNOVATIV (2013) ist PtG in Bezug auf die Langzeitspeicherung von Strom die attraktivste Lösung und verweist damit auch auf den Charme der Nutzung vorhandener Infrastruktur. Dabei bietet sich zunächst die Nutzung der aus erneuerbaren Energien stammenden Gase in der Mobilität an.

Die in dieser Studie vorgestellten integrativen Standorte können somit als attraktive Grundbausteine zur Errichtung einer flexiblen PtG-Anlagen-Infrastruktur dienen. Je nach Bedarf kann der grüne Wasserstoff in der Mobilität eingesetzt oder zur Entlastung der Stromnetze in das Fernleitungsnetz Erdgas eingespeist werden.

Literaturverzeichnis

ABO Wind AG (2015): Neuer Wind für die Energiewende. Online verfügbar unter <http://www.abo-wind.com/media/pdf/flyer/Zukunftsenergien.pdf>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

ALSTOM (19.03.2015): Absichtserklärung über Nutzung von Brennstoffzellenfahrzeugen für die Hermann-Hesse-Bahn unterzeichnet. Beyer, Dominik. Online verfügbar unter <http://www.alstom.com/de/press-centre/2015/3/absichtserklärung-uber-nutzung-von-brennstoffzellenfahrzeugen-fur-die-hermann-hesse-bahn-unterzeichnet/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Ausfelder, Florian; Beilmann, Christian; Bertau, Martin; Bräuninger, Sigmar; Heinzel, Angelika; Hoer, Renate et al. (2015): Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. In: *Chemie Ingenieur Technik* 87 (1-2), S. 17–89. DOI: 10.1002/cite.201400183.

Bankhofer, Udo; Vogel, Jürgen (Hg.) (2008): Datenanalyse und Statistik. Eine Einführung für Ökonomen im Bachelor. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

Bayrischer Verfassungsgerichtshof (09.05.2016): Pressemitteilung zur Entscheidung des Bayerischen Verfassungsgerichtshofs vom 9. Mai 2016. Sog. 10 H-Regelung für Windkraftanlagen im Wesentlichen mit der Bayerischen Verfassung vereinbar. München. Online verfügbar unter <http://www.bayern.verfassungsgerichtshof.de/14-VII-14u.a.-Pressemitt.-Entscheidung.htm>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Brinkhoff, Thomas (2013): Geodatenbanksysteme in Theorie und Praxis. Einführung in objektrelationale Geodatenbanken unter besonderer Berücksichtigung von Oracle Spatial. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Wichmann/VDE-Verl.

Bundesanstalt für Straßenwesen BaSt (2011): Manuelle Straßenverkehrszählung 2012. Ergebnisse auf Bundesautobahnen. Online verfügbar unter http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten-Downloads/2010/zaehlung-2010-BAB.pdf;jsessionid=C5BECC66EB769775533353F23F72614D.live21301?__blob=publication-File&v=1, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft BDEW; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches DVGW; Forum Netztechnik/Netztechnik im Verband für Elektrotechnik und Elektronik VDE/FNN (2015): Gemeinsame Stellungnahme zur Umsetzung der INSPIRE- Richtlinie in Deutschland und zu dem Entwurf "Handlungsempfehlungen für VU und GDI- Kontaktstellen" der GDI- DE. Datenoffenlegung für die Infrastrukturen Energie, Wasser und Abwasser? Online verfügbar unter http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/organisation/sicherheit/stellungnahme_inspire.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Bund-Länder-Initiative Windenergie (2013): Überblick zu den landesplanerischen Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Bund-Länder-Initiative Windenergie BLWE (2012): Handreichung zu Windenergieanlagen an Infrastrukturtrassen, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2015): Systemlösung Power to Gas. Chancen, Herausforderungen und Stellschrauben auf dem Weg zur Marktreife. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/fileadmin/content/Downloads/Brosch%C3%BCren/DENA_BR_PowertoGas_2015.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutsche WindGuard GmbH; Lüers, Silke; Wallasch, Anna-Kathrin; Dr.-Ing. Rehfeldt, Knud (2015): Kostensituation der Windenergie an Land in Deutschland - Update. Online verfügbar unter https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/kostensituation-der-windenergie-land-deutschland-update/20151214_kostensituation_der_windenergie_an_land_in_deutschland_update.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. TA Lärm, vom 26.08.1998. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/481/dokumente/talaerm.pdf>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag (2005): Energiewirtschaftsgesetz. EnWG, vom 07.07.2005. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag (2007): Bundesfernstraßengesetz. FStrG, vom 28.06.2007. Online verfügbar unter <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrg/BJNR009030953.html>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag (2010): Gasnetzzugangsverordnung. GasNZV, vom 03.09.2010. Online verfügbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/gas-nzv_2010/BJNR126110010.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag (01.03.2010): Bundesnaturschutzgesetz. BNatSchG, vom 31.08.2015. Fundstelle: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bnatschg_2009/gesamt.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Bundestag (08.07.2016): Gesetz zur Einführung und Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien, vom Drucksache 355/16. Online verfügbar unter <http://dipbt.bundestag.de/dip21/brd/2016/0355-16.pdf>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2011): Arbeitsblatt G 262 Nutzung von Gasen aus regenerativen Quellen in der öffentlichen Gasversorgung. Regelwerk Gas, vom 2011.

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (2016): Stellungnahme vom 28. April 2016 zum Referentenentwurf EEG 2016. Unter den Blickwinkeln Sektorkopplung, Biomethan, Kraft-Wärme-Kopplung, Power-to-Gas. Online verfügbar unter https://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/gas/anwendung/stellungnahme_referentenentwurf_eeg.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutscher Wetterdienst (2015): Unwetterwarnungen oder Strom aus Windenergie. Windenergieanlagen verfälschen Messungen des Wetterraders. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/SharedDocs/broschueren/DE/presse/Windenergie_kontra_Radar_PDF.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Deutsches Nationalkomitee für das UNESCO Programm (2007): Kriterien für die Anerkennung und Überprüfung von Biosphärenreservaten der UNESCO in Deutschland, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

e-mobil GmbH; Fraunhofer ISE; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg; Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden- Württemberg; Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden- Württemberg (2013): Wasserstoff- Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität. Entwicklungsstand und Forschungsbedarf. Online verfügbar unter http://www.e-mobilbw.de/files/e-mobil/content/DE/Publikationen/PDF/Wasserstoff-Infrastruktur%20fuer%20eine%20nachhaltige%20Mobilitaet%20-%20final_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

ENERGIE INNOVATIV (2013): Handlungsempfehlung „Power-to-Gas“. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie. München. Online verfügbar unter https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwivt/Publikationen/2013/Informationsbroschuere_Power-to-Gas_03.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

EnergieAgentur.NRW (2013): Wasserstoff - Schlüssel zur Energiewende. Beispiele aus Nordrhein-Westfalen von der Herstellung bis zur Nutzung, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Energieallee A7 (2012a): Die Informationsplattform zur Projektinitiative. Die Projektinitiative Energieallee A7. Online verfügbar unter <http://www.energieallee-a7.de/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Energieallee A7 (2012b): Die Informationsplattform zur Projektinitiative. Konzept & Umsetzung. Online verfügbar unter <http://www.energieallee-a7.de/index.php?id=6>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Energiepark Mainz; Stadtwerke Mainz AG; Linde AG; Siemens AG; Hochschule RheinMain (15.04.2016): Wasserstoff- Vorzeigeprojekt läuft erfolgreich. Partner Stadtwerke Mainz, Linde, Siemens und Hochschule RheinMain ziehen positive Zwischenbilanz zum Energiepark Mainz. Mainz. Theurer, Michael; Rauscher, Stefan; Metz, Stefan; Wüntscher, Jan. Online verfügbar unter <http://www.energiepark-mainz.de/artikel-detailseite/article/wasserstoff-vorzeigeprojekt-laeuft-erfolgreich/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

ENTEGA AG (2016): Windpark Havelland. Online verfügbar unter <https://www.entega.ag/geschaeftsfelder/erzeugung/windenergie/windpark-havelland/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) (Hg.) (2014): Leitfaden Biogasaufbereitung und -einspeisung. Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes:

"Studie - Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz" angefertigt. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. 5. Aufl., vollständig überarb. Aufl. Gülzow: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, zuletzt geprüft am 28.06.2016.

Fraunhofer ISE (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Studie November 2013. Online verfügbar unter <https://ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-stromgestehungskosten-erneuerbare-energien.pdf>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

GASCADE Gastransport GmbH (2016a): Die MIDAL. Von Nord nach Süd. Online verfügbar unter <https://www.gascade.de/netzinformationen/unser-leitungsnetz/midal/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

GASCADE Gastransport GmbH (2016b): GASCADE- Verdichterstation in Bunde. Online verfügbar unter <https://www.gascade.de/netzinformationen/verdichterstationen/bunde/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

GASCADE Gastransport GmbH (2016c): GASCADE- Verdichterstation in Rehden. Online verfügbar unter <https://www.gascade.de/netzinformationen/verdichterstationen/rehden/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

GASCADE Gastransport GmbH (2016d): TRANSPARENZ / Remit. Online verfügbar unter <https://ivo.gascade.biz/ivo/remit.jsessionid=FA0532D1234740423426ABD52D4C5EB4?0>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Graf, Frank; Götz, Manuel; Henel, Marco; Dr. Schaaf, Tanja; Tichler, Robert (2014): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten Teilprojekte B-D. Abschlussbericht DVGW-Förderkennzeichen G3/01/12 TP B-D. Online verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g3_01_12_tp_b_d.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Hartwig, Jens (2001): PostgreSQL. Professionell und praxisnah. München: Addison-Wesley (Programmer's choice).

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (2012): Entwurf Änderung des Landesentwicklungsplans Hessen 2000 nach § 8 Abs. 7 HLPg. - Vorgaben zur Nutzung der Windenergie -, zuletzt geprüft am 21.06.2016.

Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung; Hessisches Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2010): Handlungsempfehlungen des Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung und des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zu Abständen von raumbedeutsamen Windenergieanlagen zu schutzwürdigen Räumen und Einrichtungen. In: *Staatsanzeiger für das Land Hessen* (22), S. 1506–1507. Online verfügbar unter http://www.energieland.hessen.de/mm/Handlungsempfehlung_Windenergieanlagen_Staatsanzeiger_Nr_22_2010.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Hofmann, Martin (2015): Technische Optimierung einer Direktverbindung zwischen Windpark und Elektrolyseur. Bachelorarbeit. Hochschule Darmstadt, Darmstadt, zuletzt geprüft am 08.07.2016.

Hüttenrauch, Jens; Müller-Syring, Gert (2010): Zumischung von Wasserstoff zum Erdgas. In: *energie | wasser-praxis* (10), S. 68–71, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

HYPOS e.V. (09.10.2015): HYPOS-Forum informiert über „grünen“ Wasserstoff. Leipzig. Online verfügbar unter <http://hypos-eastgermany.de/news>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Hyundai Motor Deutschland GmbH (2016): Der Hyundai ix35 Fuel Cell. Online verfügbar unter <http://www.hyundai.de/Modelle/Alle-Modelle/ix35-FCEV.html>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Internationale Zivilluftfahrtorganisation (2009): Europäisches Anleitungsmaterial zum Umgang mit Anlagenschutzbereichen, zuletzt geprüft am 21.07.2016.

Koch, Frank (2014): Wasserstoff in der zukünftigen Mobilität Hydrogen in a Future Mobility. In: *Erdöl Erdgas Kohle* (5), S. 174–178.

Kopp, Stefan (2015): Windenergie im Binnenland. Flächenverbrauch- Flächenbedarf - Abstandsbedarf. Online verfügbar unter <http://www.windenergie-im-binnenland.de/flaechenverbrauch.php>, zuletzt aktualisiert am 06.09.2015, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Krieg, Dennis (2012): Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2012. Jülich: Forschungszentrum Jülich (Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energie & Umwelt, 144).

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hg) (2016): Windenergie. Potenzialanalyse. Methodik. Online verfügbar unter <http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/224630/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Linde AG (2004): Der sauberste Energieträger, den es je gab. Hydrogen Solutions von Linde Gas, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Linde Gas GmbH (2016): Rechnen Sie mit Wasserstoff. Die Datentabelle. Online verfügbar unter http://www.linde-gas.at/internet.lg.lg.aut/de/images/1007_rechnen_sie_mit_wasserstoff_v110550_169419.pdf, zuletzt aktualisiert am 19.08.2016.

Linde Material Handling (24.11.2015): Wasserstofftechnologie empfiehlt sich als zukünftige Antriebsalternative. Forschungsbericht präsentiert Ergebnisse des H2IntraDrive-Projektes. Höhn, Manfred; Oder, Heike; Rügamer, Marcus. Online verfügbar unter http://www.linde-mh.de/de/countrysite/news_infoservice_1/newspressede-tails_8960.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Lütkehus, Insa, et al. (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Online verfügbar unter http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/potenzial_der_windenergie.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Merten, Frank; Krüger, Christine (2015): Synergieeffekte zwischen Gas- und Stromnetzen für die Energiewende. In: *energie | wasser-praxis* (4/2015), S. 38–42. Online

verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/innovation/pdf/g2_01_11.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Microsoft (2016): Office-Hilfe und -Schulungen. Excel-Hilfe. Online verfügbar unter <https://support.office.com/de-de/article/QUANTIL-INKL-Funktion-680f9539-45eb-410b-9a5e-c1355e5fe2ed>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg (Hg): Abwasserreinigung. Biologische Abwasserreinigung. Online verfügbar unter <https://um.baden-wuerttemberg.de/de/umwelt/schutz-natuerlicher-lebensgrundlagen/wasser/abwasser/kommunales-abwasser/abwasserreinigung/biologische-abwasserreinigung/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Momjian, Bruce (2001): PostgreSQL. Einführung und Konzepte. München: Addison-Wesley (Programmer's choice).

Müller-Syring, Gert; Henel, Marco (2014): Abschlussbericht Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur inklusive aller assoziierten Anlagen. Abschlussbericht DVGW-Förderkennzeichen G 1-02-12. Online verfügbar unter http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_02_12.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Nord Stream AG (2016): Betrieb. Online verfügbar unter <http://www.nord-stream.com/de/betrieb/>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

NOW GmbH (2016): Aufbau Wasserstoff-Tankstellennetz. Online verfügbar unter <https://www.now-gmbh.de/de/nationales-innovationsprogramm/aufbau-wasserstoff-tankstellennetz>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

NOW GmbH (12.04.2016): Wasserstoff als strombasierter sauberer Kraftstoff im Verkehr. Berlin. Wilhelm, Tilman. Online verfügbar unter <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/wasserstoff-als-strombasierter-sauberer-kraftstoff>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Obe, Regina O.; Hsu, Leo S. (2015): PostGIS in action. Second edition. Shelter Island, NY: Manning Publications. Online verfügbar unter <http://proquest.tech.safaribooksonline.de/9781617291395>.

OPAL Gastransport GmbH (2016): TRANSPARENZ / Remit. Online verfügbar unter <https://ivo.opal-gastransport.biz/ivo/remit.jsessionid=EA8C92EF1CBC1503AD93FA281D50CE22?0>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Open Grid Europe GmbH (2016): Netzdaten Dashboard. Online verfügbar unter <https://www.open-grid-europe.com/cps/rde/oge-internet/hs.xsl/Netzdaten-Dashboard-631.htm>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Piorr, Detlef (2011): Berücksichtigung des Immissionsschutzes bei der Ausweisung von Konzentrationszonen für Windenergieanlagen, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016a): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_Buffer.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016b): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_DWithin.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016c): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_Union.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016d): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_Distance.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016e): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_Intersects.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

PostGIS (2016f): PostGIS 2.2.3dev Manual. PostGIS Reference. Online verfügbar unter http://postgis.net/docs/ST_Dump.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2016a): Energiewende. Maßnahmen im Überblick. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueberblick.html?nn=392516#doc133618bodyText5>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Presse- und Informationsamt der Bundesregierung (2016b): Energiewende. "STROMAUTOBAHNEN" - Herzstück einer neuen Energieinfrastruktur. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/EnergieTransportieren/stromautobahn/_node.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Pruscha, Helmut (Hg.) (2006): Statistisches Methodenbuch. Verfahren, Fallstudien, Programmcodes. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Statistik und ihre Anwendungen).

QGIS (2016): QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS. Online verfügbar unter <http://www.qgis.org/de/site/about/index.html>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Quentin, Jürgen; Tucci, Franziska (2016): Entwicklung der Windenergie im Wald. Ausbau, planerische Vorgaben und Empfehlungen für Windenergiestandorte auf Waldflächen in den Bundesländern. Online verfügbar unter http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA-Wind_Analyse_Wind_im_Wald_06-2016.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

RWE AG (14.01.2013): Versorgung der Tschechischen Republik und der EU gestärkt: Gaspipeline GAZELLE in Betrieb genommen. Essen/ Primda. Online verfügbar unter <http://www.rwe.com/web/cms/de/37110/rwe/presse-news/pressemitteilungen/pressemitteilungen/?pmid=4008828>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Schmid-Schmieder, Volker (2007): Alternative Energiequellen auf Kläranlagen. In: *wwt wasserwirtschaft wassertechnik* (11/2007), 26- 29. Online verfügbar unter http://www.wwt-online.de/sites/default/files/fachartikel/prozesstechnische_ansaetze_nutzen_wwt_111207.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Schroeter, Stefan (2016): Neue Nord-Süd-Trasse für Gas. In: *VDI Nachrichten* 2016, 08.07.2016 (27/28).

Siemens AG (2016): Wind Turbine SWT-3.0-101 / SWT-3.2-101 / SWT-3.4-101. Technical Specification. Online verfügbar unter <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/platforms/d3-platform/wind-turbine->

swt-3-2-101.htm#content=Technical%20Specification, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garche, Jürgen (2011): NOW-Studie. Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Söfker, Wilhelm; Fachagentur Windenergie an Land (2015): Steuerung der Windenergie im Außenbereich durch Flächennutzungsplan im Sinne des § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB. Online verfügbar unter http://www.fachagentur-windenergie.de/fileadmin/files/Veroeffentlichungen/FA-Wind_Hintergrund_Steuerung_Windenergie_Aussenbereich_02-2015.pdf, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2014): Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=855969>.

terranets BW GmbH (2014): Transparenzmodul. RC Basel - Exit. Online verfügbar unter <https://www.terranets-bw.de/portal/web/guest/transparenzmodul>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

The PostgreSQL Global Development Group (2016): PostgreSQL 9.5.3 Documentation. SELECT. Online verfügbar unter <https://www.postgresql.org/docs/current/static/sql-select.html#SQL-DISTINCT>, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Thüga AG (11.02.2015): Strom zu Gas-Anlage der Thüga-Gruppe übertrifft Erwartungen. München/ Frankfurt am Main. Meinhold, Carmen. Online verfügbar unter http://www.thuega.de/no_cache/service/presse/presseinformationen/presseinformationen-detail/article/pressemitteilung-12.html, zuletzt geprüft am 19.08.2016.

Walther, Chris (2016): Standortanalyse für ein mit Erneuerbaren Energien versorgtes Wasserstoff-Tankstellen-Netz entlang deutscher Autobahnen. Masterarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Mainz.

Wurster, Reinhold; Albrecht, Uwe (2013): Wasserstoff aus Windenergie. Ein Speichermedium mit vielen Anwendungsmöglichkeiten. In: *Wasserstoff und Brennstoffzellen* (3), zuletzt geprüft am 19.08.2016.

ZfK (2015): Bevor die Gasturbine zu streiken beginnt. In: *ZfK-Zeitung für kommunale Wirtschaft* (06), S. 19.

Anhang

Anhang 1: Darstellung der harten und weichen Tabukriterien (WALTHER 2016)

Anhang 2: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Tankstellen nach Szenario A

Anhang 3: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Kläranlagen nach Szenario A

Anhang 4: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Biogaseinspeiseanlagen nach Szenario A

Anhang 5: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Tankstellen nach Szenario B

Anhang 6: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Kläranlagen nach Szenario B

Anhang 7: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Biogaseinspeiseanlagen nach Szenario B

Anhang 1: Darstellung der harten und weichen Tabukriterien (Walther 2016)

<u>Kategorie</u>	<u>Puffer in m</u>	<u>Harte Tabukrite- rien</u>	<u>Weiche Tabukriterien</u>
Siedlungsflächen	1.000	Grundfläche + Puffer	nein
Einzelhöfe	600	Grundfläche + Puffer	nein
Flughäfen	4.000	Grundfläche + Puffer	nein
Gewerbeflächen	400	Grundfläche + Puffer	nein
Bundesautobahnen	150	Grundfläche + Puffer	nein
Bahnstrecken	150	Grundfläche + Puffer	nein
Bundesstraßen	100	Grundfläche + Puffer	nein
Freileitungen	100	Grundfläche + Puffer	nein
Wasserwege und -flächen	50	Grundfläche + Puffer	nein
Biosphärenreservate	1.000	Kernzone	Puffer
Naturschutzgebiete	1.000	Grundfläche	Puffer
Nationalparks	1.000	Grundfläche	Puffer
SPA-Gebiete	1.000	Grundfläche	Puffer
Drehfunkfeuer	15.000	keine	Puffer
FFH-Gebiete	500	keine	Grundfläche + Puffer
Wasserschutzgebiete	-	keine	Grundfläche
Landschaftsschutzgebiete	1.000	keine	Grundfläche + Puffer
DWD Wetterradar	5.000	keine	Puffer

Grundlage für die Definition der Kriterien sind in erster Linie die landesplanerischen Abstandsempfehlungen für die Regionalplanung zur Ausweisung von Windenergiegebieten (Bund-Länder-Initiative Windenergie 2013)

Anhang 2: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Tankstellen nach Szenario A

```
CREATE TABLE "Alle_PtG-Tankstellen_SzenarioA" AS  
SELECT DISTINCT ON (T.id) T.id, T.geom, Gas.id AS Gas_ID, Gas.pipeline,  
ST_Distance(T.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, Wind.Multi_ID, ST_Dis-  
tance(T.geom, Wind.geom) AS distance_to_Wind, Wind.WEA, Wind.LeistungMW,  
Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Wind.flaeche, ST_Distance(T.geom, Klaer.geom) AS  
distance_to_Klaer, Klaer.cat AS Klaer_cat, ST_Distance(T.geom, Bio.geom) AS dis-  
tance_to_Bio, Bio.id AS Bio_id, 1.4 × (ST_Distance(T.geom, Gas.geom) × 352 +  
ST_Distance(T.geom, Wind.geom) × 90) AS Kosten  
FROM "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T  
LEFT JOIN "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer  
ON ST_DWithin(T.geom, Klaer.geom, 2000)  
LEFT JOIN "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio  
ON ST_DWithin(T.geom, Bio.geom, 2000)  
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind  
ON ST_DWithin(T.geom, Wind.geom, 2000)  
INNER JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas  
ON ST_DWithin(T.geom, Gas.geom, 2000)  
ORDER BY T.id, ST_Distance(T.geom, Gas.geom),  
ST_Distance(T.geom, Wind.geom);
```

Anhang 3: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Kläranlagen nach Szenario A

```
CREATE TABLE "Alle_PtG-Kläranlagen_SzenarioA" AS  
SELECT DISTINCT ON (Klaer.cat) Klaer.cat, Klaer.geom, Gas.id AS Gas_ID,  
Gas.pipeline, ST_Distance(Klaer.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, ST_Dis-  
tance(Klaer.geom, BAB.geom) AS distance_to_BAB, Wind.Multi_ID, ST_Dis-  
tance(Klaer.geom, Wind.geom) AS distance_to_Wind, Wind.WEA, Wind.Leis-  
tungMW, Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Wind.flaeche, ST_Distance(Klaer.geom,  
T.geom) AS distance_to_T, T.id AS T_id, ST_Distance(Klaer.geom, Bio.geom) AS  
distance_to_Bio, Bio.id AS Bio_id, 1.4 × (ST_Distance(Klaer.geom, Gas.geom) ×  
352 + ST_Distance(Klaer.geom, Wind.geom) × 90) AS Kosten  
FROM "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer  
LEFT JOIN "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T  
ON ST_DWithin(Klaer.geom, T.geom, 2000)  
LEFT JOIN "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio  
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Bio.geom, 2000)  
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind  
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Wind.geom, 2000)  
INNER JOIN "Bundesautobahnabfahrten" AS BAB  
ON ST_DWithin(Klaer.geom, BAB.geom, 1000)  
INNER JOIN "Fernleitungsnetz_Erdgas" AS Gas  
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Gas.geom, 2000)  
WHERE ST_Distance(T.geom, Gas.geom) >= 2000  
OR ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL  
ORDER BY Klaer.cat,  
ST_Distance(Klaer.geom, Gas.geom),  
ST_Distance(Klaer.geom, Wind.geom);
```

Anhang 4: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Biogaseinspeiseanlagen nach Szenario A

```
CREATE TABLE "Alle_PtG-Biogaseinspeiseanlagen_SzenarioA" AS  
SELECT DISTINCT ON (Bio.id) Bio.id, Bio.geom, ST_Distance(Bio.geom,  
BAB.geom) AS distance_to_BAB, ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom) AS dis-  
tance_to_Wind, Wind.flaeche, Wind.Multi_ID, Wind.wea, Wind.leistungmw,  
Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Gas.id AS Gas_ID, Gas.pipeline, ST_Dis-  
tance(Bio.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, ST_Distance(Bio.geom, T.geom)  
AS distance_to_T, T.id AS T_id, ST_Distance(Bio.geom, Klaer.geom) AS dis-  
tance_to_Klaer, Klaer.cat AS cat_Klaer, 1.4 × (ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom)  
× 90) AS Kosten  
  
FROM "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio  
LEFT JOIN "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer  
ON ST_DWithin(Bio.geom, Klaer.geom, 2000)  
LEFT JOIN "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T  
ON ST_DWithin(Bio.geom, T.geom, 2000)  
LEFT JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas  
ON ST_DWithin(Bio.geom, Gas.geom, 2000)  
INNER JOIN "Bundesautobahnabfahrten" AS BAB  
ON ST_DWithin(Bio.geom, BAB.geom, 1000)  
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind  
ON ST_DWithin(Bio.geom, Wind.geom, 2000)  
  
WHERE ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL  
OR ST_Distance(T.geom, Gas.geom) >= 2000  
  
ORDER BY Bio.id,  
ST_Distance(Bio.geom, BAB.geom),  
ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom);
```

Anhang 5: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Tankstellen nach Szenario B

```
CREATE TABLE "Alle_PtG-Tankstellen_SzenarioB" AS  
SELECT DISTINCT ON (T.id) T.id, T.geom, Gas.id as Gas_ID, Gas.pipeline,  
ST_Distance(T.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, Wind.Multi_ID, ST_Dis-  
tance(T.geom, Wind.geom) AS distance_to_Wind, Wind.DynAbstand, Wind.WEA,  
Wind.LeistungMW, Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Wind.flaeche, ST_Dis-  
tance(T.geom, Klaer.geom) AS distance_to_Klaer, Klaer.cat AS Klaer_cat, ST_Dis-  
tance(T.geom, Bio.geom) AS distance_to_Bio, Bio.id AS Bio_id, 1.4 × (ST_Dis-  
tance(T.geom, Gas.geom) × 352 + ST_Distance(T.geom, Wind.geom) × 90) AS  
Kosten  
  
FROM "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T  
LEFT JOIN "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer  
ON ST_DWithin(T.geom, Klaer.geom, 2000)  
LEFT JOIN "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio  
ON ST_DWithin(T.geom, Bio.geom, 2000)  
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind  
ON ST_DWithin(T.geom, Wind.geom, 8431)  
INNER JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas  
ON ST_DWithin(T.geom, Gas.geom, 2000)  
  
WHERE  
Wind.DynAbstand >= ST_Distance(T.geom, Wind.geom)  
ORDER BY T.id, ST_Distance(T.geom, Gas.geom),  
ST_Distance(T.geom, Wind.geom);
```

Anhang 6: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Kläranlagen nach Szenario B

```
CREATE TABLE "Alle_PtG-Klaeranlagen_SzenarioB" AS
SELECT DISTINCT ON (Klaer.cat) Klaer.cat, Klaer.geom, Gas.id AS Gas_ID,
Gas.pipeline, ST_Distance(Klaer.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, ST_Dis-
tance(Klaer.geom, BAB.geom) AS distance_to_BAB, ST_Distance(Klaer.geom,
Wind.geom) AS distance_to_Wind, Wind.flaeche, Wind.Multi_ID, Wind.wea,
Wind.leistungmw, Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Wind.DynAbstand, ST_Dis-
tance(T.geom, Klaer.geom) AS distance_to_t, T.id AS T_id, ST_Dis-
tance(Klaer.geom, Bio.geom) AS distance_to_Bio, Bio.id AS Bio_id,
1.4 × (ST_Distance(Klaer.geom, Gas.geom) × 352 + ST_Distance(Klaer.geom,
Wind.geom) × 90) AS Kosten
FROM "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer
LEFT JOIN "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T
ON ST_DWithin(Klaer.geom, T.geom, 2000)
LEFT JOIN "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Bio.geom, 2000)
INNER JOIN "Bundesautobahnabfahrten" AS BAB
ON ST_DWithin(Klaer.geom, BAB.geom, 1000)
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Wind.geom, 8431)
INNER JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas
ON ST_DWithin(Klaer.geom, Gas.geom, 2000)
WHERE
Wind.DynAbstand >= ST_Distance(Klaer.geom, Wind.geom)
AND (ST_Distance(T.geom, Gas.geom) >= 2000
OR ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL)
ORDER BY Klaer.cat, ST_Distance(Klaer.geom,
Gas.geom), ST_Distance(Klaer.geom, Wind.geom);
```

Anhang 7: Darstellung der SQL-Abfragen zur Identifikation der integrativen Biogaseinspeiseanlagen nach Szenario B

```

CREATE TABLE "Alle_PtG-Biogaseinspeiseanlagen_SzenarioB" AS
SELECT DISTINCT ON (Bio.id) Bio.id, Bio.geom, ST_Distance(Bio.geom,
BAB.geom) AS distance_to_BAB, ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom) AS dis-
tance_to_Wind, Wind.flaeche, Wind.Multi_ID, Wind.wea, Wind.leistungmw,
Wind.Ely, Wind.Einspeisung, Wind.DynAbstand, Gas.id AS Gas_ID, Gas.pipeline,
ST_Distance(Bio.geom, Gas.geom) AS distance_to_Gas, ST_Distance(Bio.geom,
T.geom) AS distance_to_T, T.id AS T_id, ST_Distance(Bio.geom, Klaer.geom) AS
distance_to_Klaer, Klaer.cat AS cat_Klaer, 1.4 × (ST_Distance(Bio.geom,
Wind.geom) × 90) AS Kosten
FROM "Biogaseinspeiseanlagen_DE" AS Bio
LEFT JOIN "Klaeranlagen_Gesamt" AS Klaer
ON ST_DWithin(Bio.geom, Klaer.geom, 2000)
LEFT JOIN "Alle_Tankstellen_an_Autobahnen" AS T
ON ST_DWithin(Bio.geom, T.geom, 2000)
LEFT JOIN "Fernleitungsnetz Erdgas" AS Gas
ON ST_DWithin(Bio.geom, Gas.geom, 2000)
INNER JOIN "Bundesautobahnabfahrten" AS BAB
ON ST_DWithin(Bio.geom, BAB.geom, 1000)
INNER JOIN "Potenzialflaechen_Wind_aggregiert" AS Wind
ON ST_DWithin(Bio.geom, Wind.geom, 8431
WHERE
Wind.DynAbstand >= ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom)
AND (ST_Distance(T.geom, Gas.geom) IS NULL
OR ST_Distance(T.geom, Gas.geom) >= 2000)
ORDER BY Bio.id,
ST_Distance(Bio.geom, BAB.geom),
ST_Distance(Bio.geom, Wind.geom);

```