



# Standortanalyse für die Kohlenstoffbereitstellung zur Herstellung von reFuels in Deutschland

Studie im Rahmen des Projektes INNOFUELS, ISP 7

---



21. August 2024

# Standortanalyse für die Kohlenstoffbereitstellung zur Herstellung von reFuels in Deutschland

Studie im Rahmen des Projektes INNOFUELS, ISP 7

Leitung des Forschungszentrums:

Prof. Dr. Birgit Scheppat

Publikation erstellt von:

Max Rudelt

unter Mitarbeit von:

Prof. Dr. Thomas Heimer

Karsten Jädtke

Bruno Nemec

Daniel Schilffarth





## Inhaltsverzeichnis

---

Abbildungsverzeichnis .....	2
Tabellenverzeichnis .....	2
Zusammenfassung .....	3
1 Einleitung .....	4
2 Deutsche Pipeline-Netze .....	5
2.1 Erdgas .....	5
2.2 Erdöl .....	6
2.3 Wasserstoff .....	8
3 Identifikation emissionsintensiver Tätigkeiten .....	9
3.1 Kohlenstofffußabdruck einer Batteriezellfertigungsanlage .....	9
3.2 THG-Emission des deutschen Energie- und Industriesektors .....	9
4 Standorte mit langfristig unvermeidbarer THG-Emission .....	11
4.1 Zementherstellung mit Klinkererzeugung .....	11
4.1.1 Bestimmung der anlagenbezogenen Kohlenstoffemission bei der Klinkererzeugung .....	12
4.1.2 CO <sub>2</sub> -Emission ausgewählter Standorte .....	13
4.2 Batteriezellenfertigung .....	14
4.3 Raffinerien .....	15
4.4 Roheisen- und Stahlherstellung .....	17
4.5 Chemieparcs .....	17
5 Interpretation der Ergebnisse der empirischen Erhebung .....	21
6 Schlussbetrachtung .....	24
7 Anhang .....	25
8 Literaturverzeichnis .....	28



## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1	Zusammengeführte Karte mit Standorten hoher Verfügbarkeit an Kohlen- und Wasserstoff .	3
Abbildung 2	Anteile deutscher Treibhausgasemission nach KSG-Sektoren .....	4
Abbildung 3	Deutsches Erdgasnetz.....	5
Abbildung 4	Deutsches Erdölnetz.....	6
Abbildung 5	Deutsches Wasserstoff-Pipeline-Netz .....	8
Abbildung 6	Standorte deutscher Zementwerke .....	12
Abbildung 7	Klinkerproduktionsmenge Deutschland.....	13
Abbildung 8	Standorte deutscher Batteriezellfertigungsanlagen .....	15
Abbildung 9	Die zwölf größten Raffinerien Deutschlands .....	16
Abbildung 10	Stahlindustrie Deutschland.....	17
Abbildung 11	Die zwölf emissionsintensivsten Chemieparks Deutschlands.....	18
Abbildung 12	Verteilung der Emissionsquellen deutscher Chemieparks .....	19
Abbildung 13	Zusammengeführte Karte .....	21
Abbildung 14	Standorte mit hoher Verfügbarkeit an Kohlen- und Wasserstoff.....	22

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1	Deutsche THG-Emission nach Tätigkeiten .....	10
Tabelle 2	Emissionsübersicht deutscher Chemieparks .....	19
Tabelle 3	Spezifikationen der zwölf größten Raffinerien Deutschlands.....	25

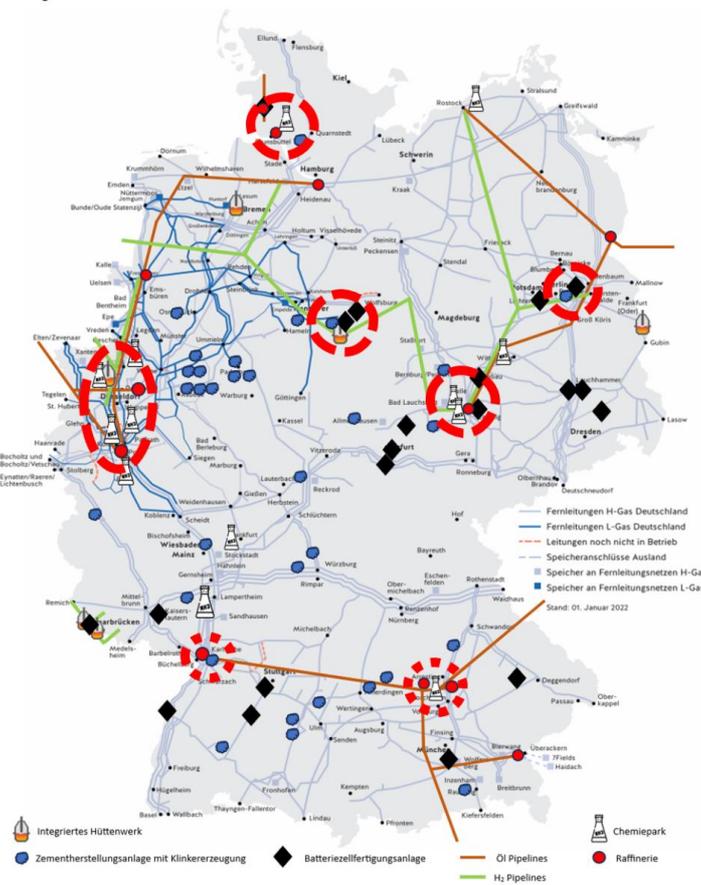
## Zusammenfassung

Dieses Paper analysiert die bestehende deutsche Infrastruktur, welche für die lokale Bereitstellung von Kohlenstoff und Wasserstoff zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt werden kann.

Einleitend werden fossile Leitungssysteme analysiert, da diese das Potenzial zur Umrüstung auf einen Betrieb mit Wasserstoff aufweisen und unabhängig von kommerziellen Entscheidungen einzelner Anlagenbetreibern langfristig betrieben werden. Die Betrachtung der Leitungsnetze wird durch das 2024 existierende Wasserstoffnetz ergänzt, da Wasserstoff für die reFuel-Produktion benötigt wird und der Anschluss an ein Verteilungsnetz einen nachhaltigen Standortvorteil darstellt. Darauf folgt die Analyse emissionshandelspflichtiger Tätigkeiten auf Basis des 2023 von der deutschen Emissionshandelsstelle veröffentlichten VET-Berichts. Hierbei werden besonders kohlenstoffintensive Emittenten ermittelt und bezüglich der Unvermeidbarkeit der Kohlenstoffemission analysiert.

Die Standorte von Raffinerien, Chemieparks, Batteriezellfertigungsanlagen, integrierten Hüttenwerken und Zementwerken mit Klinkerherstellung werden bestimmt und mit den Leitungsnetzen auf einer zusammenführenden Karte abgebildet. Abbildung 1 zeigt diese zusammengeführte Karte. Auf Basis dieser Karte können Standorte mit einem theoretisch langfristigen Angebot an lokal verfügbaren Kohlenstoffen identifiziert werden. Die Gebiete um Köln und Düsseldorf, Leipzig sowie Berlin weisen zahlreiche langfristig unvermeidbare Kohlenstoff-Emittenten auf und verfügen über einen Anschluss an das Wasserstoffnetz, wodurch sie sich als potenzielle Standorte zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe eignen.

Abbildung 1 Zusammengeführte Karte mit Standorten hoher Verfügbarkeit an Kohlen- und Wasserstoff



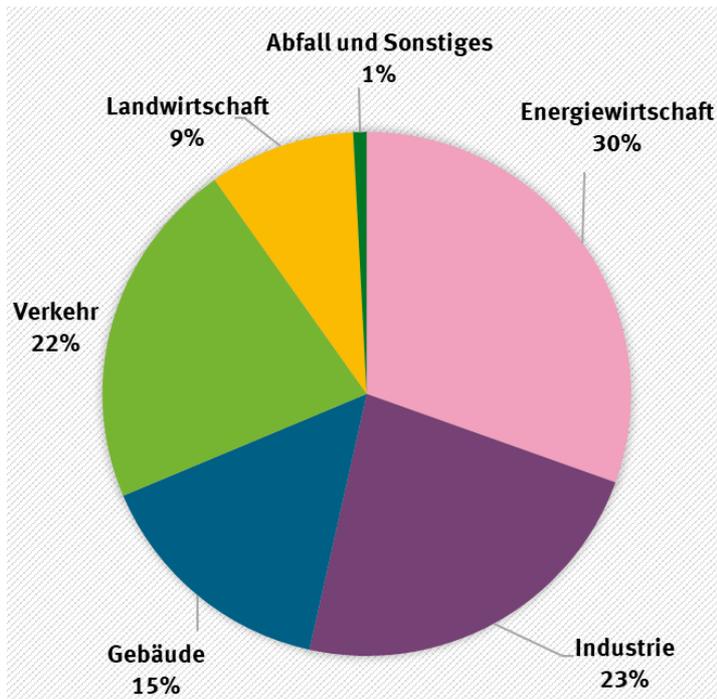
Quelle: (BMWK, 2022)

# 1 Einleitung

---

Der deutsche Verkehrssektor verursachte 2023 146 Mio. t Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (CO<sub>2e</sub>). Abbildung 2 zeigt die Anteile der Klimaschutzgesetz-Sektoren an der gesamtdeutschen Treibhausgasemission im Jahr 2023. (UBA, 2024)

Abbildung 2 Anteile deutscher Treibhausgasemission nach KSG-Sektoren



Quelle: (UBA, 2024), ohne internationalen Verkehr, 2023

Der deutsche Verkehrssektor trägt 22 % zu der gesamtdeutschen THG-Emission bei und ist der Sektor mit der geringsten Emissionsreduzierung gegenüber 1990. (UBA, 2024)

Durch den Einsatz von synthetischen Kraftstoffen kann die Emission klimaschädlicher Gase im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen reduziert werden. Zum Erreichen von Klimaneutralität strebt die Bundesregierung einen Kohlenstoffkreislauf an (Bundesregierung, 2021). Dabei soll der in Kraftstoffen enthaltene Kohlenstoff aus der Luft stammen. Der Einsatz von Biomasse oder luftabscheidenden Verfahren ermöglicht eine PtL-Produktion aus atmosphärischem Kohlenstoff. Das Bereitstellen von Kohlenstoff aus luftabscheidenden Verfahren, dem Direct-Air-Capture (DAC), ist insbesondere bei einem geringen Kohlenstoffgehalt energieaufwändig und somit kostenintensiv. Weitere Hürden bestehen in der technologischen Weiterentwicklung und Skalierung. Kohlenstoff aus biogenen Verfahren ist dezentral verfügbar. Das erschwert die Nutzung in einem großen Maßstab. (Bundesregierung, 2021)

Kurzfristig sieht die Bundesregierung das Nutzen von Kohlenstoff aus fossilen Verbrennungsprozessen vor (Bundesregierung, 2021). Dabei sollen Produktionsprozesse mit unvermeidbarer Kohlenstoffemission bevorzugt werden, sofern die Reduktion der Anlagenemissionen dadurch nicht gehemmt wird. Das wird jedoch nur dann möglich sein, wenn dadurch für die Emittenten ein längerfristig verlässlicher Business Case entsteht.

Dieses Paper identifiziert Standorte innerhalb Deutschlands, welche sich mittelfristig als Produktionsstandort für reFuels auf Basis der lokalen Kohlenstoffverfügbarkeit eignen. Zuerst werden fossile Leitungssysteme recherchiert. Darauf folgt die Analyse emissionsintensiver Tätigkeiten und deren Standorte innerhalb Deutschlands.

## 2 Deutsche Pipeline-Netze

Um geeignete Standorte für die PtL-Herstellung zu identifizieren, ist die Analyse der deutschen Energieversorgungsinfrastruktur notwendig. Es liegt nahe, eine PtL-Anlage in der Nähe von Öl- sowie Erdgas- und künftigen Wasserstoffleitungen zu errichten. Zum einen wird Wasserstoff neben CO<sub>2</sub> als Ausgangsstoff für die reFuels-Produktion benötigt. Für den Transport von beidem können bestehende Erdgasleitungen prinzipiell umgerüstet werden (Wachsmuth et al., 2023). Zum anderen könnten bestehende Ölleitungen künftig reFuels oder deren Vorstufen, beispielsweise Methanol, transportieren (Götz et al., 2024; Kang, 2021). Es folgt jeweils eine Standortanalyse des deutschen Erdgas- und Erdölnetzes sowie der deutschen Wasserstoffpipelines.

### 2.1 Erdgas

Als erstes wird das Verteilungsnetz von Erdgas in Deutschland betrachtet. Dem Erdgasnetz kann Wasserstoff zugeführt werden, welches nach dem Transport abgetrennt und für die PtL-Produktion verwendet werden kann. Weiterhin eignen sich Gasleitungen für die Umrüstung auf einen vollständigen Betrieb mit Wasserstoff. Bei der Auswahl eines geeigneten Standorts für die PtL-Produktion ist der Anschluss an das Erdgasnetz von Vorteil.

Abbildung 3 Deutsches Erdgasnetz



Quelle: (BMWK, 2022)

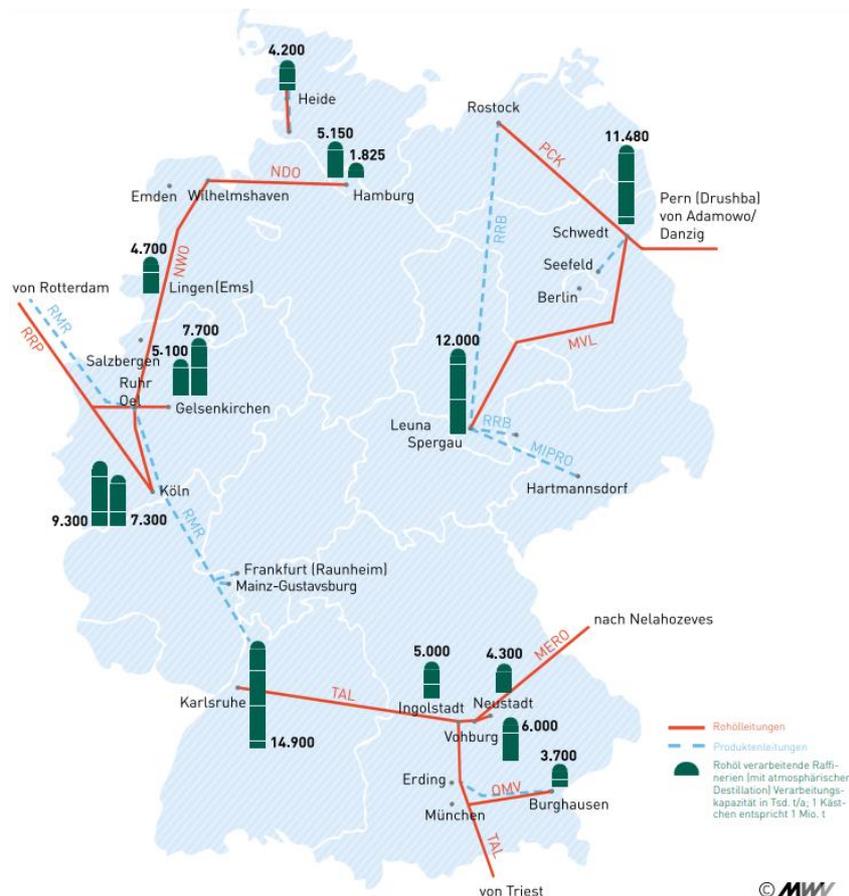
Abbildung 3 zeigt eine Karte mit den deutschen Fernleitungen, in welchen Erdgas geführt wird. Leitungen, die L-Gas<sup>1</sup> führen, sind in der Abbildung dunkel hervorgehoben. Das deutsche Erdgasnetz ist stark ausgebaut und verläuft durch alle Bundesländer. Das Leitungsnetz erfüllt die Anforderung Abnehmer wie Raffinerien, Kraftwerke und Privathaushalte zu beliefern sowie den Transport zwischen Nachbarländern zu ermöglichen.

Aufgrund der komplexen Struktur des deutschen Erdgasnetzes wird Abbildung 3 als Basiskarte für eine fusionierte Übersichtskarte deutscher Infrastrukturen, die für eine Kohlenstoffbereitstellung infragekommen, festgelegt.

## 2.2 Erdöl

Deutsche Erdölleitungen transportieren Rohöl aus dem Ausland in das Landesinnere zur Verarbeitung in Raffinerien und dabei erzeugte Produkte weiter. Sie könnten künftig für die Verteilung synthetischer Kraftstoffe genutzt oder ebenfalls zu Wasserstoffleitungen umgebaut werden, um Wasserstoff für die PtL-Produktion bereitzustellen. Es folgt die Analyse des deutschen Erdölnetzes. Abbildung 4 ist eine Karte, auf der die Erdölleitungen Deutschlands verzeichnet sind.

Abbildung 4 Deutsches Erdölnetz



Quelle: (Mineralölwirtschaftsverband e.V., 2021)

<sup>1</sup> L-Gas („low calorific gas“) ist im Vergleich zu H-Gas („high calorific gas“) energieärmer. In zahlreichen Bundesländern findet eine Umstellung auf den H-Gas-Betrieb bis 2029 statt. (BMWK, 2024)

Die deutschen Erdölleitungen führen Erdöl aus den Nachbarländern zu deutschen Raffinerien. Es existieren drei Verbundleitungen. Ein Erdölleitungsnetz verläuft von Österreich und Tschechien nach Bayern und versorgt zusätzlich Karlsruhe. Die anderen Leitungen verlaufen an der niederländischen Grenze von Köln nach Hamburg und von der polnischen Grenze in Brandenburg nach Rostock und Leuna.

## 2.3 Wasserstoff

Das Herstellen von reFuels erfordert Wasserstoff. Die PtL-Standortanalyse wird im Sinne einer Gesamtübersicht um das Wasserstoffnetz ergänzt. Abbildung 5 zeigt eine Karte Deutschlands, auf der die im Jahr 2024 existierenden Wasserstoffleitungen und -projekte eingetragen sind.

Abbildung 5 Deutsches Wasserstoff-Pipeline-Netz

### H2 ERZEUGUNG

- 1 AquaVentus, Helgoland, RWE Renewables
- 2 HGH, Hamburg – Vattenfall/Shell/ Mitsubishi/Wärme Hamburg
- 3 Clean Hydrogen Coastline, NI – EWE/EWE Netz/swb
- 4 GET H2, Lingen – RWE Generation
- 5 GreenMotionSteel, Duisburg – Air Liquide DE
- 6 MAPEVA, NRW – Neumann&Esser
- 7 doing hydrogen, Rostock – APEX Energy
- 8 doing hydrogen, MV, BB, SA – ENERTRAG
- 9 Green Hydrogen Hub, Leuna Linde/Total
- 10 H2-SARA, Dresden – Sunfire
- 11 LHvE Erzeugung, Leipzig – EDL
- 12 LHvE System, Leipzig – LVV
- 13 Projektname noch nicht zur Veröffentlichung freigegeben
- 14 Hydrohub Fenne, Völklingen – Siemens Energy/STEG
- 15 Hy4Chem, Ludwigshafen – BASF
- 16 Elyance, Erlangen – Siemens Energy
- 17 GH@BD, DE/AUT – Hydrogenious
- 18 HyTechHafen – Rostock – Rostock PORT GmbH
- 19 Bosch Power Units, BW, BY – Robert Bosch

### INFRASTRUKTUR

- 20 AquaVentus, Helgoland, GASCADE
- 21 HH-WIN – Gasnetz Hamburg
- 22 Clean Hydrogen Coastline, NI – EWE/EWE Netz/EWE Gasspeicher
- 23 Green Crane, Lingen – Hydrogenious
- 24 Hyperlink – Gasunie DE
- 25 GET H2, Gronau – RWE Gas Storage West
- 26 GET H2 – Nowega
- 27 GET H2 – Open Grid Europe
- 28 GET H2 – Thyssengas
- 29 doing hydrogen – GASCADE
- 30 doing hydrogen – ONTRAS
- 31 Green Octopus MD – ONTRAS
- 32 Green Octopus MD, Bad Lauchstädt – VNG Gasspeicher
- 33 LHvE Transport, Leipzig – Ontras
- 34 mosaHyc – Creos DE

### NUTZUNG INDUSTRIE

- 35 Hyscale100, Kreis Dithmarschen-Holcim Deutschland/Hynamics Deutschland/Ørsted W Power Germany/Raffinerie Heide
- 36 H2H, Hamburg – Arcelor Mittal
- 37 Clean Hydrogen Coastline, Bremen – Arcelor Mi
- 38 DRIBE2, Bremen, EH-Arcelor Mittal
- 39 LGH2, Lingen-BP
- 40 LGH2, Lingen-Oersted
- 41 GET H2, Salzgitter- Salzgitter Flachstahl
- 42 e-Methanol Projekt, Stade – DOW
- 43 tKH2steel, Duisburg – thyssenkrupp steel
- 44 Projektname noch nicht zur Veröffentlichung freigegeben
- 45 Projektname noch nicht zur Veröffentlichung freigegeben
- 46 doing hydrogen, BB-ENERTRAG
- 47 doing Hydrogen, Rüdersdorf – CEMEX
- 48 H2SYNGAS, Dillingen – SHS/Saarstahl
- 49 BayH2, Neustadt- Vattenfall Innovation/Bayern
- 50 RHYME Bavaria, Burghausen – Wacker Chemi

### NUTZUNG MOBILITÄT

- 51 SENECA – H2 MOBILITY DE (bundesweites H2-Tankstellennetz inkl. weiterer Partner)
- 52 BMW Produkt, München – Bayerische Motoren Werke
- 53 Brennstoffzellen Gigafactory, Region Kirchheim-Teck – cellcentric GmbH & Co KG
- 54 PEGASUS, Wörth/deutschlandweit – Daimler Truck
- 55 NextGen HD-Stack, Dettingen/ErmsErlingKlinger
- 56 Clean Hydrogen Coastline, Norddeutschland – FAUN Umwelttechnik
- 57 NextGadila, Weinheim – Freudenberg Performance Materials
- 58 WIPLIN, Hamburg-Airbus Operations
- 59 H2LoAD, Hamburg-Hamburger Hafen und Logistik
- 60 HyPA, Hamburg – Hamburg Port Authority
- 61 H2 HADAG, Hamburg – HADAG Seetouristik und Fahrdienst
- 62 H2SB, Hamburg – Green Plug

— Pipeline



Quelle: (BMW, 2021)

Das deutsche Wasserstoffnetz verläuft 2024 größtenteils durch den Norden Deutschlands. Wasserstoff aus den Niederlanden wird dadurch an das Rheinland, Hamburg, Jena, Berlin und Rostock befördert. Es versorgt Raffinerien, Chemieparks und weitere Abnehmer wie den Stahlproduzenten Salzgitter AG. Süddeutschland soll mit dem Wasserstoffkernnetz bis 2032 ff. angebunden werden. (Bundesnetzagentur, 2024)

### 3 Identifikation emissionsintensiver Tätigkeiten

---

In diesem Kapitel werden die emissionsintensivsten Tätigkeiten Deutschlands, gemessen an der jährlichen durchschnittlichen Emission pro Anlage, ermittelt. Die Datengrundlage bietet der VET-Bericht für das Jahr 2022 (UBA & DEHSt, 2023). Für das Festlegen eines unteren Schwellenwerts, ab dem eine Tätigkeit im Rahmen dieses Berichts als besonders emissionsintensiv gilt und einer Standortanalyse unterzogen wird, dient die jährliche durchschnittliche THG-Emission einer Batteriezellfertigungsanlage als Referenzwert. Hierfür wird im nächsten Schritt die Emission einer durchschnittlichen deutschen Batteriezellfertigungsanlage bestimmt.

#### 3.1 Kohlenstofffußabdruck einer Batteriezellfertigungsanlage

Das Herstellen einer Autobatterie ist ein emissionsintensiver Prozess und bedingt einen signifikanten Anteil der durch die gesamte Nutzung eines Elektrofahrzeugs verbundenen THG-Emission. Die genaue Menge emittierten CO<sub>2</sub>-Äquivalents pro kWh Batterie-Speicherkapazität ist werks- und zelltypabhängig. Durch effiziente Wärmenutzung und einen steigenden Anteil des erneuerbaren Energieanteils des verwendeten Strommix sinkt die freiwerdende THG-Emission bei der Batteriezellenproduktion, wodurch sich Potenziale zur Reduzierung der produktionsbedingten Emissionen ergeben. Die spezifischen Anlagenwerte gelten als kommerziell sensible Daten, weshalb sie Großteils nicht veröffentlicht sind. Der Wertebereich zahlreicher Studien liegt zwischen 61 und 111 kg CO<sub>2</sub>e/kWh Speicherkapazität. (Hoekstra & Steinbruch, 2020; Qiang Dai et al., 2019) Andere Studien geben Werte bis über 250 kg CO<sub>2</sub>e/kWh an (Deutscher Bundestag, 2020). Die produktionsbedingte Emission variiert je nach Wahl der betrachteten Systemgrenze, Anlagenaufbau, Zelltyp und Auslastung der Anlage. Die Emissionen durch den Strombezug variieren stark zwischen den Nationen, in denen Autobatteriezellen hergestellt werden. Auch bei einer Herstellung durch das europäische Stromnetz trägt die strombedingte Emission über die Hälfte zu den produktionsbedingten Emissionen bei. Prozessbedingte Emissionen entstehen durch das Herstellen der Kathode und Anode, sowie die Bereitstellung der Primärressourcen wie Aluminium, Nickel, Kobalt und Lithium. Je nach Zelltyp werden andere Materialien benötigt. (Deutscher Bundestag, 2020) Bereits im derzeitigen Jahr 2024 können batteriebetriebene PKWs eine geringere Emission über den Lebenszyklus im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen der vergleichbaren Fahrzeugklasse aufweisen. Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren bietet das Herstellen von Batteriezellen ein hohes Potenzial zur Emissionsreduzierung, was in den nächsten Jahrzehnten in einer Optimierung oder Veränderung des Herstellungsprozesses resultieren wird. (Hoekstra & Steinbruch, 2020) Es ist somit anzunehmen, dass die im Folgenden bestimmte energiebereinigte, aktuell unvermeidbare THG-Emission in den nächsten Jahrzehnten sinken wird.

Die Kohlenstoffemission bei der Batterieherstellung beläuft sich nach Experteneinschätzung von „Agora Energiewende“ auf etwa 145 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. Die energiebedingte Emission liegt bei etwa 80 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. (Deutscher Bundestag, 2020) Bei einem vollständig erneuerbaren Stromnetz resultiert daraus eine unvermeidbare Emission von etwa 65 kg CO<sub>2</sub>e pro kWh Speicherkapazität, welche die Bereitstellung der Rohstoffe inkludiert. Bei einer Batteriespeicherkapazität von 100 kWh führt das zu einem Kohlenstofffußabdruck von 6,5 t CO<sub>2</sub>e pro Batterie. Übliche Produktionsmengen von Batteriezellfertigungen in Deutschland sind momentan 8 bis 20 GWh (Dietmar Poll, 2023). Daraus ergibt sich eine jährliche Kohlenstoffemission von 0,52 bis 1,3 Mio. t pro Batteriezellfertigungsanlage. Für die Auswahl weiterer emissionsintensiver Tätigkeiten wird die durchschnittliche jährliche Mindestemission pro Anlage bei 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>e festgelegt.

#### 3.2 THG-Emission des deutschen Energie- und Industriesektors

Tabelle 1 listet die THG-Emissionen emissionshandlungspflichtiger Tätigkeiten des deutschen Energie- und Industriesektors aus dem VET-Bericht der DEHSt für das Jahr 2022 auf. Die Tabelle wurde durch die durchschnittliche THG-Emission einer Anlage innerhalb des Tätigkeitsfeldes ergänzt. In der Tabelle sind



Tätigkeiten hervorgehoben, welche eine durchschnittliche jährliche Anlagenemission über 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>e aufweisen.

Tabelle 1 Deutsche THG-Emission nach Tätigkeiten

Sektor	Tätigkeit	Anzahl der Anlagen	Gesamt-THG-Emission [kt CO <sub>2</sub> e]	Durchschnittliche THG-Emission pro Anlage [kt CO <sub>2</sub> e]
Energie	<b>Energieumwandlung über 50 MW</b>	445	235.634	530
	Energieumwandlung 20-50 MW	359	4.695	13
	Energieumwandlung 20-50 MW, andere Brennstoffe	13	63	5
	Antriebsmaschinen (Motoren)	3	86	29
	Antriebsmaschinen (Turbinen)	53	1.274	24
	Gesamt	873	24.1752	277
Industrie	Verbrennung	80	2.337	29
	<b>Raffinerien</b>	22	23.470	1.067
	<b>Roheisen- und Rohstahlherstellung</b>	35	29.025	829
	<b>Kokereien</b>	4	3.770	943
	Verarbeitung von Metallerzen	1	62	62
	<b>Herstellung von Roheisen und Stahl</b>	30	25.193	840
	Verarbeitung von Eisenmetallen	83	4.058	49
	Herstellung von Primäraluminium	7	600	86
	Verarbeitung von Nichteisenmetallen	28	1.452	52
	<b>Herstellung von Zementklinker</b>	35	18.763	536
	Herstellung von Kalk	56	8.663	155
	Herstellung von Glas	68	3.691	54
	Herstellung von Keramik	119	1.747	15
	Herstellung von Mineralfasern	8	400	50
	Herstellung von Gips	9	275	31
	Herstellung von Zellstoff	4	162	41
	Herstellung von Papier	130	4.572	35
	Herstellung von Industrieruß	4	568	142
	Herstellung von Salpetersäure	8	337	42
	Herstellung von Adipinsäure	3	101	34
<b>Herstellung von Ammoniak</b>	5	3.138	628	



Sektor	Tätigkeit	Anzahl der Anlagen	Gesamt-THG-Emission [kt CO <sub>2</sub> e]	Durchschnittliche THG-Emission pro Anlage [kt CO <sub>2</sub> e]
	Herstellung organischer Grundchemikalien	133	6.919	52
	Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas	15	1.439	96
	Herstellung von Soda	6	487	81
	Gesamt	858	112.202	131
	Gesamt	1.731	353.953	204

Quelle: (UBA & DEHST, 2023)

Die deutsche emissionshandelspflichtige THG-Emission liegt insgesamt bei jährlich 354 Mio. t CO<sub>2</sub>e. Über die Hälfte der THG-Emission wird durch Energieumwandlungsanlagen mit einer Leistung über 50 MW verursacht. Gemessen an der durchschnittlichen jährlichen Emission pro Anlage sind neben den leistungsstarken Energieumwandlungsanlagen Zementklinkeranlagen, Raffinerien inklusive Kokereien, sowie das Herstellen von Ammoniak, Roheisen und -stahl emissionsintensiv und werden im nächsten Kapitel bezüglich derer Unvermeidbarkeit und deren Standorte innerhalb Deutschlands analysiert.

## 4 Standorte mit langfristig unvermeidbarer THG-Emission

Durch die Analyse der Emissionen der einzelnen Sektoren können emissionsintensive Tätigkeiten identifiziert werden. Im Folgenden werden Sektoren näher betrachtet, welche eine durchschnittliche jährliche Emission von über 0,5 Mio. t CO<sub>2</sub>e pro Anlage aufweisen. Es existieren bestimmte wirtschaftliche Tätigkeiten, welche auch auf lange Sicht Treibhausgase emittieren werden, da deren Herstellungsverfahren prozessbedingt unvermeidbare THG-Emissionen freisetzen. Diese Tätigkeiten stellen Punktquellen für hochkonzentriertes CO<sub>2</sub> dar und bieten sich für eine langfristige Verwertung der Kohlenstoffemission zur Herstellung von Kraftstoffen an. Um geographische Synergien zu identifizieren, folgen Karten mit Standorten von Zementwerken mit Klinkerherstellung und von Batteriezellfertigungen in Deutschland. Die Herstellungsprozesse dieser Sektoren sind bisher nicht durch kohlenstoffemissionsfreie Prozesse zu ersetzen. Es folgt die Standortanalyse dieser beiden Tätigkeiten. Darauf folgt die Untersuchung weiterer Standorte emissionsintensiver Industrieanlagen wie Raffinerien, Stahlwerke und Chemieparks.

### 4.1 Zementherstellung mit Klinkererzeugung

Ausschließlich Zementwerke bei denen Klinker erzeugt wird, weisen reaktionsbedingt eine langfristig unvermeidbare Kohlenstoffemission auf (HeidelbergCement AG, 2023; UBA, 2020). Aufgrund der Unvermeidbarkeit der CO<sub>2</sub>-Emission bei der Klinkererzeugung ergibt sich ein langfristiges Potenzial zur Bereitstellung von Kohlenstoff. Es folgt eine Karte mit den Zementwerken Deutschlands. Für diese Analyse ist die Betrachtung der Zementwerke mit Klinkererzeugung von Relevanz. In Abbildung 6 sind die Standorte deutscher Zementwerke mit Klinkererzeugung braun markiert.

Abbildung 6 Standorte deutscher Zementwerke



Quelle: (VDZ e.V., 2020)

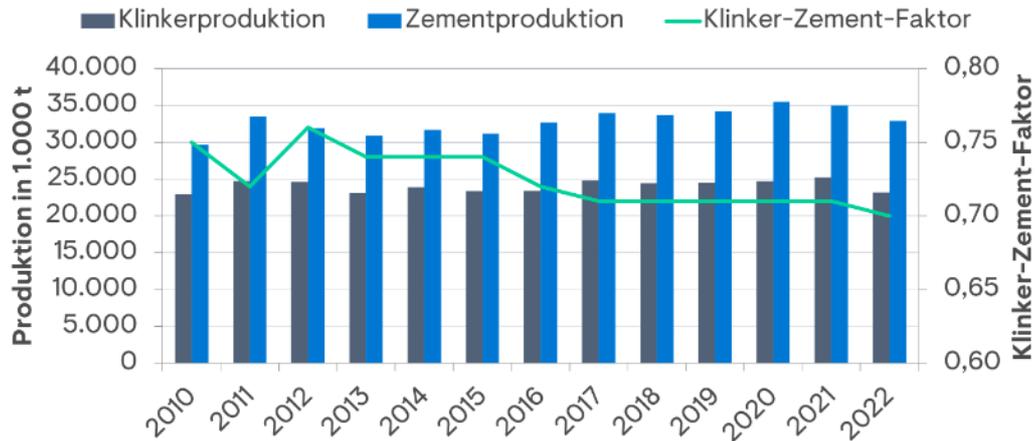
Auf dieser Deutschlandkarte sind 33 klinkererzeugende Zementwerke eingetragen. Sie sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt und vermehrt in Mittel- und Süddeutschland.

#### 4.1.1 Bestimmung der anlagenbezogenen Kohlenstoffemission bei der Klinkererzeugung

Laut Thyssenkrupp besteht bei der Klinkererzeugung eine prozessbedingte Emission von 790 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Klinker (thyssenkrupp, 2024). Dieser Wert beinhaltet die Kohlenstoffemission durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe für die Energiebereitstellung. Der Energiebedarf des Herstellungsprozesses kann theoretisch durch erneuerbare Energien gedeckt werden. Deshalb sind ausschließlich die durch den Produktionsprozess entstehenden Emissionen als unvermeidbar zu betrachten und werden im Folgenden

bestimmt. Der Anteil, der durch erneuerbare Energien gedeckt werden könnte, wäre auch vorhanden, könnte aber als biogen bezeichnet werden. Abbildung 7 zeigt die jährliche Produktionsmenge von Klinker für Deutschland von 2010 bis 2022.

Abbildung 7 Klinkerproduktionsmenge Deutschland



Quelle: (VDZ e.V., 2023)

Die jährliche durchschnittliche Produktionsmenge von Zementklinker in Deutschland liegt bei 24 Mio. t. Daraus ergibt sich eine Gesamtemission von 19 Mio. t CO<sub>2</sub>. Bei 35 Anlagen (UBA & DEHSt, 2023) ergibt sich eine durchschnittliche Kohlenstoffemission pro Anlage von 540.000 t CO<sub>2</sub>.

Der Anteil der prozessbedingten Emissionen bei der Klinkerherstellung, der durch die Brennung von Rohmehl aus hauptsächlich Kalkgestein entsteht, liegt bei etwa 2/3 (UBA, 2020). Dadurch ergibt sich eine energetisch bereinigte, prozessbedingte Kohlenstoffemission von jährlich durchschnittlich 360.000 t CO<sub>2</sub> pro Anlage.

#### 4.1.2 CO<sub>2</sub>-Emission ausgewählter Standorte

In diesem Kapitel werden einzelne Zementwerke analysiert und deren Kohlenstoffemission bestimmt, um einen Überblick über die Größenordnung der THG-Emission durch die Klinkerherzeugung deutscher Zementwerke zu erhalten. Zur Berechnung der erzeugten Klinkermenge wird der durchschnittliche Klinkerfaktor von 0,73 aus dem Jahr 2019 zugrunde gelegt (UBA, 2020), sofern kein anlagenspezifischer Wert vorliegt. Für die Kohlenstoffemission bei der Klinkerherzeugung werden 790 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Klinker mit zwei Drittel multipliziert, um die Emissionen durch die Erzeugung der Prozessenergie zu exkludieren (thyssenkrupp, 2024; UBA, 2020). Daraus ergibt sich ein standardisierter Emissionsfaktor von 0,527 kg CO<sub>2</sub> pro kg Klinker.

##### Leuna

Das Zementwerk in **Karsdorf** ist 24 km (Luftlinie (LL)) von dem Chemiewerk Leuna entfernt. Es weist eine Produktionsmenge von deutlich über einer Million Tonnen Zement pro Jahr auf (thomas gruppe, 2024). Die Produktionsmenge wird somit auf 1,3 Mio. Tonnen geschätzt. Multipliziert mit dem Klinkerfaktor ergibt sich eine Klinkerproduktionsmenge von etwa 0,95 Mio. Tonnen. Durch die Multiplikation mit dem Emissionsfaktor ergibt sich eine jährliche Menge von 500.000 t CO<sub>2</sub>.

Das Zementwerk in **Bernburg** ist 60 km (LL) von dem Chemiepark in Leuna entfernt. Es weist eine jährliche Emission von 770.000 t CO<sub>2</sub> auf (EU-Kommission, 2024a). Energiebereinigt führt das zu einer prozessbedingten Emission von 513.000 t CO<sub>2</sub>.

##### Ludwigshafen

Das Zementwerk in **Göllheim** ist 29 km (LL) vom BASF-Werk in Ludwigshafen entfernt. Der Klinkerfaktor lag



bei diesem Werk von 2017 bis 2022 bei 82 % (Dyckerhoff GmbH, 2023a). Die Zementmenge liegt bei diesem Werk bei 800.000 t pro Jahr (Dyckerhoff GmbH, 2023a). Es besteht eine Kohlenstoffemission von etwa 720.000 t für beide Drehrohröfen (Dyckerhoff GmbH, 2023a). Durch Multiplikation mit dem allgemeinen Prozessemissionsanteil von zwei Drittel ergibt sich eine prozessbedingte Kohlenstoffemission von 480.000 t.

Das Zementwerk in **Leimen** im Süden Mannheims ist 27 km (LL) von dem BASF-Werk in Ludwigshafen und 40 km (LL) von der Karlsruher MiRO entfernt. Es wurde vom Konzern mittgeteilt, die Klinkerherstellung zu beenden (Heidelberg Materials AG, 2020) und wird deshalb als Produktionsstandort für Klinker aus dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Das Zementwerk in **Amöneburg** bei Wiesbaden ist 57 km (LL) entfernt von der BASF. Es weist eine Produktionskapazität von 950.000 Tonnen Zement und einen Klinkerfaktor von etwa 52 % auf (Dyckerhoff GmbH, 2023b). Der Betreiber gibt eine jährliche Emission von etwa 200.000 t CO<sub>2e</sub> an (EU-Kommission, 2024b).

Brunsbüttel, Heide, Rostock

Das Zementwerk **Lägerdorf** ist knapp 30 km (LL) von Brunsbüttel, 45 km (LL) von Heide und 170 km (LL) von Rostock entfernt. Es weist einen Klinkerfaktor von 78 % auf. Die Produktionsmenge belief sich zwischen 2018 und 2020 auf 1,5 Mio. t Zement pro Jahr (Holcim (Deutschland) GmbH, 2021). Die jährliche Emission des Werks beläuft sich auf 1 Mio. t CO<sub>2e</sub> (EU-Kommission, 2024c). Der prozessbedingte Anteil ergibt sich zu 670.000 t CO<sub>2e</sub>.

Karlsruhe

Das Zementwerk der OPTERRA **Wössingen** GmbH ist 20 km (LL) von der Karlsruher MiRO entfernt und emittiert jährlich etwa 440.000 t CO<sub>2e</sub>, woraus sich eine energiebereinigte jährliche Emission von 300.000 t CO<sub>2e</sub> ergibt. (EU-Kommission, 2024d)

In **Dotternhausen** werden jährlich etwa 450.000 t CO<sub>2e</sub> bei der Klinkerherstellung 95 km (LL) entfernt von Karlsruhe emittiert (EU-Kommission, 2024e). Energiebereinigt entspricht das einer prozessbedingten Emission von etwa 300.000 t CO<sub>2e</sub>.

Ingolstadt

In **Mergelstetten** werden jährlich etwa 470.000 t CO<sub>2e</sub> emittiert (EU-Kommission, 2024f). Der energiebereinigte Teil ergibt sich daraus zu 313.000 t CO<sub>2e</sub>. Diese Emission fällt etwa 100 km (LL) von Ingolstadt und 140 km (LL) von Karlsruhe entfernt an. Die Forschungsgesellschaft „C4C GmbH & Co. KG“ aus den vier europäischen Zementherstellern Buzzi SpA – Dyckerhoff GmbH, Heidelberg Materials AG, SCHWENK Zement GmbH und Co. KG und Vicat S.A. hat sich mit dem Projekt „catch4climate“ zum Ziel gesetzt 100 % des an dem Standort anfallenden CO<sub>2</sub> aufzufangen. Dabei soll das Pure-Oxyfuel-Verfahren angewendet werden, wofür ein mit reinem Sauerstoff betriebener Ofen errichtet wird. Die CO<sub>2</sub>-Abscheidung soll im ersten Quartal 2025 starten. (SCHWENK Zement GmbH und Co. KG, 2024)

## 4.2 Batteriezellenfertigung

Die THG-Emission durch das Herstellen von Autobatterien stammt 2024 zu über der Hälfte aus der Erzeugung der für den Herstellungsprozess notwendigen elektrischen Energie (Deutscher Bundestag, 2020). Diese Energie kann in absehbarer Zeit erneuerbar bereitgestellt werden. Ein weiterer Beitrag zum Kohlenstofffußabdruck von Batteriezellen leistet das Fördern, Verarbeiten und Bereitstellen unterschiedlicher Rohstoffe, aus denen die Batterien gefertigt werden. Weiterhin kommt Siliciumcarbid (SiC) in der Leistungselektronik zum Einsatz. Bei dessen Herstellung im Acheson-Verfahren werden pro Tonne SiC prozessbedingt 2,4 t CO<sub>2</sub> freigesetzt. Hinzu kommt die indirekte THG-Emission durch den energieintensiven Betrieb des Freiluftofens, welche abhängig vom Strommix ist und zu weiteren etwa 1,8 t CO<sub>2e</sub> pro Tonne SiC führt. (Fraunhofer IKTS, 2023)

Im Jahr 2024 ist die Prozessemission bei der Batteriezellfertigung, die großteilig durch das Brennen der zuvor beschichteten Elektroden frei wird, intensiv und unvermeidbar. Diese Emission wird am Herstellungsstandort

freigesetzt und weist im Jahr 2024 keinen alternativen Herstellungsprozess auf. (Deutscher Bundestag, 2020) Es ist davon auszugehen, dass Batteriezellenfertigungen am Produktionsstandort emissionsintensiv bleiben und sich als langfristige Kohlenstoff-Punktquellen für die PtL-Produktion eignen. Es folgt eine Karte mit aktuellen Standorten von 20 deutschen Batteriezellenfertigungen. Diese werden hauptsächlich von deutschen Automobilherstellern wie BMW, Mercedes Benz, VW und Porsche betrieben. Weitere hier vermerkte Unternehmen sind Tesla, CATL, SVOLT, Farasis, MDC Power GmbH, BASF, Automotive Cells Company Northvolt sowie Leclanché und die Eneris Group (Dietmar Poll, 2023). Abbildung 8 zeigt diese Karte.

Abbildung 8 Standorte deutscher Batteriezellfertigungsanlagen



Quelle: (Dietmar Poll, 2023)

Zwölf der 20 Batteriezellfertigungsanlagen befinden sich in dem geographischen Gürtel um Sachsen-Anhalt, welcher die Regionen um Hannover, Erfurt, Leipzig, Dresden und Berlin einschließt. Sieben Anlagen befinden sich im Süden Deutschlands, davon drei in Baden-Württemberg, und eine Fertigungsanlage befindet sich im Norden Deutschlands bei Heide in Schleswig-Holstein.

### 4.3 Raffinerien

Raffinerien werden voraussichtlich auch in einer künftigen reFuels-Industrie eine Rolle spielen. So werden aktuell (Stand 2022) sowohl für die Raffinerie Schwedt als auch die Raffinerien Leuna und Heide entsprechende Pläne erarbeitet (Pieton et al., 2022). Raffinerien bieten ein hohes Potenzial für einen Verbundstandort, an dem die notwendigen Einsatzstoffe Wasserstoff, Kohlenstoff und Elektrizität für die

Herstellung sowie eine Leitungsinfrastruktur zur Verteilung synthetischer Kraftstoffe bereits vorliegen. Im Rahmen einer Transitionsphase hin zu einer reFuels-Produktion wäre die Abscheidung von Kohlenstoff aus dem Rauchgas fossiler Verbrennungsprozesse für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe denkbar. Voraussetzung hierfür wäre, dass diese Verwertung nicht den Rückbau des fossilen Kapitalstocks hemmt. Die Pipelineinfrastruktur des Raffineriegeländes steht langfristig für einen nachhaltigen Transport der Ein- und Ausgangsstoffe zur Verfügung. In diesem Kapitel werden die zwölf größten Raffinerien Deutschlands, gemessen an der jährlichen Rohölverarbeitungsmenge, analysiert. Hierfür wird in der folgenden Abbildung 9 deren geographische Lage innerhalb Deutschlands dargestellt. Die Größe der Raffinerien wird durch die Größe des roten Punkts und der Klammerzahl dargestellt.

Abbildung 9 Die zwölf größten Raffinerien Deutschlands



Quelle: (NIMAX GmbH, 2024), Klammerzahl: Größe der Anlage nach Rohölverarbeitungsmenge mit 1 = hoch, n = niedrig

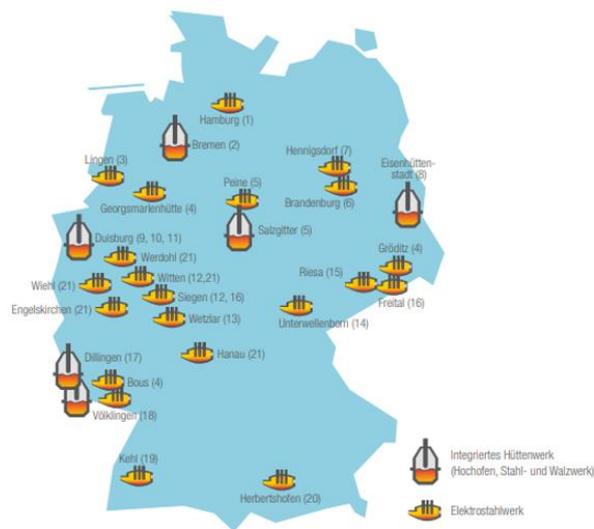
Deutschland weist zahlreiche große Raffinerien auf, die über das gesamte Bundesgebiet verteilt sind und sich in der Nähe der Außengrenze befinden. Im Anhang sind die Spezifikationen der Raffinerien in Tabelle 3 zusammengetragen.

## 4.4 Roheisen- und Stahlherstellung

Die Anlagen der Stahlherstellung sind die drittstärksten Emittenten von Treibhausgasen und befinden sich in derselben Größenordnung der beiden vorangegangenen Sektoren. Standorte der Kokereien decken sich mit Standorten von integrierten Hüttenwerken, woraus sich aktuell ein enormes Kohlenstoffpotenzial ergibt.

Stahlherstellung ist durch Wasserstoff als Reduktionsmittel ohne Koks möglich. Dadurch wird fossiles Reduktionsgas aus Koks vermieden, welches mit Sauerstoff aus dem Eisen zu CO<sub>2</sub> oxidiert. Bei dem Direktreduktionsverfahren oxidiert Wasserstoff, wodurch Wasser anstatt CO<sub>2</sub> entsteht. (Navigant Energy Germany GmbH, 2019) Die Transformation des Produktionsprozesses ist zeit- und kostenintensiv. Demnach wird es viele Jahre dauern, bis die Stahlherstellung signifikant weniger emittiert. Bis dahin besteht an den Standorten eine hohe Verfügbarkeit an Kohlenstoff. Abbildung 10 zeigt die Standorte der deutschen Stahlproduktion.

Abbildung 10 Stahlindustrie Deutschland



- |                                    |                                  |                            |
|------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| (1) ArcelorMittal Hamburg          | (9) thyssenkrupp Steel Europe    | (17) Dillinger Hüttenwerke |
| (2) ArcelorMittal Bremen           | (10) HKM                         | (18) Saarstahl             |
| (3) Benteler                       | (11) ArcelorMittal Duisburg      | (19) Badische Stahlwerke   |
| (4) Georgsmarienhütte Holding      | (12) Deutsche Edelstahlwerke     | (20) Lech-Stahlwerke       |
| (5) Salzgitter                     | (13) Buderus Edelstahl           | (21) Übrige Stahlstandorte |
| (6) Brandenburger Elektrostahlwerk | (14) Stahlwerk Thüringen         |                            |
| (7) Hennigsdorfer Elektrostahlwerk | (15) ESF Elbe-Stahlwerke Feralpi |                            |
| (8) ArcelorMittal Eisenhüttenstadt | (16) BGH Edelstahl               |                            |

Stand: Januar 2021

Quelle: (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2022)

Die Standorte der integrierten Hüttenwerke befinden sich im Saarland sowie im Norden Deutschlands und werden in der zusammenführenden Karte mitaufgenommen.

## 4.5 Chemieparks

Die Herstellung von Ammoniak ist die letzte in diesem Paper betrachtete Tätigkeit, die eine starke anlagenbezogene Emission von Treibhausgasen aufweist. Die Herstellung von Ammoniak ist klimaneutral möglich, durch die Synthese mit erneuerbarem Strom von Stickstoff (N<sub>2</sub>) aus der Luft und grünem Wasserstoff (H<sub>2</sub>) zu grünem Ammoniak (NH<sub>3</sub>) (Agentur für Wirtschaft und Entwicklung, 2023). Bisher existieren jedoch in

Deutschland noch keine Projekte zur Herstellung grünen Ammoniaks, was darauf schließen lässt, dass diese Transformation sehr zeitintensiv ist. Es folgen die größten Ammoniakhersteller Deutschlands.

**BASF** hat seinen Hauptstandort in Ludwigshafen. Die dortige Produktion von Ammoniak wird zur Hälfte stillgelegt. Bei einer Produktion von 1,37 Mio. t Ammoniak im Jahr 2023 (BASF, 2024) und einem Kohlenstofffußabdruck von 1,9 t pro Tonne Ammoniak (Gernot Kramper, 2021) ergibt sich nach der Stilllegung eine Emission von 1,3 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr.

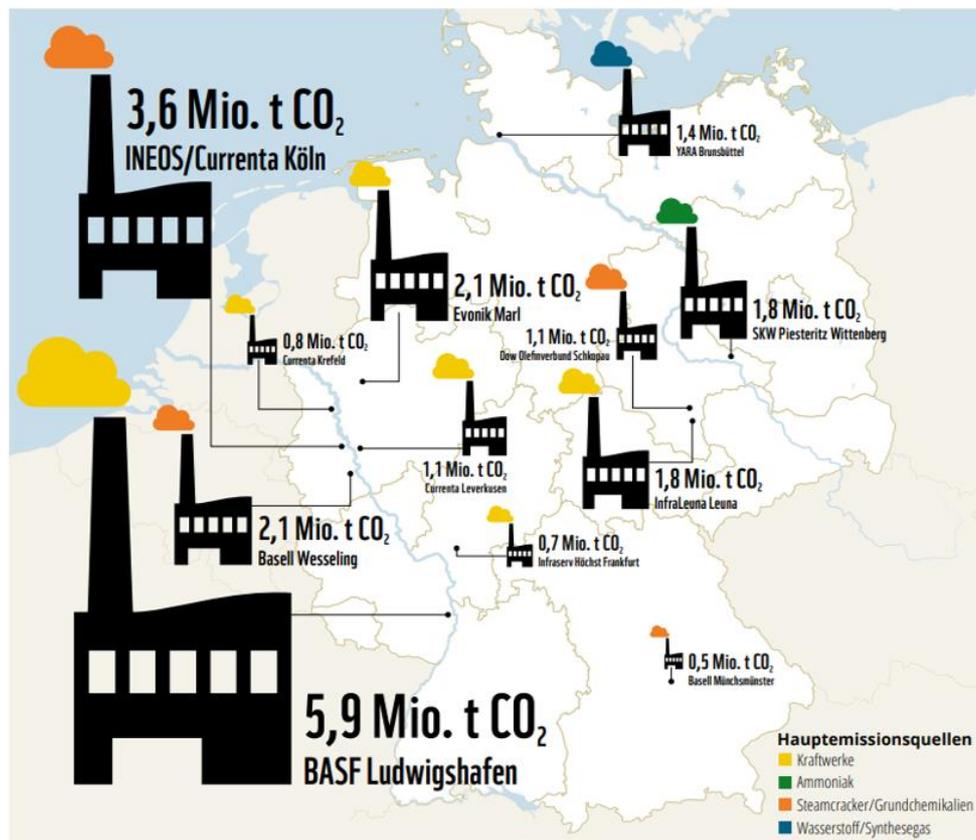
Die **SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH** ist Deutschlands größter Ammoniak-Hersteller. Die beiden Standorte befinden sich in der Lutherstadt Wittenberg und in Cunnersdorf bei Leipzig (SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH, 2024).

**Yara Deutschland** betreibt zwei Produktionsstandorte in Deutschland. In Brunsbüttel wird Ammoniak hergestellt. In Rostock werden jährlich 1,8 Mio. t stickstoffhaltiger Düngemittel hergestellt (Schultz, 2020). Die Treibhausgasemission liegt nach Berechnungen von Yara bei 3,6 t CO<sub>2e</sub> pro Tonne Stickstoff (YARA GmbH & Co. KG, 2024). Daraus ergibt sich eine jährliche Treibhausgasemission von 6,5 Mio. t.

Da die Ammoniakherstellung in Chemieparks stattfindet und weitere emissionsintensive Chemieparks existieren wird die Ammoniakherstellung für die Erstellung einer Gesamtübersicht nicht gesondert betrachtet, sondern in die Standortbetrachtung deutscher Chemieparks integriert. Es folgt eine Übersicht der deutschen Chemiaparklandschaft. Hierfür wurde die im März 2024 veröffentlichte Studie von WWF herangezogen.

Abbildung 11 zeigt die Standorte der zwölf emissionsintensivsten Chemieparks Deutschlands.

Abbildung 11 Die zwölf emissionsintensivsten Chemieparks Deutschlands



Quelle: (WWF Deutschland, 2024)

Die emissionsintensivsten deutschen Chemieparcs liegen in Ludwigshafen und Köln. In Tabelle 2 sind die deutschen Chemieparcs nach der Emissionsintensität sortiert aufgelistet.

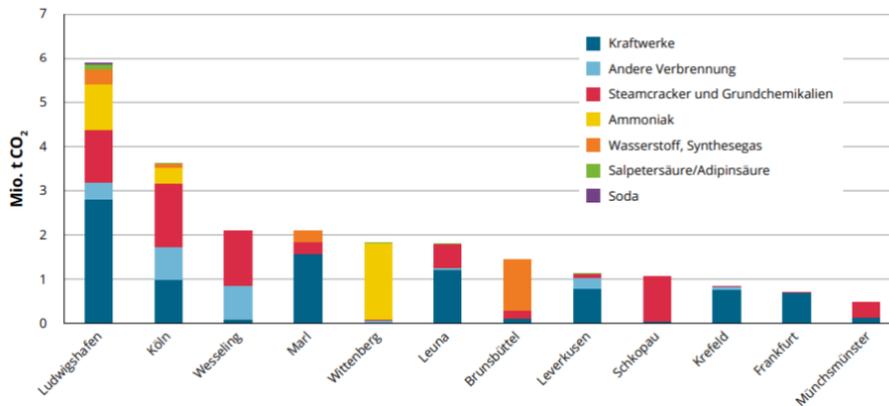
Tabelle 2 Emissionsübersicht deutscher Chemieparcs

Betreiber	Standort	CO <sub>2</sub> -Emission
BASF	Ludwigshafen	5,9 Mio.t
INEOS/Currenta	Köln	3,6 Mio.t
Basell	Wesseling	2,1 Mio.t
Evonik	Marl	2,1 Mio.t
InfraLeuna	Leuna	1,8 Mio.t
SKW Piesteritz	Wittenberg	1,8 Mio.t
Yara	Brunsbüttel	1,4 Mio.t
Currenta	Leverkusen	1,1 Mio.t
DOW Olefinverbund	Schkopau	1,1 Mio.t
Currenta	Krefeld	0,8 Mio.t
Infraserv	Frankfurt-Höchst	0,7 Mio.t
Basell	Münchsmünster	0,5 Mio.t

Quelle: (WWF Deutschland, 2024)

Die genaue Verteilung der Emissionsquellen der einzelnen Chemieparcs kann Abbildung 12 entnommen werden.

Abbildung 12 Verteilung der Emissionsquellen deutscher Chemieparcs



Quelle: (WWF Deutschland, 2024)

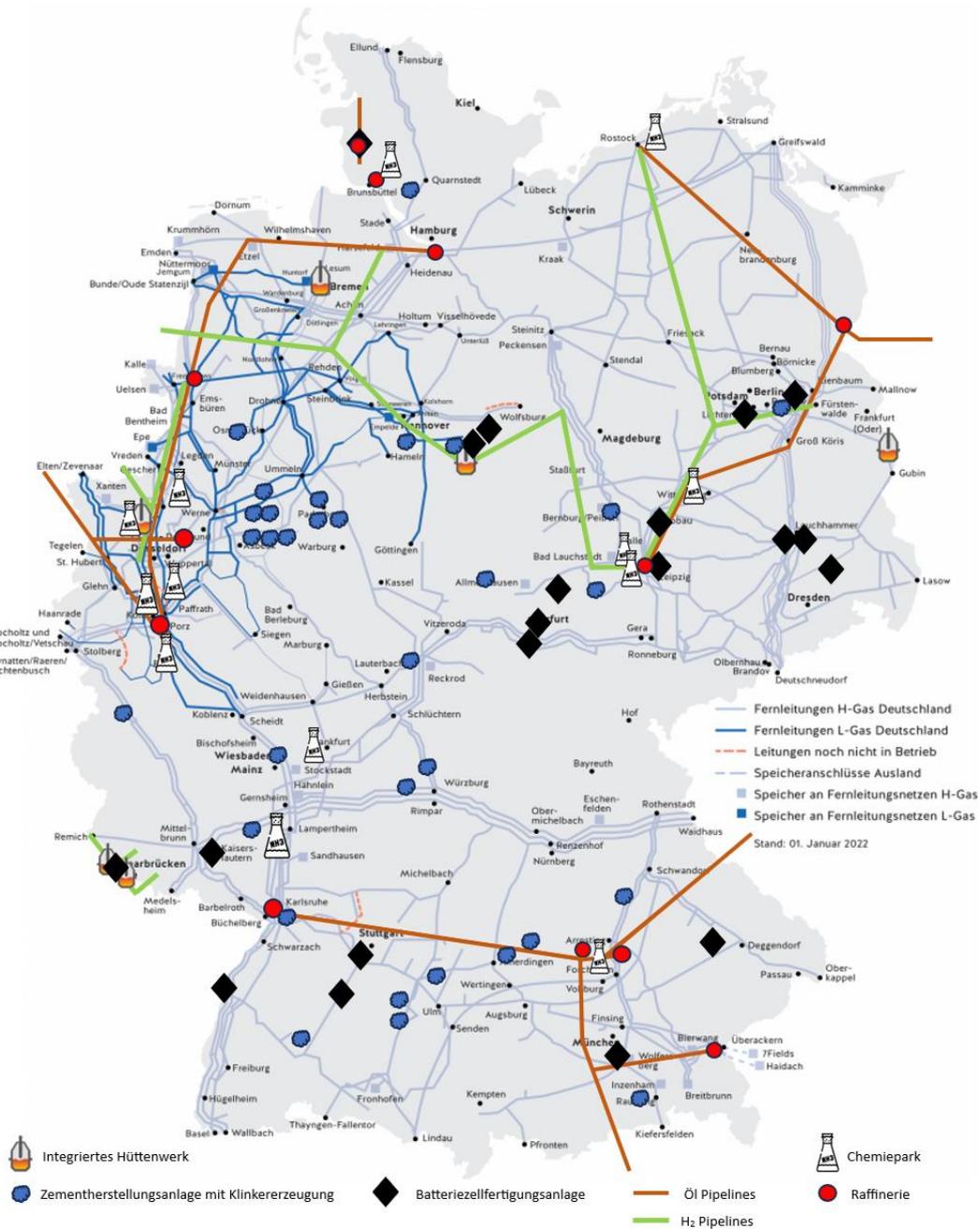


Die THG-Emission deutscher Chemieparks stammt größtenteils aus dem Betrieb von Kraftwerken und der Herstellung von Grundchemikalien. Das SKW-Werk in Wittenberg verursacht fast ausschließlich Emissionen durch die Herstellung von Ammoniak. In Brunsbüttel ist die Hauptemissionsquelle die Herstellung von Wasserstoff und Synthesegas.

## 5 Interpretation der Ergebnisse der empirischen Erhebung

Die vorangegangene Untersuchung nach Kohlenstoff-intensiven Tätigkeiten und deren Standorten, sowie der Leitungsinfrastruktur und dessen Netzwerk wird in diesem Kapitel in einer Darstellung gebündelt. Abbildung 13 zeigt eine Deutschlandkarte, in der relevante Infrastrukturen eingetragen sind, welche lokal zu einer langfristigen Verfügbarkeit von Kohlenstoff und Wasserstoff führen.

Abbildung 13 Zusammengeführte Karte



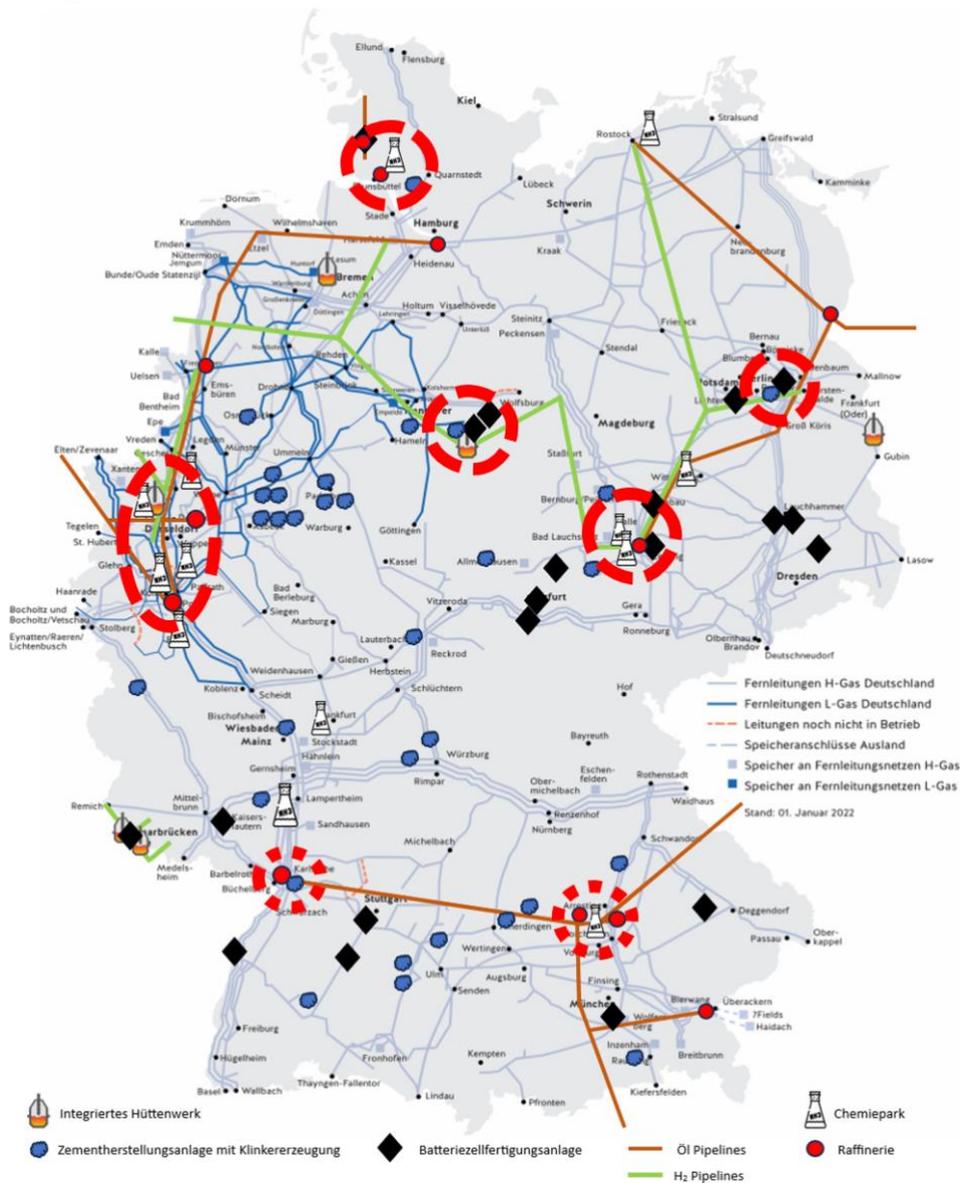
Quelle: (BMWK, 2022)



Die zusammengeführte Karte zeigt, wo sich emissionsintensive Tätigkeiten in Deutschland befinden. Einzelne Punktquellen könnten je nach Dimensionierung der reFuels-Anlage genügend Kohlenstoff für einen kontinuierlichen Betrieb bereitstellen. Trotzdem bieten sich Standorte an, an denen sich mehrere Punktquellen befinden. Dadurch wird das Angebot an Kohlenstoff, welches in unmittelbarer Nähe existiert, vergrößert. Weiterhin ist an Standorten mehrerer Kohlenstoff-Emittenten das Risiko gering, dass die Kohlenstoffbereitstellung kurzfristig durch beispielsweise die Schließung einer Anlage endet. Eine Anbindung an wasserstoffführende Leitungen sichert eine langfristige Versorgung mit Wasserstoff und stellt einen entscheidenden Standortvorteil für das Errichten einer reFuel-Anlage dar.

Abbildung 14 zeigt die zusammengeführte Karte, auf der Standorte mit einem großen Kohlenstoffangebot markiert sind. Diese Standorte bieten aus Sicht der Kohlenstoffverfügbarkeit ein hohes Potenzial zur Herstellung synthetischer Kraftstoffe. Die Anbindung an das Wasserstoffnetz stellt ebenfalls einen entscheidenden Standortvorteil dar.

Abbildung 14 Standorte mit hoher Verfügbarkeit an Kohlen- und Wasserstoff



Quelle: (BMWK, 2022)



### **Nordsee**

Der Standort nördlich von **Hamburg** um Brunsbüttel weist eine hohe lokale Kohlenstoffemission auf. Durch die nördliche Lage besteht ein hohes Angebot an erneuerbarem Strom, wodurch eine PtL-Anlage an diesem Standort systemdienlich eingesetzt werden kann (Consentec et al., 2023).

### **Oberrhein**

Das Gebiet um **Köln und Düsseldorf** ist ein Industriegebiet mit zahlreichen großen Kohlenstoffemittenten. Zwei der drei größten Raffinerien Deutschlands befinden sich in diesem Gebiet. Es ist an Gas, Öl und Wasserstoff führende Leitungen angeschlossen. Das Gebiet am Oberrhein ist ein Standort mit einer hohen Industriedichte, der sich als Verbundstandort für die Herstellung von Kraftstoffen eignet.

### **Mitteldeutschland**

In der Nähe von **Braunschweig** befinden sich zwei Batteriezellfertigungsanlagen, ein Zementwerk mit Klinkerherstellung und ein integriertes Hüttenwerk, welches an das Wasserstoffnetz angeschlossen ist. Auch nach einer Produktionsumstellung des Hüttenwerks auf den Betrieb mit Wasserstoff bestehen an diesem Standort eine langfristig unvermeidbare Kohlenstoffemissionen, welche zur Herstellung von reFuels genutzt werden kann.

Bei **Leipzig** befinden sich zwei Chemieparks und eine große Raffinerie. Zwei Batterie- und zwei Zementwerke mit Klinkerherzeugung befinden sich ebenfalls in der Umgebung. Das Gebiet wird durch alle drei Leitungsarten versorgt.

### **Brandenburg**

Bei **Berlin** befindet sich die Batteriezellfertigungsanlage von Tesla und ein Zementwerk mit Klinkerherstellung. Das Gebiet ist an alle drei Leitungsnetze angeschlossen und wird langfristig mit Gas, Öl und Wasserstoff versorgt.

### **Süddeutschland**

In **Karlsruhe** ist die zweitgrößte Raffinerie Deutschlands und es befindet sich ein Klinker erzeugendes Zementwerk in der Gegend.

In der Nähe von **Ingolstadt** befinden sich zwei Raffinerien und der Chemiapark von Basell.

Beide Standorte sind an das Gas- und Ölleitungsnetz angeschlossen, jedoch nicht an das Wasserstoffnetz. Weiterhin ist die Verfügbarkeit erneuerbaren Stroms im Süden geringer als im Norden Deutschlands. Aufgrund dieser geringeren Eignung wurden die beiden süddeutschen Standorte mit kürzeren Strichen markiert.



## 6 Schlussbetrachtung

---

In Deutschland werden emissionsintensive Tätigkeiten an zahlreichen Orten ausgeführt. Diese Arbeit identifiziert die emissionsintensivsten Anlagen Deutschlands und stellt sie gebündelt auf einer Karte dar. Die Karte wurde mit gas-, öl- und wasserstoffführenden Leitungen ergänzt. Dadurch lassen sich Standorte mit einem hohen Dargebot an langfristig verfügbarem Kohlenstoff identifizieren. Standorte in der Nähe von klinkerzeugenden Zementwerken und Batteriezellfertigungsanlagen weisen aufgrund der langfristigen Unvermeidbarkeit der Kohlenstoffemission ein besonderes Potenzial zur Bereitstellung des Kohlenstoffs auf.

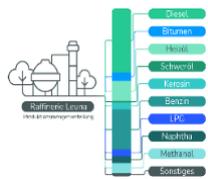
Die zusammengeführte Karte kann zur Identifikation eines geeigneten Standorts für die PtL-Produktion verwendet werden, indem es mit weiteren individuellen Standortfaktoren kombiniert wird. Darüber hinaus ist die zusammengeführte Karte ein Hilfsmittel zur Lokalisierung emissionsintensiver Standorte, was ein Anwendungsfeld über die Kraftstoffproduktion hinaus ermöglicht. Intensive Treibhausgasemittenten bergen ein hohes Potenzial zur Verwertung des klimawirksamen Kohlenstoffdioxids. Bei der Planung einer CO<sub>2</sub>-Pipeline zur Verteilung oder Untergrundspeicherung (CCS) beispielsweise in der Nordsee kann eine solche Übersichtskarte Hilfe leisten.

## 7 Anhang

### Spezifikationen zu den zwölf größten Raffinerien Deutschlands

Tabelle 3 zeigt Spezifikationen der größten deutschen Raffinerien.

Tabelle 3 Spezifikationen der zwölf größten Raffinerien Deutschlands

Anlage	Ort	Inbetriebnahme	Eigentümer	Beschäftigte	Rohölverarbeitungs- menge [t/a]	Bemerkungen
<b>Rheinland Raffinerie</b> „Energy and Chemicals Park Rheinland“	Köln (Shell plc, 2024)	1937, 1960 (chemie-schule.de, 2024)	Shell (Shell plc, 2024)	30.000 (Shell plc, 2024)	16 Mio. t (chemie-schule.de, 2024)	2021: Größter PEM-Elektrolyseur Europas (NRW.Energy4Climate, 2021)
<b>MiRO Mineralöl Raffinerie Oberrhein</b>	Karlsruhe (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)	1959 (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)	Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)	1.100 (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)	15,8 Mio. t (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)	Gesellschafter: Phillips 66, Esso, Rosneft und Shell (Mineraloel raffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG, 2022)
<b>BP Gelsenkirchen</b>	Gelsenkirchen (BP plc, 2024a)	1931 (BP plc, 2024b)	Ruhr Oel GmbH – bp Gelsenkirchen (BP plc, 2024a)	1.400 (BP plc, 2024a)	12,7 Mio. t (BP plc, 2024c)	Hauptsächlich Kraftstoffe (und Heizöl) (BP plc, 2024c)
<b>Total Energies Raffinerie Mitteldeutschland</b>	Leuna (TotalEnergies, 2024a)	1997 (TotalEnergies, 2024a)	TotalEnergies (TotalEnergies, 2024a)	700 (TotalEnergies, 2024a)	12 Mio.t (TotalEnergies, 2024a)	Produktionsverteilung:  (TotalEnergies, 2024b)



Anlage	Ort	Inbetriebnahme	Eigentümer	Beschäftigte	Rohölverarbeitungs- menge [a]	Bemerkungen
<b>PCK-Raffinerie</b>	Schwedt (PCK Raffinerie GmbH, 2024)	1964 (Innovation smonitor, 2023)	PCK Raffinerie GmbH (PCK Raffinerie GmbH, 2024)	1.202 (Bundesanzeiger, 2022)	11,5 Mio. t (PCK Raffinerie GmbH, 2024)	Konsortialraffinerie: Rosneft, Shell, AET  Betreiberin einer Sonderabfallbeseitigungsanlage (PCK Raffinerie GmbH, 2024)
<b>BayernOil Raffinerie Gesellschaft</b>	Vohburg und Neustadt an der Donau (bei Ingolstadt) (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2024)	~1965 (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2020)	BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2024)	773 (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2024)	10,3 Mio. t (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2024)	Verbund aus Varo Energy GmbH (51,43 %), Rosneft Deutschland GmbH (28,57 %) und Eni Deutschland GmbH (20 %)  (BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH, 2024)
<b>Erdöl-Raffinerie Emsland „bp Raffinerie Lingen“</b>	Lingen (BP plc, 2024d)	1953 (BP plc, 2024d)	BP Europa SE (BP plc, 2024d)	750 +70 Auszubildende (BP plc, 2024e)	5,2 Mio. t (BP plc, 2024e)	Vertriebspartner: Aral AG (BP plc, 2024e)
<b>Gunvor Raffinerie Ingolstadt</b>	Kösching (bei Ingolstadt) (Gunvor Deutschland, 2024a)	1963 (Gunvor Deutschland, 2024a)	Gunvor Group (Gunvor Deutschland, 2024a)	360 (Gunvor Deutschland, 2024b)	5 Mio. t (Gunvor Deutschland, 2024c)	Gehört dem Umweltpakt Bayern an (Gunvor Deutschland, 2024c)
<b>Holborn Europa Raffinerie</b>	Hamburg-Harburg (HOLBORN Europa Raffinerie GmbH, 2024a)	1928 (HOLBORN Europa Raffinerie GmbH, 2024b)	Oilinvest (Netherlands) B.V. (HOLBORN Europa Raffinerie GmbH, 2024c)	>350 +22 Auszubildende (HOLBORN Europa Raffinerie GmbH, 2024a)	5 Mio. t (HOLBORN Europa Raffinerie GmbH, 2024a)	



Anlage	Ort	Inbetriebnahme	Eigentümer	Beschäftigte	Rohölverarbeitungs- menge [a]	Bemerkungen
<b>Raffinerie Heide</b>	Dithmarschen (Raffinerie Heide GmbH, 2022)	1856 (Raffinerie Heide GmbH, 2022)	Seit 2010 eigenständiges Mitglied der Klesch group (Raffinerie Heide GmbH, 2022)	540 +250 von Partnerfirmen +30 Auszubildende (Raffinerie Heide GmbH, 2022)	4,5 Mio. t (Raffinerie Heide GmbH, 2022)	2021: Ertüchtigung einer Kaverne zur Speicherung von grünem Wasserstoff (Raffinerie Heide GmbH, 2022)
<b>Raffinerie Burghausen</b>	Burghausen (OMV Deutschland GmbH, 2019)	Anfang 1970er (OMV Deutschland GmbH, 2019)	OMV Deutschland GmbH (OMV Deutschland GmbH, 2024)	500 (OMV Deutschland GmbH, 2024)	3,8 Mio. t (OMV Deutschland GmbH, 2019)	
<b>TOTAL Bitumenwerk Brunsbüttel</b>	Brunsbüttel (TotalEnergies, 2024c)	1928 (TOTAL Bitumen Deutschland GmbH, 2023)	TotalEnergies Bitumen Deutschland GmbH (TotalEnergies, 2024c)	130 +150 von Dienstleistern (TotalEnergies, 2024c)	950.000 t (TOTAL Bitumen Deutschland GmbH, 2023)	Stellt nur Bitumen her (Straßenbau) (TotalEnergies, 2024c)



## 8 Literaturverzeichnis

---

- Agentur für Wirtschaft und Entwicklung. (2023). Grüner Ammoniak. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://wirtschaft-entwicklung.de/glossar/ammoniak>
- BASF. (2024, Februar 23). Produktionskapazitäten werkstofflicher Vorprodukte von BASF weltweit im Jahr 2023 (in Tonnen). Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1284262/umfrage/basf-produktionskapazitaeten-von-vorprodukten/>
- BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH. (2020). Unternehmenshistorie BayernOil. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.bayernoil.de/unternehmen/historie/>
- BAYERNOIL Raffineriegesellschaft mbH. (2024). Ein verlässlicher Partner für die Region. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.bayernoil.de/unternehmen>
- BMWi. (2021, Mai 28). IPCEI-Standortkarte des BMWi vom 28. Mai 2021. BMWi. Zugriff am 8.3.2024. Verfügbar unter: [https://fnb-gas.de/pressematerialien/infografik\\_ipcei-standortkarte-des-bmwi-vom-28-mai-2021/](https://fnb-gas.de/pressematerialien/infografik_ipcei-standortkarte-des-bmwi-vom-28-mai-2021/)
- BMWK. (2022). Gas-Fernleitungsnetz. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Bilder/Energie/gas-fernleitungsnetz-im-ueberblick-stand-feb-2016.jpg?\\_\\_blob=normal&v=1&size=834w](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Bilder/Energie/gas-fernleitungsnetz-im-ueberblick-stand-feb-2016.jpg?__blob=normal&v=1&size=834w)
- BMWK. (2024). So funktioniert die Umstellung auf H-Gas. Zugriff am 8.7.2024. Verfügbar unter: <https://www.energiewechsel.de/KAENEF/Redaktion/DE/Standardartikel/Dossier/umstellung-gasversorgung-l-gas-h-gas.html>
- BP plc. (2024a). Raffinerie Gelsenkirchen - Wo wir sind. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bp.com/de\\_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wo-wir-sind.html](https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wo-wir-sind.html)
- BP plc. (2024b). Raffinerie Gelsenkirchen - Historie. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bp.com/de\\_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wer-wir-sind/historie.html](https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wer-wir-sind/historie.html)
- BP plc. (2024c). Raffinerie Gelsenkirchen - Zahlen und Fakten. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bp.com/de\\_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wer-wir-sind/zahlen-und-fakten.html](https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-gelsenkirchen/wer-wir-sind/zahlen-und-fakten.html)
- BP plc. (2024d). Raffinerie Lingen. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bp.com/de\\_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-lingen.html](https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-lingen.html)
- BP plc. (2024e). Raffinerie Lingen - Daten & Fakten. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.bp.com/de\\_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-lingen/was-wir-tun/daten-und-fakten.html](https://www.bp.com/de_de/germany/home/wo-wir-sind/raffinerie-lingen/was-wir-tun/daten-und-fakten.html)
- Bundesanzeiger. (2022, Oktober 24). Anzahl der Mitarbeitenden der PCK Raffinerie in Schwedt in den Jahren 2012 bis 2021. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1307514/umfrage/anzahl-der-mitarbeitenden-in-pck-raffinerie-in-schwedt/>
- Bundesnetzagentur. (2024, Juli 22). Wasserstoff-Kernnetz. Zugriff am 6.8.2024. Verfügbar unter: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Wasserstoff/Kernnetz/start.html>
- Bundesregierung. (2021). *PtL-Roadmap Nachhaltige strombasierte Kraftstoffe für den Luftverkehr in Deutschland*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/LF/ptl-roadmap.pdf?__blob=publicationFile)
- chemie-schule.de. (2024). Rheinland Raffinerie. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Rheinland\\_Raffinerie?utm\\_content=cmp-true](https://www.chemie-schule.de/KnowHow/Rheinland_Raffinerie?utm_content=cmp-true)
- Consentec, Guidehouse Germany, Fraunhofer IEG, TU Berlin, Fraunhofer SCAI, & Fraunhofer ISI. (2023). *Systemdienliche Integration von grünem Wasserstoff*. Zugriff am 21.8.2024. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/studie-systemdienliche-integration-von-gruenem-wasserstoff.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/studie-systemdienliche-integration-von-gruenem-wasserstoff.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

Deutscher Bundestag. (2020). *Batterieproduktion in China - Einzelaspekte der Ökobilanzierung*. Zugriff am 16.7.2024. Verfügbar unter: <https://www.bundestag.de/resource/blob/710958/88d53d0482edb1731594729850ee49e7/WD-8-165-19-pdf.pdf>

Dietmar Poll. (2023, Juli 13). Interaktive Karte zur E-Mobility Batterieproduktion in Deutschland: Hier entstehen neue Werke. *CO2-neutrale Industrie*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.produktion.de/technik/co2-neutrale-industrie/batterieproduktion-in-deutschland-hier-entstehen-neue-werke-124.html>

Dyckerhoff GmbH. (2023a). Dyckerhoff Zementwerk Göllheim - Ein verlässlicher Partner. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://res.dyckerhoff.com/image\\_go/index.html](https://res.dyckerhoff.com/image_go/index.html)

Dyckerhoff GmbH. (2023b). Dyckerhoff Zementwerk Amöneburg- Zukunft wächst aus Tradition. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://res.dyckerhoff.com/image\\_ab/index.html](https://res.dyckerhoff.com/image_ab/index.html)

EU-Kommission. (2024a, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - SCHWENK Zement GmbH & Co. KG - Bernburg. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/oha.do?form=oha&languageCode=en&account.registryCodes=DE&accountHolder=&installationIdentifier=&installationName=&permitIdentifier=&mainActivityType=29&search=Search&searchType=oha&currentSortSettings=>

EU-Kommission. (2024b, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - Dyckerhoff GmbH - Amöneburg. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/ohaDetails.do?accountID=103678&action=current&languageCode=en&returnURL=resultList.currentPageNumber%3D2%26installationName%3D%26accountHolder%3D%26backList%3DBack%26permitIdentifier%3D%26form%3Doha%26searchType%3Doha%26currentSortSettings%3D%26mainActivityType%3D29%26installationIdentifier%3D%26account.registryCodes%3DDE%26languageCode%3Den&registryCode=DE>

EU-Kommission. (2024c, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - Holcim (Deutschland) GmbH - Lägerdorf. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/ohaDetails.do?accountID=105487&action=current&languageCode=en&returnURL=resultList.currentPageNumber%3D1%26installationName%3D%26accountHolder%3D%26permitIdentifier%3D%26nextList%3DNext%26form%3Doha%26searchType%3Doha%26currentSortSettings%3D%26mainActivityType%3D29%26installationIdentifier%3D%26account.registryCodes%3DDE%26languageCode%3Den&registryCode=DE>

EU-Kommission. (2024d, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - OPTERRA Wössingen GmbH. Zugriff am 15.8.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/ohaDetails.do?accountID=105550&action=current&languageCode=en&returnURL=installationName%3D%26accountHolder%3D%26search%3DSearch%26permitIdentifier%3D%26form%3Doha%26searchType%3Doha%26currentSortSettings%3D%26mainActivityType%3D29%26installationIdentifier%3D%26account.registryCodes%3DDE%26languageCode%3Den&registryCode=DE>

EU-Kommission. (2024e, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - Holcim (Süddeutschland) GmbH - Dotternhausen. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/ohaDetails.do?accountID=103716&action=current&languageCode=en&returnURL=resultList.currentPageNumber%3D1%26installationName%3D%26accountHolder%3D%26permitIdentifier%3D%26nextList%3DNext%26form%3Doha%26searchType%3Doha%26currentSortSettings%3D%26mainActivityType%3D29%26installationIdentifier%3D%26account.registryCodes%3DDE%26languageCode%3Den&registryCode=DE>

EU-Kommission. (2024f, April 1). European Union Transaction Log - Operator Holding Account Information - SCHWENK - Mergelstetten. Zugriff am 6.8.2024. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/clima/ets/ohaDetails.do?accountID=105530&action=current&languageCode=en&returnURL=installationName%3D%26accountHolder%3D%26search%3DSearch%26permitIdentifier%3D%26form%3Doha%26searchType%3Doha%26currentSortSettings%3D%26mainActivityType%3D29%26installationIdentifier%3D%26account.registryCodes%3DDE%26languageCode%3Den&registryCode=DE>

Fraunhofer IKTS. (2023, Juni 1). Emissionsarm und energieeffizient – Siliciumcarbid-Recycling mit



- RECOsiC©. Zugriff am 6.8.2024. Verfügbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2023/juni-2023/emissionsarm-und-energieeffizient-siliciumcarbid-recycling-mit-recosic.html>
- Gernot Kramper. (2021, November 30). Grüner Ammoniak – neues Verfahren kann zwei Prozent der weltweiten Klimagase abschaffen. *G+J Medien GmbH*.
- Götz, T., Schnurr, B., Labunski, F., Kaselofsky, J. & Pössinger, J. (2024). *Effiziente Synthese und Rückverstromung von E-Fuels (ESyRE)*. Wuppertal Institut. Zugriff am 21.8.2024. Verfügbar unter: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8596/file/8596\\_ESyRE\\_Umweltwirkung.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/8596/file/8596_ESyRE_Umweltwirkung.pdf)
- Gunvor Deutschland. (2024a). Gunvor - Historie. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/das-unternehmen/historie/>
- Gunvor Deutschland. (2024b). Gunvor - Das Unternehmen. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/das-unternehmen/>
- Gunvor Deutschland. (2024c). *Gunvor - Eine Raffinerie stellt sich vor*. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/download/aml3mai3a57ln20ertidu800b02/Broschuere\\_Raffinerie\\_final.pdf](https://gunvor-raffinerie-ingolstadt.de/download/aml3mai3a57ln20ertidu800b02/Broschuere_Raffinerie_final.pdf)
- Heidelberg Materials AG. (2020, September 15). HeidelbergCement stellt Klinkerproduktion in Leimen ein. *Pressemitteilungen*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.heidelbergmaterials.com/de/pi-15-09-2020>
- HeidelbergCement AG. (2023). Die Herstellung von Zement. Zugriff am 28.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.heidelbergmaterials.com/sites/default/files/assets/document/2b/72/broschuere-herstellung-von-zement.pdf>
- Hoekstra, A. & Steinbruch, M. (2020). *Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren*. Eindhoven University of Technology. Zugriff am 12.7.2024. Verfügbar unter: [https://www.gruenebundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag\\_de/themen\\_az/mobilitaet/pdf/200831-Studie\\_EAuto\\_versus\\_Verbrenner\\_CO2.pdf](https://www.gruenebundestag.de/fileadmin/media/gruenebundestag_de/themen_az/mobilitaet/pdf/200831-Studie_EAuto_versus_Verbrenner_CO2.pdf)
- HOLBORN Europa Raffinerie GmbH. (2024a). Holborn Raffinerie. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.holborn.de/>
- HOLBORN Europa Raffinerie GmbH. (2024b). Holborn Raffinerie - Wer wir sind. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.holborn.de/ueber-uns/wer-wir-sind/>
- HOLBORN Europa Raffinerie GmbH. (2024c). Holborn auf einen Blick. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.holborn.de/ueber-uns/daten-fakten/>
- Holcim (Deutschland) GmbH. (2021, Dezember). UMWELTBERICHT ZEMENT 2020. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/holcim\\_umweltbericht\\_2020\\_laegerdorf\\_02.pdf](https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/holcim_umweltbericht_2020_laegerdorf_02.pdf)
- Innovationsmonitor. (2023). PCK Raffinerie GmbH - Kraftstoffproduktion in Schwedt. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <http://www.innomonitor.de/index2.php?id=200>
- Kang, S. (2021). *Innovation outlook: renewable methanol*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Mineraloelraffinerie Oberrhein GmbH & Co. KG. (2022). Wir sind MiRO - Energie für den Südwesten. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.miro-ka.de/unternehmen>
- Mineralölwirtschaftsverband e.V. (2021). *Mineralölversorgung mit Pipelines*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://en2x.de/wp-content/uploads/2022/09/MWV\\_PIPELINE\\_Broschu%CC%88re.pdf](https://en2x.de/wp-content/uploads/2022/09/MWV_PIPELINE_Broschu%CC%88re.pdf)
- Navigant Energy Germany GmbH. (2019). *Branchensteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie*. Zugriff am 8.8.2024. Verfügbar unter: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-stahl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- NIMAX GmbH. (2024, Juni 17). GeoMetro Landkarte Deutschland. Verfügbar unter:

- <https://www.astroshop.de/laender/geometro-landkarte-deutschland-physisch-100-x-140-cm-/p,79060>
- NRW.Energy4Climate. (2021). REFHYNE Betrieb einer großindustriellen PEM-Wasserstoff-Elektrolyseanlage. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.energy4climate.nrw/industrie-produktion/praxisbeispiele-industrietransformation/refhyne>
- OMV Deutschland GmbH. (2019). Zahlen & Fakten 2019 OMV Deutschland GmbH. Zugriff am 22.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.omv.de/services/downloads/00/omv.de/1522141189554/fakten-und-zahlen-2020.pdf>
- OMV Deutschland GmbH. (2024). Die Raffinerie im Bayerischen Chemiedreieck. Zugriff am 22.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.omv.de/de-de/ueber-omv/omv-in-deutschland/raffinerie-burghausen>
- PCK Raffinerie GmbH. (2024). Unsere PCK. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.pck.de/unternehmen>
- Pieton, N., Neuwirth, M., Jahn, M. & Ragwitz, M. (2022). Policy Paper zur Sicherstellung einer mittel- bis langfristigen klimaneutralen Rohstoffversorgung der Raffinerie Schwedt. Fraunhofer-Gesellschaft. doi:10.24406/PUBLICA-478
- Qiang Dai, Jarod C. Kelly, Linda Gaines, & Michael Wang. (2019). *Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2313-0105/5/2/48>
- Raffinerie Heide GmbH. (2022). Heide Raffinerie - Facts und Historie. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.heiderefinery.com/ueber-uns/facts-und-historie>
- Schultz, J. (2020). *Ammoniumnitrat: Produzent schließt Explosion wie in Beirut für Deutschland aus*. Redaktionsnetzwerk Deutschland. Zugriff am 21.8.2024. Verfügbar unter: <https://www.rnd.de/politik/ammoniumnitrat-in-deutschland-produzent-schliesst-explosion-wie-in-beirut-aus-OLUWI333B5C5PP72VRA67XL32I.html>
- SCHWENK Zement GmbH und Co. KG. (2024, März 21). Forschungsprojekt „catch4climate“: Große Fortschritte beim Bau der CO<sub>2</sub>-Abscheide-Anlage in Mergelstetten. Zugriff am 6.8.2024. Verfügbar unter: <https://www.schwenk.de/forschungsprojekt-catch4climate-grosse-fortschritte-beim-bau-der-co2-abscheide-anlage-in-mergelstetten/>
- Shell plc. (2024). Shell Energy and Chemicals Park Rheinland – Über uns. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.shell.de/ueber-uns/standorte/rheinland.html>
- SKW Stickstoffwerke Piesteritz GmbH. (2024). Unternehmensprofil SKW Stickstoffwerke. Homepage, . Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.skwp.de/unternehmen/unternehmensprofil/>
- thomas gruppe. (2024). Erwerb der OPTERRA Zement GmbH und der OPTERRA Beton GmbH mit Werken in Karsdorf, Sötenich und Neufahrn. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.thomas-gruppe.de/blog/erwerb-der-opterra-zement-gmbh-und-der-opterra-beton-gmbh-mit-werken-in-karsdorf-soetenich-und-neufahrn/>
- thyssenkrupp. (2024). Zementproduktion: Kalzinierter Ton senkt CO<sub>2</sub>-Fußabdruck deutlich. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: <https://insights.thyssenkrupp-polysius.com/de/story/zementproduktion-kalzinierter-ton-senkt-co2-fussabdruck-deutlich/>
- TOTAL Bitumen Deutschland GmbH. (2023). TOTALBITUMEN. *Internet Archive*. Zugriff am 22.6.2024. Verfügbar unter: [https://web.archive.org/web/20150909143104/http://pdf.total-services.de/bitumen\\_produkte\\_und\\_leistungen/](https://web.archive.org/web/20150909143104/http://pdf.total-services.de/bitumen_produkte_und_leistungen/)
- TotalEnergies. (2024a). TotalEnergies Raffinerie Mitteldeutschland in Leuna. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://totalenergies.de/ueber-uns/standorte/raffinerie-leuna>
- TotalEnergies. (2024b). Produktionsverteilung Raffinerie Leuna. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: [https://totalenergies.de/system/files/atoms/image/totalenergies-grafik\\_raffinerie.png](https://totalenergies.de/system/files/atoms/image/totalenergies-grafik_raffinerie.png)
- TotalEnergies. (2024c). Bitumenwerk in Brunsbüttel. Zugriff am 22.6.2024. Verfügbar unter: <https://totalenergies.de/ueber-uns/standorte/bitumenwerk-brunsbuettel>
- UBA. (2020). *Dekarbonisierung der Zementindustrie*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter:



- [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet\\_zementindustrie.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zementindustrie.pdf)  
UBA. (2024, April 30). Klimaschutz im Verkehr. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#rolle>
- UBA & DEHSt. (2023). *VET-Bericht 2022*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2022.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- VDZ e.V. (2020). Zementwerke in Deutschland. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.vdz-online.de/fileadmin/\\_processed\\_/8/9/csm\\_2-Poster\\_Zementvorkommen\\_deutsch\\_\\_841x1189\\_8\\_2020-2\\_cd7d4cc5ad.jpg](https://www.vdz-online.de/fileadmin/_processed_/8/9/csm_2-Poster_Zementvorkommen_deutsch__841x1189_8_2020-2_cd7d4cc5ad.jpg)
- VDZ e.V. (2023). Zement- und Klinkerproduktion in Deutschland. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.vdz-online.de/fileadmin/user\\_upload/Zement\\_Klinkerproduktion.png](https://www.vdz-online.de/fileadmin/user_upload/Zement_Klinkerproduktion.png)
- Wachsmuth, J., Duscha, V., Wietschel, M., Oberle, S., Herrmann, U., Graf, M. et al. (2023). *Transformation der Gasinfrastruktur zum Klimaschutz*. Umweltbundesamt. Zugriff am 21.8.2024. Verfügbar unter: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-03-31\\_cc\\_09-2023\\_transformation-gasinfrastruktur-klimaschutz.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-03-31_cc_09-2023_transformation-gasinfrastruktur-klimaschutz.pdf)
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2022). *Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland*. Zugriff am 17.6.2024. Verfügbar unter: [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl\\_Fakten-2022\\_RZ\\_neu\\_Web.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Fakten-2022_RZ_neu_Web.pdf)
- WWF Deutschland. (2024). *DIRTY DOZEN: CHEMIE Emissionen der 12 größten Chemieparks in Deutschland*. Berlin: WWF Deutschland in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut e.V. Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/WWF-Dirty-Dozen-Chemie.pdf>
- YARA GmbH & Co. KG. (2024). Lebenszyklus-Analyse von Ammoniumnitrat. Unternehmenshomepage, . Zugriff am 20.6.2024. Verfügbar unter: <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/pure-nutrient/info-1-ich-will-ertrag-kein-co2/dungemittel-und-klimawandel/lebenszyklus-analyse-ammoniumnitrat/>





Hochschule **RheinMain**  
**AZARE**

AZARE – Anwendungszentrum für Antriebssysteme auf Basis regenerativer Energieträger  
c/o Hochschule RheinMain  
Am Brückweg 26  
65428 Rüsselsheim  
[www.hs-rm.de/azare](http://www.hs-rm.de/azare)

---

