

E2Fuels – CO₂-Potenzialatlas (AP1.1.3)

Schlussbericht im Rahmen des Verbundvorhabens
- Modul I: Strombasierte Kraftstoffe und Energiesystemanalysen

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

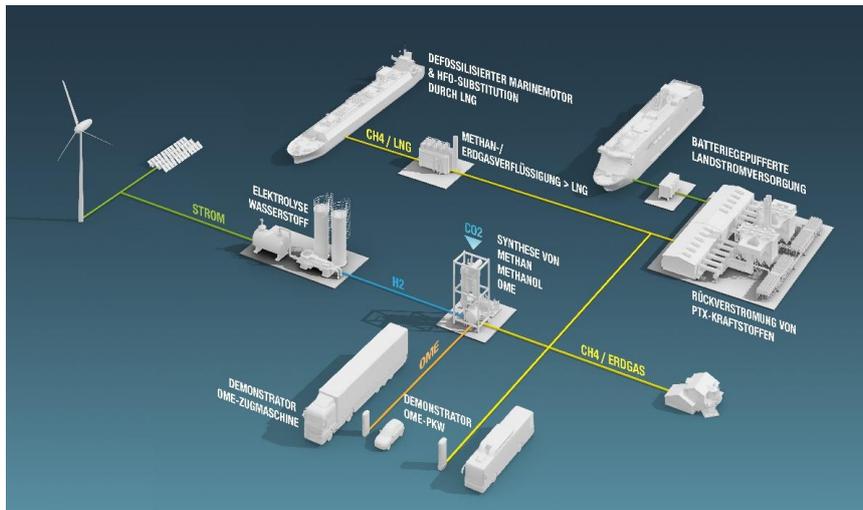
Unter dem Leitprojekt

E2Fuels

Erneuerbare Emissionsarme Kraftstoffe:

Forschung zur Herstellung und Nutzung in einem sektorgekoppelten Ansatz

Kennzeichen 03EIV011E



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

Zentrum für Sonnenenergie- und
Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)
Fachgebiet Systemanalyse
Projektleiter Stefan Fidaschek
stefan.fidaschek@zsw-bw.de
Tel.: +49 711 7870 352
Fax: +49 711 7870 200

Projektlaufzeit: 01.10.2018 – 30.09.2021

Inhalt

1	Kurze Darstellung zu.....	8
1.1	Aufgabenstellung.....	8
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	8
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
1.4	Stand der Technik – wissenschaftlich und technisch (Anknüpfungspunkt)	9
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
2	Eingehende Darstellungen	11
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	11
2.1.1	AP 1.1.3.1 Entwicklung einer Methodik zur Klassifizierung und Erhebung von CO ₂ -Quellen und Aufbau der Datenbankstruktur	11
2.1.2	AP 1.1.3.2 Literaturrecherche zur Erfassung des Status quo anhand vorhandener Untersuchungen zu nationalen CO ₂ -Potenzialen und Bildung der Datenbasis.....	19
2.1.3	AP 1.1.3.3 Datenerhebung georeferenzierter CO ₂ -Quellen, Datenverdichtung durch beschreibende Datenpunktattribute, Analyse der Daten zur Ableitung von räumlich aufgelösten Potenzialen und Visualisierung der Ergebnisse in Karten	23
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	71
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	71
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	71
2.5	Vorangegangener Fortschritt an anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens	72
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse.....	72
3	Literaturverzeichnis.....	72
4	Anhang	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potenzialabschätzung (vor-) konzentrierter CO ₂ -Quellen in Deutschland	10
Tabelle 2: Anzahl Anlagendaten mit Anzahl der Doubletten und Lösungen	18
Tabelle 3: Verwendete Quellen für die Auswertung des CO ₂ -Potenzials mit den zugehörigen Szenarien	20
Tabelle 4: CO ₂ -Emissionen nach Sektoren	25
Tabelle 5: CO ₂ -Emissionen nach Energieträger	26
Tabelle 6: Abgleich ZSW-Datenbank mit der Emissionsberichterstattung des UBA	26
Tabelle 7: Entwicklung der Produktionsmengen.....	31
Tabelle 8: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke, BY	34
Tabelle 9: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Bayern auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	34
Tabelle 10: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen (außer Zement) im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Harburg, BY	35
Tabelle 11: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Harburg, BY	35
Tabelle 12: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen (außer Zement) im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Triefenstein, BY	36
Tabelle 13: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Triefenstein, BY	36
Tabelle 14: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rohrdorf, BY	37
Tabelle 15: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rohrdorf, BY	37
Tabelle 16: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in BW	38
Tabelle 17: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in BW auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	38
Tabelle 18: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von den Zementwerken Schelklingen und Allmendingen, BW	39
Tabelle 19: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius von den Zementwerken Schelklingen und Allmendingen, BW	39
Tabelle 20: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Leimen, BW	41
Tabelle 21: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Leimen, BW	41
Tabelle 22: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, BW	42
Tabelle 23: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, BW	42
Tabelle 24: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Erwitte, NRW	43
Tabelle 25: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Erwitte auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	43
Tabelle 26: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Beckum, NRW	43
Tabelle 27: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Beckum auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	44
Tabelle 28: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Geseke, NRW	44
Tabelle 29: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Geseke auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	44

Tabelle 30: CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Paderborn, NRW	44
Tabelle 31: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Paderborn auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	44
Tabelle 32: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Erwitte, NRW.....	45
Tabelle 33: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, NRW	45
Tabelle 34: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Lengerich und Ennigerloh, NRW	46
Tabelle 35: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Beckum auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	46
Tabelle 36: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lengerich, NRW.....	47
Tabelle 37: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, NRW	47
Tabelle 38: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Göllheim und Üxheim, RP.....	48
Tabelle 39: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Göllheim und Üxheim auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	48
Tabelle 40: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Göllheim, RP.....	48
Tabelle 41: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Göllheim, RP.....	49
Tabelle 42: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Wiesbaden und Großenlüder, HE	49
Tabelle 43: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Wiesbaden und Großenlüder auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	49
Tabelle 44: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Wiesbaden, HE	50
Tabelle 45: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Wiesbaden, HE	50
Tabelle 46: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Großlüdern, HE	51
Tabelle 47: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Großlüdern, HE	51
Tabelle 48: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Bernburg und Karsdorf, ST	52
Tabelle 49: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Bernburg und Karsdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien	52
Tabelle 50: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Karsdorf, ST	53
Tabelle 51: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Karsdorf, ST	53
Tabelle 52: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Bernburg, ST.....	54
Tabelle 53: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Bernburg, ST.....	54
Tabelle 54: CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Lagersdorf, SH	54
Tabelle 55: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Lagersdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	55
Tabelle 56: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lagersdorf, SH	55

Tabelle 57: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lagersdorf, SH	55
Tabelle 58: CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Rüdersdorf, BB	56
Tabelle 59: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Rüdersdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	56
Tabelle 60: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rüdersdorf, BB	57
Tabelle 61: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rüdersdorf, BB	57
Tabelle 62: CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Niedersachsen	57
Tabelle 63: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen der Zementwerke in Hannover und Höver auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	58
Tabelle 64: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Hannover, NI	58
Tabelle 65: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Hannover, NI	58
Tabelle 66: CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Thüringen.....	59
Tabelle 67: Abschätzung der zukünftigen CO ₂ -Emissionen des Zementwerks in Niederorschel auf Grundlage der jeweiligen Szenarien.....	59
Tabelle 68: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Niederorschel, TH	60
Tabelle 69: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Niederorschel, TH	60
Tabelle 70: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Zörbig	62
Tabelle 71: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Zörbig	63
Tabelle 72: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Schwedt.....	63
Tabelle 73: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt.....	63
Tabelle 74: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Anklam	64
Tabelle 75: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt.....	64
Tabelle 76: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO ₂ -Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Wachau	65
Tabelle 77: Potenzielle CO ₂ -Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt.....	65
Tabelle 78: Zementwerke in NRW mit Beschreibung zu Infrastrukturfaktoren.....	69
Tabelle 79: Bioethanolanlagen mit Beschreibung zu Infrastrukturfaktoren sowie Anbindung zu Zementwerken	70
Tabelle 80: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (netto).....	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modulübersicht im Projekt (Strukturplan).....	9
Abbildung 2: Verwendete Datenquellen zur Erstellung der Datenbank als Grundlage für den CO ₂ -Potenzialatlas	12
Abbildung 3: Aufbauschema für die CO ₂ -Datenbank. Quelle 1 hat hier die höchste Priorität. Die Roh Tabellen können nach dem Aufbau verworfen werden.....	16
Abbildung 4: Grafische Benutzerschnittstelle zur halbautomatischen Zusammenführung von Doubletten.	17
Abbildung 5: Vergleich CO ₂ -Angebot und –Nachfrage in den Stützjahren 2020 – 2050. Jeder Punkt stellt ein Szenario aus den Quellen aus Tabelle 3.	22
Abbildung 6: Deutschlandweite Verteilung der CO ₂ -Quellen in den Sektoren Energie und Industrie .	24
Abbildung 7: Deutschlandweite Verteilung der CO ₂ -Quellen nach Energieträger.....	24
Abbildung 8: CO ₂ -Emissionen nach Sektoren.....	25
Abbildung 9: CO ₂ -Emissionen nach Energieträger	26
Abbildung 10: Verteilung der CO ₂ -Emissionen in Deutschland.....	27
Abbildung 11: Aufteilung der Branchen für die Emissionsprognosen	28
Abbildung 12: Direkte CO ₂ -Emissionen aus der Zementindustrie.....	30
Abbildung 13: Standorte der Zementwerke mit Klinkerproduktion	30
Abbildung 14: Verfahren zur CO ₂ -Abscheidung bei der Zementklinkerherstellung	31
Abbildung 15: Ambitioniertes Referenzszenario.....	32
Abbildung 16: Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen pro Werk in Tonnen	33
Abbildung 17: Standorte der deutschen Zementwerke.....	33
Abbildung 18: Zementwerke in Bayern.....	34
Abbildung 19: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Harburg, BY	35
Abbildung 20: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Triefenstein, BY	36
Abbildung 21: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Rohrdorf, BY	37
Abbildung 22: Zementwerke in Baden-Württemberg.....	38
Abbildung 23: CO ₂ -Quellen um die Zementwerke Schelklingen und Allmendingen, BW	39
Abbildung 24: Zementwerk Leimen mit drei weiteren Zementwerken im 60-Minuten-Fahrradius	40
Abbildung 25: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Leimen, BW	40
Abbildung 26: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Dotterhausen, BW.....	41
Abbildung 27: Zementwerke in Nordrhein-Westfalen.....	42
Abbildung 28: Zementwerk Erwitte mit sechs weiteren Zementwerken im 60-Minuten-Fahrradius..	43
Abbildung 29: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Erwitte, NRW.....	45
Abbildung 30: Zementwerk Lengerich mit dem Zementwerk Ennigerloh im 60-Minuten-Fahrradius.	46
Abbildung 31: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Lengerich, NRW.....	46
Abbildung 32: Zementwerke in Rheinland-Pfalz	47
Abbildung 33: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Göllheim, RP.....	48
Abbildung 34: Zementwerke in Hessen.....	49
Abbildung 35: CO ₂ -Quellen um die Zementwerke Wiesbaden und Großenlüder, HE	50
Abbildung 36: Zementwerke in Sachsen-Anhalt	51
Abbildung 37: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Karsdorf, ST	52
Abbildung 38: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Bernburg, ST	53
Abbildung 39: Zementwerk in Schleswig-Holstein.....	54
Abbildung 40: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Lagersdorf, SH	55
Abbildung 41: Zementwerk in Brandenburg.....	56
Abbildung 42: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Rüdersdorf, BB	56
Abbildung 43: Zementwerke in Niedersachsen	57

Abbildung 44: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk Hannover, NI	58
Abbildung 45: Zementwerke in Thüringen.....	59
Abbildung 46: CO ₂ -Quellen um das Zementwerk in Niederorschel, TH.....	59
Abbildung 47: Biogaseinspeise- und Bioethanolanlagen in Deutschland	61
Abbildung 48: Bioethanolproduktion.....	61
Abbildung 49: Bioethanolanlagen in den neuen Bundesländern.....	62
Abbildung 50: Restriktive Flächen für PtX-Anlagen.....	66
Abbildung 51: Standortkarte von Zementwerken und Bioethanolanlagen mit restriktiven und selektiven Faktoren	68
Abbildung 52: Zementwerke in NRW mit restriktiven und selektiven Faktoren	68
Abbildung 53: Bioethanolanlagenstandorte mit selektiven Infrastrukturfaktoren	69

1 Kurze Darstellung zu

1.1 Aufgabenstellung

Das ZSW ist Projektpartner im vom BMWi geförderten Verbundvorhaben Modul I Strombasierte Kraftstoffe und Energiesystemanalyse unter dem E2Fuels – Leitprojekt: E2Fuels – Erneuerbare Emissionsarme Kraftstoffe: Forschung zur Herstellung und Nutzung in einem sektorgekoppelten Ansatz.

Die Power-to-X-Technologie (PtX-Technologie) zur Erzeugung emissionsarmer, synthetischer Kraftstoffe setzt sich aus einer Elektrolyseanlage, einem optionalen H₂-Speicher, einer CO₂-Bereitstellung und einer Syntheseeinheit zusammen. Dies macht eine optimale Integration und Dimensionierung der Teilsysteme notwendig, um höchste Wirkungsgrade, Flexibilität und Verfügbarkeit sowie geringe Investitions- und Betriebskosten zu erreichen. Zudem weist die Einbindung in externe Prozesse ein hohes Potenzial zur Steigerung des Nutzungsgrades und zur Erschließung zusätzlicher Erlösquellen auf.

Das Vorhaben CO₂-Potenzialatlas fokussierte sich auf den Teilaspekt der CO₂-Bereitstellung. Durch den strukturellen Aufbau einer Datenbank zur georeferenzierten Aufnahme von CO₂-Quellen und der Datenrecherche, wurde eine breite Datenbasis gebildet, die ein Abbild der CO₂-Verfügbarkeit darstellt. Die detaillierte Erfassung der CO₂-Quellen wurde genutzt, um darauf aufbauend Analysen zur Regionalverteilung von zukünftigen PtX-Anlagen durchführen zu können. Eine ausreichende Kohlenstoffdioxidverfügbarkeit nach Menge und Qualität ist ein wesentlicher Standortfaktor für die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen.

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur CO₂-Verfügbarkeit für Power-to-X beruhen auf Gesamtpotenzialen, um die Umsetzungsfähigkeit der Technologie generell zu prüfen. Hier im Vorhaben wurde dieser Ansatz nun um eine georeferenzierte Datenbasis der Einzelemissionsquellen erweitert. Denn die regionale Kohlenstoffdioxidverfügbarkeit bietet einen Anhaltspunkt zur Dimensionierung der Anlagen, da CO₂ zumeist einen limitierenden Faktor für den Produktionsprozess darstellt. Durch die georeferenzierten Informationen (Geokoordinate, Adresse, PLZ o.ä.) zu den CO₂-Quellen und einer Erweiterung der Datenbasis mit Zusatzinformationen (Attributen), wurde ein umfassendes Bild der CO₂-Quellen-Verfügbarkeit in Deutschland gefertigt. Daneben ist die Datenbank so variabel aufgebaut, dass nachträglich weitere relevante Produktionsfaktoren (u.a. Informationen zu Produkt- und Nebenproduktsenken) sowie Standortfaktoren, wie Kopplungspunkte zu den Energienetzen jederzeit ergänzt werden können.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das AP 1.1 wurde im Fachgebiet Systemanalyse (SYS) des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) bearbeitet. In seiner Querschnittsfunktion innerhalb des ZSW befasst sich das Fachgebiet SYS seit Bestehen des Instituts mit regenerativen Energien und Effizienztechnologien, für die unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten die günstigsten Einsatzbereiche bestimmt und geeignete Markteinführungsstrategien entwickelt werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Behandlung des Themas Elektromobilität sowie Wasserstoff und seiner synthetischen Folgeprodukte. Hinzu kommt eine langjährige Projekterfahrung im Bereich der Datenverarbeitung und Datenbankmanagement in der SYS-Arbeitsgruppe Simulation & Optimierung (SimOpt).

Dementsprechend verfügen die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fachgebietes über umfangreiche Erfahrungen in der Konzeption von Datengestützten Auswertungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Teilvorhaben CO₂-Potenzialatlas innerhalb des Modul I (vgl. Abbildung 1), sind drei Arbeitspakete 1.1.3.1 bis 1.1.3.3 vorgesehen. Die jeweiligen Ziele der Arbeitspakete, sowie die beinhalteten Arbeiten und speziell deren Ergebnisse sind unter 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse aufgezeigt.

Abbildung 1 zeigt die Einordnung des AP 1.1.3. in das Gesamtvorhaben von Modul I.

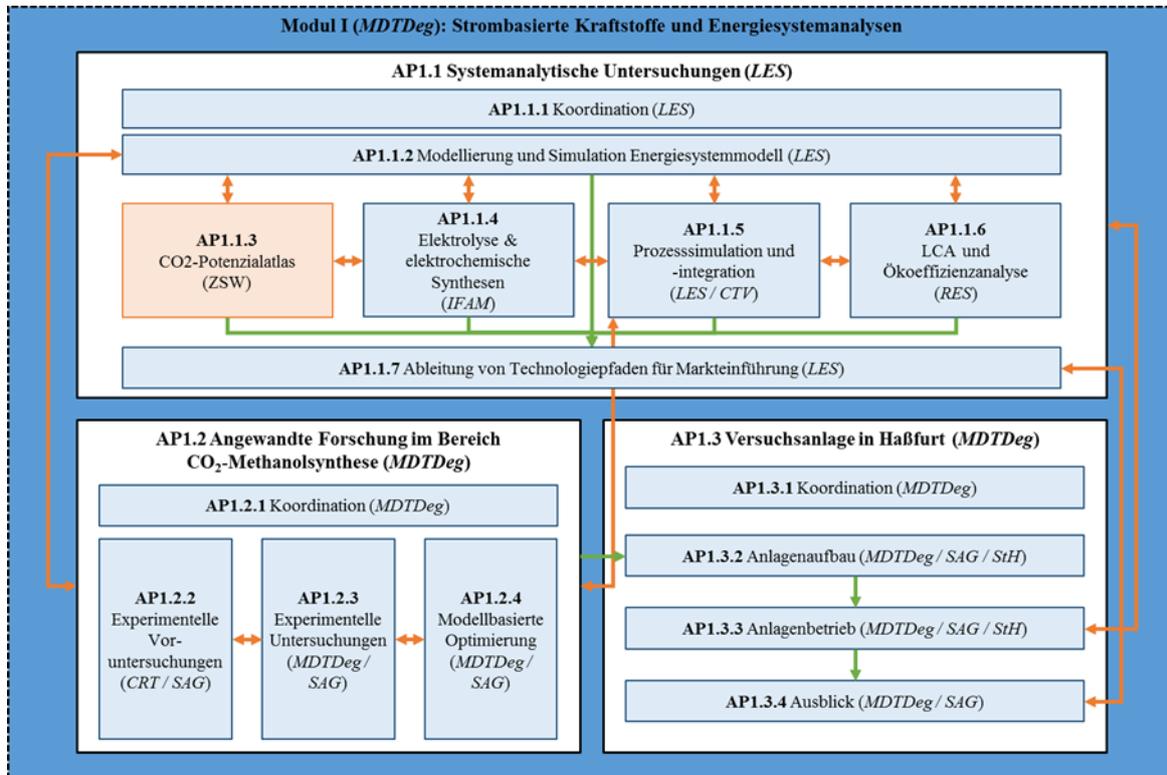


Abbildung 1: Modulübersicht im Projekt (Strukturplan)

1.4 Stand der Technik – wissenschaftlich und technisch (Anknüpfungspunkt)

Während im Stromsektor mit einem Anteil der erneuerbaren Energien von 31,7 % im Jahr 2016, nach dem fünften Monitoring-Bericht des BMWI, die mittelfristigen Ausbauziele von 35 % bis 2020 schon vorzeitig erreichbar schienen (tatsächlich wurden sogar 46 % erreicht [1]), war der Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor rückläufig [2]. Dieser lag im Jahr 2015 bei lediglich 5,2 %. Er stieg bis 2020 zwar auf 7,3 %, das mittelfristige Ziel von 10 % bis 2020 wurde dennoch verfehlt [2]. Daher sind deutliche Anstrengungen und neue Lösungsansätze nötig, um den Anteil der erneuerbaren Energien im Verkehrssektor zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Durch strombasierte, erneuerbare Kraftstoffe (e-Fuels) können fossile Kraftstoffe substituiert und damit die CO₂-Emissionen im Verkehrssektor reduziert werden. Die Herstellung und Nutzung der e-Fuels hat das Potenzial, bestehende Infrastrukturen (Speicherung und Verteilung mittels Tankstellennetz, PKW- und LKW-Flotte) zu nutzen und damit die Einführung zu erleichtern. Für eine Markteinführung und Durchdringung von e-Fuels im Verkehrssektor ist neben der Identifikation aussichtsreicher Kraftstoffe für verschiedene Anwendungen (PKW, LKW, maritime und stationäre Großmotoren) aber auch die Verfügbarkeit von Kohlenstoff als Basis für die Synthese von Kohlenwasserstoffe aus Wasserstoff und Kohlenstoff zu untersuchen. Denn für die Kohlenwasserstoffsynthese werden Kohlenstoffoxide (CO und CO₂) in konzentrierter Form benötigt, die mit möglichst geringem Kosten- und Energieaufwand bereitgestellt werden und idealerweise aus erneuerbaren Quellen stammen. Bei den bestehenden PtX-

Demoanlagen erfolgt die CO₂-Bereitstellung meist aus konzentrierten Quellen, weil dort der Energieaufwand zur Aufkonzentration wesentlich geringer ist, als bei der Bereitstellung aus Luft (Direct Air Capture), wo das CO₂ in sehr verdünnter Form vorliegt (400 ppm). Eine Übersicht konzentrierter biogener und fossiler Quellen ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Potenzialabschätzung (vor-) konzentrierter CO₂-Quellen in Deutschland

	CO ₂ - Konzentrationsbereich Vol%	CO ₂ -Potenzial Mrd. m ³ /a
Fermentation: Biogas-, Klär-, Ethanol-Anlagen	30 – 100 %	7
Industrie: Stahl-, Zementwerke	10 - 20 %	34
Chemie: Ammoniak-, Ethylenoxid-Synthese	bis 100 %	2
Thermische Kraftwerke	10 - 15 %	147
<i>Gesamt</i>		<i>190</i>
<i>Benchmark Luft</i>	<i>0,04%</i>	<i>1.500.000</i>

Quelle: ZSW[3]

Bisher werden die Kohlenstoffdioxid-Potenziale überwiegend als Gesamtheit ermittelt (vgl. eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz [4]). Diese statistischen Informationen ermöglichen zwar Rückschlüsse auf das theoretische Potenzial synthetischer Kraftstoffe, aber für die Entwicklung eines Power-to-X-Technologiepfades und zur Durchführung von techno-ökonomischen Analysen sind detailliertere Informationen hilfreich und notwendig. Daher wurde eine geographisch verortete Datenbasis über bestehende CO₂-Quellen in Deutschland erstellt. Durch die georeferenzierten Informationen (Geokoordinate, Adresse, PLZ) zu den CO₂-Quellen und einer Erweiterung der Datenbasis mit Zusatzinformationen (Attributen), wie Mengenpotenzialen, der Dargebotsdynamik (jährliche Verfügbarkeit) oder den Ursprungssubstraten (biogene Quelle, industrielle Emission etc.) wurde ein umfassendes Bild der CO₂-Quellenverfügbarkeit in Deutschland gefertigt. Schwerpunkte der Untersuchung lagen dabei auf den drei in Tabelle 1 genannten Bereichen – biogene und industrielle Quellen sowie dem konventionellen Kraftwerkspark.

Als Datenbasis dienten die amtlichen Statistiken (Bundesnetzagentur (u. a. das EEG-Anlagenregister, die Kraftwerkliste, usw.), Statistisches Bundesamt (destatis)), Veröffentlichungen von Forschungsvorhaben und Verbänden, sowie Recherchen bei Unternehmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das ZSW befand sich bei der Projektdurchführung in ständigem Austausch mit den Institutionen aus den weiteren Arbeitspaketen des AP1.1. Es wurden regelmäßige Telefonkonferenzen und Projekttreffen durchgeführt. Teilweise wurden diese als physisch Treffen, nach Pandemiebeginn jedoch ausschließlich als Video-Konferenzen, durchgeführt. Es wurde stets der aktuelle Stand aufgezeigt, Hinweise und Vorschläge wurden aufgenommen und, soweit möglich, in die weiteren Projektarbeiten eingebunden.

Da die konkrete Thematik des CO₂-Potenzialatlases keine direkten Überschneidungen mit den weiteren APs des Gesamtvorhabens hatte, konnte über die Projekttreffen hinaus keine inhaltliche Zusammenarbeit und kein Datenaustausch oder –abgleich stattfinden.

2 Eingehende Darstellungen

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 AP 1.1.3.1 Entwicklung einer Methodik zur Klassifizierung und Erhebung von CO₂-Quellen und Aufbau der Datenbankstruktur

Die Ziele des Arbeitspakets gestalteten sich wie folgt:

- Erarbeitung der Methode zur Klassifizierung und Erhebung von CO₂-Quellen
- Aufbau der Datenbankstruktur zur Erfassung von CO₂-Quellen.
- Festlegung, Bezug und Installation einer für den Anwendungsfall geeigneten GIS-Softwarelösung

2.1.1.1 Erarbeitung der Methode zur Klassifizierung und Erhebung von CO₂-Quellen

CO₂-Emissionen werden fast ausschließlich durch Verbrennungsprozesse verursacht (ca. 95 %). Die mit fast 82 % im Jahr 2020 bedeutendste Quelle von Treibhausgasemissionen ist die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die restlichen 18 % der Gesamtemissionen teilen sich Landwirtschaft mit 8,2 %, Industrieprozesse mit 7,9 % und Abfallwirtschaft mit 1,2 % [5].

Bei der Freisetzung von CO₂ wird zwischen diffusen und stationären Quellen unterschieden. Nach dem Europäischen Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister (European Pollutant Release and Transfer Register), kurz E-PRTR, Verordnung Nr. 166/2006/EG, sind diffuse Quellen "die zahlreichen kleinen oder verteilten Quellen, aus denen Schadstoffe in Boden, Luft und Wasser freigesetzt werden können". Ein Großteil der Emissionsquellen in den Sektoren Kleinverbrauch, Landwirtschaft und auch im Verkehrssektor können als diffuse Quellen angesehen werden. Diese Sektoren werden auf Grund der geringen sowie dezentral anfallenden CO₂-Mengen im E2Fuels – CO₂-Potenzialatlas bei der PtX-Standortanalyse nicht betrachtet.

Ein anderes Bild zeigt sich in den Sektoren Energieversorgung und Industrie. Der Energiesektor in Deutschland emittierte im Jahr 2020 rund 600 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente. Die Emissionen durch Industrieprozesse betragen im Jahr 2020 rund 44 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente [5]. Neben den energiebedingten Emissionen werden im industriellen Sektor zur gesamten Darstellung der CO₂-Emissionen auch die prozessbedingten CO₂-Emissionen mit aufgenommen. Prozessbedingte, klimawirksame CO₂-Emissionen werden bei chemischen Reaktionen bestimmter Produktionsschritte direkt freigesetzt.

Angesichts der vielen unterschiedlichen stationären CO₂-Quellen und der verschiedenen gesetzlichen Berichtspflichten in den beiden Sektoren sind die verfügbaren Datengrundlagen für eine räumliche Darstellung der aktuellen Punktquellen sehr vielfältig.

Im Folgenden werden die wesentlichen Quellen für die Datenbank des CO₂-Potenzialatlas aufgezeigt (Abbildung 2) und anschließend detailliert erläutert.

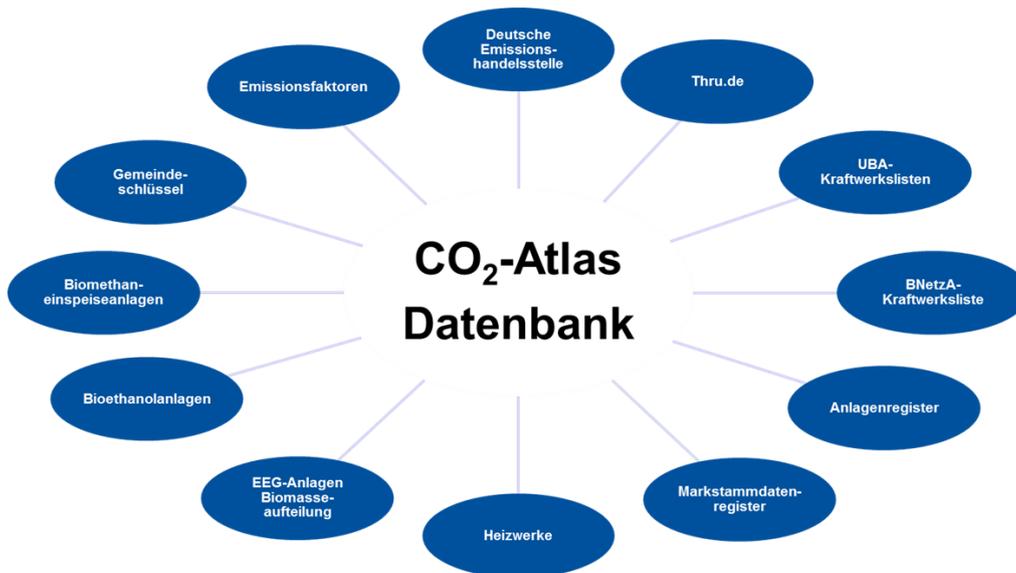


Abbildung 2: Verwendete Datenquellen zur Erstellung der Datenbank als Grundlage für den CO₂-Potenzialatlas

CO₂-Emissionen, welche für potenzielle PtX-Standorte verwendbar sein könnten, lassen sich u. a. aus dem E-PRTR und der Emissionsberichterstattung extrahieren. Die jeweiligen Datensätze werden vom Umweltbundesamt veröffentlicht. Die Daten zum E-PRTR stehen über das Internetportal Thru.de zur Verfügung. Das Portal veröffentlicht Luftschadstoff- und Schmutzwasseremissionen von Betrieben sowie deren entsorgte Abfallmengen. In der Datenbank sind Schadstoffemissionen von knapp 5.000 zumeist größeren Betrieben aufgelistet. Grundsätzlich müssen alle Betriebe, die eine Tätigkeit ausüben, die die EU in der europäischen E-PRTR-Verordnung nennt, über ihre Schadstoffemissionen berichten. Berichtspflichtig sind etwa Kraftwerke, Raffinerien, Chemiebetriebe sowie die Lebensmittelindustrie, aber auch Deponien und Kläranlagen, sobald diese eine gewisse Größe überschreiten und zudem eine beträchtliche Menge eines Schadstoffes in die Umwelt freisetzen. Die Untergrenze für eine Berichtspflicht im E-PRTR liegt bei einer emittierten Jahresfracht von 100kt CO₂. Daneben veröffentlicht die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) jedes Jahr einen Bericht über die emissionshandlungspflichtigen Treibhausgasemissionen von stationären Anlagen in Deutschland - den sogenannten VET-Bericht („Verified Emissions Table“). Im Jahr 2019 waren in Deutschland 1.851 stationäre Anlagen vom Europäischen Emissionshandelssystem (EU-ETS) erfasst. Diese Anlagen emittierten rund 363 Mio. t CO₂-Äquivalente [6].

Es besteht aber ein Unterschied zwischen den gemeldeten CO₂-Emissionen beim Emissionshandel und bei den Betrieben, welche nach der E-PRTR-Verordnung melden. Für den Emissionshandel – also den Handel mit Zertifikaten zur Berechtigung CO₂ freizusetzen – ist die jährliche CO₂-Fracht aus fossilen Energieträgern, wie Kohle, Gas oder Öl, entscheidend. Nutzt ein Betrieb aber z.B. Biomethan als Erdgasersatz oder Holz, um weniger Kohle zu verwenden, braucht er auch weniger CO₂-Zertifikate. Die EU hat hingegen Anfang 2010 in ihrer E-PRTR-Verordnung festgelegt, dass Betriebe über ihre gesamten jährlichen CO₂-Emissionen berichten müssen, egal aus welchem Energieträger oder aus welcher Quelle das schädliche Klimagas stammt. In der Thru.de-Datenbank umfassen die CO₂-Emissionsangaben also sowohl jene, die beim Verbrennen fossiler Energieträger wie Kohle oder Gas entstehen, als auch jene, die beim Verbrennen von Biomasse entstehen. Diese Freisetzungen werden als CO₂-Gesamtmenge in kg/Jahr angegeben. Die Meldung wie groß der Anteil „CO₂-Emissionen aus dem nicht-biogenen Anteil“ ist, erfolgt aber durch den Betreiber auf **freiwilliger** Basis.

Wie oben beschrieben, sind Anlagen, die weniger als 100 kt CO₂-Jahresfracht emittieren, und dadurch auch viele Erneuerbare-Energien-Anlagen, nicht enthalten. Durch das neue Ziel der Klimaneutralität für Deutschland 2045, muss das CO₂-Angebot aus konzentrierten Quellen jedoch schnell stark sinken. Für eine Standortanalyse werden dadurch auch CO₂-Emittenten mit einer Jahresfracht unter 100 kt interessant. Diese wurden daher durch die Verwendung weiterer Quellen mit aufgenommen.

Um eine möglichst genaue „Vor-Ort-Situation“ abbilden zu können, wurden weitere standortspezifische Informationen, wie z. B. zur Wärmeauskopplung, Angaben zu den verwendeten Energieträgern (Brennstoffe), und Anlagenanzahl pro Standort, in die Datenbank übertragen. Diese Informationen wurden anschließend mit den bereits vorhandenen Daten aus dem E-PRTR und dem Emissionshandel abgeglichen. Eventuelle doppelte Datensätze wurden identifiziert und gelöscht. Die genaue Vorgehensweise wird im Abschnitt **„Aufbau der Datenbankstruktur zur Erfassung von CO₂-Quellen“** erklärt. Bei Datensätzen, bei denen keine CO₂-Emissionsangaben vorlagen, wurden diese auf Grundlage der erzeugten Strommenge [7] und den Emissionsfaktoren der Energieträger, welche regelmäßig vom Umweltbundesamt [8] veröffentlicht werden, berechnet (Vorgehensweise siehe Abschnitt **„Berechnung der CO₂-Emissionen“**). Dies traf für alle Punktquellen zu, die nicht im E-PRTR oder dem Europäischen Emissionshandelssystem erfasst wurden.

Die zusätzlichen Datenquellen werden nachfolgend aufgezeigt und erläutert.

Das Umweltbundesamt veröffentlicht in regelmäßigen Abständen eine Übersicht über „Kraftwerke in Deutschland“, in der zusätzliche Informationen zu den Energieanlagen enthalten sind. Hier sind u. a. Angaben zur elektrischen Leistung, zur Fernwärmeleistung, zur Anlagenart sowie zum Primärenergieträger zu finden [9].

Die BNetzA erhebt Leistungsdaten im Rahmen ihres Monitorings nach §35 EnWG bei den Betreibern von Stromerzeugungsanlagen. Diese werden als sogenannte „Kraftwerksliste“ veröffentlicht [BNetzA1]. In dieser sind Bestandskraftwerke in Deutschland mit einer elektrischen Nettonennleistung von mindestens 10 MW einzeln aufgelistet, mit zusätzlichen Informationen, wie zum eingesetzten Hauptenergieträger, ggf. vorhandenen Zusatzenergieträgern sowie eventueller Wärmeauskopplung. Erzeugungsanlagen, die eine installierte Leistung kleiner 10 MW haben, werden nicht mehr einzeln erfasst. Wenn ein Zahlungsanspruch nach dem EEG besteht, werden diese nach Bundesland und Energieträger zusammengefasst aufgelistet. Besteht kein Zahlungsanspruch nach dem EEG, werden die Anlagen anhand der Energieträger zusammengefasst aufgeführt. Um jedoch EEG-Anlagen abbilden zu können, wurden weitere Veröffentlichungen der BNetzA miteinbezogen.

Datenerhebungen der BNetzA im Bereich regenerativer Energieträger fanden vom 01.08.2014 bis zum 31.01.2019 im Rahmen des Anlagenregisters für Erneuerbare-Energien-Anlagen statt. Dadurch liegen ab dem Berichtsjahr 2015 amtliche Angaben zum Leistungszu- und -rückbau nach Energieträgern vor. Der Fokus des Anlagenregisters lag dabei auf neu in Betrieb genommenen Anlagen. Für Bestandsanlagen bestand nur dann eine Meldepflicht, wenn bestimmte Ereignisse eingetreten waren (z. B. Leistungsänderungen, Stilllegungen, erstmalige Verwendung erneuerbarer Energieträger).

Seit dem 01.02.2019 wurde das Anlagenregister durch das Marktstammdatenregister (MaStR) abgelöst. Dies ist ein umfassendes behördliches Register des Strom- und Gasmarktes, das sowohl EEG- als auch nicht-EEG-geförderte Anlagen umfasst. Das Register befindet sich derzeit noch im Aufbau und weist deshalb noch größere Lücken auf. Des Weiteren enthält das MaStR ausschließlich Stammdaten: Namen, Adressen, Standorte, Zuordnungen, Technologien, Leistungswerte, etc. Nicht enthalten sind

die so genannten „Bewegungsdaten“, die mit der energiewirtschaftlichen Aktivität eines Marktakteurs oder den Vorgängen innerhalb von Anlagen verbunden sind (z. B. Produktionsmengen).

Da für die Berechnungen der CO₂-Emissionen Angaben zur Stromerzeugung benötigt werden, wurden in der Datenbank EEG-Stromerzeugungsdaten der BNetzA mit aufgenommen. Die Energieversorgungsunternehmen sowie die Verteilnetzbetreiber (zum 31. Mai) und Übertragungsnetzbetreiber (zum 31. Juli) übermitteln auf jährlicher Basis Stamm- und Bewegungsdaten für die EEG-Jahresendabrechnung an die BNetzA. Diese enthalten Angaben zu den eingespeisten Strommengen und EEG-Vergütungen. Es ist aber zu beachten, dass die Angaben nur für EEG-Anlagen gelten und daher, abhängig vom Energieträger, keine vollständige Abdeckung des Gesamtanlagenbestandes gegeben ist. Dies ist unter anderem teilweise bei der festen Biomasse der Fall, da hier Anlagen über 20 MW keine EEG-Vergütung erhalten. Bei diesen Anlagen wurde daher, wenn sie nicht unter die E-PRTR-Verordnung fallen und dadurch bereits erfasst wurden, auf Grundlage der installierten Leistung und der Jahresvolllaststunden (abhängig vom Anlagentyp) die Stromerzeugung berechnet.

Im EEG erfolgt allerdings keine Unterteilung der Biomasse nach eingesetzten Energieträgern. Aus diesem Grund ist in den Meldungen der Übertragungsnetzbetreiber auch keine Differenzierung der Biomasse in „fest“, „flüssig“ oder „gasförmig“ verfügbar. Damit ist eine Aufteilung der Anlagen nach Biogasanlagen, Anlagen, die flüssige Biomasse oder feste Biomasse einsetzen, nicht ohne weiteres möglich. Am ZSW wurde jedoch eine Methodik erarbeitet, die eine Auswertung und Differenzierung nach Aggregatzustand erlaubt.

Zunächst erfolgt eine automatische Zuordnung von Anlagen zu einem der Aggregatzustände auf Basis von in Vergütungskategorien identifizierbaren eindeutigen Boni. Im zweiten Schritt werden Anlagen, die auf Grund der gleitenden Vergütung des EEG und verschiedener, nur anteilig gezahlter Boni mehrfach aufgelistet sind (identischer Anlagenschlüssel), zusammengefasst. Für alle noch nicht zugeordneten Anlagen werden weitere Datenquellen (wie z. B. BImSch-Listen, BGKEV-Datenbank) und Internet-Recherchen herangezogen. Anlagen, denen kein eindeutiger Energieträger zugewiesen werden konnte, werden schließlich mittels eines Algorithmus, der beispielsweise Umrüstungen identifiziert, zugeordnet.

2.1.1.2 Aufbau der Datenbankstruktur zur Erfassung von CO₂-Quellen

Einpflegen der unterschiedlichen Datenquellen

Der Aufbau der Datenbank für das Projekt E2Fuels erwies sich als komplexer als erwartet. Um ein möglichst umfassendes Kataster der CO₂-Quellen aufzubauen, musste auf Quelldaten verschiedener Struktur und Herkunft zurückgegriffen werden. Eine weitere Herausforderung war, dass die Datenbank zu jedem Zeitpunkt ein Update mit aktualisierten Daten erlauben sollte, ohne die Originaltabellen dabei manuell umformatieren zu müssen. Dabei stellten sich zwei Arbeitsschritte als besonders arbeitsaufwändig heraus:

1. Die manuelle Aufbereitung der meist im XLSX- oder CSV-Format vorliegenden Rohdaten der verschiedenen Quellen in ein einheitliches Tabellenformat:
2. Das Durchforsten des Datenbestands nach Doubletten, die leider aufgrund der teilweise überlappenden Datenbestände in großer Zahl (mehrere Hundert für einige Quellen) auftreten.

Angesichts dessen wurde als Ziel formuliert, dass diese Prozesse so weit wie möglich automatisiert ablaufen müssen, damit die Datenbank auch nach Projektende mit vertretbarem Aufwand weiter gepflegt werden kann.

Für Punkt 1 wurden daher separate Interfaces für jeden Quellentyp geschrieben, die nach einem einmal für die Quelle definierten Schema die Rohdaten interpretieren und in die Datenbank überführen können. Dabei ist wichtig, dass die Rohdaten möglichst wenig – im Idealfall keine – manuelle Änderungen erfahren, bevor sie dem Einlese-Interface übergeben werden. Die Software wurde flexibel genug gestaltet, um mit kleineren Änderungen des Formats umgehen zu können – ggf. nach einer minimalen Anpassung. Dies stellt weitestgehend sicher, dass die betreffenden Quellen auch in Zukunft leicht nutzbar sind.

Die ursprüngliche Überlegung bezüglich Updates der Datenbank war, die neue Version einer Quelldatentabelle einzulesen und mit dem Datenbestand in der Datenbank zu verschneiden. Dabei tritt jedoch das Problem auf, dass einige Quellen keine Primärschlüssel bereitstellen (z.B. Anlagenschlüssel, Kraftwerksnummer) um die Anlagen eindeutig zu identifizieren. Die Primärschlüssel müssen in diesen Fällen aus einer Kombination der anderen Tabellenspalten (Name, Ort, Betreiber o. ä.) konstruiert werden, die sich im Zweifelsfall bei einem Update ändern können. Noch schwerwiegender ist, dass bei der ersten Verschneidung von z. B. zwei Doubletten nur ein Primärschlüssel übrig bleibt. Der zweite Primärschlüssel kann somit bei einem Update nicht genutzt werden und würde für eine neue Doublette sorgen. Die zusätzliche Verwaltung aller Doubletten-Primärschlüssel in der Datenbank würde diese hingegen massiv verkomplizieren. Daher wird die Datenbank bei jedem Update komplett gelöscht und neu aufgebaut. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass die Quellen immer in der gleichen Reihenfolge (nach Priorität, also geschätzter Zuverlässigkeit) miteinander verschnitten werden. Der Rechenaufwand beträgt hier etwa eine Stunde und ist dadurch also nicht maßgeblich.

Um sicherzustellen, dass keine Stammdaten überschrieben werden, speichert die Software nur die Daten der Quelle mit der höchsten Priorität und diejenigen aus disjunkten Quellen – also solchen, bei denen es keine Überlappung mit anderen Quellen geben kann – direkt in den finalen Datenbanktabellen. Alle anderen Daten werden zunächst in Rohdatentabellen zwischengespeichert. Dieses Schema ist zusammen mit den im Folgenden beschriebenen Prozessschritten in Abbildung 3 dargestellt.

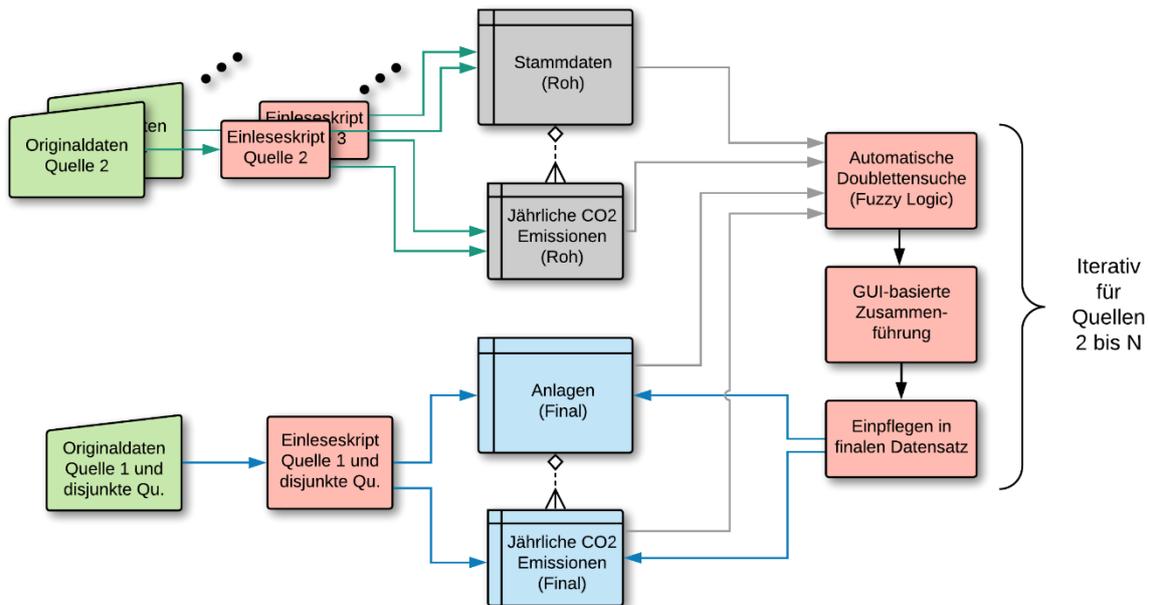


Abbildung 3: Aufbauschema für die CO₂-Datenbank. Quelle 1 hat hier die höchste Priorität. Die Roh Tabellen können nach dem Aufbau verworfen werden.

Die Doublettensuche aus 2. wurde in zwei Schritte unterteilt: Im ersten Schritt sucht ein Algorithmus die Doubletten in der Datenbank und einer einzupflegenden Quelle. Nach einigem Experimentieren erwies sich hier ein *fuzzy string match* auf der textuellen Kombination von Anlagenbetreiber, -name, PLZ und Ort als am zuverlässigsten. Diese Methode sucht in den entstehenden Textschnipseln nach übereinstimmenden Worten, Zahlen und Buchstaben und bewertet die Menge der Übereinstimmungen nach einem festen Schema. Als Parameter ist dann lediglich eine Mindestbewertungszahl anzugeben, ab der die beiden Anlagen zunächst als Doubletten angesehen werden. Wie sich herausstellte, lässt sich dieser Parameter durch Untersuchung einiger Beispiele sehr gut auf einen robusten Wert einstellen.

Der zweite Schritt besteht dann darin, die erhaltenen Doubletten manuell zu überprüfen. Dazu werden diese in einem eigens entwickelten, webbasierten Interface zur vergleichenden Durchsicht und Bewertung angezeigt. Dies erscheint womöglich mit zu hohem Aufwand versehen und soll deshalb mit einem Zahlenbeispiel hinterlegt werden: Für die Thru-Datenbank und die Emissionshandelsdaten kommen jeweils mehrere Tausend Anlagen für die CO₂-Datenbank in Frage. Jede der Anlagen des einen Datensatzes im anderen Datensatz zu suchen – obwohl es hier Differenzen in Namen, Reihenfolge der Worte, Druckfehler und fehlende Felder geben kann – gleicht einer Sisyphusarbeit. Durch die Automatisierung in Schritt eins, schrumpft die manuelle Arbeit auf die Durchsicht von einigen hundert möglichen Doubletten zusammen, die auf visuell einfache Weise präsentiert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt in diesem Zusammenhang ist, dass die manuelle Bewertung für jede Kombination von Anlagen abgespeichert wird, so dass beim Aktualisieren einer Quelle nur die Anlagen neu bewertet werden müssen, die vorher nicht vorhanden waren, bzw. deren Primärschlüssel sich geändert haben.

The screenshot shows a software interface for merging data from two sources. At the top, there is a progress bar with stages: Init, Q2S, Q2M (highlighted), Q2Z, Q3S, Q3M, Q3Z, Q4S, Q4M, Q4Z. Below the progress bar, there is a section for 'Zusammenführung von Quelle 2 mit den bestehenden Daten'. This section includes a search filter with the text '6/518 (518 lodo)', a 'Schnellfilter' input field, and a 'ToDo' checkbox. There are several action buttons: 'Daten-Prio', 'Prio', 'Teil von →', 'Separieren', 'Ignorieren', 'Teil von ←', 'Prio', and 'Daten-Prio'. A 'Fertig' button is also present. Below these buttons, there is a 'Prio / Daten-Prio' dropdown menu. The main area displays two side-by-side tables for 'Anlage 01-50-01000004838' and 'Anlage 14310-0154'. The left table has red rows, and the right table has green rows. At the bottom, there is a 'Kommentar eingeben' field and a 'Speichern' button.

Abbildung 4: Grafische Benutzerschnittstelle zur halbautomatischen Zusammenführung von Doubletten.

Das grafische Interface zur Untersuchung der Doubletten ist in Abbildung 4 dargestellt. Es gibt bei jeder Doublette folgende Einstellmöglichkeiten, die teilweise entweder für die linke oder rechte Anlage gelten:

Priorität (links oder rechts anwendbar): Die auf dieser Seite gezeigte Anlage besitzt bessere Stammdaten. Diese werden zuerst in die Datenbank übernommen. Fehlende Felder werden dann durch die Daten der anderen Anlage ergänzt, soweit vorhanden.

Datenpriorität (links oder rechts anwendbar): Die auf dieser Seite gezeigte Anlage besitzt bessere Bewegungsdaten. Diese werden zuerst in die Datenbank übernommen. Fehlende Jahre werden durch die Daten der anderen Anlage ergänzt, soweit vorhanden.

Separate Anlagen: Die automatische Doublettensuche hat fälschlicherweise zwei unterschiedliche Anlagen als Doubletten markiert. Beide Anlagen werden unverändert in die Datenbank übernommen.

Ignorieren: Wenn sich die Bezeichnungen mehrerer Anlagen sowohl in der Datenbank als auch in der einzulesenden Quelle sehr ähneln, kann es vorkommen, dass die automatische Doublettensuche mehrere Kombinationen derselben Anlage mit anderen Anlagen findet. Diese „Doubletten von Doubletten“ können hiermit ignoriert werden.

Teil von (links und rechts anwendbar): Dies ist der komplizierteste Fall. Manche Anlagen liegen in der einen Quelle als einzelne Blöcke vor (z. B. Thru-Datenbank), in der anderen aber nur als eine Gesamtanlage (z. B. Emissionshandel). Wenn in den einzelnen Blöcken den gleichen Energieträger verwendet wurden, wurden diese als ein Block zusammengefasst. Bei unterschiedlichen Energieträgern, wenn diese denn einzelnen Blöcke zugeordnete werden konnten, wurden sie getrennt erfasst. Problematisch ist hierbei jedoch, dass die Summe der Emissionen der einzelnen Blöcke nicht

zwangsläufig denen der Gesamtanlage entsprechen müssen, weil die Kriterien, nach denen die Emissionen erfasst werden, in den Quellen unterschiedlich sind.

Darüber hinaus enthält die Datenbank auch Anlagen aus Quellen, bei denen es keine Überlappung mit anderen Quellen gibt. In diesen Fällen erübrigt sich die Doublettensuche.

Statistik der Doublettensuche

Zunächst werden alle im Emissionshandel erfassten Anlagen in die Datenbank gelesen. Von diesen waren nach dem letzten Stand **1.851** als CO₂-Emittenten relevant.

Die folgende Tabelle zeigt die Statistik des sequenziellen (der Spalte nach) Einlesens und Verschneidens der überlappenden, anderen Datenquellen. Hierbei bedeutet „Bestand“ die bereits in der Datenbank befindliche Anlage, wobei diese bei den späteren Quellen auch schon durch die vorhergehende Zusammenführung modifiziert sein kann. Daher ist die Reihenfolge hier sehr wichtig. Einige Anlagen werden von der automatischen Doublettensuche fälschlicherweise detektiert und manuell wieder als separat markiert. Manchmal handelt es sich bei den Doubletten auch um Teilanlagen, wie im letzten Abschnitt beschrieben. Die verbleibenden Doubletten enthalten entweder unzureichende Information, tragen keine neuen Datenwerte bei oder sind offensichtliche Datenfehler. Sie werden daher ignoriert.

Tabelle 2: Anzahl Anlagendaten mit Anzahl der Doubletten und Lösungen

<i>Quelle</i>	<i>Thru</i>	<i>BnetzA-Kraftwerksliste</i>	<i>UBA-Kraftwerksliste</i>
Eindeutig neue Anlagen	2236	243	436
Doubletten	518	461	738
Bestand überschrieben	15	15	28
Bestand ergänzt	304	201	179
Separate Anlage	35	48	278
Teil einer Anlage	141	169	169
Ignoriert / Fehler	23	28	84

Berechnung der CO₂-Emissionen

Für den Datenbestand der Emissionshandel-Datenbank sind die CO₂-Emissionen direkt angegeben. Bei der Thru-Datenbank ist lediglich eine Umrechnung der Einheiten auf die intern verwendeten Mt/Jahr notwendig.

Bei allen anderen Quellen werden die Emissionsfaktoren des UBA als Basis für die Berechnung der CO₂-Emissionen herangezogen. Diese Faktoren sind nach Jahren und Energieträgern geordnet, wobei im vorliegenden Fall bei den Anlagen nur jeweils der primäre Energieträger berücksichtigt wird. Die UBA-Tabelle gibt z. B. an, dass die Erzeugung von 1 TJ elektrischer Energie aus *Kokereigas Deutschland* im Jahr 2014 mit 41,2 t CO₂ zu Buche schlug. Leider taucht dieselbe Kategorie in anderen Datenbeständen als *Synthesegas*, *Koksgas* oder *Hochofengas* auf. Die Kategoriebezeichnungen aus den verschiedenen Quelltabellen wurden also zunächst manuell sortiert und den UBA-Kategorien zugeordnet. Daraus resultierten verschiedene Bezeichner, denen mit einer Nachschlagetabelle eindeutige Energieträgerkategorien zugeordnet werden konnten.

Es ist auch möglich, mit dem implementierten Schema Zukunftsszenarien zu berechnen. Dazu wird tabellarisch ein Pfad vorgegeben, nach dem sich die Emission nach Energieträgerkategorien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 prozentual verändert. Die entsprechenden Daten entspringen einschlägigen Studien zur Transformation des Energiesystems und der produzierenden Industrie. Die

jeweils aktuellsten Emissionswerte jeder Anlage werden dann für die Prognose mit dem ihrer Kategorie entsprechenden Faktor multipliziert. Siehe hierzu auch Abschnitt „Branchenspezifische CO₂-Emissionsprognosen“ unter der Beschreibung zu AP 1.1.3.3.

Konsolidierte Datenbank

Die konsolidierte Datenbank enthält rund 23.000 Einzelemittenten (Anlagentabelle) und rund 150.000 Emissionsdatensätze (Bewegungsdaten) mit den unterschiedlichen Datenständen 2017 bis 2021. Der Hintergrund für die verschiedenen Datenstände liegt an den unterschiedlichen Veröffentlichungszeitpunkten der einzelnen Quellen. Bei der E-PRTR-Veröffentlichung dauert es beispielsweise rund 15 Monate nach Ende des jeweiligen Berichtsjahres (aktuelles Jahr minus 1), bis die Daten auf Thru.de veröffentlicht werden. Dies bedeutet also, dass die Emissionsdaten für 2019 für die E-PRTR-Veröffentlichung im Jahr 2020 von den Anlagenbetreibern gemeldet wurden, aber auf Grund der Bearbeitungsdauer und des Prozesses zum Stand des Daten-Updates noch nicht veröffentlicht waren. Die letzte Aktualisierung im Rahmen des Projektes fand im März 2021 statt. Zu diesem Zeitpunkt konnten über Thru.de lediglich die Emissionsdaten bis einschließlich 2018 abgerufen werden. Eine spätere Aktualisierung des Datensatzes, war auf Grund der darauf basierenden aufbauenden Arbeiten, die bis zum Projektende (September 2021) erfolgen mussten, nicht möglich. Bei der VET-Berichterstattung der DEHSt beträgt der zeitliche Verzug etwa ein Jahr. Welche Quellen mit dazugehörigen Inhalten und Datenstände für die Datenbank verwendet wurden, ist im Anhang in der Tabelle „AP1.1.3.1_Datenbankquellen“ dargestellt.

Festlegung, Bezug und Installation einer für den Anwendungsfall geeigneten GIS-Softwarelösung

Für die kartographische Darstellung der gesammelten Daten fiel die Entscheidung zugunsten der Open Source Software QGIS aus. QGIS ist ein Geoinformationssystem zum Betrachten, Bearbeiten und Erfassen von räumlichen Daten und ist GNU General Public License (Freie Software) lizenziert [10].

2.1.2 AP 1.1.3.2 Literaturrecherche zur Erfassung des Status quo anhand vorhandener Untersuchungen zu nationalen CO₂-Potenzialen und Bildung der Datenbasis

Die Ziele des AP 1.1.3.2 gestalteten sich wie folgt:

- Darstellung des Wissens- und Forschungsstandes zu CO₂-Potenzialen. Ableitung des theoretischen CO₂-Potenzials in Deutschland.
- Erhebung vorhandener Daten als Grundlage für die Datenbank.

Um den derzeitigen Stand der CO₂-Potenziale zu erörtern, mussten veröffentlichte Studien, Statistiken und Berichte zur Erfassung des theoretischen, nationalen CO₂-Ausstoßes aber auch hinsichtlich des CO₂-Bedarfs recherchiert werden. Hierzu wurden insgesamt 12 Studien, welche 34 Szenarien beinhalteten, ausgewertet.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die untersuchten Studien.

Tabelle 3: Verwendete Quellen für die Auswertung des CO₂-Potenzials mit den zugehörigen Szenarien

Kurzbezeichnung	Autoren/ Herausgeber/ Auftraggeber (Institution)	Autoren/ Herausgeber (Personen)	Erscheinungs- zeitraum	Titel	Verwendete Szenarien
UBA - RESCUE	UBA		Nov. 2019	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE-Studie	GreenEe1, GreenEe1, GreenLate, GreenLife, GreenMe, GreenSupreme,
Roadmap Chemie 2050	DECHEMA & FutureCamp		Sept. 2019	Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland	Technologiepfad, Treibhausgasneutralität
ifeu - CO ₂ für PtX	ifeu	Fröhlich, Blömer, Münter & Brischke	März 2019	CO ₂ -Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland - Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit	KSZ-KS95
Prognos, FhG, DBFZ - fl. Energieträger	Prognos AG, Fraunhofer UMSICHT & DBFZ	Hobohm et al.	Mai 2018	Status und Perspektiven flüssiger Energieträger in der Energiewende	PtX 80, PtX 95
TF_Energiewende	Fraunhofer ISI, izes gGmbH, Wuppertal Institut (Hrsg.)	Viebahn et al. (Hrsg.)	April 2018	Technologien für die Energiewende - Technologiebericht Band 2	Konzentrierte CO ₂ -Quellen, Faulgase, 80 %ige + 90 %ige Substitution, KSZ-KS95
UBA - Politiksznarien VII	UBA	Repenning, Emele, Blanck, Cook, et al.	Jan. 2018	Politiksznarien für den Klimaschutz VII - Treibhausgas-Emissionsszenarien bis 2035	MMS, MWMS [Mit-(Weiteren)-Maßnahmen-Szenario]
BCG, Prognos - Klimapfade Dt.	BCG, Prognos AG	Gerbert, Herhold, Burchardt et al.	Jan. 2018	Klimapfade für Deutschland	Referenz, 80 %-Pfad, 95 %-Pfad
Kopernikus PtX – 1. Roadmap	DECHEMA (Hrsg.)	Ausfelder & Dura (Hrsg.)	2018	Optionen für ein nachhaltiges Energiesystem mit Power-to-X Technologien - Herausforderungen - Potenziale - Methoden - Auswirkungen 1. Roadmap des Kopernikus-Projektes "Power-to-X": Flexible Nutzung erneuerbarer Ressourcen (P2X)	-85%, -95%, -100%
Concawe - Report	Concawe	Soler	Jan. 2020	Report - Role of e-fuels in the European transport system - Literature review	More-electric
LBST, dena - E-Fuels	LBST & dena	Siegemund et al.	Nov. 2017	"E-Fuels" Study - The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU	
Öko, FhG, IREES - Überblick	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Haller, Repenning, Vogel, Schломann, Reuter, Jochem, Reitze, Schön, Toro	Juni 2016	Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050	ERP-Ref, KSZ-AMS, ERP-Ziel, KSZ-KS80, KSZ-KS90, KSZ-KS95, THGND
Öko, FhG, IREES - Emissionspfade Gebäude & HH-Strom	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Hesse, Bürger, Fries, Schломann	Juni 2016	Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Gebäudesektor und Stromverbrauch Privathaushalte	KSZ-AMS, GS Trend, 100%EE Trend, KSZ-KS80, -KS90, -KS95, MMS, THGND
Öko, FhG, IREES - Emissionspfade Stromerzeugung	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Greiner, Hermann	Mai 2016	Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Stromerzeugung	Realdaten, MMS, KSZ-AMS, -KS80, -KS90, -KS95, ERP-Ziel, Szen-15 100, Plan B GP
Öko, FhG, IREES - Emissionspfade Verkehr	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Blanck, Zimmer	März 2016	Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Verkehr	Realdaten, MMS, KSZ-AMS, ERP-Ziel, KSZ-KS80, -KS90, -KS95, eMobil-G, -R, LS 2011-A, MD-Inno, THGND
Öko, FhG, IREES - Emissionspfade GHD & Industrie	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Wohlfarth, Schломann, Jochem, Reitze, Schön, Toro	März 2016	Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Sektoren Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Industrie	ERP-Ref, ERP-Ziel, MD-Ref, -Inno, KSZ-AMS, -KS80, KS90, KS95, Realdaten, THGND
Öko, FhG, IREES - Emissionspfade Land- & Forstwirtschaft / Landnutzung	Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI, IREES GmbH	Wiegmann, Scheffler, Henneberg	März 2016	Sektorale Emissionspfade in Deutschland bis 2050 - Landwirtschaft und Forstwirtschaft / Landnutzung	ERP-Ref, ERP-Ziel, MD-Ref, -Inno, KSZ-AMS, -KS80, KS90, KS95, Realdaten, THGND
Öko-Institut - Prüfung Methanisierungsstrategien	Öko-Institut e.V.	Hermann, Emele, Loreck	März 2014	Prüfung der klimapolitischen Konsistenz und der Kosten von Methanisierungsstrategien	50 % / 70 % Verfügbarkeit aus Biogas, KSZ-KS90

UBA - THGND 2050	UBA	Benndorf et al.	Okt. 2013 / April 2014	Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050	THGND
Prognos, EWI, GWS - Energieszenarien	Prognos, EWI & GWS	Schlesinger, Hofer, Kemmler, et al.	Aug. 2010	Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung	Referenzszenario, Sz-IVA

Die erhaltenen Werte wurden in vergleichenden Tabellen ausgewertet. Dabei konnten CO₂-Angebote (Emissionen) und die -Nachfrage auf die Stützjahre 2020, 2030, 2040 und 2050 aufgezeigt werden. Beim Angebot war eine detaillierte Unterteilung auf einzelne Wirtschafts- und Industriebereiche möglich. Dies spielte wiederum für den später folgenden Schritt, der Umsetzung der Emissionsprognosen in die Datenbank, eine wichtige Rolle.

Anhand der erhaltenen Werte konnte die nachfolgende Grafik erstellt werden. Dabei entspricht jeder Punkt einer der 34 Szenarien (s. letzte Spalte, Tabelle 3) aus den aufgelisteten Studien.

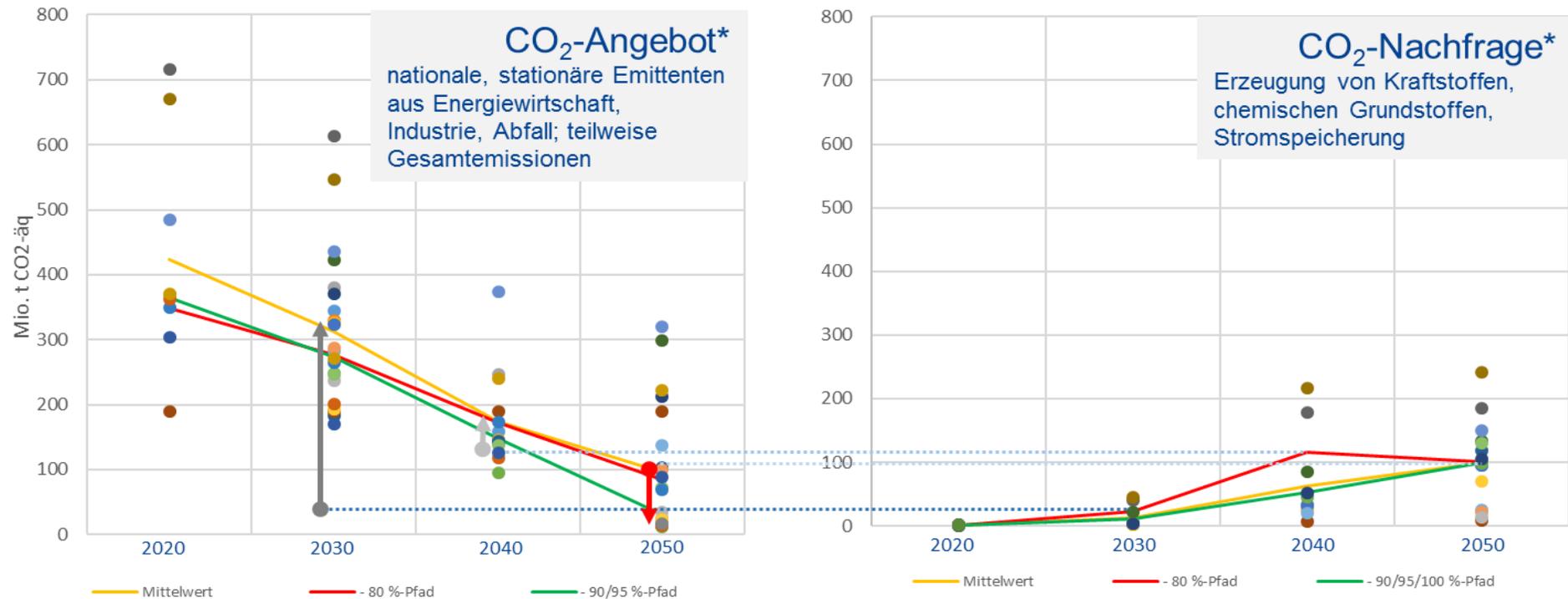


Abbildung 5: Vergleich CO₂-Angebot und -Nachfrage in den Stützjahren 2020–2050. Jeder Punkt stellt ein Szenario aus den Quellen aus Tabelle 3.

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus der Auswertung und dadurch aus der Grafik ziehen:

- 2030 steht ein hohes CO₂-Angebot einer noch geringen CO₂-Nachfrage gegenüber.
- 2040 kann es bereits zur Deckung zwischen Angebot und Nachfrage kommen.
- 2050 besteht, unter Abhängigkeit des Zielpfades (80 %, 95 %), voraussichtlich eine Unterdeckung. Alternative CO₂-Quellen (z. B. Direct Air Capture, DAC) werden erforderlich.
- Bei verstärktem Import von Energieträgern sinkt voraussichtlich die nationale Nachfrageseite. Dafür können Technologien für alternative CO₂-Quellen schon vor 2040 im Ausland erforderlich werden.
- Annahmen zum Einsatz synthetischer Kraftstoffe wirken sich erheblich auf den CO₂-Bedarf aus.

Als Zusammenfassung der Metaanalyse (mittlerer Angebots- und Nachfragepfad) zeigt sich, dass bis zum Jahr 2040 von einem ausreichenden CO₂-Potenzial aus stationären Emissionen in Deutschland zur Deckung der Nachfrage an CO₂ als Rohstoff zur Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen ausgegangen werden kann. In der Dekade 2040 - 2050 beginnt die Nachfrage das Angebot zu übersteigen, alternative Kohlenstoffquellen wie Direct Air Capture oder die Umleitung alternativer Kohlenstoffströme (Abfälle, Reststoffe, Biomasse) könnten erforderlich werden. Dennoch sollte bedacht werden, dass die Aussage auf der Analyse unterschiedlicher Szenarien zum Angebot und der Nachfrage nach CO₂ beruhen. Im Verschneiden von Extremszenarien kann sowohl die Nachfrage bereits vor 2040 das Angebot übersteigen oder entgegengesetzt auch in 2050 noch kein Angebotsmangel vorliegen. Die Situation wird voraussichtlich auch durch die mittlerweile verschärfte Klimaschutzgesetzgebung mit dem Ziel der Treibhausgasneutralität für 2045 beeinflusst. Zu erwarten ist ein deutlich schnellerer Rückgang der verfügbaren Quellen, der einer ggf. rascher steigenden Nachfrage gegenüber steht, weil früher Alternativen für fossile Brenn-, Treib- und Rohstoffe benötigt werden. Dabei erscheinen gerade Punktemittenten, wie Zementwerke, langfristig sichere Rohstoffquellen, da hier nur mit geringen Emissionsminderungen zu rechnen ist.

Durch die erlangten Erkenntnisse aus den Studien, Berichten und Statistiken sowie der Übernahme der Emissionsprognosen in die Datenbank, konnten die gesetzten Ziele vollumfänglich erreicht werden.

2.1.3 AP 1.1.3.3 Datenerhebung georeferenzierter CO₂-Quellen, Datenverdichtung durch beschreibende Datenpunktattribute, Analyse der Daten zur Ableitung von räumlich aufgelösten Potenzialen und Visualisierung der Ergebnisse in Karten

Im AP 1.1.3.3 gestalteten sich die Ziele wie folgt:

- Datenbank mit detailliert spezifizierten und georeferenzierten CO₂-Quellen ist verfügbar.
- Die Daten werden genutzt, um Analysen zur nationalen CO₂-Verfügbarkeit heute und im Ausblick bis 2030 ff. zu erstellen.
- Die Daten werden eingesetzt um GIS-gestützte Analysen durchzuführen, um PtX-Potenzialgebiete zu ermitteln, CO₂-Sammelstrategien zu entwickeln und die Ausarbeitung des Technologiepfades zu unterstützen.

2.1.3.1 Analyse der Daten zur Ableitung von räumlich aufgelösten Potenzialen und Visualisierung der Ergebnisse in Karten

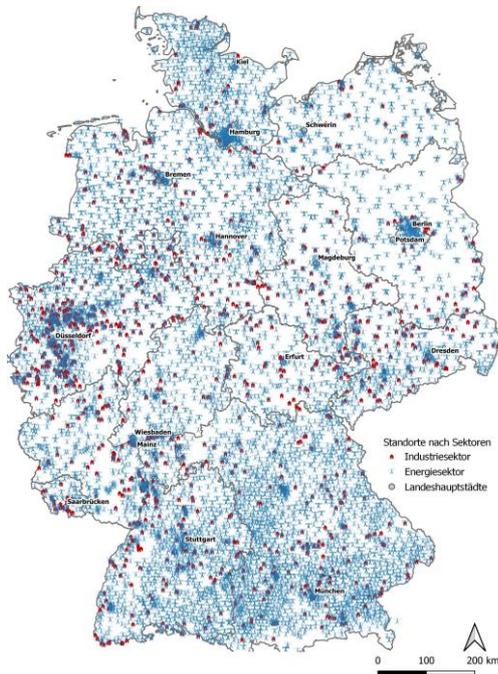


Abbildung 6: Deutschlandweite Verteilung der CO₂-Quellen in den Sektoren Energie und Industrie

Die konsolidierte Datenbank enthält mehr als 23.000 Einzelemittenten (Anlagentabelle) und rund 150.000 Emissionsdatensätze (Bewegungsdaten) mit dem Datenstand 2017/2018.

Die Einzelemittenten teilen sich wie folgt auf:

- 1.570 Industrieanlagen
- 21.600 Energieanlagen

Die Energieträger wiederum verteilen sich wie folgt auf die Anlagen auf:

- 18.880 Anlagen mit Biomasse
- 1.600 Anlagen mit Abfällen (aus Industrie, GHD und Haushalten)
- 2.760 Anlagen, die konventionelle Energieträger einsetzen

Bei den Einzelemittenten wurde jede stationäre CO₂-Quelle getrennt erfasst. Dies bedeutet, wenn an einem Standort mehrere stationäre CO₂-Quellen vorhanden sind, wurden diese einzeln in die Datenbank aufgenommen. Wird z. B. bei einem Kraftwerksstandort (soweit diese Angaben veröffentlicht wurden) in einem Block ein konventioneller Energieträger und im zweiten Block Biomasse verbrannt, sind diese als einzelne Datensätze in der Datenbank vorhanden. Dieses gilt auch für den Industriesektor. Sind an einem Standort bspw. ein Kraftwerk und eine Produktionsanlage aufgelistet, wurden diese als getrennte Datensätze aufgenommen. Bei BASF in Schwarzheide bspw. erfolgte eine getrennte Erfassung des GuD-Kraftwerks und der Steamreforming-Anlage, welche Synthesegase erzeugt.

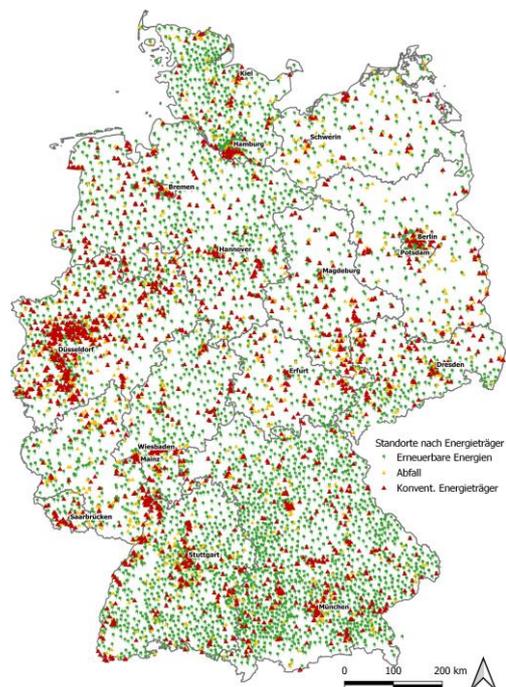


Abbildung 7: Deutschlandweite Verteilung der CO₂-Quellen nach Energieträger

Auswertung der CO₂-Datensätze von 2014 bis 2017

Abbildung 8 und Tabelle 4: CO₂-Emissionen nach Sektoren Tabelle 4 zeigen die Auswertung der CO₂-Datensätze von 2014 bis 2017 (für 2018 und nachfolgende Jahre lagen bei Projektschluss noch keine vollständigen Datensätze vor), getrennt nach den Sektoren Energie und Industrie. Den größten Anteil stellt mit mehr als 80 % der Energiesektor. Auf den Industriesektor entfielen rund 17 % der in der Datenbank enthaltenen CO₂-Emissionen. 1 % der CO₂-Emissionen konnten nicht eindeutig zugeordnet werden.

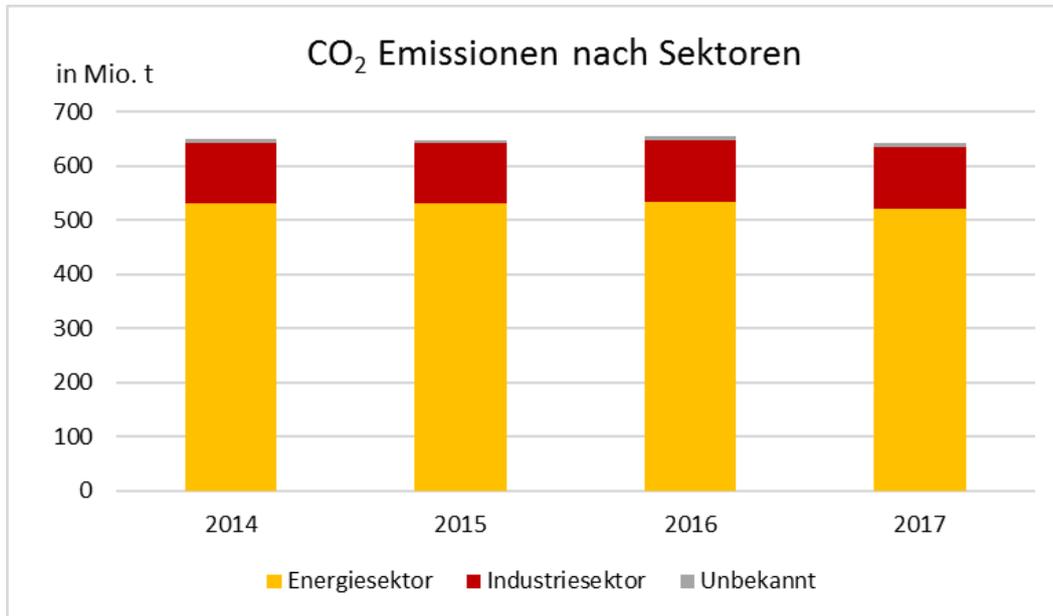
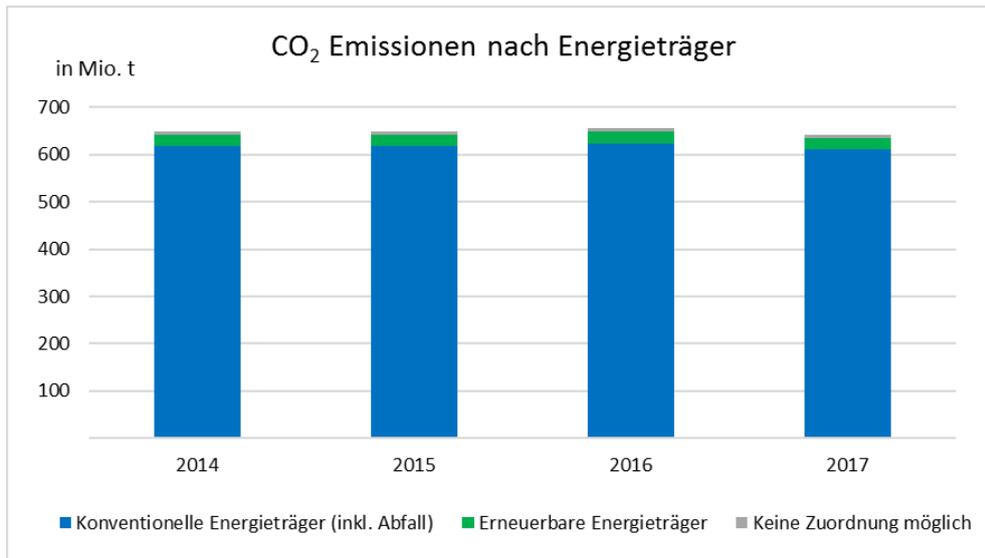


Abbildung 8: CO₂-Emissionen nach Sektoren

Tabelle 4: CO₂-Emissionen nach Sektoren

	2014	2015	2016	2017
	in Mio. t			
Energiesektor	530	531	534	520
Industriesektor	111	110	114	115
Unbekannt	8	7	7	7
Summe	649	649	655	642

Die nachfolgende Abbildung und Tabelle zeigen die Auswertung der CO₂-Datensätze getrennt nach Energieträgern. Rund 95 % der CO₂-Emissionen werden durch konventionelle Energieträger verursacht. CO₂-Emissionen, die durch Verbrennung von Abfällen entstehen, wurden zu den konventionellen Energieträgern dazugezählt. Die erneuerbaren Energien tragen mit rund 4 % zu den CO₂-Emissionen bei. Bei rund 1 % war keine eindeutige Zuordnung möglich.

Abbildung 9: CO₂-Emissionen nach EnergieträgerTabelle 5: CO₂-Emissionen nach Energieträger

	2014	2015	2016	2017
	in Mio. t			
Konventionelle Energieträger und Abfall (aus Industrie, GuD, Haushalte)	617	617	623	610
Erneuerbare Energieträger	24	25	25	25
Keine Zuordnung möglich oder mehrere Energieträger	8	7	7	7
Summe	649	649	655	642

Für eine Abschätzung der Vollständigkeit der CO₂-Datensätze in der Datenbank, wurden diese Datensätze mit den Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes zu den Treibhausgas-Emissionen in Deutschland abgeglichen. Dazu wurden die nationalen Trendtabellen für die deutsche Emissions-Berichterstattung des Umweltbundesamtes [4] verwendet. In den Veröffentlichungen des Umweltbundesamtes zur gesamten CO₂-Emission werden aber neben den stationären Quellen auch die diffusen Quellen mitberücksichtigt. Diese wurden für den Abgleich, soweit eine Unterscheidung möglich war, herausgerechnet, da in der ZSW-Datenbank nur stationäre Quellen enthalten sind. Es zeigte sich, dass die Abweichungen zu den Emissionsdaten des Umweltbundesamtes für die Jahre 2014 bis 2017 max. 2 % betragen.

Tabelle 6: Abgleich ZSW-Datenbank mit der Emissionsberichterstattung des UBA

	2014	2015	2016	2017
	in Mio. t			
Nationale Trendtabellen für die deutsche Emissions-Berichterstattung (Umweltbundesamt [5])	652	649	648	631
ZSW Datenbank	649	649	655	642
Abweichung	99 %	100 %	101 %	102 %

Für eine Standortanalyse ist neben der Auswertung der einzelnen stationären CO₂-Quellen auch wichtig in welchen Regionen mehrere CO₂-Punktquellen vorhanden sind. Dafür wurden die CO₂-Punktquellen mit Postleitzahlgebieten verknüpft. Daraus lässt sich ableiten in welchen Regionen hohe CO₂-Emissionen aus Punktquellen auftreten und durch welche stationären Punktquellen diese verursacht werden. In den dunkelbraunen und schwarz eingefärbten Postleitzahlgebieten sind dies bspw. hauptsächlich die Braun- und Steinkohlekraftwerke. Bei einer weiteren, genaueren Betrachtung der Karte zeigte sich, dass bspw. in Nordrhein-Westfalens Regierungsbezirken Detmold, Arnsberg und Münster hohe CO₂-Emissionen aus verschiedenen Punktquellen auftreten. Diese Punktquellen sind

unter anderem Zementwerke, die im Abschnitt „2.1.3.3 Durchführung von GIS-gestützten Analysen zur Ermittlung von PtX-Potenzialgebieten“ genauer behandelt werden.

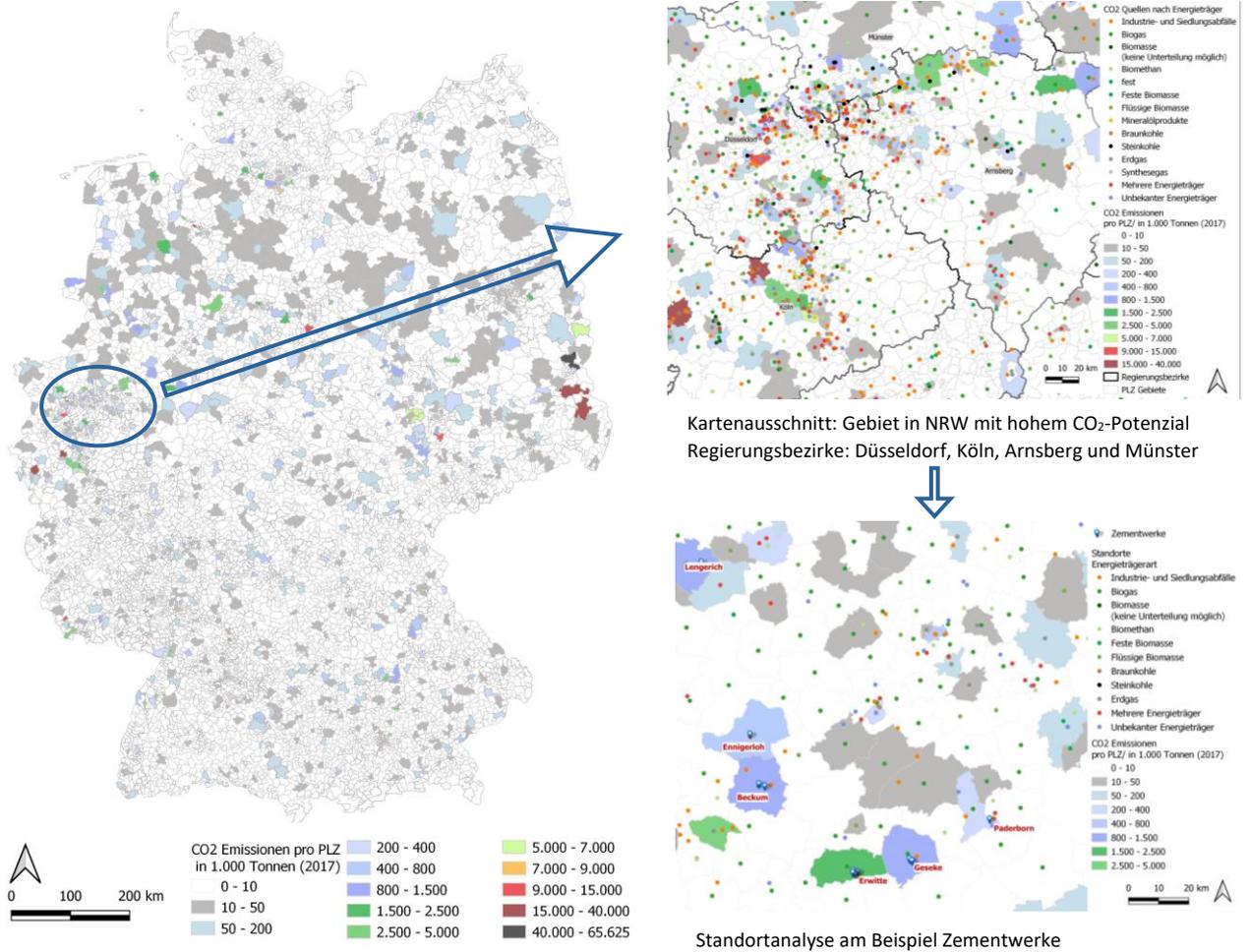


Abbildung 10: Verteilung der CO₂-Emissionen in Deutschland

2.1.3.2 Branchenspezifische CO₂-Emissionsprognosen

Um die zusammengetragenen realen Vergangenheitswerte auf die zukünftigen Stützjahre 2030, 2040 und 2050 erweitern zu können, mussten Emissionsprognosen recherchiert und übertragen werden. Hierzu konnten die erarbeiteten Rechercheergebnisse aus AP 1.1.3.2 angewendet werden. Es wurden folgende Quellen und darin enthaltene Szenarien verwendet:

- Umweltbundesamt – RESCUE-Studie
 - GreenLate-Szenario
 - GreenSupreme-Szenario
- Agora & Wuppertal Institut – Klimaneutrales Deutschland sowie Klimaneutrale Industrie
 - mit CCS-Szenario
 - ohne CCS-Szenario
- ZSW-Studie i.V.m. HFT Stuttgart – „Untersuchung der Zementindustrie als zukünftige CO₂-Quelle für die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen“
- Emissionsprognosen von Branchenverbänden
 - DECHEMA & FutureCamp – Roadmap Chemie 2050
 - Cerame-Unie – Fahrplan der Keramikindustrie

Die Werte der genannten Quellen wurden dabei wiederum nach NACE-Codes aufgeteilt. Dadurch konnten durch Abgleich der Codes die erhaltenen Werte mit den bestehenden Datensätzen verrechnet werden, bzw. diese erweitert werden. Die übergeordnete Branchenaufteilung wird durch die Abbildung 11 verdeutlicht. Die NACE-Aufteilung weist dabei weitere Verfeinerungen innerhalb der Branchen auf. Die Werte wurden jedoch jeweils für einen Branchenzweig gleichbleibend aggregiert.

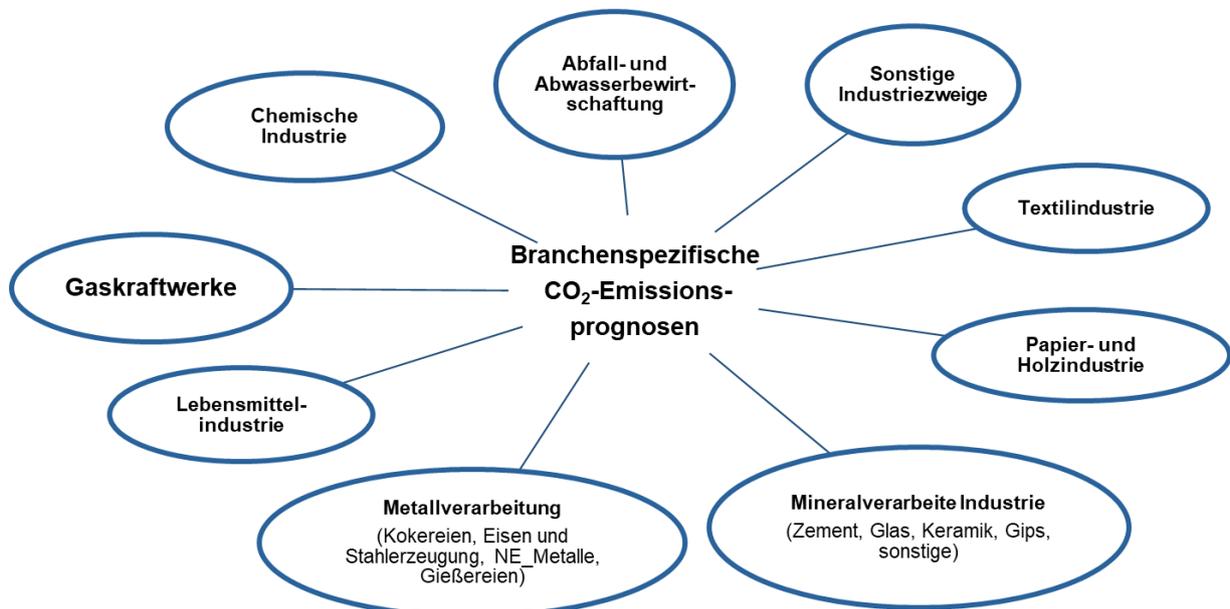


Abbildung 11: Aufteilung der Branchen für die Emissionsprognosen

Da keines der oben aufgeführten Szenarien Werte für alle gezeigten Branchen beinhaltet und die Werte teilweise stark variieren, wurde ein konglomerierendes „ZSW-Szenario“ erstellt. Hierfür wurden Mittelwerte gebildet, sobald für eine Branche mehrere Werte vorhanden waren. Lücken wurden u. a. durch die genannten Branchenstudien oder durch die am ZSW durchgeführte Studie geschlossen.

Zusätzlich zu den oben gezeigten Industriebranchen wurden als Punktquellen aus der Energiebranche Prognosedaten für Gaskraftwerke eingearbeitet. Auf die Betrachtung von Kohlekraftwerke als CO₂-Quelle wurde hier verzichtet, da die sich verändernden Ausstiegsszenarien eine langfristige Nutzung ausschließen. Für die Gaskraftwerke wurden ebenfalls die Szenarien GreenLate und GreenSupreme aus der UBA-RESCUE-Studie verwendet sowie daraus der Mittelwert gebildet. Anders als bei den oben genannten Szenarien, mussten hier die Umrechnungen jedoch auf einzelne Standorte bzw. Anlagen angewendet werden, da hier keine ganze Branche betrachtet wurde.

Für die Umsetzung mussten die Werte der Szenarien in prozentuale Veränderungen umgerechnet werden, da sich die Datengrundlage aufgrund anderer Quellennutzung von der in diesem Projekt erstellten Datenbank unterscheiden.

2.1.3.3 Durchführung von GIS-gestützten Analysen zur Ermittlung von PtX-Potenzialgebieten

Auf Grundlage der Auswertung der Studie Klimaschutzszenario 2050 [11] und der branchenspezifischen CO₂-Emissionsprognosen, wurde für eine detailliertere Standortanalyse beispielhaft die Zementindustrie mit Klinkerproduktion ausgewählt und im Bereich Erneuerbarer Energien fiel die Entscheidung auf Biogasaufbereitungsanlagen (Biomethananlagen) und Bioraffinerien für Bioethanolproduktion, denn das abgeschiedene CO₂ aus Biogaseinspeise- und Bioethanolanlagen stellt auf Grund der hohen Konzentration und Reinheit einen technisch und wirtschaftlich günstig zu erschließenden potenziellen Rohstoff dar.

Da für das Jahr 2018 noch nicht für alle CO₂-Quellen Emissionssätze vorliegen, wurden für diese Betrachtung die Emissionsdaten aus 2017 verwendet.

Neben den reinen CO₂-Mengenberechnungen, wurde zusätzlich eine räumliche Analyse vorgenommen. Dabei wurden CO₂-Emissionen (Stand 2017) von Standorten zusammengefasst, die innerhalb eines maximalen Fahrzeitradius von 60 Minuten liegen. Bei der Berechnung der Fahrzeit wurde der Einfluss von Straßentypen (Autobahn, Landstraße, etc.) mit einbezogen. Da gerade in ländlichen Gebieten die Gasinfrastruktur nicht flächendeckend vorhanden ist, wurde für die beispielhafte Auswertung angenommen, dass der CO₂-Transport per Trailer erfolgt. Bei der Analyse der CO₂-Punktquellen innerhalb dieser Radien, wurde nach konventionellen und erneuerbaren Energieträgern unterschieden. Bei den konventionellen Energieträgern wurden die CO₂-Punktquellen anlagenspezifisch ausgewertet und eine zukünftige Entwicklung der CO₂-Emissionen auf Grund von Szenarien (siehe obenstehenden Abschnitt „Branchenspezifische CO₂-Emissionsprognosen“) abgeleitet. Da keine anlagenspezifischen Daten zum zukünftigen Betrieb der jeweiligen Anlagen vorliegen, konnten keine absoluten Werte übernommen werden, sondern nur mögliche Entwicklungspfade auf Grundlage der bundesweit geltenden Szenarien. Bei den Biomasseanlagen erfolgte die Auswertung nach Anlagenzahl mit dem Stand 2017. Wie sich der Anteil von Biomasseanlagen in Zukunft weiterentwickelt ist schwer abzuschätzen. Im Klimaschutzszenario 2050 [11] wird von einem sinkenden Anteil von fester und gasförmiger Biomasse in der Stromproduktion ausgegangen. Die Stromproduktion aus flüssiger Biomasse wird laut KSZ 95 [11] bis 2050 keine Rolle mehr spielen und wurde deshalb auch nicht in die Standortanalyse aufgenommen. Auf Grund des geplanten Kohleausstiegs könnte sich dies aber auch wieder ändern.

Standortanalyse am Beispiel der deutschen Zementindustrie

Im Jahr 2020 produzierten in Deutschland 21 Zementunternehmen an 54 Werksstandorten 35,5 Mio. Tonnen Zement. Unter dem Begriff „Zementindustrie“ werden 35 Anlagen zur Herstellung von Zementklinker und eine Anlage zur Herstellung von Produkten aus gebranntem Ölschiefer zusammengefasst [12].

CO₂-Emissionen nach aktuellem Stand

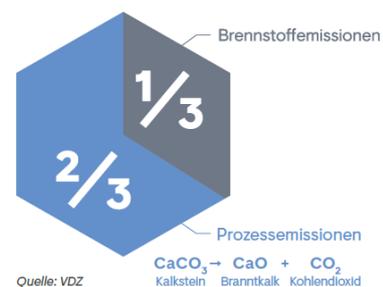


Abbildung 13: Standorte der Zementwerke mit Klinkerproduktion

Bei der eben genannten Zementproduktion in Deutschland von rund 35,5 Mio. Tonnen im Jahr 2020 wurden 20,1 Mio. Tonnen CO₂-Emission, die dem Herstellungsprozess zuzuordnen sind, emittiert. Dies entspricht rund 3% der gesamten deutschen CO₂-Emissionen. Darüber hinaus entstanden indirekte CO₂-Emissionen in Höhe von etwa 1,8 Mio. t CO₂ bei der Erzeugung des für die Zementproduktion benötigten Stroms, z.B. für Mahl- und Förderprozesse, Emissionsminderungstechniken sowie den Antrieb der Öfen. Die Emissionen der deutschen Klinkerproduktion haben sich seit Beginn des Emissionshandels 2005 nicht wesentlich verändert [12].

Wie aufgezeigt, werden bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Zementklinker, große Mengen an CO₂ freigesetzt. Zement wird maßgeblich aus Kalkstein hergestellt, der in Steinbrüchen gewonnen und in Drehöfen zu Zementklinker gebrannt wird. Beim Brennprozess wird das Rohmaterial auf 1.450°C erhitzt; dabei wird prozess- und

brennstoffbedingt CO₂ freigesetzt. Das prozessbedingte CO₂ entsteht bei der Calciniierung des Kalksteins zu Branntkalk. Das brennstoffbedingte CO₂ hingegen resultiert aus dem Einsatz der Brennstoffe. Insgesamt sind etwa zwei Drittel der CO₂-Emissionen prozessbedingt und ein Drittel brennstoffbedingt. In Zahlen ausgedrückt ist die Herstellung einer Tonne Zement in Deutschland mit Emissionen in Höhe von rund 600 kg CO₂ verbunden. Es entstehen dabei rohstoffbedingte Prozessemissionen von etwa 400 kg CO₂ und brennstoffbedingte Emissionen von rund 200 kg CO₂. Während die brennstoffbedingten CO₂-Emissionen bspw. durch den Einsatz alternativer, kohlenstofffreier Brennstoffe reduziert werden können, sind laut des Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) die prozessbedingten CO₂-Emissionen der Klinkerherstellung mit heute verfügbaren Technologien nicht minderbar [13]. Für die Standortanalysen werden deshalb nur Standorte mit Klinkerproduktion genauer betrachtet.



Quelle: VDZ

Abbildung 12: Direkte CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie Quelle: VDZ [12]

Die Zementindustrie forscht schon seit längerem an geeigneten Verfahren zur CO₂-Abscheidung. Das so gewonnene CO₂ kann entweder langfristig geologisch bzw. mineralogisch gebunden (Carbon Capture and Storage, CCS) oder als Rohstoff mit Hilfe des Carbon Capture and Utilization (zu Deutsch: CO₂-Abscheidung und Verwendung, kurz CCU) weiterverwendet werden. Eine mögliche Nutzungsmöglichkeit für das beim CCU-Verfahren gewonnene CO₂ ist die Erzeugung von synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) im Zuge eines Power-to-X (PtX)-Verfahrens.

Nach Aussage des VDZ befinden sich derzeit verschiedene CO₂-Abscheidungsverfahren im Pilot- und Demonstrationsmaßstab oder in der Planung. In der Abbildung 14 werden vier mögliche Verfahren zur CO₂-Abscheidung im Klinkerbrennprozess vorgestellt [13].

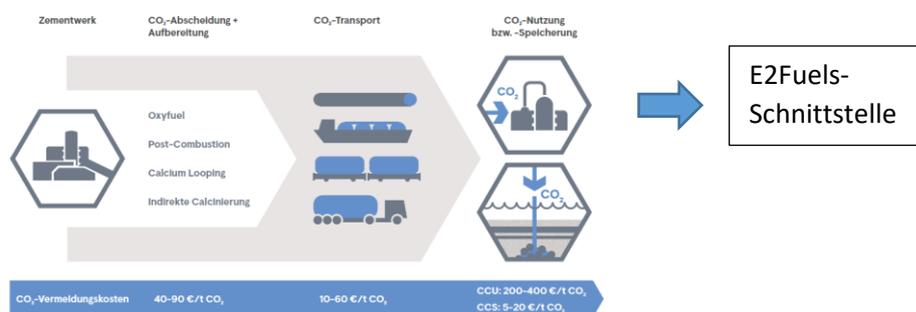


Abbildung 14: Verfahren zur CO₂-Abscheidung bei der Zementklinkerherstellung

Quelle: VDZ [12]

Bisherige Produktionsmengen

Die Entwicklung von 2010 bis 2019 der deutschen Klinker- und Zementproduktion verläuft insgesamt relativ konstant [14].

Tabelle 7: Entwicklung der Produktionsmengen

Jahr	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
	in Tsd. t										
Produktion Klinker	22.996	24.775	24.581	23.127	23.871	23.355	23.423	24.802	24.469	24.578	24.709
Produktion Zement	29.915	33.540	32.432	31.308	32.099	31.160	32.674	33.991	33.655	34.186	35.485

Quelle: VDZ [15]

Für die PtX-Technologie werden auf lange Sicht Quellen benötigt, die auch in einem post-fossilen Zeitalter (ab 2030) weiterhin CO₂ zur Verfügung stellen.

Der Verband VDZ geht in der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ [13] davon aus, dass nach heutiger Einschätzung die Entwicklung der Neubautätigkeiten und die damit zusammenhängende Nachfrage der Betonmenge sich bis zum Jahr 2030 konstant auf dem Niveau der letzten Jahre einpendeln wird. Von 2030 bis 2050 wird von einem leichten Rückgang der Produktionsmengen von rund 5% ausgegangen. Nach Aussage des Verbandes liegen aktuell auch keine Meldungen über bevorstehende Werkschließungen vor.

Daneben sieht das novellierte Bundesklimaschutzgesetz vor, dass Deutschland bis zum Jahr 2045 weitgehend treibhausgasneutral werden soll.

Für eine genauere Standortanalyse bieten sich deshalb Zementwerke an, da diese zukünftig weiterhin CO₂ zur Verfügung stellen werden.

Methodik

Als Grundlage für die Standortanalyse wurden die erfassten CO₂-Mengen pro Zementwerk für den Zeitraum 2014 bis 2018 aus der ZSW-Datenbank ausgewertet. Darauf aufbauend wurden dann auf Basis von bestehenden Szenarien (siehe Kapitel 2.1.3.2 „Branchenspezifische CO₂-Emissionsprognosen“) für die Stützjahre 2030, 2040 und 2050 CO₂-Emissionsmengen berechnet.

Nachfolgend werden am Beispiel der Zementindustrie die spezifischen Inhalte der für die Emissionsprognosen verwendeten drei Studien erläutert.

➤ *Szenario 1: Agora: „Klimaneutrales Deutschland“ [16]*

Die Studie „Klimaneutrales Deutschland“ führt über drei Schritte zu einem Treibhausgasausstoß von null im Jahr 2050. Über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals wurden Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland entwickelt, in denen die Kriterien Wirtschaftlichkeit, Wahrung der Investitionszyklen und Akzeptanz als Kernkriterien enthalten sind. Das verwendete Szenario beruht auf der Annahme, dass einerseits der Zementbedarf steigt, andererseits aber die prozessbedingten Emissionen durch einen effizienteren Einsatz von Zementklinkern geringfügig sinken werden. Bei den energetischen Emissionen bis 2050 wird angenommen, dass, durch den Einsatz von biogenen Brennstoffen und Alternativbrennstoffen mit biogenen Kohlenstoffanteilen aufgrund von deren Klimaneutralität die Klimawirkung bei gleichbleibendem CO₂-Ausstoß in der Verbrennung gesenkt werden kann. Werden kohlenstofffreie Brennstoffe wie klimaneutral erzeugter Wasserstoff eingesetzt, sinken dagegen die nutzbaren CO₂-Emissionen. Für dieses Szenario wurde der Einsatz von CO₂-Abscheidetechnologien, die als ein wichtiger Bestandteil in der Studie für ein klimaneutrales Deutschland enthalten sind, bei der Standortanalyse für die Zementindustrie nicht berücksichtigt. Der Grund dafür ist, dass in der Studie die Abscheidung und geologische Speicherung in die Berechnungen zur Reduktion eingeflossen sind. Im vorliegenden Falle sollen die CO₂-Emissionen jedoch der Herstellung von Kraftstoffen dienen, weshalb die CCS-Minderungen als verwertbare CO₂-Mengen gesehen wurden. Dadurch beträgt die in der Studie angenommene Reduktion der CO₂-Emissionen bis 2050 rund 30 %.

➤ *Szenario 2: Umweltbundesamt: „Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE“; Szenario: Green Supreme [17]*

Grundlage ist das Szenario GreenSupreme (“Germany – resource efficient and greenhouse gas neutral – Minimizing future GHG emissions and raw material consumption”) aus der o. g. Studie des UBA [17]. In diesem Szenario werden die effektivsten Maßnahmen aus den anderen in der Studie aufgeführten „Green-Szenarien“ zur ambitionierten schnellen Minderung der Treibhausgasemissionen und des Rohstoffverbrauchs bis 2050 zusammengefasst. Dadurch sollen bis 2050 u.a. die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen der Zementproduktion um ca. 76 % im Vergleich zu 2010 gesenkt werden und die energiebedingten Emissionen komplett entfallen.

➤ *Szenario 3: ZSW Szenario auf Basis von VDZ: „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“; Szenario: Ambitioniertes Referenzszenario [13]*

In diesem Szenario geht der VDZ davon aus, dass bis 2050 ohne den Einsatz von CO₂-Abscheidetechnologien eine Minderung um 36 % erreicht werden könnte. Der Verband weist allerdings darauf hin, dass dieses Ziel nur mit sehr großen Anstrengungen erreicht werden kann.

Es liegen hierbei lediglich Annahmen für 2030 und 2050 vor.

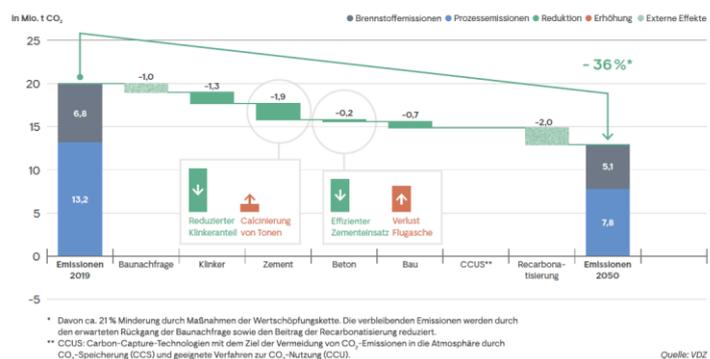


Abbildung 15: Ambitioniertes Referenzszenario

Quelle: VDZ [15]

Die Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen pro Zementwerk basieren auf den bisherigen standortspezifischen CO₂-Emissionen und auf der Reduzierung der CO₂-Emissionen auf Grundlage der jeweiligen Szenarien. Diese berücksichtigen aber keine standortspezifischen Begebenheiten. Hier

musste die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass bei allen Anlagen die gleichen Emissionsminderungen bis 2050 erfolgen.

Standortanalyse der Zementwerke

Die Standortanalyse erfolgt zunächst nach Bundesländern. Wobei einige Anlagen, die an mehrere Bundesländer angrenzen, auch bundesländerübergreifend betrachtet werden. Zusätzlich wurde ausgewertet wie viele CO₂-Emissionen innerhalb bestimmter Radien per Trailer gesammelt werden können, um dadurch den Rohstoff für möglichst große PtX-Anlagen an einem nahegelegenen Standort zu erhalten. Dies steigert einerseits die verfügbare Menge, schmälert jedoch auch die Abhängigkeit von einer einzigen Anlage und reduziert dadurch Unwägbarkeiten. Hierfür wurden, von großen Emittenten ausgehend, Fahrtzeitradien gezogen, welche durch das GIS-System berechnet wurden. Es sind Fahrtzeiten von 10, 30 und 60 Minuten abgebildet. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen und Anlagen, die erneuerbare Energieträger einsetzen (zusammengefasst nach Energieträger), die innerhalb des 60 Minuten Fahrtradius liegen, wurden tabellarisch aufgelistet. Bei den sechs emissionsintensivsten Anlagen wurde auf Grundlage des NACE-Codes eine Emissionsprognose berechnet (siehe dazu Kapitel 2.1.3.2 „Branchenspezifische CO₂-Emissionsprognosen“). Dadurch ist schnell erkenntlich mit welchem zeitlichen und ressourcenbedingten Aufwand weitere CO₂-Quellen nutzbar wären.



Abbildung 17: Standorte der deutschen Zementwerke

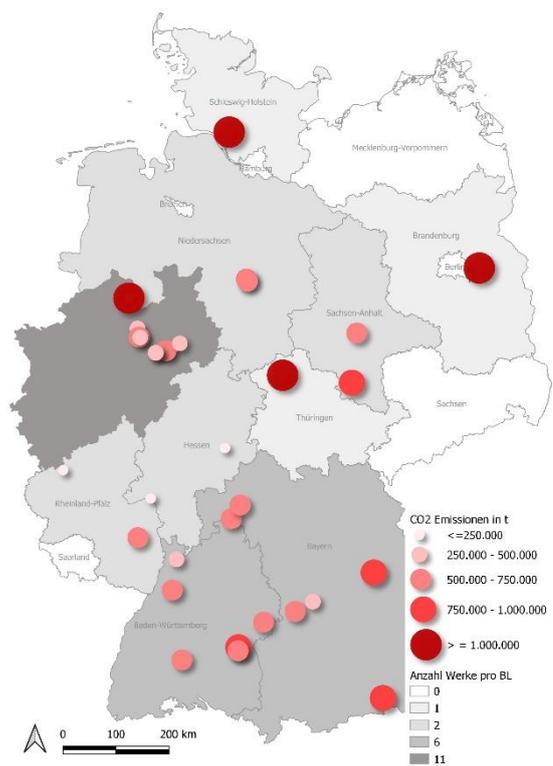


Abbildung 16: Durchschnittliche CO₂-Emissionen pro Werk in Tonnen

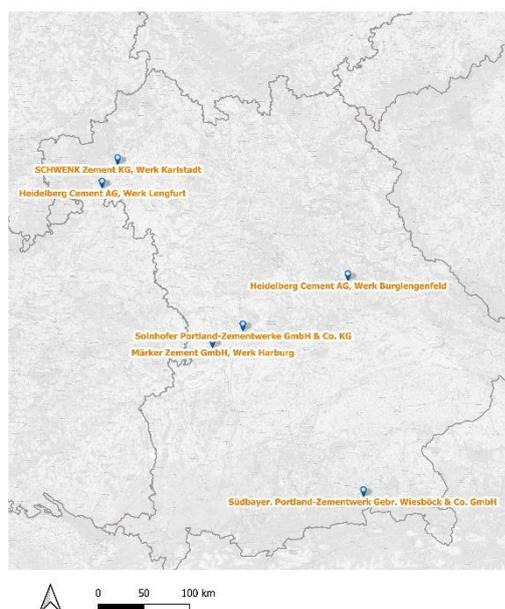
Bayern

Abbildung 18: Zementwerke in Bayern

In Bayern gibt es an sechs Standorten Zementwerke mit Klinkerproduktion. Das Werk von Heidelberg Cement in Burglengenfeld hat mit durchschnittlich rund 880.000 Tonnen CO₂-Emissionen (2014 bis 2018) jährlich den größten Ausstoß an CO₂ in Bayern. Gefolgt vom südbayerischen Zementwerk in Rohrdorf mit rund 800.000 Tonnen. Das kleinste Zementwerk in Bayern ist das Werk in Solnhofen. Dies hat einen jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 335.000 Tonnen pro Jahr (Tabelle 8).

Tabelle 8: CO₂-Emissionen der Zementwerke, BY

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Heidelberg Cement AG, Werk Burgfelden	950	872	923	920	751
Heidelberg Cement AG, Triefenstein	643	620	567	684	792
Märker Zement GmbH, Harburg	651	682	588	639	679
SCHWENK Zement KG, Karlstadt	713	605	698	704	729
Solnhofer Portland-Zementwerke GmbH & Co. KG, Solnhofer	362	266	360	348	339
Südbayer. Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH, Rohrdorf	781	754	787	806	856

Durch die Anwendung der weiter oben genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der bayrischen Zementwerke.

Tabelle 9: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Bayern auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. T							
Heidelberg Cement AG, Werk Burgfelden	410	330	215	940	830	620	715	565
Heidelberg Cement AG, Triefenstein	310	245	160	705	620	460	535	420
Märker Zement GmbH, Harburg	300	240	158	690	610	450	525	415
SCHWENK Zement KG, Karlstadt	320	255	170	735	650	480	560	440
Solnhofer Portland-Zementwerke GmbH & Co. KG, Solnhofer	155	125	80	360	315	230	270	215
Südbayer. Portland-Zementwerk Gebr. Wiesböck & Co. GmbH, Rohrdorf	370	295	195	850	750	555	645	510

Zementwerke an den Standorten Solnhofen, Harburg und Heidenheim (Mergelstetten)

Ausgehend von einer maximalen Fahrzeit von 60 Minuten, können vom Zementwerk Märker Zement GmbH in Harburg (Schwaben) zwei weitere Zementwerke angefahren werden. Das Werk in Solnhofen ist ca. 34 km entfernt (ca. 35 Minuten Fahrzeit). Das zweite Zementwerk in Heidenheim an der Brenz/Mergelstetten (SCHWENK Zement KG) ist rund 60km entfernt. Die reine Fahrzeit beträgt hier knapp 60 Minuten. Diese drei Zementwerke haben zusammen einen durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß (2014 bis 2018) von rund 1,5 Mio. Tonnen.

Insgesamt sind im Umkreis von 60 Minuten rund 760 weitere zusätzliche potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von rund 1,5 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Davon setzen 685 CO₂-Quellen erneuerbare Energieträger ein.

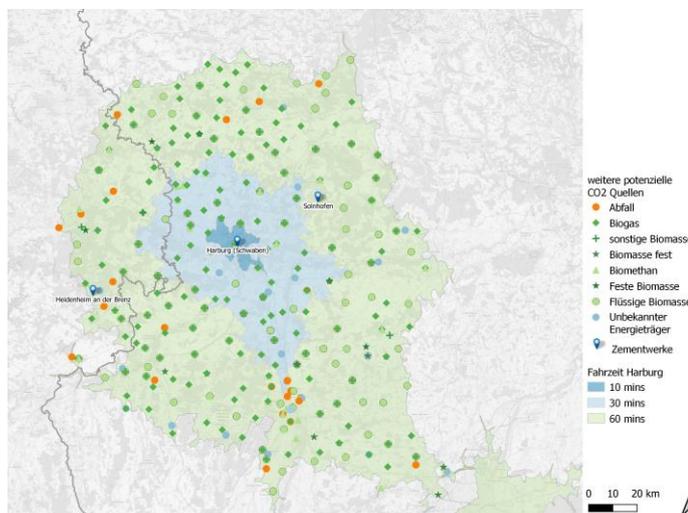


Abbildung 19: CO₂-Quellen um das Zementwerk Harburg, BY

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt. Da hier jedoch auch Branchen involviert sind, welche nicht in jedem der drei Szenarien abgebildet werden, werden die Werte in diesen Fällen nicht für die zukünftigen Jahre dargestellt. Dies gilt auch für alle ähnlichen Tabellen in der kompletten Standortanalyse.

Tabelle 10: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen (außer Zement) im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Harburg, BY

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
		2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040
CO ₂ -Emissionen in Tsd. T										
Lech-Stahlwerke GmbH	162	40	7	0	110	20	0	110	20	2
Märker Kalk GmbH	162	75	30	7	170	160	110	140	135	90
Papierfabrik Palm GmbH & Co.KG	129	65	10	0	110	30	0	90	30	0
LEIPA Georg Leinfelder GmbH	80	40	8	0	70	20	0	55	20	0
ROCKWOOL Operations GmbH & Co. KG	74	20	2	0	55	210	1	40	10	0
Südzucker AG	68	20	2	0	-	-	-	25	5	0

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 11: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Harburg, BY

Energieträger	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [in Tsd. t]
Biogas	617	535
Biomethan	40	7
Feste Biomasse	21	117
Sonstige Biomasse	4	275
Abfall	3	25

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen zukünftig zwar keine größeren CO₂-Punktquellen aber 685 erneuerbare Energieanlagen, die Biomasse als Energieträger einsetzen. Inwieweit diese als CO₂-Quellen zukünftig zur Verfügung stehen, müsste in einer spezifischen Standort- sowie beinhalteteter Anlagenanalyse genauer betrachtet werden.

Zementwerke an den Standorten Triefenstein, Karlstadt und Wiesbaden

Bei einer Fahrzeit von rund 60 Minuten liegen vom Heidelberger Zementwerk in Triefenstein zwei weitere Zementwerke im Einzugsgebiet. Erstens das Zementwerk in Karlstadt (SCHWENK Zement KG). Dieses liegt ca. 30 km entfernt mit einer durchschnittlichen Fahrzeit von ca. 30 Minuten. Beide Anlagen stoßen zusammen durchschnittlich rund 1,4 Mio. Tonnen CO₂ (2014 bis 2018) aus. Knapp außerhalb des 60 Minuten Radius ist das Zementwerk in Wiesbaden (Dyckerhoff GmbH). Die Entfernung beträgt 118 km mit einer Fahrzeit von rund 80 Minuten. Allerdings beträgt der CO₂-Ausstoß hier lediglich 0,1 Mio. Tonnen, weshalb eine Bündelung evtl. wenig sinnvoll wäre. Die drei Zementwerke zusammen haben einen durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß (2014 bis 2018) von rund 1,5 Mio. Tonnen.

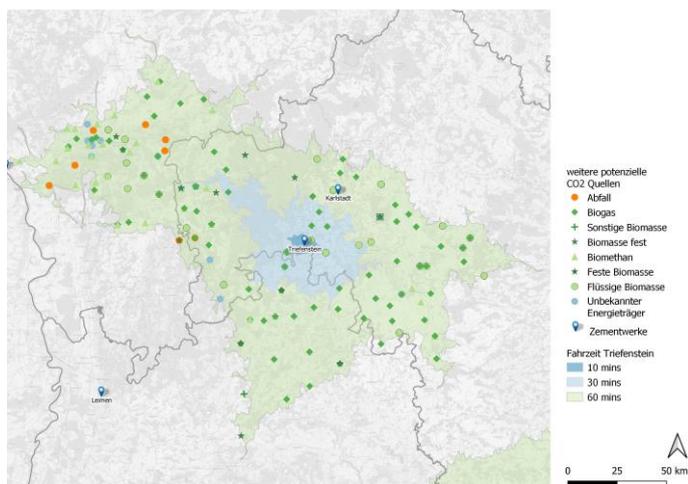


Abbildung 20: CO₂-Quellen um das Zementwerk Triefenstein, BY

Insgesamt sind im Umkreis von 60 Minuten rund 225 weitere potenzielle CO₂-Quellen mit einem CO₂-Ausstoß von 4,5 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Mit 1,8 Mio. Tonnen ist das Uniper Kraftwerk (Erdgas) in Straubing der größte Emittent. Danach kommt das Mainova Heizkraftwerk West (Erdgas/Kohle) mit 0,9 Mio. Tonnen CO₂.

Bei rund 1,3 Mio. Tonnen CO₂ (20 Anlagen) ist keine eindeutige Zuordnung der Energieträger möglich. Es sind jeweils 10 Anlagen im Energie- und Industriesektor.

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 12: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen (außer Zement) im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Triefenstein, BY

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t										
Uniper Kraftwerke GmbH, Gaskraftwerk	1.814	1.255	210	15	-	-	-	1.310	1.165	145
Mainova AG, Heizkraftwerk West (Kohle/Erdgas)	893	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sappi Stockstadt GmbH	310	150	30	0	265	75	0	210	75	0
Kraftwerk Obernburg GmbH (mehrere Energieträger)	296	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Opel Automobile GmbH, GuD-Anlage M-120	240	165	30	2	-	-	-	175	155	20
DS Smith Paper Deutschland GmbH, GuD-HKW	175	120	20	1	-	-	-	125	115	15

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 13: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Triefenstein, BY

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	126	122
Biomethan	38	7
Feste Biomasse	21	60
Sonstige Biomasse ¹	13	330
Abfall	10	2.475

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 10 Anlagen, die Abfälle als Energieträger einsetzen und 2017 mehr als 2 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Des Weiteren sind 4 Gaskraftwerke in diesem Radius. Ob diese als Einzelstandorte oder im Verbund für PtX-Anlagen in Frage kommen, müsste in einer spezifischen Standort- sowie beinhalteter Anlagenanalyse genauer betrachtet werden.

Zementwerk am Standort in Rohrdorf

Im Umkreis von 60 Minuten vom Standort Rohrdorf sind rund 380 weitere zusätzliche potenzielle CO₂-Quellen mit einem CO₂-Ausstoß von rund 3 Mio. Tonnen im Jahr 2017 vorhanden. Davon werden rund 2,3 Mio. Tonnen CO₂ (11 Anlagen) durch konventionelle Energieträger erzeugt. Bei diesen Quellen ist aber keine eindeutige Zuordnung der Energieträger möglich.

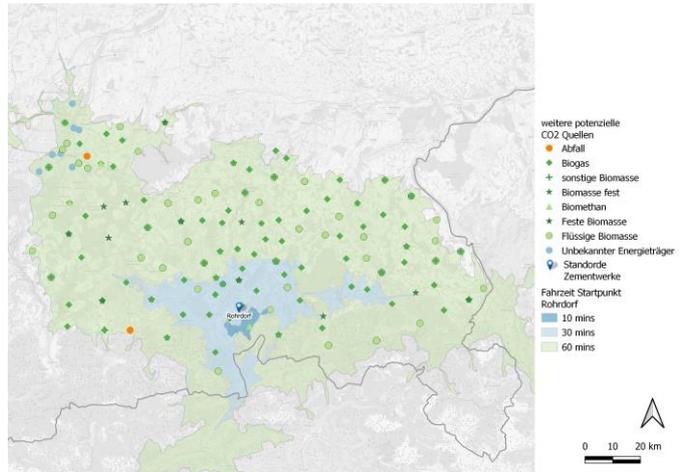


Abbildung 21: CO₂-Quellen um das Zementwerk Rohrdorf, BY

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 14: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rohrdorf, BY

	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
		2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040
Name des Betriebs	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
SWM Services GmbH, Heizkraftwerk Nord 2 (Kohle)	1.633	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SWM Services GmbH, Heizkraftwerk Süd GuD	960	665	110	7	-	-	-	695	620	80
Molkerei Meggle Wasserburg GmbH & Co KG	86	25	2	0	-	-	-	25	4	0
Stadtwerke Rosenheim, Müllheizkraftwerk	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Uniper Energy Storage GmbH	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TU München, Anlage HKW (unbekannter Energietr.)	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 15: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rohrdorf, BY

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	289	140
Biomethan	6	1
Feste Biomasse	33	59
Sonstige Biomasse ¹	3	28
Abfall	2	5

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen keine großen CO₂-Punktquellen, die einer genaueren Betrachtung bedürfen.

Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg gibt es an 6 Standorten Zementwerke mit Klinkerproduktion. Das größte ist das Werk von Heidelberg Cement in Schelklingen. Es stößt durchschnittlich rund 830.000 Tonnen CO₂ jährlich (2014 bis 2018) aus. Gefolgt vom Schwenk Zementwerk in Allmendingen mit rund 630.000 Tonnen CO₂ jährlich. Die restlichen 4 Zementwerke in BW stoßen durchschnittlich je 540.000 Tonnen CO₂ pro Jahr aus.

Die Zementwerke in BW sind mit ihren CO₂-Emissionen der vergangenen Jahre in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

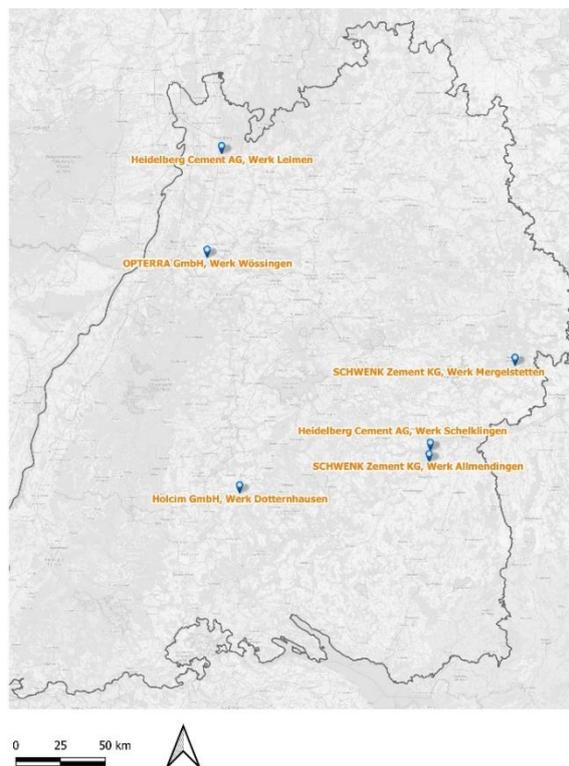


Abbildung 22: Zementwerke in Baden-Württemberg

Tabelle 16: CO₂-Emissionen der Zementwerke in BW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	in Tsd. t				
Heidelberg Cement AG, Werk Leimen	444	448	429	532	538
Heidelberg Cement AG, Werk Schelklingen	804	803	862	876	828
Holcim (Süddeutschland) GmbH, Werk Dotterhausen	529	511	530	505	549
OPTERRA GmbH, Werk Wössingen	529	502	497	539	551
SCHWENK Zement KG, Werk Allmendingen	476	491	559	588	616
SCHWENK Zement KG, Werk Mergelstetten	540	459	514	623	537

Durch die Anwendung der weiter oben genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der Zementwerke in BW.

Tabelle 17: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in BW auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Heidelberg Cement AG, Werk Leimen	220	180	115	510	450	330	390	310
Heidelberg Cement AG, Werk Schelklingen	390	310	200	890	780	585	675	535
Holcim (Süddeutschland) GmbH, Werk Dotterhausen	240	195	130	560	490	370	425	335
OPTERRA GmbH, Werk Wössingen	240	195	125	560	491	365	425	335
SCHWENK Zement KG, Werk Allmendingen	292	230	150	670	590	440	510	400
SCHWENK Zement KG, Werk Mergelstetten	250	200	130	570	500	375	430	340

Zementwerke an den Standorten Schelklingen und Allmendingen

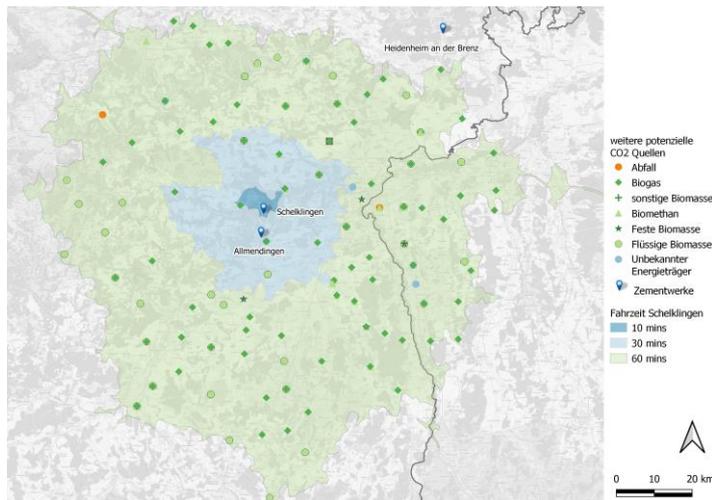


Abbildung 23: CO₂-Quellen um die Zementwerke Schelklingen und Allmendingen, BW

Die zwei größten Zementwerke in BW an den Standorten Schelklingen und Allmendingen sind rund 6 km voneinander entfernt. Der durchschnittliche jährliche CO₂-Ausstoß beider Anlagen beträgt ca. 1,5 Mio. Tonnen (2014 bis 2018). Insgesamt sind im Umkreis von 60 Minuten Fahrzeit rund 340 weitere zusätzliche potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von rund 0,7 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Bei etwas mehr als 0,1 Mio. Tonnen ist der Energieträger unbekannt. Dies bedeutet, dass rund 0,6 Mio. Tonnen CO₂ erneuerbaren Energieträgern zugeordnet werden können.

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 18: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von den Zementwerken Schelklingen und Allmendingen, BW

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t										
Märker Kalk GmbH	142	65	25	6	150	140	100	125	120	75
Sappi Ehingen GmbH	43	20	4	0	35	10	0	30	10	0
Papierfabrik Scheufelen GmbH + Co. KG	31	15	3	0	25	8	0	20	7	0
Boehringer Ingelheim Pharma, Anlage J41	29	20	7	0	20	4	0	25	15	6
Ziegelwerk Bellenberg Wiest GmbH & Co. KG	28	15	5	1	30	30	20	25	25	15
Boehringer Ingelheim Pharma, Anlage H111	27	20	7	0	20	4	0	20	15	5

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 19: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius von den Zementwerken Schelklingen und Allmendingen, BW

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	271	234
Biomethan	18	2
Feste Biomasse	10	107
Sonstige Biomasse ¹	3	55
Abfall	3	40

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen bis auf die Firma Märker Kalk GmbH keine großen CO₂-Punktquellen, weshalb keine genauere Betrachtung benötigt wird.

Zementwerke an den Standorten Leimen, Walzbachtal, Göllheim und Wiesbaden

Vom Werk Leimen (Heidelberger Cement AG) liegen im 60-Minuten-Fahrradius drei weitere Zementwerke.

Das nächstgelegene ist das Zementwerk der Opterra GmbH in Walzbachtal. Die Entfernung beträgt ca. 55km mit einer reinen Fahrzeit von ca. 45 Minuten. Der CO₂-Ausstoß beider Werke zusammen beträgt im Zeitraum von 2014 bis 2018 durchschnittlich eine Mio. Tonnen pro Jahr.

Das Zementwerk in Göllheim (Dyckerhoff GmbH) ist knapp 82km mit einer reinen Fahrzeit von ca. einer Stunde entfernt. Beide Anlagen zusammen emittierten durchschnittlich 1,2 Mio. Tonnen CO₂ jährlich (2014 bis 2018).

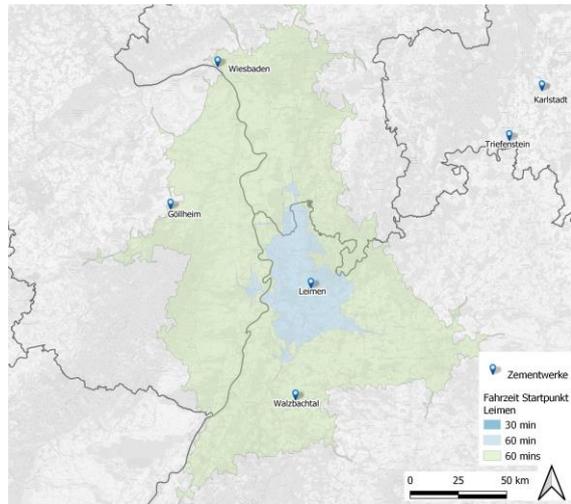


Abbildung 24: Zementwerk Leimen mit drei weiteren Zementwerken im 60-Minuten-Fahrradius

Das Werk in Wiesbaden (Dyckerhoff GmbH) ist mit rund 100 km etwas weiter entfernt als das Zementwerk in Göllheim, da aber neben Landstraßen auch auf Autobahnen gefahren werden kann, verkürzt sich die reine Fahrzeit auf rund eine Stunde. Der durchschnittliche jährliche CO₂-Ausstoß beider Anlagen zusammen beträgt rund 700.000 Tonnen CO₂.

Alle vier Anlagen zusammen emittieren durchschnittlich jährlich rund 1,9 Mio. Tonnen CO₂.

Insgesamt sind im Umkreis von 60 Minuten rund 320 weitere potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von rund 12 Mio. Tonnen im Jahr 2017 vorhanden, wobei bei knapp 10 Mio. Tonnen der

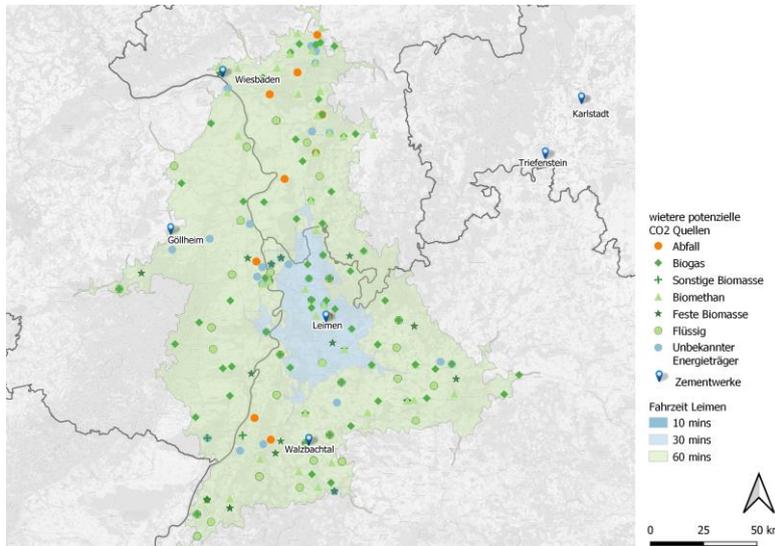


Abbildung 25: CO₂-Quellen um das Zementwerk Leimen, BW

Energieträger nicht eindeutig ermittelt werden konnte. 66 CO₂-Quellen können dem Industriesektor zugeordnet werden. Davon liegen alleine 44 am BASF Standort in Ludwigshafen. 31 CO₂-Quellen sind dem Energiesektor zuzuordnen. Davon sind wiederum 6 Kraftwerksblöcke am BASF-Standort. Der Standort liegt in der Mitte (Entfernung: jeweils ca. 45 km) von den Zementwerken in Göllheim und Leimen. Damit würde sich eine Bündelung der CO₂-Mengen anbieten.

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 20: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Leimen, BW

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2040	2050	2040	2050	2030			2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. T									
Mineralö Raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG	2.720	2.085	700	9	1.81	375	-20	2.205	1.410	550
BASF SE, GuD-Anlage A800	1.551	1.075	181	10	-	-	-	1.120	1.000	125
BASF SE, GuD-Anlage C200	1.312	910	155	10	-	-	-	950	845	105
Mainova AG, Heizkraftwerk West (Kohle/Erdgas)	893	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BASF SE, Ammoniak-Fabrik 4	862	660	220	3	575	120	-7	700	445	175
BASF SE, Ammoniak-Fabrik III	582	445	150	2	390	80	-4	470	300	115

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 21: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Leimen, BW

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	112	83
Biomethan	53	11
Feste Biomasse	20	546
Sonstige Biomasse ¹	1	0
Abfall	13	426

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen mehrere Anlagen der BASF sowie die Mineralö Raffinerie Oberrhein, die auch zukünftig größere Mengen an CO₂-emittieren werden. Inwieweit diese Standorte als PtX-Standorte oder als Verbund mit den Zementwerken in Frage kommen, müsste in einer genaueren Betrachtung analysiert werden.

Zementwerk am Standort in Dotternhausen

Der jährliche CO₂-Ausstoß vom Zementwerk Holcim (Süddeutschland) GmbH in Dotternhausen beträgt rund 500.000 Tonnen. Insgesamt sind im Umkreis von 60 Minuten rund 303 weitere zusätzliche potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß im Jahr 2017 von rund 0,4 Mio. Tonnen vorhanden.

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

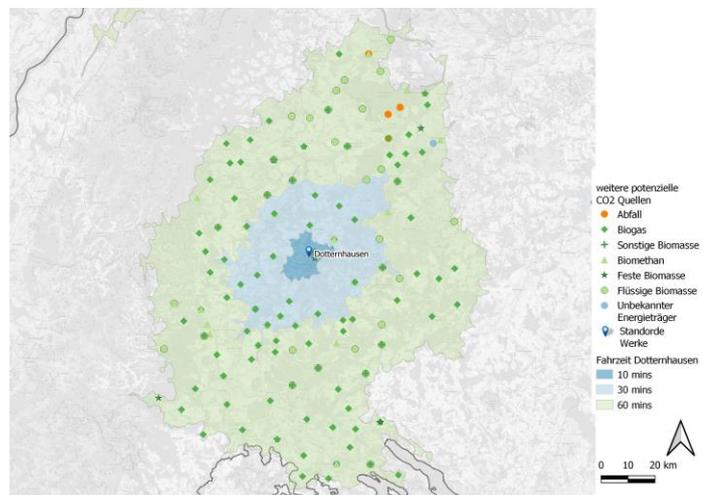
Abbildung 26: CO₂-Quellen um das Zementwerk Dotternhausen, BW

Tabelle 22: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, BW

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Constellium Singen GmbH, Heizkraftwerk (Kohle)	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Knauf Gips KG, Kraftwerk (unbekannt)	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BHKW Stadtwerke Tübingen, Obere Viehweide	21	15	2	0	-	-	-	15	15	2
Stadtwerke Tübingen GmbH, Fernheizwerk I	18	15	2	0	-	-	-	15	10	1
MVV Enamic GmbH, Fernheizwerk II Tübingen	6	4	1	0	-	-	-	4	4	0
Stadtwerke Tübingen GmbH, FHW Waldhäuser-Ost	4	3	0	0	-	-	-	3	3	0

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 23: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, BW

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	240	161
Biomethan	24	3
Feste Biomasse	9	10
Sonstige Biomasse ¹	0	0
Abfall	5	52

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius befinden sich keine großen CO₂-Punktquellen. Eine vertiefende Betrachtung scheint daher unbegründet.

Nordrhein-Westfalen

Aufgrund der räumlichen Konzentration von 11 Zementwerken in NRW, erfolgt eine detaillierte räumliche Auswertung. In Lengerich, Ennigerloh und Paderborn ist jeweils ein Werk, in Beckum und Geseke sind jeweils zwei Werke und am Standort Erwitte sind vier Werke vorhanden.

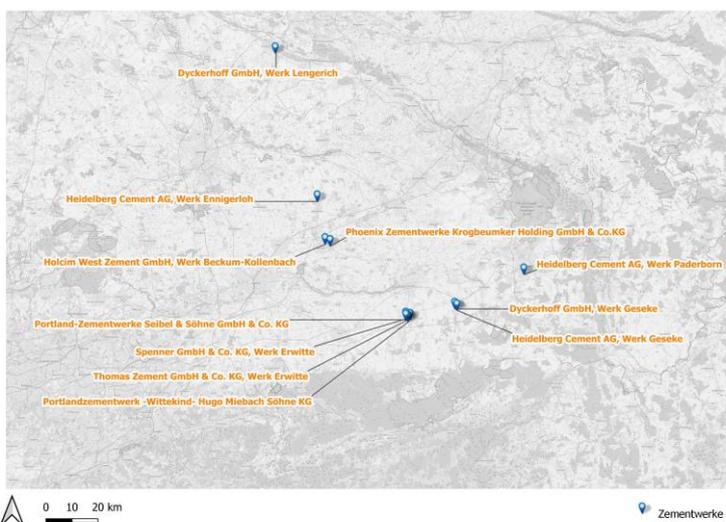


Abbildung 27: Zementwerke in Nordrhein-Westfalen

Bis auf das Zementwerk in Lengerich, sind vom Standort Erwitte mit den vier Zementwerken alle restlichen sechs Zementwerke in NRW innerhalb von 60 Minuten Fahrtzeit zu erreichen. Die jährliche CO₂-Menge in Abhängigkeit der Fahrtzeit beträgt bei einem 30-Minuten-Radius rund 3 Mio. Tonnen CO₂ und bei einem 60-Minuten-Radius rund 4 Mio. Tonnen CO₂.

Standort Erwitte

In Erwitte gibt es vier Zementwerke in einem Umkreis von nicht mehr als einem Kilometer. Alle vier Zementwerke zusammen emittieren jährlich rund 2 Mio. Tonnen CO₂.

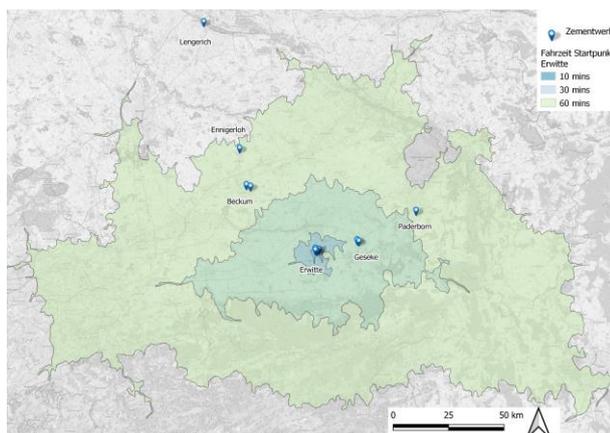


Abbildung 28: Zementwerk Erwitte mit sechs weiteren Zementwerken im 60-Minuten-Fahrradius

Tabelle 24: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Erwitte, NRW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Portland-Zementwerke Seibel & Söhne GmbH & Co. KG, Erwitte	305	311	352	332	348
Portlandzementwerk -Wittekind- Hugo Miebach Söhne KG, Erwitte	458	496	566	566	548
Spenner GmbH & Co. KG. Werk Erwitte	766	695	794	744	718
Thomas Zement GmbH & Co. KG. Werk Erwitte	388	397	431	411	391

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der Zementwerke in Erwitte.

Tabelle 25: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Erwitte auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Portland-Zementwerke Seibel & Söhne GmbH & Co. KG, Erwitte	150	120	80	350	310	230	265	210
Portlandzementwerk -Wittekind- Hugo Miebach Söhne KG, Erwitte	245	195	130	560	495	370	425	335
Spenner GmbH & Co. KG. Werk Erwitte	345	275	180	790	700	520	600	475
Thomas Zement GmbH & Co. KG. Werk Erwitte	185	150	100	430	380	280	325	260

Standort Beckum

Am Standort Beckum gibt es zwei Zementwerke im Umkreis von 2 km mit jährlichen CO₂-Emissionen von rund 900.000 Tonnen.

Tabelle 26: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Beckum, NRW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Holcim WestZement GmbH. Werk Beckum-Kollenbach	672	577	623	631	587
Phoenix Zementwerke Krogbeumker Holding GmbH & Co.KG	285	279	300	317	293

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der Zementwerke in Beckum.

Tabelle 27: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Beckum auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
Name des Betriebs	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Holcim WestZement GmbH. Werk Beckum-Kollenbach	285	230	150	660	580	430	500	395
Phoenix Zementwerke Krogbeumker Holding GmbH & Co.KG	135	110	70	315	275	205	240	190

Standort Geseke

In Geseke sind es zwei Zementwerke im Abstand von ca. 1,5 km mit jährlichen CO₂-Emissionen von rund 900.000 Tonnen.

Tabelle 28: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Geseke, NRW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Dyckerhoff GmbH, Werk Geseke	240	272	301	272	249
HeidelbergCement AG, Werk Geseke	640	657	614	744	672

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der Zementwerke in Geseke.

Tabelle 29: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Geseke auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
Name des Betriebs	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Dyckerhoff GmbH, Werk Geseke	125	100	65	285	250	185	215	170
HeidelbergCement AG, Werk Geseke	310	250	160	710	625	465	540	425

Standort Paderborn

Das Zementwerk in Paderborn liegt etwa 20 km von den zwei Zementwerken in Geseke entfernt. Dieses Werk gehört zu den kleineren Zementwerken und hat einen jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 250.000 Tonnen.

Tabelle 30: CO₂-Emissionen des Zementwerks in Paderborn, NRW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
HeidelbergCement AG, Werk Paderborn	288	231	243	240	288

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen des Zementwerks in Paderborn.

Tabelle 31: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen des Zementwerks in Paderborn auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
Name des Betriebs	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
HeidelbergCement AG, Werk Paderborn	120	95	60	275	240	180	210	165

Alle vier Standorte (Erwitte, Geseke, Beckum und Paderborn) liegen in einem 60-Minuten-Fahrradius. Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius rund 510 weitere CO₂-Quellen knapp 10 Mio. Tonnen ausgestoßen, wobei knapp 8,8 Mio. Tonnen dem Energieträger Abfall zugeordnet werden können. Davon entfallen rund 4,4 Mio. Tonnen auf RWE-Kraftwerke. Die Kohlekraftwerke in Westfalen und in Lünen wurden 2021 endgültig stillgelegt.

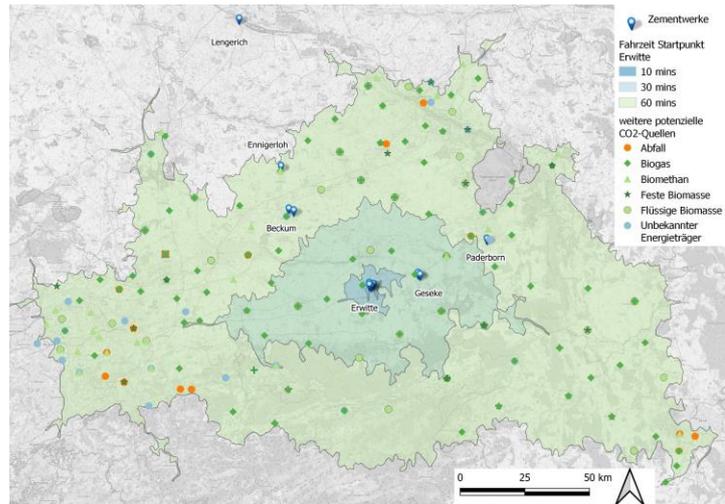


Abbildung 29: CO₂-Quellen um das Zementwerk Erwitte, NRW

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 32: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Erwitte, NRW

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
RWE Generation SE, Kohlekraftwerk Westfalen	2.600	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trianel Kohlekraftwerk Lünen GmbH & Co. KG	2.541	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RWE Generation SE, Erdgaskraftwerk Werne	1.639	1.135	190	10	-	-	-	1.185	1.055	135
STEAG GmbH, Kohlekraftwerk Lünen	956	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rheinkalk GmbH, Anlage zum Brennen von Kalkstein	752	275	55	3	-	-	-	575	340	100
Trianel Gaskraftwerk Hamm GmbH & Co. KG	417	290	50	3	-	-	-	300	270	35

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

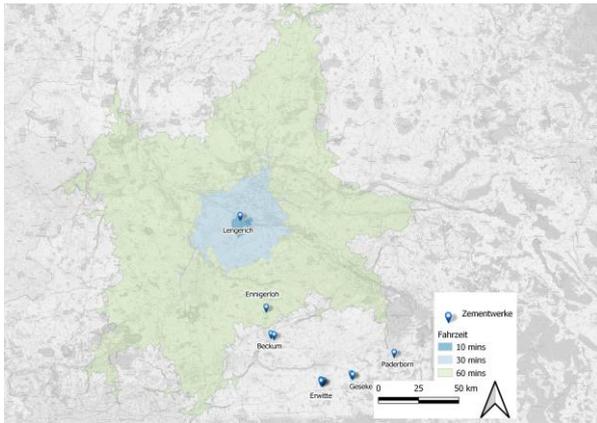
Tabelle 33: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, NRW

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	353	238
Biomethan	37	7
Feste Biomasse	28	372
Sonstige Biomasse ¹	9	435
Abfall	21	8.842

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 21 Punktquellen, welche Abfall als Energieträger einsetzen und 2017 knapp 9 Mio Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Weiterhin befinden sich hier 9 Punktquellen, welche der Papierindustrie zugeordnet werden können mit Biomasse als Energieträger. 28 weitere Punktquellen verwenden feste Biomasse als Energieträger. Desweiteren sind hier zwei große Gaskraftwerke sowie die Firma Rheinkalk GmbH, die eine Anlage zum Brennen von Kalkstein betreibt. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund für PtX-Anlagen in Frage kommen, müsste in einer vertieften Standortanalyse genauer betrachtet werden.

Standorte Lengerich und Ennigerloh



Das Zementwerk in Lengerich ist eines der größten Zementwerke in Deutschland und hat alleine einen durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 1 Mio. Tonnen. In Ennigerloh, das ca. 50 km entfernt ist, steht ein weiteres Zementwerk von der Heidelberg Cement AG mit einem durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 500.000 Tonnen.

Abbildung 30: Zementwerk Lengerich mit dem Zementwerk Ennigerloh im 60-Minuten-Fahrradius

Tabelle 34: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Lengerich und Ennigerloh, NRW

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t					
Dyckerhoff GmbH, Werk Lengerich	1.140	1.010	993	1.110	1.020
HeidelbergCement AG, Werksgruppe Ennigerloh	482	489	447	555	531

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der beiden Zementwerke.

Tabelle 35: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Beckum auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t								
Dyckerhoff GmbH, Werk Lengerich	490	390	255	1.125	990	740	855	675
HeidelbergCement AG, Werksgruppe Ennigerloh	230	185	120	535	470	350	405	320

Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius rund 800 weitere CO₂-Quellen über 9,5 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen. Davon können etwas weniger als die Hälfte keinem eindeutigem Energieträger zugeordnet werden. Rund 4,4 Mio. Tonnen CO₂ sind dagegen dem Energieträger Abfall zuzuweisen. Alleine zwei RWE-Kraftwerke, die Abfälle mitverbrennen, emittierten 2017 rund 4 Mio Tonnen CO₂. Das RWE Kohlekraftwerk in Ibbenbüren wurde 2021 endgültig stillgelegt.

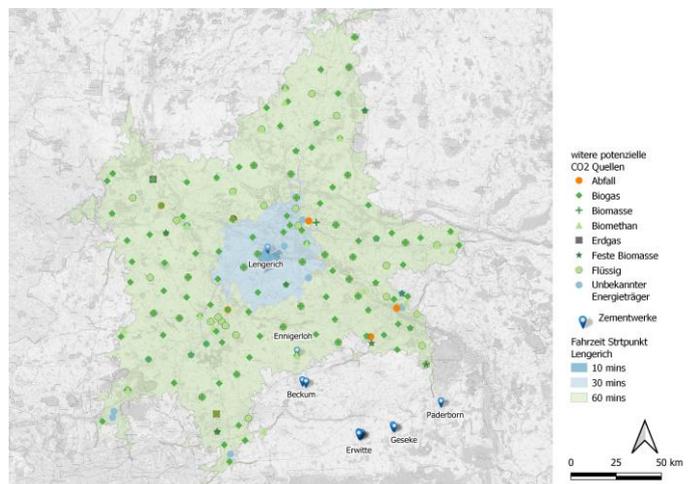


Abbildung 31: CO₂-Quellen um das Zementwerk Lengerich, NRW

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten.

Tabelle 36: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lengerich, NRW

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
RWE Generation SE, Kraftwerk Ibbenbüren (Kohle)	2.412	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RWE Generation SE, Kraftwerk Werne	1.639	1.135	190	10	-	-	-	1.185	1.055	135
Evonik Degussa GmbH, Gaskraftwerk I, Block 4 und Block 5	1.634	1.130	190	10	-	-	-	1.180	1.050	135
Evonik Degussa GmbH, Wasserstoff-Anlage	682	520	175	2	455	95	-5	550	355	140
Evonik Degussa GmbH, Acrylsäureesteranlage	333	255	85	1	220	45	-3	270	173	68
Evonik Degussa GmbH, Kraftwerk IV (Zurzeit Umstellung auf Gas)	210	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 37: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Dotternhausen, NRW

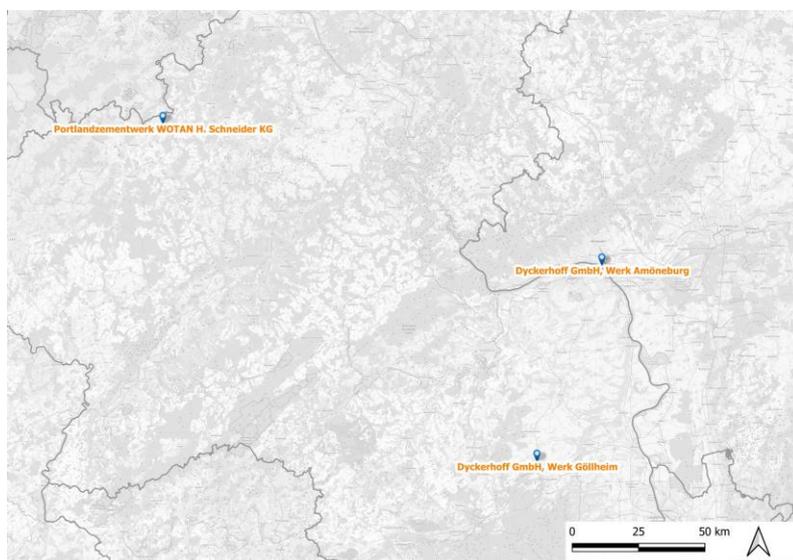
	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	620	409
Biomethan	50	7
Feste Biomasse	13	114
Sonstige Biomasse ¹	7	261
Abfall	9	4.407

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 9 Punktquellen, welche Abfall als Energieträger einsetzen und 2017 mehr als 4 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Weiterhin können hier 7 Punktquellen der Papierindustrie zugeordnet werden mit Biomasse als Energieträger. 13 weitere Punktquellen verwenden feste Biomasse als Energieträger. Desweiteren sind hier rund 620 Biogasanlagen vorhanden. Die Firma Evonik Degussa GmbH (Chemieerzeugnisse) befindet sich ebenfalls innerhalb des 60-Minuten-Fahrtzeitradius. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund mehrerer Standorte für den Betrieb von PtX-Anlagen in Frage kommen, müsste in einer vertieften Anlagen- und Standortanalyse betrachtet werden.

Rheinland-Pfalz

Standorte Uxheim und Göllheim



In Rheinland-Pfalz gibt es zwei Zementwerke. Das Zementwerk in Göllheim und rund 190 km davon entfernt das Zementwerk in Uxheim. Das Werk in Uxheim gehört zu den kleineren Zementwerken in Deutschland, weshalb der Standort nicht weiter betrachtet wurde.

Tabelle 38: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Göllheim und Üxheim, RP

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t					
Portlandzementwerk WOTAN H. Schneider KG	165	175	184	178	153
Dyckerhoff GmbH, Werk Göllheim	683	689	683	675	683

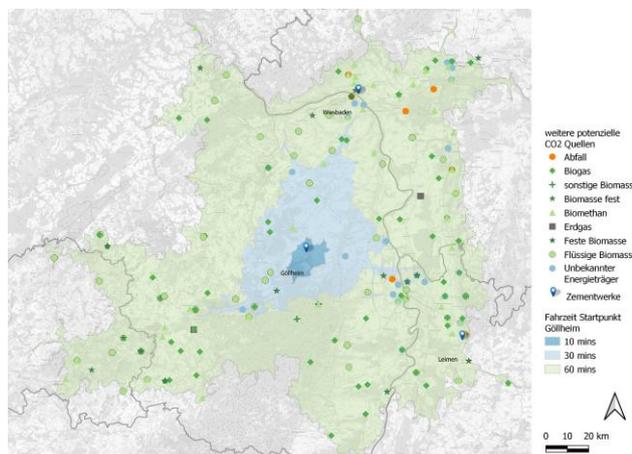
Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der beiden Zementwerke.

Tabelle 39: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Göllheim und Üxheim auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. T								
Portlandzementwerk WOTAN H. Schneider KG	80	65	40	535	470	350	140	110
Dyckerhoff GmbH, Werk Göllheim	315	255	165	535	470	350	550	435

Standort Göllheim

Im Radius von 60 Minuten Fahrtzeit können vom Werk Göllheim noch zwei weitere Zementwerke erreicht werden. Das Werk in Leimen ist ca. 80 km mit einer Fahrtzeit von rund einer Stunde entfernt. Das Zementwerk in Wiesbaden liegt rund 60 km mit einer Fahrtzeit von rund 45 Minuten entfernt. Alle drei Zementwerke zusammen ergeben einen CO₂-Ausstoß von rund 1,3 Mio. Tonnen jährlich.

Abbildung 33: CO₂-Quellen um das Zementwerk Göllheim, RP

Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius rund 320 weitere CO₂-Quellen ca. 10 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen. Bei rund 97 CO₂-Quellen, die alleine knapp 9 Mio. Tonnen 2017 emittiert haben, ist der Energieträger unbekannt. Davon können 50 CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von mehr als 7 Mio. Tonnen dem BASF-Standort in Ludwigshafen zugeordnet werden. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 40: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Göllheim, RP

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t										
BASF SE, GuD-Anlage A800	1.551	1.075	181	10	-	-	-	1.120	1.000	125
BASF SE, GuD-Anlage C200	1.312	910	155	10	-	-	-	950	845	105
Mainova AG, Heizkraftwerk West (Kohle/Erdgas)	893	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BASF SE, Ammoniak-Fabrik 4	862	660	220	3	575	120	-7	700	445	175
Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG (Müllverbrennung)	609	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BASF SE, Ammoniak-Fabrik III	582	445	150	2	390	80	-4	470	300	115

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 41: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Göllheim, RP

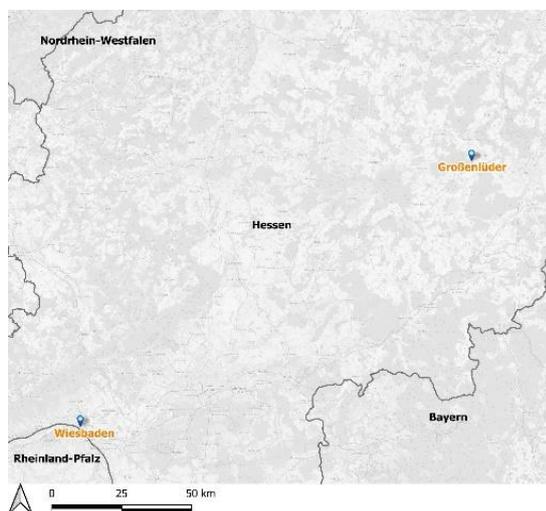
	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	93	71
Biomethan	54	13
Feste Biomasse	24	502
Sonstige Biomasse ¹	2	6
Abfall	20	1.429

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 20 Punktquellen mit Abfällen als Energieträger sowie 24 weitere Punktquellen, welche feste Biomasse als Energieträger verwenden. Desweiteren liegt der BASF-Standort in Ludwigshafen im 60-Minuten-Fahrtzeitradius. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund als CO₂-Quellen für PtX-Anlagen in Frage kommen, müsste in einer vertieften Standortanalyse betrachtet werden.

Hessen

Standorte Wiesbaden (Werk Amöneburg) und Großlüder



Die zwei Zementwerke in Hessen sind rund 150 km voneinander entfernt.

Das Werk am Standort Wiesbaden liegt jedoch innerhalb des 60-Minuten-Radius von den Werksstandorten Göllheim und Leimen (siehe Auswertung für Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg). In der nachfolgenden Tabelle sind die CO₂-Emissionen der letzten auswertbaren Jahre der beiden in Hessen liegenden Zementwerke aufgeführt.

Abbildung 34: Zementwerke in Hessen

Tabelle 42: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Wiesbaden und Großlüder, HE

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Dyckerhoff GmbH, Werk Wiesbaden	183	195	186	183	209
ZKW Otterbein Zementwerk, Großlüder	211	204	207	219	217

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der beiden Zementwerke.

Tabelle 43: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Wiesbaden und Großlüder auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Dyckerhoff GmbH, Werk Wiesbaden	90	70	45	205	180	130	155	120
ZKW Otterbein Zementwerk, Großlüder	100	80	50	225	200	150	170	135

Im Jahr 2017 haben am Standort Wiesbaden (Werk Amöneburg) innerhalb des genannten Radius rund 320 weitere CO₂-Quellen ca. 13 Mio. Tonnen emittiert. Wie am Standort in Göllheim ist auch hier bei rund 98 Anlagen, die 2017 alleine etwas weniger als 10 Mio. Tonnen CO₂ emittiert haben, der Energieträger unbekannt. Davon können aber 50 CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von mehr als 7 Mio. Tonnen dem BASF-Standort in Ludwigshafen zugeordnet werden. Rund 2,7 Mio. Tonnen CO₂ sind dagegen dem Energieträger Abfall zuzuweisen.

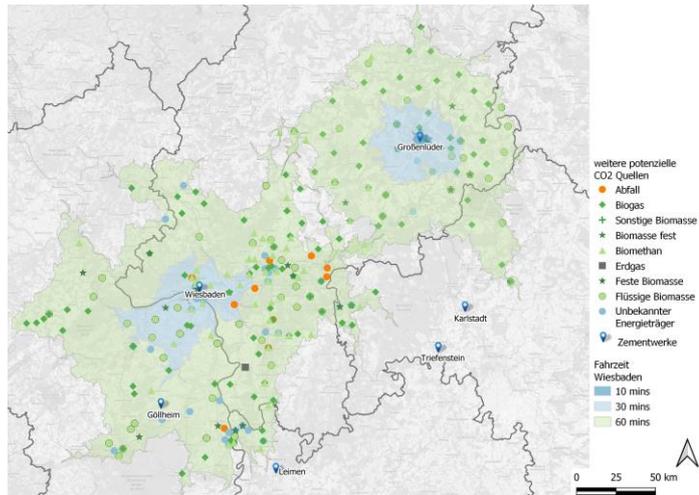


Abbildung 35: CO₂-Quellen um die Zementwerke Wiesbaden und Großenlüder, HE

Alleine das Uniper-Kraftwerk in Großkrotzenburg, emittierte 2017 rund 1,8 Mio. Tonnen CO₂. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 44: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Wiesbaden, HE

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Uniper Kraftwerke GmbH, Gaskraftwerk	1.814	1.255	210	15	-	-	-	1.310	1.165	145
BASF SE, GuD-Anlage A800	1.551	1.075	181	10	-	-	-	1.120	1.000	125
BASF SE, GuD-Anlage C200	1.312	910	155	10	-	-	-	950	845	105
Mainova AG, Heizkraftwerk West (Kohle/Erdgas)	893	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BASF SE, Ammoniak-Fabrik 4	862	660	220	3	575	120	-7	700	445	175
Kraftwerke Mainz-Wiesbaden AG (Müllverbrennung)	609	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 45: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Wiesbaden, HE

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	102	91
Biomethan	66	12
Feste Biomasse	18	432
Sonstige Biomasse ¹	2	316
Abfall	18	2.733

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 18 Punktquellen mit Abfällen als Energieträger sowie 18 weitere Punktquellen, welche feste Biomasse als Energieträger einsetzen. Desweiteren liegt der BASF-Standort in Ludwigshafen im 60-Minuten-Fahrtzeitradius. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund von mehreren Standorten als CO₂-Quellen für PtX-Anlagen in Frage kommen könnten, müsste in einer weiteren Standortanalyse genauer betrachtet werden.

Am Standort in Großenlüder betrug der CO₂-Ausstoß bei ca. 125 Anlagen rund 0,5 Mio. Tonnen. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 46: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Großlüttern, HE

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Papierfabrik Adolf Jass GmbH & Co. KG	162	125	40	1	140	40	0	110	40	0
Biomasseheizkraftwerk Lauterbach	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
K+S KALI GmbH, Werk Neuhoof-Ellers, Trocknung	25	20	6	0	15	3	0	20	15	5
K+S KALI GmbH, Werk Neuhoof-Ellers, Kraftwerk (unbekannter Energieträger)	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-
GETEC BBE GmbH, Biomasse BHKW	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glatfelter Ober-Schmitten GmbH, GuD Anlage	14	10	1	0	-	-	-	10	9	1

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 47: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Großlüttern, HE

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	87	54
Biomethan	15	2
Feste Biomasse	9	49
Sonstige Biomasse ¹	1	162
Abfall	1	0

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius sind bis auf die Papierfabrik Adolf Jass GmbH & Co. KG und die K+S KALI GmbH keine weiteren großen CO₂-Punktquellen. Da die prognostizierten zukünftigen CO₂-Emissionen beider Anlagen eher gering sind, bedarf es vermutlich keiner vertieften Betrachtung. Aus dem Gesichtspunkt der CO₂-Quellen wäre die Region daher für PtX-Anlagen uninteressant.

Sachsen-Anhalt

Standorte Bernburg und Karsdorf

In Sachsen-Anhalt gibt es zwei Standorte, die zwar lediglich rund 80 km voneinander entfernt sind, jedoch aber mit einer Fahrzeit von 80 Minuten auseinanderliegen. In der nachfolgenden Tabelle sind die CO₂-Emissionen der letzten auswertbaren Jahre der beiden Zementwerke aufgeführt.

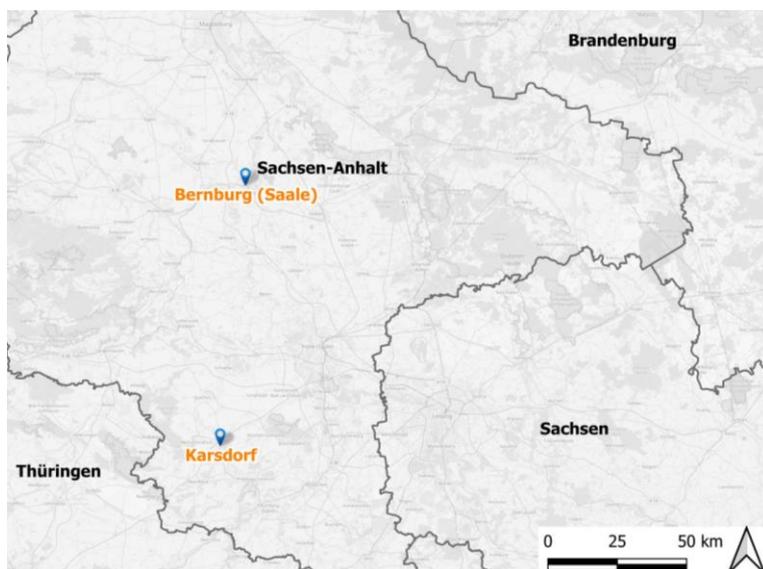


Abbildung 36: Zementwerke in Sachsen-Anhalt

Tabelle 48: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Bernburg und Karsdorf, ST

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t					
SCHWENK Zement KG, Werk Bernburg	673	643	681	794	802
OPTERRA GmbH, Werk Karsdorf	882	872	867	936	904

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen der beiden Zementwerke.

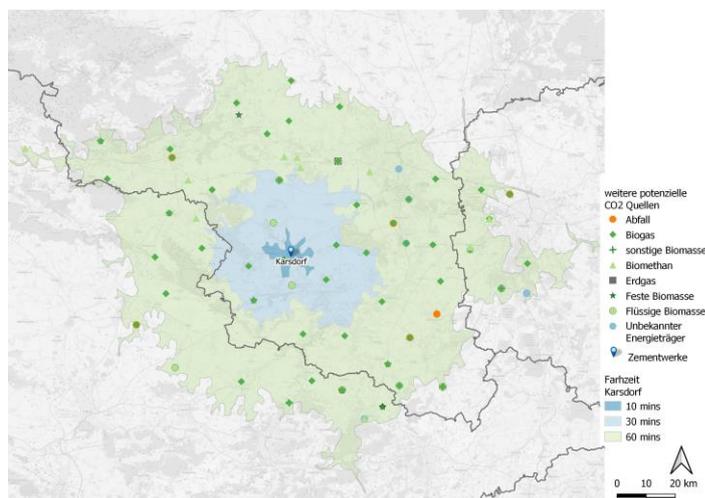
Tabelle 49: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Bernburg und Karsdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t								
SCHWENK Zement KG, Werk Bernburg	330	265	175	765	675	505	580	460
OPTERRA GmbH, Werk Karsdorf	415	330	215	950	835	625	720	570

Standort Karsdorf

Ausgehend von Karsdorf liegen im Radius von 60 Minuten keine weiteren Zementwerke. Das nächste Zementwerk ist Schwenk Zement in Bernburg. Dies liegt ca. 80 km entfernt. Da die meiste Zeit auf Landstraßen gefahren werden muss, beträgt die reine Fahrzeit aber ungefähr 80 Minuten. Beide Zementwerke emittieren durchschnittlich rund 1,6 Mio. Tonnen CO₂ jährlich.

Rund 120 km westlich von Karsdorf ist das Duena Zementwerk in Niederorschel. Da hier hauptsächlich auf Autobahnen gefahren werden kann, beträgt die reine Fahrzeit auch ca. 80 Minuten. Beide Zementwerke addiert emittieren im Durchschnitt etwas weniger als 2 Mio. Tonnen CO₂ jährlich. Der CO₂-Ausstoß aller drei Anlagen zusammen beträgt jährlich rund 2,6 Mio. Tonnen.

Abbildung 37: CO₂-Quellen um das Zementwerk Karsdorf, ST

Im Jahr 2017 haben um **Karsdorf** innerhalb dieses Radius 187 weitere CO₂-Quellen ca. 12 Mio. Tonnen ausgestoßen. Rund 7,3 Mio. Tonnen sind davon durch Verbrennung von Abfällen entstanden. Alleine das Uniper-Kraftwerk in Schkopau emittierte 2017 rund 5,3 Mio. Tonnen CO₂. Bei 31 CO₂-Quellen mit einer Emission von rund 3,8 Mio. Tonnen im Jahr 2017 konnte kein Energieträger eindeutig zugeordnet werden.

Die sechs emissionsintensivsten dieser Anlagen sind in der nachfolgenden

Tabelle aufgeführt. Hier gilt weiterhin der Hinweis, dass nicht alle Branchen in den Zukunftsszenarien enthalten sind. Speziell Kohlekraftwerke wurden hier nicht betrachtet, weshalb hier keine Werte für die Stützjahre berechnet werden.

Tabelle 50: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Karsdorf, ST

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA				Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t										
Uniper Kraftwerke GmbH, Kohlekraftwerk Schkopau	5.282	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH	1.713	1.300	440	6	1.14	235	-13	1.390	890	345	
Dow Olefinverbund GmbH	1.100	840	285	4	730	150	-8	890	570	220	
RKB Raffinerie-Kraftwerks-Betriebs GmbH	851	650	220	3	570	115	-7	690	440	170	
MIBRAG Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft, Kraftwerk Deuben	758	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
ROMONTA GmbH, Schmierstoffraffinerie Amsdorf	444	340	115	2	300	60	-3	460	230	90	

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 51: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Karsdorf, ST

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	122	160
Biomethan	10	10
Feste Biomasse	7	49
Sonstige Biomasse ¹	2	12
Abfall	9	7.250

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 9 Punktquellen, welche Abfälle als Energieträger einsetzen und 2017 mehr als 7 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Des Weiteren befinden sich mehrere Raffinerien bzw. die Mineralölverarbeitete Industrie in diesem Radius. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund von mehreren Standorten als CO₂-Quellen für PtX-Anlagen in Frage kommen könnten, müsste in einer vertieften Anlagen- und Standortanalyse betrachtet werden.

Standort Bernburg

Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius um **Bernburg** rund 320 weitere CO₂-Quellen ca. 10 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen, wobei knapp 8 Millionen Tonnen durch die Verbrennung von Abfällen verursacht wurden. Wie am Standort Karsdorf emittiert alleine das Uniper Kraftwerk in Schkopau im Jahr 2017 rund 5,3 Millionen Tonnen CO₂. Bei 45 CO₂ Quellen mit einer CO₂ Emission von rund 3,8 Millionen Tonnen im Jahr 2017 konnte kein Energieträger eindeutig zugeordnet werden. Die sechs emissionsintensivsten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

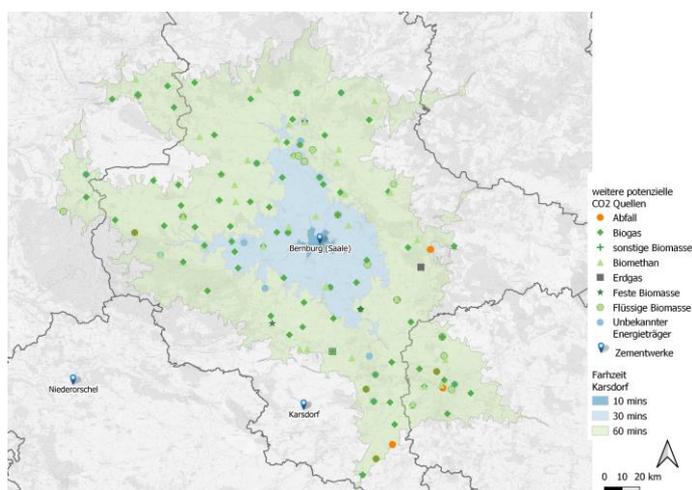
Abbildung 38: CO₂-Quellen um das Zementwerk Bernburg, ST

Tabelle 52: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Bernburg, ST

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Uniper Kraftwerke GmbH, Kohlekraftwerk Schkopau	5.282	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH	1.713	1.300	440	6	1.14	235	-13	1.390	890	345
RKB Raffinerie-Kraftwerks-Betriebs GmbH	851	650	220	3	570	115	-7	690	440	170
MIBRAG Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft, Kraftwerk Deuben	758	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ROMONTA GmbH, Schmierstoffraffinerie Amsdorf	444	340	115	2	300	60	-3	460	230	90
Linde Gas Produktionsgesellschaft, Werk Leuna	397	305	100	1	265	55	-3	320	205	80

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 53: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Bernburg, ST

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	182	215
Biomethan	42	52
Feste Biomasse	6	76
Sonstige Biomasse ¹	2	12
Abfall	11	7.644

¹ Papierindustrie

Die 60-Minuten-Fahrtzeitradien von den Standorten **Karsdorf** und **Bernburg** überschneiden sich, so dass einige Punktquellen bei beiden Standorten vorkommen. Ausgehend vom Standort **Bernburg** befinden sich hier 11 Punktquellen, welche Abfälle als Energieträger einsetzen und 2017 mehr als 7,5 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Des Weiteren befinden sich mehrere Raffinerien bzw. die Mineralölverarbeitete Industrie in diesem Radius. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund von mehreren Standorten als CO₂-Quellen für PtX-Anlagen in Frage kommen, müsste in einer vertieften Anlagen- und Standortanalyse genauer betrachtet werden.

Schleswig-Holstein



Abbildung 39: Zementwerk in Schleswig-Holstein

Standort Lägerdorf

Das Holcim Werk in Lägerdorf ist ein Zementwerk mit Klinkererzeugung. Der jährliche durchschnittliche CO₂-Ausstoß liegt bei über 1 Mio. Tonnen. In Lübeck ist zwar ein weiteres Zementwerk, allerdings ohne Klinkerproduktion.

Tabelle 54: CO₂-Emissionen des Zementwerks in Lägerdorf, SH

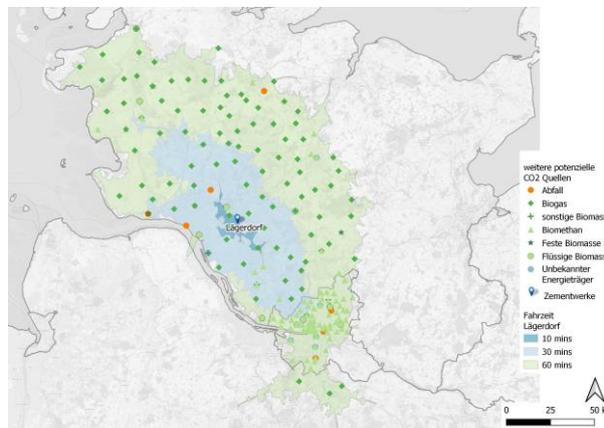
Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. T				
Holcim GmbH, Werk Lägerdorf	1.170	1.170	1.100	1.070	1.060

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen des Zementwerks.

Tabelle 55: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen des Zementwerks in Lagersdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. T							
Holcim GmbH, Werk Lagersdorf	515	415	270	1.200	1.045	780	900	715

Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius rund 340 weitere CO₂-Quellen ca. 10 Mio. Tonnen ausgestoßen, wobei knapp 6 Mio. Tonnen der Verbrennung von Abfällen zuzuordnen sind. Alleine das Vattenfall-Heizkraftwerk in Moorburg, das Abfälle als Energieträger einsetzt, emittierte im Jahr 2017 rund 5,3 Mio. Tonnen CO₂. Bei 21 CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von 2,4 Mio. Tonnen im Jahr 2017 konnte kein eindeutiger Energieträger zugewiesen werden. Die sechs emissionsintensivsten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Abbildung 40: CO₂-Quellen um das Zementwerk Lagersdorf, SHTabelle 56: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lagersdorf, SH

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario			
		2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
		CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Vattenfall Heizkraftwerk Moorburg GmbH (Kohle)	5.911	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Yara Brunsbüttel GmbH, POX-Synthesegasanlage	1.407	1.075	360	5	940	195	-11	1.140	730	285	
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Wedel (Kohle)	1.091	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Raffinerie Heide GmbH, Kraftwerk	758	280	195	3	505	105	-6	615	390	155	
ArcelorMittal Hamburg GmbH, Reduktionsanlage (RA)	444	340	115	2	295	60	-3	370	170	65	
TRIMET Aluminium SE, Aluminiumschmelzflusselektrolyse	397	105	15	0	-	-	-	310	155	35	

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf ihre Energieträger auf:

Tabelle 57: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Lagersdorf, SH

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	258	238
Biomethan	39	6
Feste Biomasse	3	14
Sonstige Biomasse ¹	2	34
Abfall	10	5.945

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen 10 Punktquellen, welche Abfälle als Energieträger einsetzen und 2017 knapp 6 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen haben. Des Weiteren sind hier mehrere größere Industrieanlagen vorhanden, die auch zukünftig eine signifikante CO₂-Menge ausstoßen werden. Inwieweit diese als Einzelstandorte oder im Verbund als CO₂-Quellen für PtX-Anlagen in Frage kommen könnten, müsste in einer vertieften Anlagen- und Standortanalyse genauer betrachtet werden.

Brandenburg

Standort Rüdersdorf bei Berlin

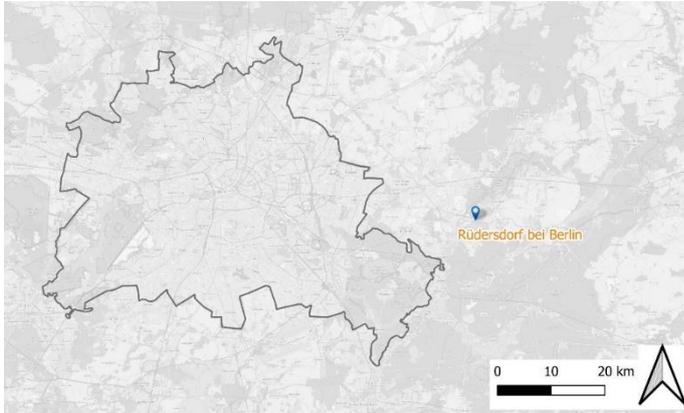


Abbildung 41: Zementwerk in Brandenburg

In Brandenburg gibt es einmal das Zementwerk CEMEX Zement in Rüdersdorf mit Klinkererzeugung. Das Zementwerk emittiert mehr als 1,4 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr. Es gibt in Brandenburg zwar zwei weitere Zementwerke, allerdings ohne Klinkererzeugung, weshalb diese nicht weiter betrachtet werden. Die Emissionen für das Zementwerk des Standorts Rüdersdorf sind für die Jahre, für welche Daten vorliegen, in der nachfolgenden

Tabelle zu sehen.

Abbildung 42: CO₂-Emissionen des Zementwerks in Rüdersdorf, BB

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
CEMEX Zement GmbH, Werk Rüdersdorf	1.460	1.480	1.350	1.560	1.400

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen des Zementwerks.

Abbildung 43: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen des Zementwerks in Rüdersdorf auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
CEMEX Zement GmbH, Werk Rüdersdorf	670	540	355	1.545	1.360	1.015	1.175	930

Im Jahr 2017 haben innerhalb dieses Radius rund 200 weitere CO₂-Quellen ca. 2 Mio. Tonnen CO₂ ausgestoßen, wovon knapp 1,5 Mio. aus der Energieversorgung stammen und keinem eindeutigen Energieträger zugeordnet werden können. Die sechs emissionsintensivsten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

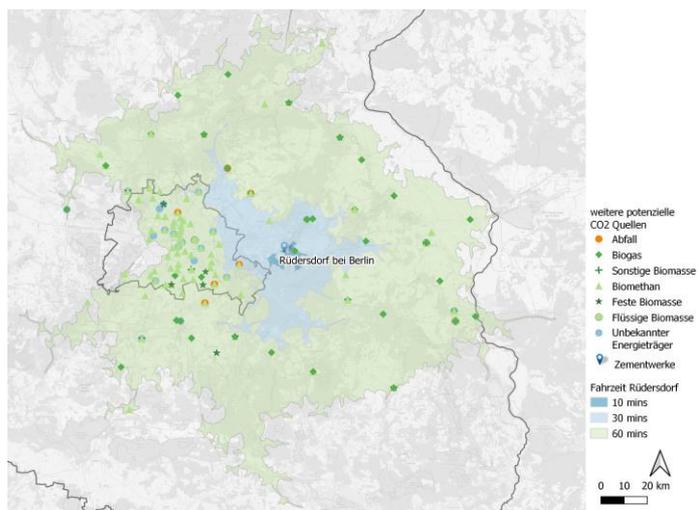


Abbildung 42: CO₂-Quellen um das Zementwerk Rüdersdorf, BB

Tabelle 60: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rüdersdorf, BB

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Klingenberg (Erdgas)	937	650	110	7	-	-	-	675	600	75
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Mitte (Erdgas)	935	650	110	7	-	-	-	675	600	75
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Moabit (Kohle)	489	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Lichterfelde (Erdgas)	350	240	40	3	-	-	-	255	225	30
Stadtwerke Frankfurt Oder GmbH, HKW (Erdgas)	158	110	20	1	-	-	-	115	100	15
Vattenfall Wärme Berlin AG, HKW Lichtenberg (Erdgas)	129	90	15	1	-	-	-	95	85	10

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf ihre Energieträger auf:

Tabelle 61: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Rüdersdorf, BB

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	106	167
Biomethan	54	15
Feste Biomasse	10	187
Sonstige Biomasse ¹	1	372
Abfall	8	63

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen einige Erdgaskraftwerke und eine Papierfabrik. Inwieweit sich die Erdgaskraftwerke als CO₂-Quelle für potenzielle PtX-Standorte eignen, hängt davon ab, welcher Energieträger zukünftig eingesetzt wird bzw. ob die Anlagen stillgelegt werden.

Niedersachsen



Abbildung 43: Zementwerke in Niedersachsen

Die zwei Standorte Hannover und Höver in Niedersachsen liegen nur 4 km mit einer reinen Fahrzeit von rund 10 Minuten voneinander entfernt. Zusammen stoßen sie ca. 1,2 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr aus. Die genauen Emissionsdaten der beiden Werke sind in der nachstehenden Tabelle ersichtlich.

Tabelle 62: CO₂-Emissionen der Zementwerke in Niedersachsen

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
HeidelbergCement AG, Werk Hannover	480	541	550	629	618
Holcim (Deutschland) GmbH, Werk Höver	625	617	676	632	654

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen des Zementwerks.

Tabelle 63: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen der Zementwerke in Hannover und Höver auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. T								
HeidelbergCement AG, Werk Hannover	260	210	140	600	530	400	455	360
Holcim (Deutschland) GmbH, Werk Höver	300	235	155	685	600	450	520	410

Im Jahr 2017 haben innerhalb des 60-Minuten-Fahrtzeitradius rund 413 weitere CO₂-Quellen mehr als 13 Mio. Tonnen ausgestoßen. Bei 19 CO₂-Quellen, die alleine rund 8,5 Mio. emittieren, konnte keine eindeutige Zuordnung eines Energieträgers erfolgen. Wobei alleine die Firma Salzgitter Flachstahl GmbH rund 7,6 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr 2017 emittierte. Sollte die Stahlproduktion an diesem Standort auf Direktreduktion mit Wasserstoff umgestellt werden, fallen hier wesentliche Emissionsmengen weg. Rund 4,4 Mio. Tonnen entfielen auf Kraftwerke, die unter anderem als Energieträger Abfall einsetzen. Davon emittierten im Jahr 2017 alleine die zwei Heizkraftwerke von Volkswagen in Wolfsburg ca. 2,4 Mio. Tonnen und das Kraftwerk in Mehrum 1,8 Mio. Tonnen CO₂. Das Kraftwerk in Mehrum wird Ende 2021 endgültig stillgelegt.

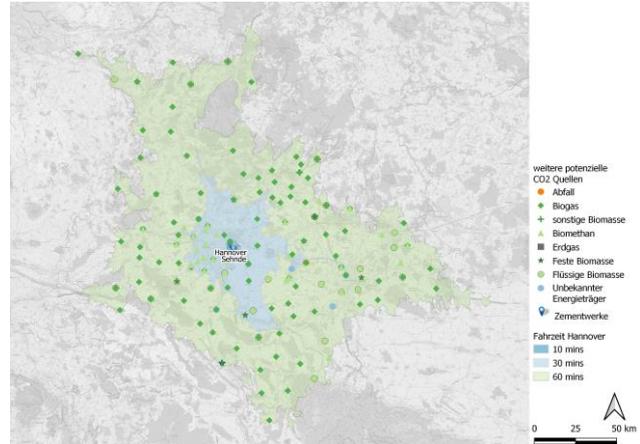


Abbildung 44: CO₂-Quellen um das Zementwerk Hannover, NI

Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 64: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Hannover, NI

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
		2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t										
Salzgitter Flachstahl GmbH, Glocke	4.095	1065	170	0	2830	430	-2	2.890	570	60
Salzgitter Flachstahl GmbH, Kraftwerk Hallendorf (Gas)	3.190	2.210	375	22	-	-	-	2.305	2.055	260
Kohlekraftwerk Mehrum GmbH	1.853	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volkswagen AG, Heizkraftwerk West (Kohle)	1.653	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volkswagen AG, Heizkraftwerk Nord / Süd (Kohle)	743	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Braunschweiger Versorgungs-AG, HKW Mitte (Erdgas)	449	310	55	3	-	-	-	325	290	35

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf ihre Energieträger auf:

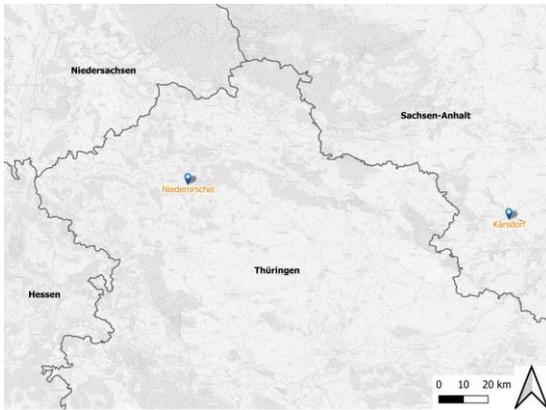
Tabelle 65: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Hannover, NI

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	333	389
Biomethan	43	8
Feste Biomasse	5	111
Sonstige Biomasse ¹	4	113
Abfall	0	0

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen einige größere CO₂-Punktquellen. Einerseits die Salzgitter Flachstahl GmbH als auch vier Kraftwerke. Laut Aussage von Volkswagen werden deren zwei Kraftwerke zurzeit umgerüstet, um diese zukünftig als Gaskraftwerke zu betreiben. Auf Grund der damit zur Verfügung stehenden CO₂-Emissionsmengen (Zementwerke, Kraftwerke und Industrieanlagen), dürfte das genannte Gebiet für potentielle PtX-Anlagen interessant sein.

Thüringen



In Thüringen gibt es nur ein Zementwerk. Dieses liegt in Niederorschel. Es hat einen durchschnittlichen jährlichen CO₂-Ausstoß von rund 1 Mio. Tonnen. Ein weiteres Zementwerk, allerdings ohne Klinkerproduktion, ist in Dornburg. Die CO₂-Emissionen des Werks in Niederorschel sind nachfolgend ausgewiesen.

Abbildung 45: Zementwerke in Thüringen

Tabelle 66: CO₂-Emissionen des Zementwerks in Thüringen

Name des Betriebs	2014	2015	2016	2017	2018
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t				
Deuna Zement GmbH, Werk Niederorschel	1.070	1.020	1.110	1.160	1.010

Durch die Anwendung der genannten Szenarien auf die einzelnen Standorte, ergeben sich die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführten Emissionsprognosen des Zementwerks.

Tabelle 67: Abschätzung der zukünftigen CO₂-Emissionen des Zementwerks in Niederorschel auf Grundlage der jeweiligen Szenarien

Name des Betriebs	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario	
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t							
Deuna Zement GmbH, Werk Niederorschel	500	400	260	1.145	1.010	750	870	690

Im Jahr 2017 haben innerhalb des 60-Minuten-Fahrtzeitradius rund 150 weitere CO₂-Quellen ca. 0,5 Mio. Tonnen ausgestoßen. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

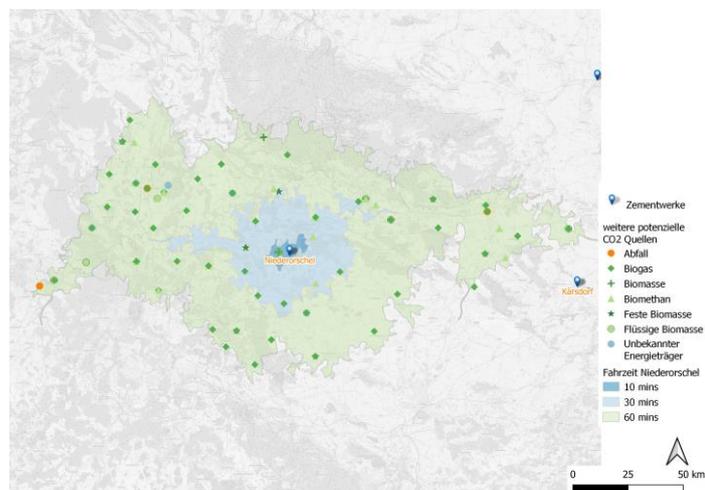


Abbildung 46: CO₂-Quellen um das Zementwerk in Niederorschel, TH

Tabelle 68: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Niederorschel, TH

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Smurfit Kappa Herzberg Solid Board GmbH	92	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stadtwerke Leipzig, Biomasse KW	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Städtische Werke Energie + Wärme GmbH (Biomasse-)	53	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Novelis Deutschland GmbH (Beschichtungsanlagen)	23	20	5	0	15	3	0	20	10	5
RITZENHOFF AG (Herstellung von Hohlglas)	5	5	1	0	3	1	0	4	3	1
DS Smith Paper; Witzenhausen, (Biomassekraftwerk)	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 69: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom Zementwerk Niederorschel, TH

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	112	118
Biomethan	19	10
Feste Biomasse	7	73
Sonstige Biomasse ¹	3	112
Abfall	3	74

¹ Papierindustrie

Obwohl im 60-Minuten-Fahrtzeitradius keine weiteren großen CO₂-Punktquellen mehr vorhanden sind, würde auf Grund der hohen CO₂-Emissionsmengen durch das Zementwerk, die auch zukünftig je nach Szenario noch erheblich sind, das Gebiet für potentielle PtX-Anlagenstandort relevant sein.

Standortanalyse am Beispiel von Biogaseinspeise- und Bioethanolanlagen



Abbildung 47: Biogaseinspeise- und Bioethanolanlagen in Deutschland

Abgeschiedenes CO₂ aus Biogaseinspeise- und Bioethanolanlagen stellt auf Grund der hohen Konzentration und Reinheit einen technisch und wirtschaftlich günstig zu erschließenden potenziellen Rohstoff dar.

Im Jahr 2019 waren rund 216 Biogaseinspeiseanlagen (Biogasaufbereitungsanlagen) mit einer kumulierten Einspeisekapazität von 134.000 Nm³/h in Deutschland in Betrieb. Bei einer angenommenen Volllaststundenzahl von 6000 h lag daher die Biomasseproduktion potenziell bei rund 800 Mio. Nm³, woraus 0,8 Mio. t CO₂-Emissionen aus dem Aufbereitungsprozess resultieren [18].

Die real verfügbaren Mengen sind jedoch stark von Entwicklungspfaden der Biomassenutzung abhängig. Nach Ergebnissen des untersuchten Klimaschutzszenarios 95 (KS95; beinhaltet THG-Minderungen um 95 %) [11], stünden mit 0,5 Mio. t CO₂ im Jahr 2050 nur noch geringe Mengen zur Verfügung, die sich auf viele kleine Standorte verteilen.

Bei der Bioethanolherstellung legt die Analyse des Entwicklungspfades im KS95 langfristig eine weitgehend konstante Produktion in der heutigen Größenordnung nahe [11]. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland an sieben Standorten rund 650.000 t Bioethanol hergestellt, wobei rund 0,65 Mio. t CO₂ entstanden sind [19]. Dadurch würden sich diese CO₂-Punktquellen als mögliche PtX-Standorte anbieten. Sechs der sieben Standorte befinden sich in den neuen Bundesländern.

Produktion von Bioethanol

Zur Gewinnung von Bioethanol werden die in den Pflanzen enthaltenen Kohlenhydrate oder Stärke mit Hilfe von Enzymen oder Hefepilzen zu Alkohol vergoren. Während die energiebedingten CO₂-Emissionen reduziert werden können, sind die prozessbedingten CO₂-Emissionen bei der Vergärung nicht minderbar.

E2Fuels
Schnittstelle

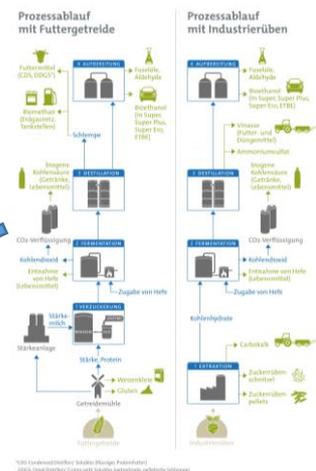


Abbildung 48: Bioethanolproduktion

Quelle: BDB [9]

Standortanalyse Bioethanolanlagen

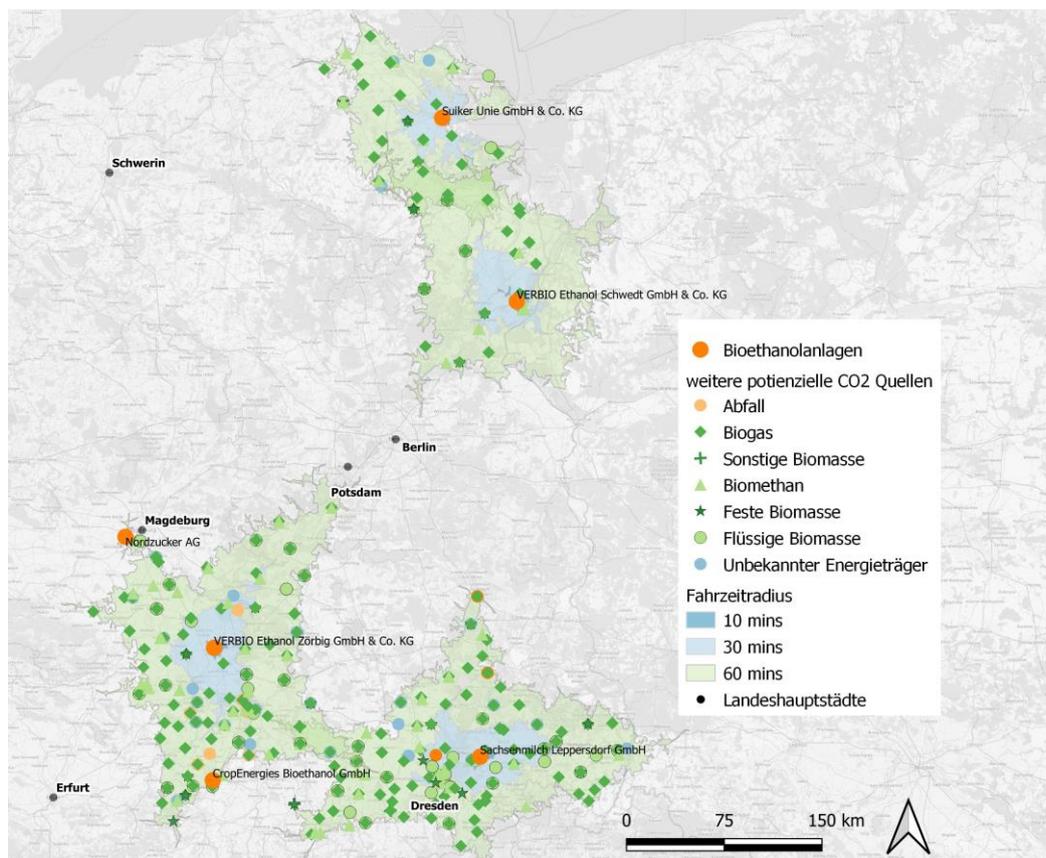


Abbildung 49: Bioethanolanlagen in den neuen Bundesländern

VERBIO Ethanol Zörbig GmbH & Co. KG

Im Umkreis der VERBIO Ethanol Zörbig GmbH & Co. KG (s. Abbildung 49) sind innerhalb eines 60-Minuten-Fahrtzeitradiuses noch zwei weitere Bioethanolanlagen. Im Norden am Rande von Magdeburg die Nordzucker AG (Produktionskapazität von 100.000 Tonnen/Jahr) und südlich von Zörbig in Zeitz die CropEnergies Bioethanol GmbH [19]. Die Anlage in Zeitz hat eine Produktionskapazität von 315.000 Tonnen/Jahr und ist damit die größte in Deutschland. Bei der Produktion entstehen rund 0,25 Mio. Tonnen CO₂ pro Jahr. Im Umkreis sind zusätzlich mehr als 280 weitere potenzielle CO₂-Quellen mit einem CO₂-Ausstoß von über 28 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Die sechs emissionsintensivsten dieser Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 70: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Zörbig

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario			
		2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
CO ₂ -Emissionen in Tsd. t											
Lausitz Energie Kraftwerke AG, Kohlekraftwerk Lippendorf	10.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Uniper Kraftwerke GmbH, Kohlekraftwerk Schkopau	5.282	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL Raffinerie Mitteldeutschland GmbH	1.713	1.300	440	6	1.14	235	-13	1.390	890	345	
SKW Stickstoffwerke Piesteritz, Ammoniakanlage 1	1.198	920	310	4	800	165	-9	970	620	240	
Dow Olefinverbund GmbH, Ethylenanlage	1.098	840	280	4	730	150	-8	890	570	220	
SKW Stickstoffwerk Piesteritz, Ammoniakanlage 2	1.031	790	265	4	690	140	-8	835	535	210	

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 71: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Zörbig

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	169	197
Biomethan	29	39
Feste Biomasse	10	139
Sonstige Biomasse ¹	3	218
Abfall	12	18.565

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen einige größere CO₂-Punktquellen. Zum einen die Total Raffinerie sowie die SKW Stickstoffwerke Piesteritz. Des Weiteren sind 12 Punktquellen vorhanden, die Abfälle als Energieträger einsetzen. Auf Grund der damit auch zukünftig zur Verfügung stehenden CO₂-Emissionsmengen (Zementwerke, Kraftwerke und Industrieanlagen) wäre diese Region vermutlich für potentielle PtX-Anlagen relevant.

VERBIO Ethanol Schwedt GmbH & Co. KG

Die Anlage in Schwedt ist mit einer Kapazität von 170.000 Tonnen/Jahr die zweitgrößte Anlage in Deutschland [19]. Dabei entstehen etwas mehr als 0,15 Mio. Tonnen CO₂. Im Fahrradius von 60 Minuten sind knapp 140 weitere zusätzliche potenzielle CO₂-Quellen mit einem CO₂ Ausstoß von mehr als 4 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Der größte CO₂-Emittent ist mit 3,7 Mio. Tonnen die PCK Raffinerie GmbH direkt in Schwedt. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 72: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Schwedt

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
PCK Raffinerie GmbH	3.690	2.825	950	10	2.46	505	-30	3.690	1.915	745
LEIPA Georg Leinfelder GmbH, Papiermaschinen 1-4	62	30	6	0	55	15	0	50	30	15
1Heiz Energie GmbH, Biomasse HKW	49	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LEIPA Georg Leinfelder GmbH, HKW, Leipa Nord	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biogas (EEG NR: E4186001EA1000000000056780100001)	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biomethanaufbereitungsanlage Schwedt	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf ihre Energieträger auf:

Tabelle 73: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	122	166
Biomethan	8	21
Feste Biomasse	4	54
Sonstige Biomasse ¹	1	63
Abfall	0	0

¹ Papierfabrik LEIPA Georg Leinfelder GmbH in Schwedt

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius ist bis auf die PCK Raffinerie GmbH keine weitere große CO₂-Punktquelle vorhanden. Da diese zukünftig jedoch vermutlich weiterhin größere CO₂-Mengen ausstößt, wäre eine vertiefende Analyse sinnvoll.

Suiker Unie GmbH & Co. KG in Anklam

Das Bioethanolwerk in Anklam gehört mit einer Produktionskapazität von ca. 55.000 Tonnen/Jahr zu den kleineren Anlagen [19]. Im Umkreis von 60 Minuten Fahrtzeit sind rund 250 weitere potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von knapp 0,5 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Die größten CO₂-Emittenten mit knapp über 0,2 Mio. Tonnen sind vier Heizkraftwerke. Zwei davon werden von der Neubrandenburger Stadtwerke GmbH betrieben und emittierten zusammen rund 140.000 Tonnen CO₂. Die zwei anderen Heizkraftwerke werden von den Stadtwerken Greifswald betreiben und hatten 2017 einen CO₂-Ausstoß von rund 70.000 Tonnen. Die sechs emissionsintensivsten Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 74: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Anklam

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
Neubrandenburger Stadtwerke GmbH, HKW (Erdgas)	131	90	15	1	-	-	-	95	85	10
Suiker Unie GmbH & Co. KG, Zuckerfabrik Anklam	80	25	2	0	-	-	-	30	6	0
Stadtwerke Greifswald GmbH, HKW Helmschäger Berg (Erdgas)	63	43	7	0	-	-	-	45	40	5
OPAL Gastransport GmbH & Co. KG	31	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biogas (EEG Nr: E4186001EA1000000000056780100001)	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Biogas (EEG Nr: E41860010000000000602127844100001)	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 75: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	112	165
Biomethan	8	7
Feste Biomasse	6	2
Sonstige Biomasse	0	0
Abfall	2	137

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegen keine großen CO₂-Punktquellen, weshalb keine genauere Betrachtung benötigt wird.

Sachsenmilch Leppersdorf GmbH in Wachau

Die Anlage in Wachau ist mit einer Produktionskapazität ca. 8.000 Tonnen/Jahr die zweitkleinste Anlage in Deutschland [19], wodurch auch der CO₂-Ausstoß als eher gering gewertet werden kann. Jedoch sind im Umkreis von 60 Minuten Fahrtzeit rund 250 weitere potenzielle CO₂-Quellen mit einem Ausstoß von rund 1,5 Mio. Tonnen (2017) vorhanden. Jedoch handelt es sich dabei um eine Vielzahl kleinerer Emittenten. Der größte Ausstoß erfolgte durch die BASF am Standort Schwarzheide mit rund 0,3 Mio. Tonnen CO₂. Bei 17 CO₂-Punktquellen mit etwas weniger als 0,5 Mio. Tonnen konnte kein eindeutiger Energieträger zugeordnet werden. Davon sind 5 Anlagen mit knapp 0,3 Mio. Tonnen Heizkraftwerke, die mehrere Energieträger einsetzen. Die sechs emissionsintensivsten dieser Anlagen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 76: Entwicklung der Emissionsmengen der sechs größten CO₂-Quellen im 60-Minuten-Fahrradius von der Bioethanolanlage in Wachau

Name des Betriebs	Status Quo	GreenSupreme, UBA			Klimaneutrales Deutschland, Agora			ZSW Szenario		
	2017	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
	CO ₂ -Emissionen in Tsd. t									
BASF Schwarzheide GmbH, GuD-Kraftwerk	312	215	40	2	-	-	-	225	200	25
Sachsenmilch Leppersdorf GmbH, GuD-Kraftwerk	132	90	15	1	-	-	-	95	85	10
Zweite Energieversorgungscenter Dresden-Wilschdorf (Biomasseheizkraftwerk)	116	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Schoeller Technocell GmbH & Co KG, Biomassekraftwerk	84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Wacker Chemie AG, HKW Nünchritz (Erdgas)	78	55	10	1	-	-	-	55	50	6
Kübler & Niethammer Papierfabrik Kriebstein AG, Biomassekraftwerk	60	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Die oben genannten CO₂-Quellen, welche erneuerbare Energieträger und Abfälle einsetzen, teilen sich wie folgt auf ihre Energieträger auf:

Tabelle 77: Potenzielle CO₂-Quellen mit erneuerbaren Energieträgern und Abfall im 60-Minuten-Fahrradius vom von der Bioethanolanlage in Schwedt

	Anzahl	CO ₂ -Menge 2017 [Tsd. t]
Biogas	175	165
Biomethan	28	7
Feste Biomasse	8	2
Sonstige Biomasse ¹	1	0
Abfall	0	0

¹ Papierindustrie

Im 60-Minuten-Fahrtzeitradius liegt bis auf BASF in Schwarzheide (ca. 65 km entfernt) keine großen CO₂-Punktquellen, weshalb keine genauere Betrachtung benötigt wird.

Clariant Produkte (Deutschland) GmbH in Straubing

Aufgrund der geringen Produktionskapazität von 1.000 Tonnen/Jahr [19] wurde die Bioethanolanlage in Straubing nicht genauer betrachtet.

Weitere Kriterien für die Auswahl eines PtX-Anlagenstandorts

Bei der Suche eines Standorts für PtX-Anlagen spielen viele Faktoren eine Rolle. Die Verfügbarkeit von CO₂-Quellen bildet dabei lediglich einen, wenn auch sehr wichtigen, selektiven Faktor ab. Noch wichtiger sind zunächst jedoch die restriktiven Faktoren, da diese potenziellen Standorte bereits ausschließen. Bei der Betrachtung von möglichen Anlagen in der unmittelbaren Nähe von CO₂-Quellen; dürften diese restriktiven Faktoren zwar zumeist relativ gering sein, da die CO₂-Emittenten bspw. nicht in Naturschutzgebieten stehen. Plant man jedoch einen Standort zwischen mehreren Emittenten zu finden, um die Ressourcen der Quellen zu bündeln, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit bereits, dass sich der Mittelpunkt auf einer unverbaubaren Fläche befindet.

Folgende Gebiete zählen zu den restriktiven Flächen:

- Wasserschutzgebiete
- Naturschutzgebiete
- Nationalparks
- Flora-Fauna-Habitat-Gebiete
- Vogelschutzgebiete
- Bereits genutzte Flächen (Siedlungen, Verkehrsanlagen, Wälder, Gewässer, Schutzgebiete, etc.)
- Hangneigung > 15 %

Die Hangneigung sollte für den Anlagenstandort dabei nicht allzu hoch ausfallen, da sich die Kosten des Baus ansonsten stark erhöhen. Daher wurden hier Flächen mit einer Hangneigung über 15 % zu den restriktiven Flächen gezählt. Die prozentuale Neigung, ab welcher die Fläche als restriktiv gewertet werden kann, ist jedoch nicht immer klar definiert und variiert entsprechend der zu bauenden Anlage. Genaue Angaben sind hier schwer zu finden und befinden sich bei Energieanlagen, welche Gasverarbeitungsprozesse beinhalten, wie z. B. Biogasanlagen, zumeist zwischen 10 und 20 %. Die genannten 15 % sowie weitere Angaben zu den restriktiven Flächen, allerdings bezogen auf Biogasanlagen, sind bei Ma, Scott, DeGloria und Lembo (2005) „Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS“ auf Seite 596 zu finden [20].

Bei den Karten für die genannten Schutzgebiete handelt es sich zumeist um frei zugängliche Daten. Diese können beispielsweise unter opendata-esri.de oder www.geoportal.de heruntergeladen und in das jeweilige GIS-System eingearbeitet werden. Für die Hangneigung mussten jedoch die sog. ASTER-Karten unter <https://search.earthdata.nasa.gov/search> heruntergeladen werden. Mit diesen konnten in QGIS mit dem Neigungsberechnungswerkzeug die Hangneigungen berechnet und abgegrenzt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt deutschlandweit die oben genannten restriktiven Flächen in grau, auf welchen potentielle PtX-Standorte zunächst auszuschließen sind.

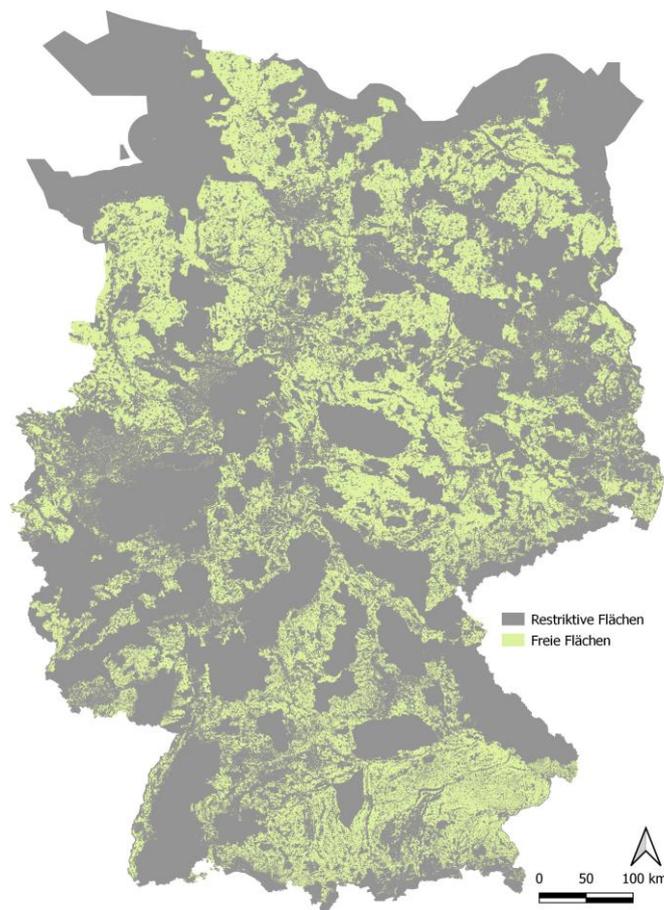


Abbildung 50: Restriktive Flächen für PtX-Anlagen

Verwendbare CO₂-Quellen stellen hingegen, wie oben bereits erwähnt, einen selektiven, also bevorzugenden oder fördernden, Faktor für potentielle Standorte dar. Weitere selektive Faktoren, bei welchen es sich vorwiegend um Infrastruktur handelt, können in diesem Falle sein:

- Stromanschluss (für den Anlagenbetrieb)
- Gasanschluss (für eine evtl. Methaneinspeisung oder falls Erdgas bspw. zur Wärmeproduktion benötigt wird)
- Wasseranschluss (allgemein wichtig, vor allem, wenn Elektrolyse am selben Ort stattfindet)
- Straßenanbindung (Belieferung mit CO₂ sowie Abtransport von Kraftstoffen per Trailer)
- Gleisanbindung (s. Straßenanbindung, evtl. noch mit Kostenvorteilen)
- Erneuerbare-Energie-Anlagen (direkter EE-Strombezug, bspw. per Power Purchase Agreement (PPA), zur Herstellung von grünen Kraftstoffen oder Gasen)

Die nachfolgende Karte bildet die oberen restriktiven Flächen gemeinsam mit einem Teil der selektiven Flächen ab. Es wurden, der Übersichtlichkeit halber sowie nach Möglichkeit verwendbarer Daten, große CO₂-Emittenten gewählt (Zementwerke und Bioethanolanlagen) sowie das Gas- und Stromnetz abgebildet. Straßen- und Gleisanbindung wird darauffolgend in spezifischeren Beispielen aufgezeigt. Erneuerbare-Energien-Anlagen wurden für die Standortsuche nicht genauer betrachtet. Dies hätte einerseits einen erheblichen Mehraufwand bedeutet, andererseits ist der Bezug dieser bilanziell über das öffentliche Stromnetz möglich.

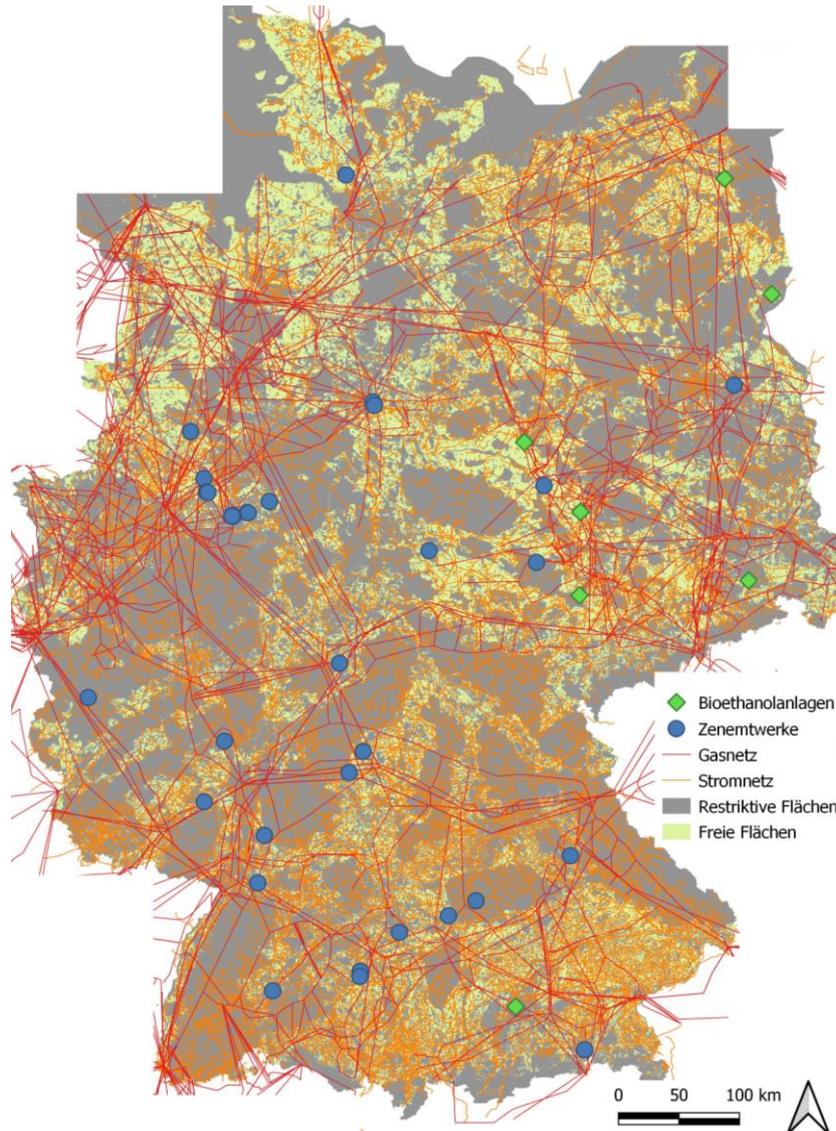


Abbildung 51: Standortkarte von Zementwerken und Bioethanolanlagen mit restriktiven und selektiven Faktoren

Im folgenden Abschnitt wird eine beispielhafte Analyse einzelner Standorte der Zementwerke in NRW sowie von Bioethanolanlagen in Abhängigkeit der vor Ort jeweils vorhandenen Infrastruktur aufgezeigt.

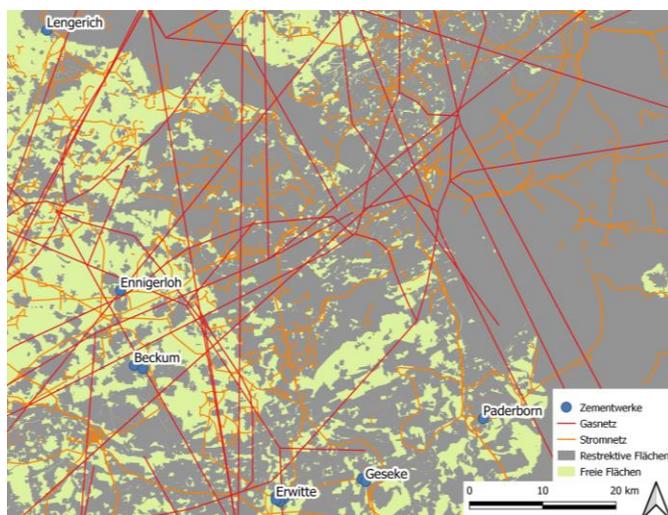


Abbildung 52: Zementwerke in NRW mit restriktiven und selektiven Faktoren

Aufgrund der räumlichen Konzentration von elf Zementwerken in NRW, bietet sich hier eine weitere beispielhafte räumliche Auswertung an. In Lengerich, Ennigerloh und Paderborn befindet sich jeweils ein Werk, in Beckum und Geseke jeweils zwei und am Standort Erwitte sind vier Werke vorhanden.

Die nachfolgende Tabelle zeigt welche Infrastrukturfaktoren von den einzelnen Zementwerksstandorten wie erfüllt werden. Die Stromleitungen sind zwar in der Abbildung 52 eingezeichnet, werden für die

Kurzanalyse jedoch nicht weiter betrachtet, da der Anschluss ohnehin an jedem Standort vorhanden ist. Relevant würde dieser Faktor eher, wenn man einen Standort zwischen den emittierenden Anlagen sucht. Ähnlich verhält es sich beim Wasseranschluss. Dieser ist in jedem Werk vorhanden. Leider konnten hierzu keinen Kartendaten gefunden werden, allerdings ist das Netz in Deutschland so gut ausgebaut, dass dies keine große Hürde bei der Standortsuche darstellen dürfte.

Tabelle 78: Zementwerke in NRW mit Beschreibung zu Infrastrukturfaktoren

Zementwerkstandort in NRW	Straßenanbindung	Gleisanbindung	Gasleitung (Entfernung Luftlinie)
Erwitte	A 44	Bahnhof Erwitte	am Standort
Beckum-Kollenbach (Holcim)	B 58	am Standort	rund 1 km
Beckum (Phonix)	B 475	Bahnhof Beckum	am Standort
Geseke	L 549	am Standort	rund 5 km
Paderborn	B 64	am Standort	rund 6 km
Lengerich	L 591	am Standort	rund 6 km
Ennigerloh	B 475	am Standort	am Standort

Aufgrund der guten Infrastruktur (Gasanschluss, Gleisanbindung, Autobahnanbindung) und bei durchschnittlichen jährlichen CO₂-Emissionen von 2 Mio. Tonnen wäre der Standort Erwitte optimal für eine PtX-Anlage geeignet. Dies würde auch auf den Standort in Lengerich zutreffen.

Beim Phoenix Zementwerke Krogbeumker am Standort Beckum ist eine Gasleitung vorhanden. Das Holcim West Zement GmbH, Werk Beckum-Kollenbach ist ca. 1 km davon entfernt, dafür besitzt es einen direkten Gleisanschluss. Beide Anlagen zusammen emittieren jährlichen rund 900.000 Tonnen CO₂. Auch hier wäre ein PtX-Anlagenstandort denkbar.

Die Standorte Ennigerloh und Beckum haben zwar keine direkte Autobahnanbindung, aber eine Anbindung ans Hauptgasnetz ist auf Grund der geringen Entfernung jeweils vermutlich ohne größeren Aufwand möglich. Dadurch könnten diese Standorte für PtX-Anlagen ebenfalls interessant sein.

Bei den Standorten Geseke und Paderborn ist der Infrastrukturanschluss, wie der Karte zu entnehmen ist, nicht optimal. Zwar gibt es jeweils eine direkte Gleisanbindung, allerdings befinden sich die nächstgelegenen Gasanschlüsse 5 bis 6 km weit entfernt. Die Straßenanbindung ist in Paderborn noch über eine Bundesstraße möglich. In Geseke und Lengerich ist diese jedoch lediglich über eine Landstraße gegeben.

Bei den Bioethanolanlagen zeigt sich ein unterschiedliches Bild. Da dies eher kleine Anlagen mit einem geringen CO₂-Ausstoß sind, würde sich ein Verbund von mehreren stationären CO₂-Quellen anbieten. In der nachfolgenden Tabelle werden deshalb die infrastrukturellen, selektiven Faktoren für Bioethanolanlagenstandorte betrachtet und, falls vorhanden, die Entfernung zu den nächstgelegenen Zementwerken als zusätzliche CO₂-Ressourcen aufgezeigt.

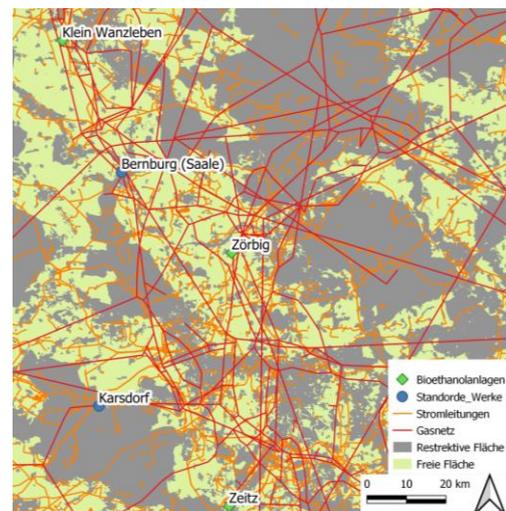


Abbildung 53: Bioethanolanlagenstandorte mit selektiven Infrastrukturfaktoren

Tabelle 79: Bioethanolanlagen mit Beschreibung zu Infrastrukturfaktoren sowie Anbindung zu Zementwerken

Standort Bioethanolanlagen und Zementwerke	Straßenanbindung	Gleisanbindung	Gasleitung (Entfernung Luftlinie)
CropEnergies Zeis (55 km, ca. 1 h Fahrzeit vom Zementwerk in Karsdorf)	B2	am Standort	rund 1 km
→ Zementwerk in Karsdorf	K 2662	am Standort	am Standort
Nordzucker AG (Bioethanol) (45 km, ca. 30 Fahrminuten vom Zementwerk in Bernburg)	A 14	Bahnhof Magdeburg (10 Km entfernt)	rund 500 m
VERBIO Ethanol Zörbig (40 km, ca. 30 Fahrminuten vom Zementwerk in Bernburg)	L 143	Bahnhof Zörbig	am Standort
→ Zementwerk in Bernburg	A 14 / B 185	Bahnhof Bernburg	am Standort
VERBIO Ethanol Schwedt	B 166	Bahnhof Schwedt	rund 11 km
Suiker Unie in Anklam	B 109	Bahnhof Anklam	am Standort

Die größte Anlage, CropEnergies Bioethanol GmbH in Zeis mit einer Produktionskapazität von 315.000 Tonnen/Jahr, gehört zur Südzuckergruppe, die am gleichen Standort ebenfalls ein Werk betreibt. Eine Gleisanbindung ist vorhanden, die Gasleitung ist ca. 1 km (Luftlinie) vom Werk entfernt. Beide Anlagen emittieren zusammen rund 235.000 t CO₂ jährlich. Einen Verbund könnten die Anlagen mit der Nordzucker AG in Magdeburg, der Verbio Ethanolanlage in Zörbig und dem Zementwerk in Bernburg bilden. Zusammen emittieren die drei Anlagen rund 1 Mio. Tonnen CO₂ im Jahr.

Fazit der CO₂-Standortanalyse

Mit dem Aufzeigen der Kriterien im Kartenmaterial konnte ein guter erster Überblick über mögliche PtX-Standorte geliefert werden. Ebenso wurden einzelne potentielle Standorte detaillierter betrachtet, speziell für die größten und aussichtsreichsten CO₂-Punktquellen. Aufgrund der Menge der Daten und Kriterien und der Rechenintensität, bspw. der Fahrtradiusberechnungen, war dies nur beispielhaft möglich und potentielle Standorte konnten nur angedeutet werden. Um konkrete Standorte zu identifizieren, müsste eine Spezifikation auf kleinere Gebiete oder Regionen erfolgen. Dadurch könnte eine vertiefte Anlagen- und Standortanalyse durchgeführt werden und konkrete potentielle PtX-Standorte herausgearbeitet werden. Die dafür benötigte Daten- und Kartengrundlage wurde in der Ausarbeitung jedoch geschaffen.

Große Unsicherheiten für potentielle PtX-Standorte bestehen natürlich auch aufgrund der zukünftigen CO₂-Emissionsentwicklungen (s. hierzu nachfolgendes Fazit).

Fazit für zukünftiges CO₂-Potenzial für PtX-Standorte in Deutschland

Aufgrund der deutschen Klimaschutzgesetzgebung wird CO₂ mittelfristig ein knappes Gut.

Deutschland strebt ein Erreichen der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 an. Dies ist im Klimaschutzgesetz verankert und bedeutet, dass über konkrete jährliche Minderungsziele der Treibhausgasausstoß und damit auch die CO₂-Emissionen konsequent reduziert werden.

Netto-Treibhausgas-Neutralität im Jahr 2045 bedeutet, dass die dann noch verbleibenden Emissionen durch THG-Senken ausgeglichen werden müssen. Ab dem Jahr 2050 strebt die Bundesregierung negative Emissionen an, so dass Deutschland dann mehr Treibhausgase in natürlichen Senken einbinden muss, als es ausstößt.

Diese neuen gesetzlichen Vorgaben haben massive Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von CO₂ für CCU-Zwecke, wie die Produktion von synthetischen Kraftstoffen oder Kohlenwasserstoffverbindungen als Rohstoffe für die chemische Industrie. Studien zeigen, dass die Nachfrage nach Kohlenstoffverbindungen in Deutschland schon 2040 deutlich größer sein wird als über die verbleibenden Punktemissionen in Deutschland bereitgestellt werden kann. Deutschland kommt also als Standort für PtX-Anlagen allein aufgrund des knappen CO₂-Angebots kaum in Frage. Dagegen ist der Import von PtX-Produkten aus dem Ausland, wo die Produktion durch hervorragende Erzeugungsbedingungen für grünen Strom in Kombination mit Direct Air Capture kosteneffizient darstellbar ist, ein entscheidender Teil der Energie- und Rohstoffversorgung eines klimaneutralen Deutschlands.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend sind die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises dargestellt:

Tabelle 80: Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises (netto)

812, 817, 822	Personalkosten	192.745,54 €
843	Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	19.497,57 €
846	Dienstreisen	1.168,73 €

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die hier durchgeführten Forschungsarbeiten zeigen die Potenziale für mögliche zukünftige PtX-Standorte hinsichtlich des CO₂-Bedarfs auf. Außerdem wurden die Zukunftsabschätzungen gebündelt, sodass zeitliche Aussagen zu CO₂-Angebot und –Bedarf möglich sind. Beides stellt wichtige Säulen für die Planung von PtX-Anlagen in den kommenden Jahren dar.

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren in Anbetracht des erzielten Endergebnisses angemessen. Es wurde mit dem notwendigen Personalaufwand und moderaten Kosten eine erhebliche Datenbasis sowie ein Know-how-Zuwachs erarbeitet. Beides kann in zukünftigen Projekten als Grundlage für erste Planungen dienen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der Nutzen des Projektes wird in der Verwertbarkeit der Daten für die deutschlandweite Planung von PtX-Projekten oder anderen Anlagen mit CO₂-Bedarf hinsichtlich der Standortsuche gesehen. Ebenso können die erzielten Ergebnisse zum Vergleich der Abschätzungen des gesamten deutschen CO₂-Bedarfs und –Ausstoßes dienen.

Eine direkte Weiterverwendung der Datenbasis sowie der Methodik findet voraussichtlich im Reallabor H2-Wyhlen¹ statt. Hier sollen Erkenntnisse aus dem Reallabor auf andere Standorte übertragen werden und dadurch Standorte für PtX identifiziert werden. Des Weiteren gibt es derzeit mehrere Ansätze für weiterführende Projekte. Einerseits steht zur Diskussion die Ergebnisse in einer Art interaktiven Karte der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Andererseits wird aktuell mit der Technischen Universität München - Professur für Regenerative Energiesysteme – eruiert, ob die erarbeiteten Daten in einem weiteren Projekt spezifiziert und mit einer nachgelagerten Simulation erweitert werden könnten. Ebenfalls gibt es hier Überlegungen die Daten mit einer Lebenszyklusanalyse zu verbinden.

¹ Verbundprojekt Reallabor der Energiewende für Sektorkopplung und Wasserstoff-Technologien Grenzach-Wyhlen

2.5 Vorangegangener Fortschritt an anderen Stellen während der Durchführung des Vorhabens

Das Fraunhofer IEE veröffentlichte im Zuge des DeV-KopSys-Projektes im Juni 2021 einen PtX-Atlas. Dieser stellt eine interaktive WebGIS-Anwendung dar, in welcher für verschiedene Länder der Welt die PtX-Potenziale betrachtet werden können. Jedoch schließt dies einerseits Europa und dadurch auch Deutschland nicht mit ein. Andererseits werden CO₂-Potenziale hier nicht betrachtet. Dennoch überschneiden sich die Ergebnisse zumindest in der Standortsuche für PtX-Anlagen. Zur tatsächlichen PtX-Standortauswahl sollte idealerweise eine Kombination der Vorgehensweisen und Ergebnisse angestrebt werden, in der die Weltkarte, inkl. Europa, mit den benötigten Input-Faktoren, inkl. CO₂, aufgezeigt wird. Dies bedürfe jedoch einer ähnlichen Datenlage hinsichtlich des standortspezifischen CO₂-Ausstoßes. Evtl. könnte eine Konzentration auf Länder mit hohem PtX-Potenzial und möglichen Importmöglichkeiten eine gangbare Simplifizierung darstellen.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

3 Literaturverzeichnis

1. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWI). *Achter Monitoring-Bericht „Die Energie der Zukunft“* [online]. Berlin, [kein Datum]. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/achter-monitoring-bericht-energie-der-zukunft.pdf?__blob=publicationFile&v=32
2. BUNDEMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWI). *Zeitreihen Erneuerbare Energien*. [online]. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen/zeitreihen.html
Zeitreihen Erneuerbare Energien
3. ZENTRUM FÜR SONNENENERGIE- UND WASSERSTOFF-FORSCHUNG BADEN WÜRTTEMBERG (ZSW). *Technologiebericht 4.2a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende* [online]. 2018. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7059/file/7059_Power-to-gas.pdf
4. ÖKO-INSTITUT E.V. (OEKO.DE). *eMobil 2050 - Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*. [online]. September 2014. [Zugriff am: 8. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/publikationen/p-detailsDas>
Das Öko-Institut ist eine der europaweit führenden, unabhängigen Forschungs- und Beratungseinrichtungen für eine nachhaltige Zukunft.
5. UMWELTBUNDESAMT (UBA). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. [online]. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>
6. DEUTSCHE EMISSIONSHANDELSSTELLE (DEHST). *Treibhausgasemissionen 2019 Emissionshandlungspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019)* [online]. 2020. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=4
7. ÜBERTRAGUNGSNETZBETREIBER (ÜNB). *Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, „Jahresabrechnungen nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG-*

- Jaresabrechnungen 2000 bis 2020)“. [online]. [Zugriff am: 3. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.netztransparenz.de/EEG/Jahresabrechnungen>
8. UMWELTBUNDESAMT (UBA). Spezifische Emissionsfaktoren für den deutschen Strommix. *Umweltbundesamt* [online]. 4. Oktober 2016. [Zugriff am: 3. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/spezifische-emissionsfaktoren-fuer-den-deutschen>
 9. UMWELTBUNDESAMT (UBA). Datenbank „Kraftwerke in Deutschland“. *Umweltbundesamt* [online]. 30. Juli 2013. [Zugriff am: 3. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland>
 10. QGIS. Open-Source-Geographisches-Informationssystem (QGIS). [online]. [Zugriff am: 7. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.qgis.org/de/site/>
 11. ÖKO-INSTITUT E.V. und FRAUNHOFER ISI. *Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht* [online]. 2015. [Zugriff am: 26. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf>
 12. DEUTSCHE EMISSIONSHANDELSSTELLE (DEHST). *Treibhausgasemissionen 2020 Emissionshandlungspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2020)* [online]. 2021. Verfügbar unter: https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=4
 13. VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V (VDZ). *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ zeigt mögliche Transformationspfade für eine klimaneutrale Zukunft bis ins Jahr 2050.* [online]. [kein Datum]. [Zugriff am: 11. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.vdz-online.de/dekarbonisierung>
 14. VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V (VDZ). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020* [online]. 2021. Verfügbar unter: file:///C:/Users/mwalker/AppData/Local/Temp/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf
 15. ZSW. *ZSW CO2 Datenbank.*
 16. AGORA ENERGIEWENDE. *Klimaneutrales Deutschland In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals* [online]. 2020. [Zugriff am: 20. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf
 17. UMWELTBUNDESAMT (UBA). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE* [online]. 2019. [Zugriff am: 4. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_dt.pdf
 18. DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR (DENA). *Einspeiseatlas von Biomethanaufbereitungsanlagen.* [online]. [Zugriff am: 8. Februar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.biogaspartner.de/einspeiseatlas/>
 19. BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN BIOETHANOLWIRTSCHAFT E.V. *Bioethanolwerke in Deutschland. BDBe* [online]. [Zugriff am: 25. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.bdbe.de/biokraftstoff-bioethanol/zellulose-ethanol> Die deutschen Bioethanolhersteller

verarbeiten in erster Linie Rohstoffe aus ihrer Region und bieten den heimischen Landwirten so eine zusätzliche Absatzmöglichkeit für ihre Produkte. Arbeitsplätze, Bioethanolwerke in Deutschland, Jahreskapazität, Bioethanolproduktion, Zellulose-Ethanol

20. MA, Jianguo, SCOTT, Norman R., DEGLORIA, Stephen D. und LEMBO, Arthur J. Siting analysis of farm-based centralized anaerobic digester systems for distributed generation using GIS. *Biomass and Bioenergy*. 1. Juni 2005. Jg. 28, Nr. 6, S. 591–600. DOI 10.1016/j.biombioe.2004.12.003.

4 Anhang

AP1.1.3.1_Datenbankquellen

Datenquelle	Quelle	Datenbasis	Datenstand	Datensatz	Anlagenarten			Anlagengröße [MW]			Energieträger		Leistung		KWK	Strom		Schadstoffe		
				original	Industrie	Kraftwerke	EE	≥ 100	≤ 20	< 20	Haupt-	Neben-	elektrisch	thermisch		Erzeugung	EEG-Vergütung	Menge	Art	
Konventionelle & Erneuerbare Energien Kraftwerke																				
Emissionshandel	www.dehst.de/DE/startseite/startseite-node.html	ca. 1870 Anlagen > 20 MW mit emissionshandelspflichtigen Tätigkeiten	Jan 19	X	X	X		X	X										X	X
Pollutant Release and Transfer Register (E-PRTR)	www.thru.de/thru/de/downloads/	ca. 5000 Betriebe; Tätigkeit nach europäischen E-PRTR-Verordnung aufgelistet sind	Mrz 19	X	X	X		X	X	Abhängig von der Schadstoffreisetzungsmenge									X	X
BNetzA-Kraftwerksliste	www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html	Kraftwerke > 10 MW	Jan 21	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X		X			
UBA_Kraftwerksliste > 100MW	www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland		Jan 21	X		X	X	X			X		X	X	X					
UBA_Kraftwerksliste > 10MW	Nicht frei verfügbar, muss direkt bei UBA angefordert werden (Ansprechpartner im UBA: Ludger Schrempf, <Ludger.Schrempf@uba.de>)		Jan 21	X		X	X	X	X	≥ 10	X		X	X	X					
Marktstammdatenregister	www.marktstammdatenregister.de/MaSTR	alle Kraftwerke (EE & konventionell)	Jan 21	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X			
ausschließlich Erneuerbare-Energien-Kraftwerke																				
Anlagenregister	BNetzA	EE-Anlagen ab 08.2014	Jan 19	X			X			X	X		X					X		
EEG-Biomasseanlagen	Übertragungsnetzbetreiber und	Anlagen mit EEG-Biomassevergütung	Sep 20				X			X	X		X		X	X	X			
Biomethaneinspeiseanlagen	Verband: www.biogaspartner.de/einspeiseatlas/ und ZSW (eigene Recherche)		Feb 21				X			X	X									
Bioethanolanlagen	Verband: www.bdbe.de/biokraftstoff-bioethanol/zellulose-ethanol und ZSW (eigene Recherche)	Bioethanolproduktionsanlagen	Feb 21				X			X	X									
Sonstige																				
Emissionsfaktoren	UBA: www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#textpart-5 und ZSW (eigene Recherche)		Mrz 21		X	X	X													
Gemeindeschlüssel				X																