Bachelor's Thesis

Erstellen eines CO_2-Potentialatlas Deutschlands für die Systemintegration von „Power-to-Fuel“

Developing a model of the CO_2-supply in Germany with regard to the system integration of “Power-to-Fuel”

verfasst von

Michael Masnitza

Mat.Nr. 03627439

eingereicht am

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Technische Universität München

bei

Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher

Betreuer Dipl. Ing. Johannes Winklmaier

Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und Anwendungstechnik
Ordinarius Prof. Dr.-Ing. U. Wagner · Prof. Dr. rer. nat. Th. Hamacher (komm.)

Technische Universität München

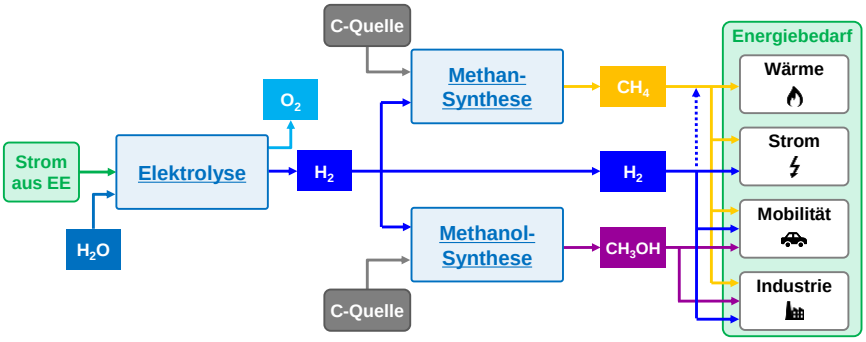
Bachelor Thesis

Erstellen eines CO_2-Potentialatlas Deutschlands für die Systemintegration von „Power-to-Fuel“

Developing a model of the CO_2-supply in Germany with regard to the system integration of “Power-to-Fuel”

Hintergrund der Themenstellung

Der zunehmende Anteil an erneuerbaren Energien in Deutschland führt infolge ihrer volatilen Einspeisung zu einem steigenden Bedarf an flexiblen Verbrauchern. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Brennstoffe (sog. Power-to-Fuel) ist in diesem Zusammenhang eine mögliche Technologie. Dabei wird aus Wasser durch Elektrolyse Wasserstoff gewonnen. Sollte dieser Brennstoff nicht direkt vertrieben werden, kann er in einem zweiten Prozess unter Zuführung von CO_2 in einer Synthese-Reaktion zu Methan oder Methanol umgesetzt werden.



Zielsetzung und Arbeitsschritte

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Produzenten von CO_2, welche als Bezugsquellen für Power-to-Fuel in Frage kommen, identifiziert werden. Anschließend sollen deren CO_2-Emissionen quantifiziert, ihre Erzeugungskosten für das CO_2 ermittelt und diese Daten in eine digitale Karte für Deutschland implementiert werden. Daraus lassen sich optimale Power-to-Fuel-Standorte ableiten.

Voraussetzungen

Interesse an Energiemärkten; Gute Kenntnisse des MS-Office-Pakets (insb. Excel); Programmierkenntnisse vorteilhaft (MATLAB); Eigenverantwortliches und selbstständiges Arbeiten; hohes Engagement und Eigeninitiative verbunden mit Teamgeist und Flexibilität

Betreuer: Dipl. Ing. Johannes Winklmaier (johannes.winklmaier@tum.de)

Ausgabedatum: 01.10.2014

Prof. Dr. rer. Nat. Thomas Hamacher

Kurzzusammenfassung
Ziel der Arbeit war die Erstellung eines CO_2-Potentialatlas um das Potential der Methanisierung quantifizieren und lokalisieren zu können. Weiter wurden kurzfristig optimale Methanisierungsstandorte ermittelt, die das Stromnetz entlasten und keinen CO_2- und H_2-Transport benötigen.
Die Daten der CO_2-Emitter stammen aus den CO_2-Zertifikaten. Standortüberschneidungen wurden anhand der Postleitzahlen ermittelt. Die Datenverarbeitung wurde in Matlab realisiert. Statistiken wurden mit QGIS und Excel erstellt. Die Darstellung erfolgte in Matlab und MS Power View.
Kraftwerke emittieren etwa 370 Mio. Tonnen pro Jahr und bieten großflächig die besten Abscheidungsbedingungen. Nordrhein-Westfalen emittiert mit 200 Mio. Tonnen jährlich am meisten CO_2 . Besonders Bayern fällt mit vielen Anlagen bei geringer Emission auf. Es wurden etwa 240 optimale Standorte identifiziert mit einem Methanisierungspotential von etwa 5,76 TWh Methan-Äquivalent. Der limitierende Faktor des Methanisierungspotentials ist das Stromangebot aus erneuerbaren Energien, nicht das Angebot von CO_2 . Das größte Methanisierungspotential haben Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Nordrhein-Westfalen.

Abstract
The objective was to develop a model of the CO_2-supply in Germany to identify and localize the potential of methanation. In addition, the ideal short term locations for methanation were identified. These ease the load on the power grids and do not require transport of CO_2 and H_2.
The data of CO_2-emitters were derived from the CO_2-certificates. Location overlaps were identified based on postal code. The data processing was implemented in Matlab. Statistics were derived using QGIS and Excel. The illustration was realized in Matlab and MS Power View.
Power plants emit about 370 million tons CO_2 a year and have the best prerequisite for extensive CO_2 capture. North Rhine-Westphalia emits the most CO_2 at 200 million tons a year. Bavaria has a low CO_2 emission considering its numerous industrial facilities. About 240 ideal locations were identified with a potential of methanation of about 5.76 TWh methane equivalent. The limiting factor of the potential of methanation is the supply of renewable energy, not the supply of CO_2 . Lower Saxony, Saxony-Anhalt, Brandenburg and North Rhine-Westphalia have the largest potential of methanation.

Erklärung

Hiermit erkläre ich,
Name: Masnitza
Vorname: Michael
Matr. Nr.: 03627439

dass ich die beiliegende Bachelor's Thesis zum **Thema**:
Erstellen eines CO_2-Potentialatlas Deutschlands für die Systemintegration von „Power-to-Fuel"

selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, sowie alle wörtlichen und sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet und die entsprechende Quelle angegeben habe.
Vom Lehrstuhl und seinen Mitarbeitern zur Verfügung gestellte Hilfsmittel, wie Modelle oder Programme, sind ebenfalls angegeben. Diese Hilfsmittel sind Eigentum des Lehrstuhls bzw. des jeweiligen Mitarbeiters. Ich werde sie nicht über die vorliegende Arbeit hinaus weiter verwenden oder an Dritte weitergeben.

Einer weiteren Nutzung dieser Arbeit und deren Ergebnisse (auch Programme und Methoden) zu Zwecken der Forschung und Lehre, stimme ich zu.

Ich habe diese Arbeit noch nicht zum Erwerb eines anderen Leistungsnachweises eingereicht.

München, den 27.01.2015

.....
(Bearbeiter: Name, Vorname)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VII

Tabellenverzeichnis VIII

Abkürzungsverzeichnis IX

1 Einleitung 1

2 Rahmenbedingungen 2
- 2.1 CO_2-Zertifikate verarbeiten und optimale Methanisierungsstandorte ermitteln 2
- 2.2 Betrachteter Zeitraum und Dimensionierung der Anlagen 2
- 2.3 Mögliche Methanisierungstandorte 3
- 2.4 Definierung kurzfristig optimaler Methanisierungsstandorte 3
- 2.5 Zusammenfassen auf PLZ 4
- 2.6 Berücksichtigung der CO_2-zertifikathandelspflichtigen Emitter 4
- 2.7 CO_2 im Abgas hat keine Entstehungskosten 4

3 Datenakquise 5
- 3.1 Standort und Emission von CO_2-Emittern 5
- 3.2 Standorte der erneuerbaren Energie Produktion 5
- 3.3 Geodaten der PLZ 6

4 Der CO_2-Gestehungspreis 7
- 4.1 Zusammensetzung des CO_2-Gestehungspreises 7
- 4.2 Vergleich der Prozesskette von CCU und CCS 7
- 4.3 Bestimmung der Abscheidungskosten 8
- 4.4 Bestimmung der Transportkosten 11

5 Datenaufbereitung 14
5.1 Beschreibung von erstellten Tabellen 14
5.2 Aufbereitung der CO_2-Emitter Liste 15
5.3 Aufbereitung der Liste der EE-Standorte 16
5.4 Aufbereitung der PLZ-Liste 18
5.5 Berechnen der Distanzmatrix 18
5.6 Erstellung der Abscheidungskostenmatrix 18
5.7 Erstellung der Transportkostenmatrix 19
5.8 Filtern optimaler Methanisierungsstandorte 19
5.9 Berechnung des Methanisierungspotentials an optimalen Methanisierungsstandorten 19
5.10 Erstellung der Statistiken der Bundesländer in QGIS 20

6 Visualisierung der Ergebnisse 21
6.1 Darstellung in Matlab 21
6.2 Darstellung in Excel und MS Power View 22

7 Interpretation der Ergebnisse 23
7.1 Verteilung der CO_2-Emission auf die Bundesländer 23
7.2 Verteilung der CO_2-Emission auf die Emittertypen 26
7.3 Verteilung optimaler Methanisierungsstandorte auf die Bundesländer . . . 29
7.4 Größenverteilung optimaler Standorte 32

8 Zusammenfassung & Ausblick 33

Literatur- und Quellenverzeichnis 35

A Anhang 37
A.1 Kurzbeschreibung erstellter Matlab-Funktionen 37
A.2 Tabelle CO_2-Emission der Bundesländer 38
A.3 Tabelle optimaler Standorte der Bundesländer 39
A.4 Tabelle optimaler Standorte 40

Abbildungsverzeichnis

7.1 Matlab Karte der CO_2-Emitter in Deutschland auf PLZ summiert 23
7.2 Durchschnittliche CO_2-Emission einer Anlage Jahr 24
7.3 CO_2-Emission der Bundesländer 25
7.4 Verteilung der Anlagen auf die Bundesländer 25
7.5 Matlab Karte der CO_2-Emitter in Deutschland nach Anlagentyp 26
7.6 Größenverteilung der CO_2-Emitter nach Typ 27
7.7 Verteilung der Anlagen auf Emittertypen 28
7.8 Verteilung der CO_2-Emission auf Emittertypen 28
7.9 Darstellung aller optimalen Standorte nach Methanisierungspotential in Power View 29
7.10 Darstellung großer optimaler Standorte ab einem Methanisierungspotential von 26230,68 MWh/a in Power View 30
7.11 Verteilung des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten auf die Bundesländer 31
7.12 Optimale Standorte: Anteilige Verfügbarkeit von CO_2 , Wind-EE und Solar-EE 31
7.13 Größenverteilung des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten . 32

8.1 Power View Darstellung der CO_2-Emitter in Bayern 34

Tabellenverzeichnis

4.1 Prozessketten von CCS und CCU 8
4.2 Tabellarische Darstellung der CO_2-Vermeidungskosten pro abgeschiedener Tonne. 11
4.3 Vergleich der Gastransportmedien [DPR06, S. 75-94] 13

7.1 Verteilung der CO_2-Emission auf Emittertypen 27

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
EE	Erneuerbare Energie
lat	latitude
lon	longitude
CO_2	Kohlenstoffdioxyd
H_2	Wasserstoff
O_2	Sauerstoff
CH_4	Methan
CCS	carbon (dioxide) capture and storage
CCU	carbon capture and usage
ST	short term / kurzfristig
MT	mid term / mittelfristig
LT	long term / langfristig
kWh_avg	Durchschnittliche Stromproduktion pro Jahr
kWh/kW	Durchschnittliche Stromproduktion pro Jahr pro installierter Nennleistung

1 Einleitung

Um den CO_2-Ausstoß zu reduzieren, setzt Deutschland bei der Stromerzeugung auf erneuerbare Energie. Aber die Wärmeerzeugung und Industrie sind ebenso CO_2-intensiv. Zur Zeit werden hierfür fossile Brennstoffe eingesetzt. Das Ziel von "Power-to-Fuel" ist die Substitution fossiler durch synthetische Brennstoffe, die aus erneuerbar Energie gewonnen wurden. Diese sind CO_2-neutral. Die Herstellung synthetischer Brennstoffe erfolgt durch Elektrolyse und Methanisierung. Im ersten Schritt wird Wasser mit EE-Strom in der Elektrolyse in Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 getrennt. In der Methanisierung entsteht aus H_2 und CO_2 Methan CH_4. Eine Herstellung von flüssigen synthetischen Brennstoffen ist auch möglich. CO_2 ist das Edukt, dessen Potential in dieser dieser Arbeit abgeschätzt wird.
Durch Kombination von Methanisierung, Elektrolyse, EE-Erzeuger und einem Gaskraftwerk entsteht ein CO_2-Kreislauf. Das CO_2 wird aus dem Abgas des Gaskraftwerks abgeschieden. In der Elektrolyse und Methanisierung entsteht mit EE-Strom wieder Methan, das im Gaskraftwerk genutzt wird. Auf diese Weise kann Methanisierung, kombiniert mit einem Gaskraftwerk, als flexibler Verbraucher von Strom und Erzeuger von Strom oder Wärme fungieren.
Die Hauptaufgabe der Arbeit besteht aus der Erstellung eines CO_2-Potentialatlas Deutschlands für die Systemintegration von „Power-to-Fuel". Die Kernfragen lauten:

- Wo ist CO_2 verfügbar?
- Wie viel CO_2 steht zur Verfügung?
- Zu welchem Preis ist es beziehbar?

Hierfür wurden die CO_2-Zertifikatsdaten des EU-Emissionshandels ausgewertet und Statistiken für Deutschland und die Bundesländer erstellt. Weiter wurden optimale Methanisierungsstandorte definiert, gesucht und dargestellt.

2 Rahmenbedingungen

2.1 CO_2-Zertifikate verarbeiten und optimale Methanisierungsstandorte ermitteln

Die Daten zur CO_2-Emission aus den CO_2-Zertifikaten sollen verarbeitet, analysiert und veranschaulicht werden, um CO_2-Quellen identifizieren zu können.
Weiter sollen die kurzfristig optimalen Methanisierungsstandorte, die keinen CO_2-Transport voraussetzen und das Stromnetz entlasten, ermittelt werden. Für langfristige Standortoptimierung soll eine erst Datengrundlage geschaffen werden.
Alle Emitter und Standorte sollen mit Geodaten versehen sein.

2.2 Betrachteter Zeitraum und Dimensionierung der Anlagen

Für die Kostenabschätzung werden nur short bzw. midterm (ST/MT) verfügbare Technologien betrachtet. Erwartete longterm (LT) Kostenreduktion wird im Text genannt.
Bereits marktreife Technologien werden bevorzugt.
Methanisierung ist in der Entwicklungsphasen. ST liegt die Anlagenleistung kleinem MW Bereich. Deshalb gibt es aktuell wenig CO_2-Bedarf. Es werden Kleinmengen CO_2 transportiert.
LT erreicht man großen MW oder GW Bereich, daraus resultiert ein großer CO_2-Bedarf, für den eine eigene Infrastruktur nötig ist. Zu CO_2-Infrastruktur gibt es nur wenig Literatur und Erfahrungsberichte, da die kommerziellen Anbieter von CO_2-Pipelines ihre Daten nicht veröffentlichen.

2.3 Mögliche Methanisierungstandorte

Für potentielle Methanisierungsstandorte gibt es mehrere Optionen:

1. Bei Ortschaften:
   Methanisierung an Ortschaften ermöglicht eine gute Abwärmenutzung durch Anschluss an das Fernwärmenetz. Allerdings müssen Strom und CO_2 transportiert werden. Es wird eine CO_2-Infrastruktur und Netzausbau benötigt.

2. An der CO_2-Quelle:
   Durch Methanisierung an der CO_2-Quelle wird der CO_2-Transport vermieden. Es wird keine neue Infrastruktur benötigt. Es entsteht keine Emission durch Pipelineleckage. Allerdings muss Strom transportiert werden und die Abwärmenutzung ist limitiert.

3. An der EE-Quelle:
   In diesem Fall muss kein Strom transportiert werden. EE-Erzeuger können so vom Netz genommen werden. Allerdings ist CO_2-Transport, also neue Infrastruktur, nötig.

4. An bestehendem H_2-Produzenten:
   Durch Methanisierung an einem bestehenden H_2-Produzenten wird die Elektrolyse günstiger.[1] Allerdings muss Strom und CO_2 transportiert werden und die Abwärmenutzung ist limitiert.

2.4 Definierung kurzfristig optimaler Methanisierungsstandorte

Stromtransport benötigt Netzausbau. Dieser stagniert in Deutschland. CO_2-Transport in größerer Dimension benötigt eine Pipeline Infrastruktur. Es gab in Deutschland bereits Bevölkerungswiderstand gegen neue Stromtrassen und CO_2- Pipelines. Ein Standort wird als kurzfristig optimal definiert, der die Standortoptionen "An der CO_2-Quelle" und "An der EE-Quelle" vereinigt. Dadurch müssen kein Strom und CO_2 transportiert und das Netz kann entlastet werden.

1 Der H_2-Preis pro Tonne wird geringer, je größer der Elektrolyseur dimensioniert ist.

Es wird angenommen, dass Methanisierung und Elektrolyse am gleichen Ort stattfinden, da sonst Wasserstoff transportiert werden müsste.
Für spätere LT-Betrachtungen werden in der Arbeit auch Informationen zum CO_2-Transport gesammelt.

2.5 Zusammenfassen auf PLZ

Um die emittierte Menge CO_2 pro Region besser darstellen zu können und um die Anzahl der Rechenoperationen zu verringern werden CO_2-Emitter und EE-Produzenten auf jeder PLZ zusammengefasst. Dies bietet sich an, da sowohl CO_2-Zertifikate, als auch EE-Liste mit PLZ angegeben sind.

2.6 Berücksichtigung der CO_2-zertifikathandelspflichtigen Emitter

Die potentiellen CO_2-Lieferanten sind große CO_2-Emitter. Große Emitter sind zur CO_2-Zertifikats Abgabe verpflichtet. Mit den CO_2-Zertifikatsdaten sind etwa 40% der Deutschen CO_2-Emissionen abgedeckt. Großindustrie und Kraftwerke bieten die besten Randbedingungen zur CO_2-Abscheidung. Diese sind CO_2-Zertifikats pflichtig.
Nicht erfasst wird z.B. der Transportsektor. Hier ist eine Abscheidung des CO_2 aus dem Abgas und der Transport zur Methanisierungsanlage allerdings nicht zu realisieren.

2.7 CO_2 im Abgas hat keine Entstehungskosten

Wir nehmen an, dass das Abgas "gratis" zur Verfügung gestellt wird. Die Anlagen-, und Brennstoffkosten werden nicht auf den CO_2-Preis abgeschrieben.

3 Datenakquise

Im Folgenden werden die Quellen der verwendeten Daten genannt:

3.1 Standort und Emission von CO_2-Emittern

Die CO_2-zertifikatspflichtigen Anlagen werden in einer öffentlichen Datenbank der EU-Kommission zur Verfügung gestellt. Diese Datenbank ist nicht vollständig, es fehlen z.B. die PLZ Einträge.
Deshalb wird auf die Daten der deutschen Emissionshandelsstelle DEHSt zurückgegriffen. Sie ist für die Sammlung und Verwaltung der Deutschen CO_2-Zertifikate und Anlagen zuständig. Sie stellt ein Anlagenregister mit allen für die Arbeit relevanten Daten online als PDF, nicht als Excel-Tabelle, zur Verfügung. [UB13]
Wir betrachten die Daten des Jahres 2012. Dies ist das letzte Jahr der letzten abgeschlossenen Handelsperiode. Es ist das vollständiger als die vorherigen Jahre und final, da die Handelsperiode abgeschlossen ist.

3.2 Standorte der erneuerbaren Energie Produktion

Die Methanisierungsstandorte sind in dieser Arbeit bei EE-Erzeuger positioniert. Die Bundesnetzagentur ist laut EEG 2014 §6 verpflichtet, ein öffentliches EE-Anlagenregister zu führen. Dieses wurde erst im Laufe der Erstellung der Arbeit freigeschaltet. Es eignet sich nicht als Datengrundlage, da nur die Nennleistung, nicht die durchschnittliche Stromproduktion angegeben ist.
Deshalb werden die Daten aus dem privaten EE-Anlagenregister www.Energymap.info bezogen. [fSeD14] Hier steht eine große .csv-Datei mit Datensätzen von etwa eineinhalb

Million EE-Anlagen mit Angabe der durchschnittlichen Stromproduktion zur freien Verfügung.

3.3 Geodaten der PLZ

Die Längen und Breitengrade der PLZ-Gebiete werden aus der OpenGeoDb bezogen. [Ope12] Sie ist eine online open source Datenbank, auf der die Geodaten aller deutschen PLZ gesammelt werden. Sie werden als Textfile bereitgestellt. Der Textfile wurde in Excel importiert und abgespeichert. Er ist aufsteigend nach PLZ sortiert.

4 Der CO_2-Gestehungspreis

4.1 Zusammensetzung des CO_2-Gestehungspreises

Der CO_2-Gestehungspreis pro Tonne setzt sich wie folgt zusammen:

$$\begin{aligned} CO_2\text{-}Gestehungspreis(t) = Abscheidungskosten(t, Anlage) \\ + Transportkosten(t, Transportart, Distanz) \\ - CO_2\text{-}Zertifikatskosten(t) \end{aligned} \tag{4.1}$$

Es entstehen Kosten bei der Abscheidung des CO_2 aus dem Abgas des Emitters, abhängig vom Anlagentyp. Weiter entstehen transportbedingte Kosten, z.B. bei der Kompression zum Transport, abhängig von der Transportart, und dem Transport selbst, abhängig von der Transportart und dem Transportweg. Da das CO_2 nicht ausgestoßen wird, spart sich der Anlagenbetreiber CO_2-Zertifikate. Damit gehen Sie negativ in die Gestehungskosten ein.

4.2 Vergleich der Prozesskette von CCU und CCS

Methanisierung fällt im Power-to-Fuel Kontext unter CCU, Carbon Capture and Usage. Tabelle 4.1 zeigt einen tabellarischer Vergleich der Prozessketten von CCU zu CCS, Carbon Capture and Storage.

Man stellt fest, dass sich die beiden Methoden ähneln. Abscheidung und Transport sind praktisch identisch. CCU braucht ggf. eine höhere CO_2-Reinheit nach der Abscheidung. Der letzte Schritt ist verschieden. Bei CCU wird das transportierte CO_2 weiterverarbeitet, in unserem Fall methanisiert, bei CCS in einer geologischen Lagerstätte endgelagert.

Tabelle 4.1: Prozessketten von CCS und CCU

Prozessschritt	CCS	CCU
1	CO_2-Abscheidung	CO_2-Abscheidung
2	CO_2- Transport	CO_2-Transport
3	CO_2-Endlagerung	Methanisierung

Abscheidungs- und Transportkosten des CO_2 können wir daher aus CCS-Literatur übernehmen.

4.3 Bestimmung der Abscheidungskosten

[DPR06, S. 47-74] Die Abscheidungskosten unterscheiden sich nach Anlagentypen und Abscheidungstechnologie. Da CCS und CCU noch im Entwicklungsstadium sind, werden die Preise pauschal in Abscheidungskosten pro eingefangener oder vermiedener Tonne CO_2 angegeben.Der Preis einer eingefangen Tonne sind die Kosten für das Zurückhalten einer Tonne CO_2 . Der Preis ist in einer vermiedenen Tonne CO_2 angegeben. Da bei der CO_2-Abscheidung der Wirkungsgrad der Anlage sinkt, muss zur gleichen Energieerzeugung mehr Brennstoff verfeuert werden. Dieser Wirkungsgradverlust ist im Preis der vermiedenen Tonne mit eingerechnet. Er ist also stets teurer als der Preis der eingefangenen Tonne. Für uns ist der Preis pro vermiedener Tonne ausschlaggebend, da der Anlagenbetreiber seine Mehrkosten auf den CO_2-Preis weitergeben wird. Im weiteren wird vermiedene und abgeschiedene Tonne gleichbedeutend verwendet. [1]
Die CO_2-Abscheidung aus Kraftwerken kann durch drei unterschiedlichen Verfahrensklassen realisiert werden:

- Post-combustion:
  Die post-combustion-Verfahren reinigen das Abgas nach der Verbrennung. Mögliche Verfahren sind Membranfiltration oder chemische Wäsche. Letztere wird aktuell verwendet, um Schwefeloxide aus dem Abgas zu filtern. Die Technologie ist also erprobt, wurde auf CO_2 übertragen und ist praktisch marktreif. Das CO_2 wird bei niedriger Temperatur an Amine gebunden und bei hoher Temperatur abgegeben.

1 Eine vermiedene Tonne resultiert aus mehr als einer abgeschiedenen Tonne CO_2 , abhängig von dem Mehraufwand des Brennstoffs. Dies ist in der Technologiekennzahl Abgeschiedene t CO_2 / vermiedene t CO_2 angegeben und schwankt stark. Für eine genauere Preisschätzung müsste man den Preis pro vermiedener Tonne noch durch die entsprechende Kennzahl teilen.

[2]Das Rückgewinnen des Waschmittels ist energieintensiv. Durch Rückgewinnung und CO_2-Verdichtung sinkt der Wirkungsgrad des Kraftwerks.
Die Aminowäsche kann einem vorhandenen Kraftwerkssystem nachgeschaltet werden.

- Post-combustion:
  Das pre-combustion-Verfahren entfernt das CO_2 vor der Verbrennung. Das CO_2 wird aus dem Brenngas eines IGCC-Kraftwerks mit physikalischer Wäsche abgeschieden. Die Rückgewinnung des physikalischen Waschmittels ist weniger energieintensiv als die des chemischen. Vorhandene Kraftwerke können nicht zu IGCC-Kraftwerken nachgerüstet werden. Die IGCC-Technologie hat sich am Markt nicht etabliert. Rückgewinnung des Waschmittels und Verdichtung senken den Wirkungsgrad des Kraftwerks. Das CO_2 weist eine hohe Reinheit auf.

- Oxyfuel:
  Bei Sauerstoff basierten Verfahren wird der Brennstoff in einer Umgebung von Sauerstoff und zurückgeführtem Rauchgas verbrannt. Durch die Verbrennung in reinem Sauerstoff entsteht fast reines CO_2 im Abgas. Nur Unreinheit des Brennstoffs und Rußpartikel, vor allem bei Kohle, verunreinigen das Abgas. Die Verbrennungsumgebung führt zu hohen Temperaturen, deshalb muss das abgekühlte Abgas teilweise in die Brennkammer zurückgeführt werden, um die Temperatur zu reduzieren. Das Arbeitsmittel im GuD-Kraftwerk ist dann reines CO_2 . Hierfür muss eine CO_2-Gasturbine entwickelt werden. Die Technologie ist noch nicht verfügbar. Aktuell müsste Luftzerlegung zur Versorgung mit reinem Sauerstoff verwendet werden. Diese ist energieintensiv. Durch die Sauerstoffherstellung und die Verdichtung des CO_2 sinkt der Wirkungsgrad des Kraftwerks.
  In unserem optimalen Fall, bei Kombination von Abscheidung und Methanisierung, fällt bei der Elektrolyse Sauerstoff als Abfallprodukt an. Die Abscheidungskosten können durch diese Synergie reduziert werden. Das CO_2 weist bei Verwendung von Gas eine hohe Reinheit auf. Bei Verwendung von Kohle gibt es Verunreinigungen.

Die Abscheidung aus Industrieabgas erfolgt meist durch post-combustion. Vor allem Eisen- und Stahlverarbeitung sowie Zementherstellung emittieren größere Mengen CO_2 und sind häufig emissionshandelspflichtig. Eine Ausnahme stellt die Abscheidung aus dem Raffinerie und Petroleum Sektor da. Hier schwankt die Konzentration des CO_2 im Abgas

2 Die Temperaturen sind von dem verwendeten Amin abhängig.

stark von Anlage zu Anlage. Die Abscheidungskosten bei stark verunreinigtem Abgas sind hier sehr hoch. Andererseits kann das Abgas auch eine hohe CO_2-Reinheit aufweisen, was die Abscheidung extrem billig machen würde. Für diese Unterscheidung reichen die Daten aus den CO_2-Zertifikaten nicht aus. [TK12]
Die geschätzten Abscheidungskosten für Kraftwerks- und Industrieabscheidung finden sich in Tabelle 4.2. [3] [4]

Zusätzlich hat die Literaturrecherche ergeben:
Der Anlagentyp bestimmt die Verunreinigung des Abgases. Je reiner das CO_2 im Abgas ist, desto weniger kostet die Abscheidung. Besonders hoch sind die Abscheidungskosten bei Biogasanlagen, da das CO_2 stark verunreinigt ist. Besonders niedrig bei Ölraffinerien, die hier teilweise ein reiner CO_2-Fluss als Abgas vorliegt.
Es ist Anzumerken, dass nie 100 Prozent des CO_2 im Abgas abgeschieden wird. Hierfür führt man einen Abscheiderate ein. [DPR06, S. 52f.] Sie beschreibt, wie viel Prozent des emittierten CO_2 aufgefangen werden.
Im TEHG wird für den CO_2-Zertifikatshandel zwischen 33 Anlagentypen von CO_2-Emittern unterschieden. In den CO_2-Zertifikaten sind 1-17 ohne 8 enthalten. 1-4 enthalten Strom- und Wärmeerzeugung, im weiteren "Kraftwerke" genannt. 5 und 6 repräsentieren Brennstoff betriebene Arbeitsmaschinen, 6 "Raffinerien", 9-17 "Industrieanlagen". [dJufV11]
Für alle Industrieanlagen außer Glasherstellung,Keramikherstellung und das einbrennen von Kalkstein wurden Kostenabschätzungen in der CCS-Literatur gefunden und in der Tabelle nach den Anlagentypen zugeordnet. Glas, Keramik und Kalkstein wurde der Typische Wert der Abscheidungskosten der Industrie zugeordnet, 65 Euro pro vermiedener Tonne. Arbeitsmaschinen[5] wurden zu "Kraftwerke" hinzugefügt und die Kosten der Kraftwerkes-CO_2-Abscheidung zugeordnet, entsprechend der CO_2-Wäsche aus Abgas von Brennstoffverbrennung.

Zur optimalen Unterscheidung werden den Abscheidungskosten aus Kraftwerken der Wert 58 €, Industrie der Wert 65 €und Raffinerien der Wert 60 €aus Tabelle 4.2 zugeordnet.

3 Die eingeklammerten Dollarwerte wurden in Euro umgerechnet. Sie wurden im Jahr 2011 abgeschätzt. 2011 war der Dollarpreis etwa 1,39 €.
4 Die Abscheidungstechnologien sind noch im Entwicklungsstadium. Die Werte sind mit hoher Unsicherheit behaftet.
5 Tätigkeiten Nr. 5 und 6

Tabelle 4.2: Tabellarische Darstellung der CO_2-Vermeidungskosten pro abgeschiedener Tonne.

		ST/MT	LT
Kraftwerke	Pre-combustion	48 €(67 $)	-
[DPR06, S. 47-74]	Oxyfuel	-	41 €(57 $)
[Ins11, S. 46]	Post-combustion	42 - 58 €/ 58 €(81$)	-
Industrie	Eisen- und Stahlverarbeitung	40 - 65 €	30 - 55 €
[TK12]	Zementherstellung	>65 €	25 - 55 €
	Raffinerie und Petroleum Sektor	50 - 60 €	30 €

4.4 Bestimmung der Transportkosten

Die Transportkosten $c_t(t)$ werden wie folgt berechnet:

$$c_t(t) = spezifischeKostenprokm(t, Transportmedium) * Transportdistanz \tag{4.2}$$

Die Transportkosten hängen hauptsächlich von zwei Faktoren ab, dem gewählten Transportmedium und der Transportstrecke. [6] Für die Transportstrecke wird die Luftlinie von CO_2-Emitter zu Methanisierungsstandort betrachtet. Für das Transportmedium stehen vier Optionen zur Auswahl: [DPR06, S. 75-94]

1. LKW:
   In Deutschland ist ein großes Straßennetz vorhanden. Es ist keine neue Infrastruktur nötig. Damit sind die Investitionskosten gering. Der Transport ist skalierbar durch den Einsatz von mehr LKW.
   Der Preis pro Kilometer, die CO_2-Bilanz und das Unfallrisiko sind hoch. Es sind nur kleine Fördermengen pro Ladung möglich.
   Transport ist ST möglich.

2. Bahn:
   In Deutschland ist ein großes Schienennetz vorhanden. Es muss nur in den Anschluss an das Schienennetz investiert werden. Der Transport ist skalierbar durch den Einsatz von mehr Zügen.
   Der Preis pro Kilometer ist billiger als bei LKW-Transport, das Transportvolumen ist größer. Die CO_2-Bilanz ist vom Strommix abhängig.
   Transport ist ST/MT möglich.

6 Nebenfaktor ist z.B. der benötigte Druck

3. Schiff:
   Schiffe bieten ein großes Transportvolumen und ermöglichen einen niedriger Preis pro Kilometer bei langer Transportstrecke. Dazu muss die Auslastung hoch sein. Die Investitionskosten eines Schiffes sind hoch.
   In Deutschland ist keine große Schifffahrt Möglich. Auch sind keine große Strecke zurückzulegen, wie z.B. bei Transport von liquified natural gas (LNG) von Amerika nach England.

4. Pipeline:
   Die Pipeline bietet geringe Kosten pro Kilometer. Das Unfallrisiko ist gering, die Transportmenge ist groß und der Transport ist beinahe CO_2-neutral. [7]
   Allerdings ist die Anfangsinvestition hoch, die Pipeline benötigt eine hohe Auslastung, um günstig zu sein und ist standortbezogen unflexibel. Auch gab es in Deutschland bereits Bürgerwiderstand gegen den Bau einer CO_2-Pipeline. Wegen der langen Bauzeit ist der Transport nur LT möglich. Die Transportkostenschätzung wurde mit [STM08] abgeglichen und bestätigt.

7 Ausgenommen den Aufbau und Leckageverluste.

Tabelle 4.3: Vergleich der Gastransportmedien [DPR06, S. 75-94]

	LKW	Bahn	Schiff	Pipeline
Transportmenge	-	0	+	+ +
Skalierbarkeit	+	+	+	-
Infrastruktur vorhanden	+ +	+	nicht möglich	-
CO_2-Bilanz	-	(+/-)	0	+
Flexibilität	+	-	0	- -
Anfangsinvestition	+ +	+	-	-
€/ (100 km*t)	10	4	1,3 - 0,22	0,8 - 0,5

In Tabelle 4.3 sind die Vor- und Nachteile der Transportmedien tabellarisch dargestellt. Die Bewertung basiert auf den Werten sehr schlecht (- -) über neutral (0) bis sehr gut (++). Die Preisspanne bei Schiff und Pipeline entsteht durch nicht linearen Kostenanstieg über die Transportdistanz. Je mehr Strecke zurückgelegt werden muss, desto billiger der Preis pro Tonne pro Kilometer.

Fazit: Für eine vereinfachten Betrachtung der radiale Transportkosten ändert sich bei verschiedenen Transportarten nur der Preis pro Kilometer.
Da die Methanisierung noch im Entwicklungsstadium ist, und wir ST/MT betrachten, ist der Bedarf an CO_2 gering. Es wird LKW-Transport empfohlen. LT überwiegen die Preisvorteile des Pipelinetransports.

5 Datenaufbereitung

5.1 Beschreibung von erstellten Tabellen

Folgende Tabellen wurden erstellt:

- Tabelle einzelner CO_2-Emitter mit:
  PLZ, CO_2-Emission 2012, Haupttätigkeit, Abscheidungskosten, Anlagennummer
- Tabelle der CO_2-Emission der Bundesländer mit:
  Geodaten, Bundesland, CO_2-Emission 2012, Anlagenanzahl
- Tabelle optimaler Standorte mit:
  PLZ, CO_2-Angebot, Stromangebot,Windstromproduktion, Solarstromproduktion, Abscheidungskosten, Methanisierungspotential
- Tabelle optimaler Standorte auf Bundesländer summiert mit:
  Bundesland, Summe Stromangebot, Summe Windstromproduktion, Summe Solarstromproduktion, Summe Methanisierungspotential, Anzahl optimaler Standorte
- Zwei Tabellen der Strom- und Windenergieerzeuger auf PLZ summiert mit:
  PLZ, durchschnittlich produzierter Strom pro Jahr, EE-Typ
- PLZ-Geodaten Tabelle mit:
  PLZ, lat, lon
- Transportkostentabelle mit:
  Transportart, spezifische Kosten/(100km*t)

Um die Daten Darstellen zu können wurden die Tabellen teilweise mit den der PLZ zugehörigen Längen- und Breitengradeinträgen versehen.

Kurzbeschreibungen wichtiger erstellter Matlabfunktionen und Matlabscripts finden sich im Anhang. Genauere Beschreibungen der Funktionen und Eigenschaften der In- und Outputvariablen sind in den zugehörigen Matlabfiles als Kommentare hinterlegt.

5.2 Aufbereitung der CO_2-Emitter Liste

Die von der DEHSt bereitgestellte PDF-Tabelle ist weder mit Excel, noch mit Matlab auslesbar. Eine Excel Tabelle stellte der zuständige Fachbereich des Umweltministeriums nicht zur Verfügung. Um die PDF Tabelle nutzbar zu machen, wurden folgende Schritte unternommen:

1. Mit dem Onlinetool "Nitro" [1] entstand eine Excel-Tabelle mit 42 sheets, analog zur Seitenzahl der PDF. Die sheets wurden mit einem Excel Macro zu einem verschmolzen. [2]

2. Etwa jede dritte Zahl war als String formatiert. Eine Funktion, um alle Strings mehrerer Felder, die gemischt als Zahl oder String formatiert sind, zu Zahlen zu formatieren, hat Excel nicht. Die Lösung:
   Hierfür erstellt man einen Eintrag mit der Zahl 1. Dieses Feld kopiert man, und fügt sie mit "Paste Special ">"Operation">"Multiply" auf die gemischt formatierten Felder ein. Dadurch werden alle Strings, die zu Zahlen formatiert werden können, automatisch zu Zahlen formatiert und mit 1 multipliziert. Ihr Wert bleibt gleich.

3. Der Anlagentyp, der gesetzlich durch die Haupttätigkeit festgelegt ist, ist als String dokumentiert, z.B. "Haupttätigkeit nach XI". Der String wurde durch eine arabische Zahl ersetzt, z.B. "9".

4. Bei der Zuordnung von Längen und Breitengraden zu den PLZ hat sich herausgestellt, dass etwa 60 Einträge der PLZ-Spalte, davon 49 einzelne PLZ, fehlerhaft sind. Die PLZ wurden unter Berücksichtigung des Anlagenstandorts korrigiert. Die PLZ der Ortsnamen wurden unter Zuhilfenahme von post.de[3], plz-postleitzahl.de[4] und

1 `https://www.pdftoexcelonline.com/de/`
2 Das Macro erstellt zuerst ein leeres sheet. Dann kopiert es das erste alte sheet in das Leere. Die übrigen alten sheets werden in einer Schleife durch iteriert. Beim Kopieren werden die ersten 2 Spalten ignoriert, da diese die Spaltenbezeichnung enthalten, die vorher mit dem ersten sheet kopiert wurde.
3 `http://www.postdirekt.de/plzserver/`
4 `http://www.plz-postleitzahl.de/`

gewerbeverzeichnis-deutschland.de[5] korrigiert. Es handelte sich meist um Zahlendreher. Z.b. war für eine Anlage in München 80377 statt 80337 als PLZ notiert.

5. Beim Import in Matlab hat sich gezeigt, dass ganze Zahlen ohne Dezimalstelle angegeben sind, aber mit EU-Tausendertrennzeichen -z.B. 105.000. Der Rest war als EU-Dezimal -z.B. 1040567,5- ohne Tausendertrennzeichen notiert. Diese Mischung kann Matlab standardmäßig nicht importieren. Durch eine modifizierte Importfunktion wurden diese auf US-Dezimalnotation korrigiert und importiert.

Insgesamt werden etwa 1700 Anlagen mit etwa 420 Millionen Tonnen CO_2-Emission betrachtet.

5.3 Aufbereitung der Liste der EE-Standorte

Die von Energymap.info bereitgestellte .csv Datei umfasst etwa 1.500.000 Einträge auf 250 MB. Die Einträge sind sowohl Zahlen, als auch Strings. Zu groß, um sie mit Excel zu öffnen und falsch formatiert, um sie mit Matlab effektiv zu bearbeiten. [6] Die Größe und Formatierung musste reduziert bzw. optimiert werden. Dies wurde in folgenden Schritten in dem .csv file Editor CSVed realisiert:[7]

1. Für die Arbeit nicht relevanten Spalten wurden entfernt.
2. Der String des Anlagentypen (z.B. "Windkraft") wurde mit einer Zahl ersetzt. [8]
3. EU-Dezimalnotation wurde durch US-Dezimalnotation ersetzt, da Matlab nur mit US-Dezimal Notation arbeitet. Z.B. wurde 1.000.234,05 durch die US-Notation 1,000,234.05 ersetzt, um die Daten in Matlab als Zahlen laden zu können.
4. Die Einträge von Solar- und Windkraft wurden jeweils in eine eigene Tabelle exportiert.
5. In der Spalte kWh_avg und kWh/kW ist bei neuen Anlagen kein Eintrag. Der Wert der installierte Nennleistung ist vorhanden. kWh/kW repräsentiert die durchschnittliche Stromproduktion pro installierter Nennleistung, kWh_avg durchschnittliche

5 `http://www.gewerbeverzeichnis-deutschland.de/`
6 Der Import und die Bearbeitung von Daten in Matlab, die als string formatiert sind, benötigt komplexe string-Abfragen und viel Rechenzeit.
7 http://csved.sjfrancke.nl/
8 Folgende Werte wurden zugeordnet: Solarkraft: 1,Biomasse: 2,Windkraft: 3,Wasserkraft: 4,Biogas: 5

Stromproduktion pro Jahr. Die fehlenden Einträge wurden folgendermaßen hochgerechnet:
Um diese mit einem realistischen Wert abzuschätzen, wurde für jede PLZ der Durchschnitt der kWh/kW gebildet und für leere Spalten der PLZ eingetragen. [9] Falls auf der PLZ nur eine Anlage vorhanden ist, wird der Gesamtdurchschnitt verwendet. Die durchschnittliche Stromproduktion pro Jahr errechnet sich mit:

$$kWh_avg = Nennleistung * kWh/kW \tag{5.1}$$

Weiter werden nur Windkraftwerke und Solarkraftwerke betrachtet, also volatile Erzeuger. Wasserkraft wird zur Netzregulierung benötigt. Biomasse wird dezentral zur Wärmeerzeugung verwendet und wird deshalb ausgeschlossen. Biogas ist ein Sonderfall. Hier wird H_2 in das Biogas eingebracht, um eine höhere Methankonzentration zu erzeugen, da ein Überschuss an CO_2 im Biogas vorliegt. Hierfür wird der Strom oder das H_2 zur Biogasanlage gebracht und wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Damit sind 4 EE-Tabellen vorhanden:

- Eine vollständige Anlagenliste (unbearbeitet)
- Eine vollständige Anlagenliste (bearbeitet)
- Eine Liste Windanlagen mit 24335 Einträgen und einer Stromproduktion von etwa 64 TWh pro Jahr. [10]
- Eine Liste Solaranlagen mit 1494303 Einträgen und einer Stromproduktion von etwa 34 TWh pro Jahr.

Letzteren zwei sind für die Verwendung in Matlab geeignet.[11]

9 kWh/kW wurde für Wind und Solar getrennt berechnet, da sich diese unter den Erzeugertypen stark unterscheidet.
10 122 Einträge haben eine 0 als PLZ-Eintrag, sind damit fehlerhaft und werden nicht betrachtet.
11 Die Solaranlagenliste muss wegen ihrer Größe in Teilen in Matlab eingelesen werden.

5.4 Aufbereitung der PLZ-Liste

Die PLZ sind als Text auf der Website gespeichert. Das Format ist: PLZ, lat, lon, Ortsname. Der Text wurde in Excel eingelesen. In Matlab wurde eine modifizierte Importdatei erstellt, um die korrekte Formatierung der Längen- und Breitengrade zu gewährleisten. Ein Eintrag wurde nachgetragen. [12]

5.5 Berechnen der Distanzmatrix

Für eine spätere Optimierung des Transports wurde eine Funktion zur Erstellung der Distanzmatrix geschrieben. Zuerst wird aus der PLZ Liste die relevanten PLZ ausgelesen, da das Berechnen der Distanzmatrix aller PLZ -etwa 8000 Einträge- viel Rechenzeit beansprucht. Die Distanz wird für jede CO_2-Emitter PLZ zu allen Wind-EE-PLZ und Solar-PLZ berechnet. Eingabeparameter ist jeweils ein PLZ-Vektor. Lat und lon der PLZ wird aus der PLZ-Liste entnommen. Für die Distanzberechnung wird ein code aus dem Matlab File Exchange verwendet. [13] Dieser Code berechnet die Distanz zwischen zwei Koordinatenpaaren. Nahegelegene Orte werden durch Flächenapproximation, weiter entfernt durch eine Kugelapproximation berechnet. "Nahegelegen"wurde mit 25km festgelegt. [14]

5.6 Erstellung der Abscheidungskostenmatrix

Es wurde eine Tabelle angelegt, in der die geschätzten CO_2-Abscheidungskosten jedes relevanten Anlagentyps hinterlegt sind. Einheit ist € pro Tonne.

12 Der Matlabimport der Ortsnamen ist bei Umlauten fehlerhaft.
13 `http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/5256-pos2dist`
14 In der Dokumentation des codes wird der Übergangsbereich der zwei Methoden als "kleiner zweistelliger km Bereichängegeben.

5.7 Erstellung der Transportkostenmatrix

Es wurde eine Tabelle angelegt, in der die geschätzten Transportkosten der Transportarten hinterlegt sind. Die Einheit ist € pro 100 km.

5.8 Filtern optimaler Methanisierungsstandorte

Ein Methanisierungsstandort wird als optimal charakterisiert, wenn weder Strom noch CO_2 transportiert werden müssen. Also wenn CO_2-Emitter und Wind- bzw. Solarkraft auf der selben PLZ zu finden sind. Entweder betrachtet man die Einträge der Distanzmatrix, deren Wert gleich 0 ist. Einfacher:
Man prüft, welche PLZ sowohl in der CO_2-Emitterliste, als auch in der Solar- bzw. Windenergieliste enthalten sind. Hier sind die Transportkosten gleich 0.
Solar- und Windstromproduktion werden getrennt gespeichert.
Es werden nur CO_2-Emitter mit günstigen Abscheidungskosten betrachtet, also Kraftwerke.

5.9 Berechnung des Methanisierungspotentials an optimalen Methanisierungsstandorten

Es wird die billigste CO_2-Quelle an jeder optimalen PLZ gesucht. Falls mehrere Anlagen dje gleichen niedrigsten Abscheidungskosten haben, wird deren CO_2-Emission addiert. Da eine Abscheidung nie 100-prozentig ist, wird der Emissionswert mit der Abscheiderate multipliziert.[15] Das Resultat ist die Menge des billigsten Angebots von CO_2 an der PLZ.
Zur Herstellung einer MWh Methan-Äquivalent benötigt man etwa 2 MWh Strom und 200 kg CO_2 .
Die verfügbare Menge CO_2 ist in Tonnen angegeben. Durch Multiplikation mit 5 erhält man das CO_2-Angebot in MWh Methan-Äquivalent.
Die verfügbare Menge Strom ist in kWh abgegeben. Durch Dividieren durch 1000*2 erhält man das Stromangebot in MWh Methan-Äquivalent. Faktor 1000 für die Umrechnung

15 Es wird 0,9 angenommen. [DPR06, S. 52f.]

von kWh zu MWh und Faktor 2, da Elektrolyse und Methanisierung etwa doppelt soviel Strom verbrauchen, wie Methan-Äquivalent herstellt wird.
Weiter werden nur industriell relevante Stromerzeuger betrachtet. Industriell relevant sind Methanisierer und Elektrolyseur ab einer elektrischen Anschlussleistung von einem MW. [Var12]

Eine Methansyntheseanlage plus Elektrolyseur mit einer elektrischen Anschlussleistung von 1 MW benötigt 8760 MWh Stromangebot pro Jahr bei Vollast. In Methan-Äquivalent umgerechnet entspricht das 8760/2 MWh Stromangebot und 8760/2 MWh CO_2-Angebot pro Jahr. PLZ mit kleinerem CO_2- oder EE-Angebot werden vernachlässigt.
Anschließend vergleichen wir das mögliche Stromangebot mit dem CO_2-Angebot und speichern das Minimum. Jetzt kann man das Methanisierungspotential an der PLZ ablesen.

5.10 Erstellung der Statistiken der Bundesländer in QGIS

Um die Statistiken der Bundesländer zu erhalten, wurde das Geoinformationssystem QGIS verwendet. In QGIS können die Daten auf Karten dargestellt werden. Es bietet weitere Analysemöglichkeiten auf Basis von Ländergrenzen. Durch das Erstellen von zwei Ebenen, einer Ebene mit Bundesländern [fKuGB11] und einer Ebene mit Emittern bzw. Methanisierungsstandorten, und anschließendem Schneiden dieser Ebenen, wurden die Statistiken der einzelnen Bundesländer ermittelt.

6 Visualisierung der Ergebnisse

6.1 Darstellung in Matlab

Die ersten Darstellungen der Daten wurden in matlab realisiert. Dazu wurde die geoshow() Funktion verwendet. In folgenden Schritten wird die Deutschlandkarte erstellt:

1. Hinterlegte Küstenlinie der Welt aus Matlab-Bibliothek laden
2. Grenzen Deutscher Bundesländer laden [fKuGB11]
3. Darstellungsbereich festlegen: Längengrade und Breitengrade zur Darstellung sind als Vektoren [West East] und [North South] sind Parameter in geoshow(). Auf dieser Karte können mit geoshow() einzelne Punkte eingezeichnet werden.
4. geoshow mit (1., 2., 3.) aufrufen[1]
   - Für Bild der Anlagenanzahl: Plotte Punktgröße auf PLZ-Koordinaten nach Anzahl Anlagen der PLZ
   - Für Bild CO_2-Menge: Plotte Punktgröße auf PLZ-Koordinaten nach summierter Emission der PLZ

Es zeigt sich, dass die Darstellung in Ballungsgebieten zu grob ist. Es ist ein Zoom nötig. [2] Grobe Abschätzung der Emissionsdichte ist möglich. Folglich ist das Darstellungstool von Matlab für unsere Datenmenge nicht optimal. Für weitere Analyse wurde auf das Geoinformationssystem QGIS zurückgegriffen. Eine genaue Darstellung wurde in MS Power View realisiert.

1 1. - 3. wurden in der Funktion plotmap() zusammengefasst.
2 Die beigelegten Matlabfigures können in Matlab geöffnet werden. Hier ist Zoomen möglich.

6.2 Darstellung in Excel und MS Power View

Für genauere Darstellung wurden in MS Power View zwei interaktive Karten erstellt. In MS Power View gibt es die Möglichkeit, aus Excel-Tabellen, die Längen- und Breitengrade enthalten, Karten zu erstellen. Hierfür werden die Punkte auf der bing.com Onlinekarte dargestellt. Es liegt eine Karte der Emitter und eine Karte der optimalen Standorte vor. In Power View kann nach Variablen und Wertebereichen gefiltert werden.

7 Interpretation der Ergebnisse

7.1 Verteilung der CO_2-Emission auf die Bundesländer

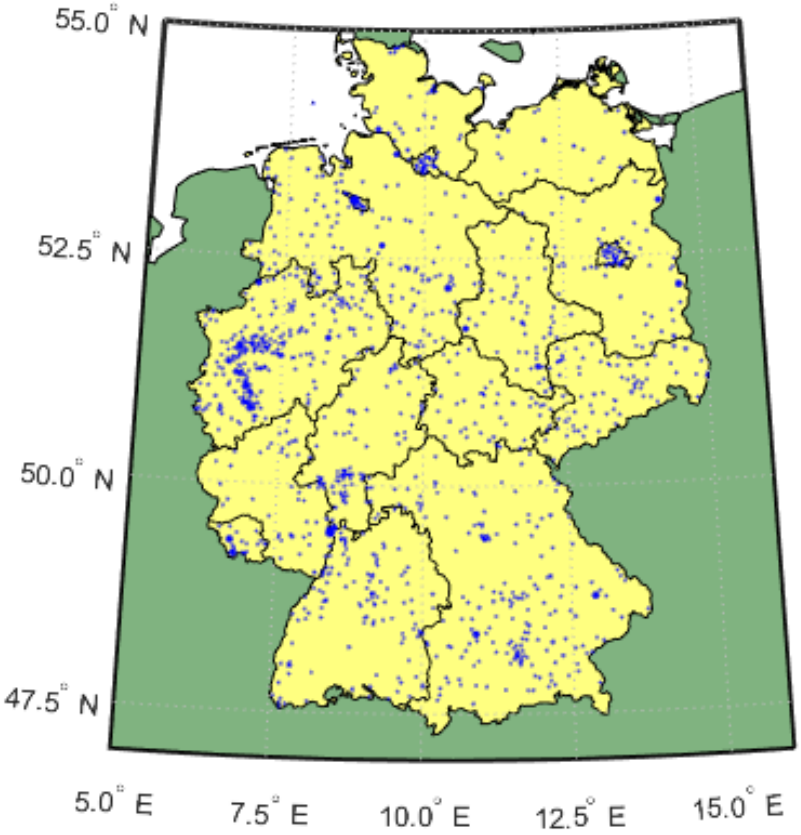


Abbildung 7.1: Matlab Karte der CO_2-Emitter in Deutschland auf PLZ summiert

Abbildung 7.1 zeigt die CO_2-Emission in Deutschland auf der jeweiligen PLZ summiert. Die Punktgröße zeigt die emittierte Menge CO_2 auf logarithmischer Skala.

Man erkennt Ballungen an Großstädten. Grund hierfür sind vermutlich die Heizkraftwerke. Die höchste Flächendichte, ausgenommen Berlin, Hamburg und Bremen, befindet sich in NRW. Um Mannheim und Frankfurt erkennt man auch eine hohe Emitterdichte.

Abbildung 7.3 zeigt die Aufteilung der Emission auf die einzelnen Bundesländer, Abbildung 7.4 die zugehörige Anlagenanzahl.
Die Statistik der Bundesländer zeigt:
Nordrhein-Westfalen dominiert mit etwa 200 Mio. Tonnen Emission bei etwa 400 Anlagen. Es stellt damit fast die Hälfte aller deutschen CO_2-Emissionen bei etwa einem Viertel der Anlagen. Nordrhein-Westfalen, Bayern, Niedersachsen und Baden-Württemberg stellen die meisten Anlagen.
In Abbildung 7.2 kann man die durchschnittliche CO_2-Emission einer Anlage pro Jahr jedes Bundeslandes ablesen. Besonders Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und Thüringen fallen durch eine hohe Anlagenanzahl bei geringer Emission auf. Sie unterschreiten damit einen Durchschnittswert von unter 100.000 Tonnen CO_2-Emission pro Jahr pro Anlage.

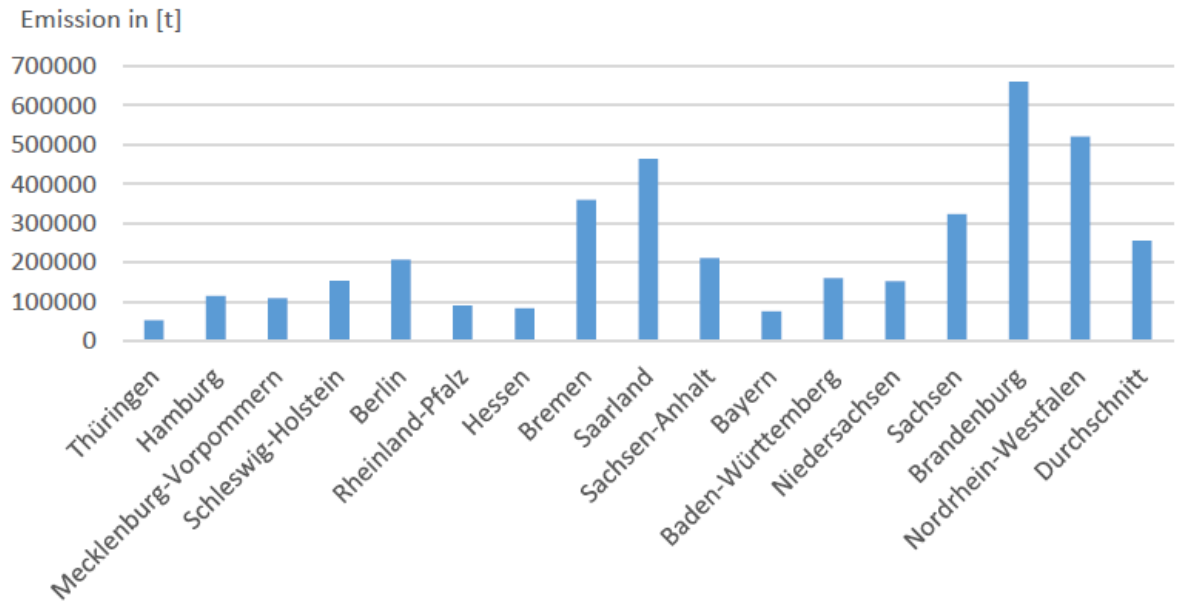


Abbildung 7.2: Durchschnittliche CO_2-Emission einer Anlage pro Jahr

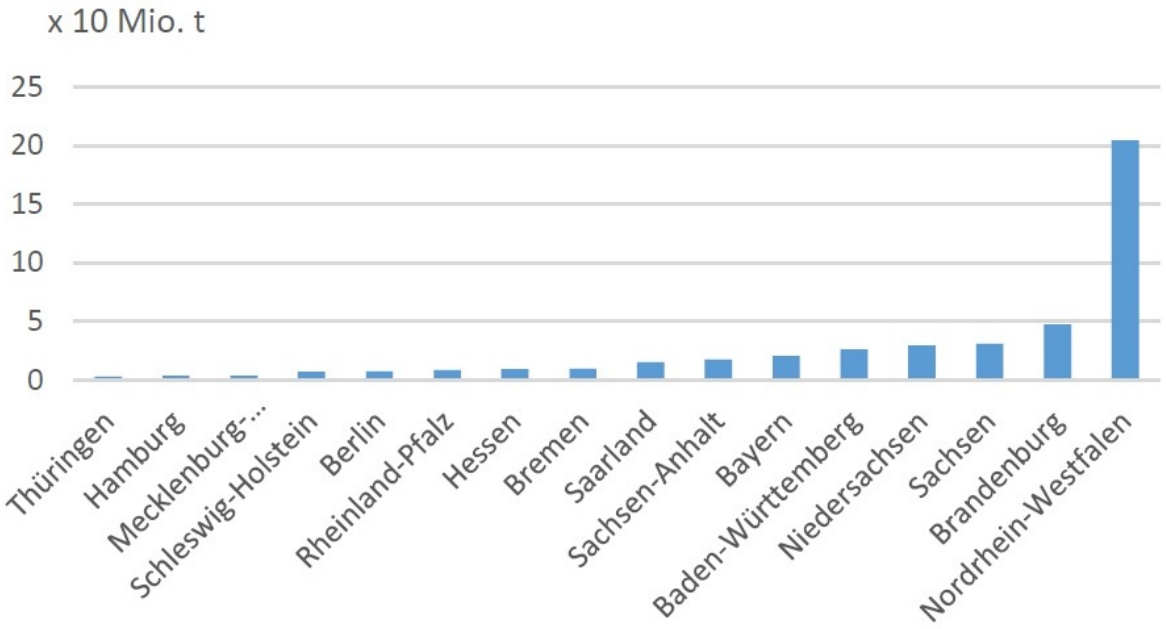


Abbildung 7.3: CO_2-Emission der Bundesländer

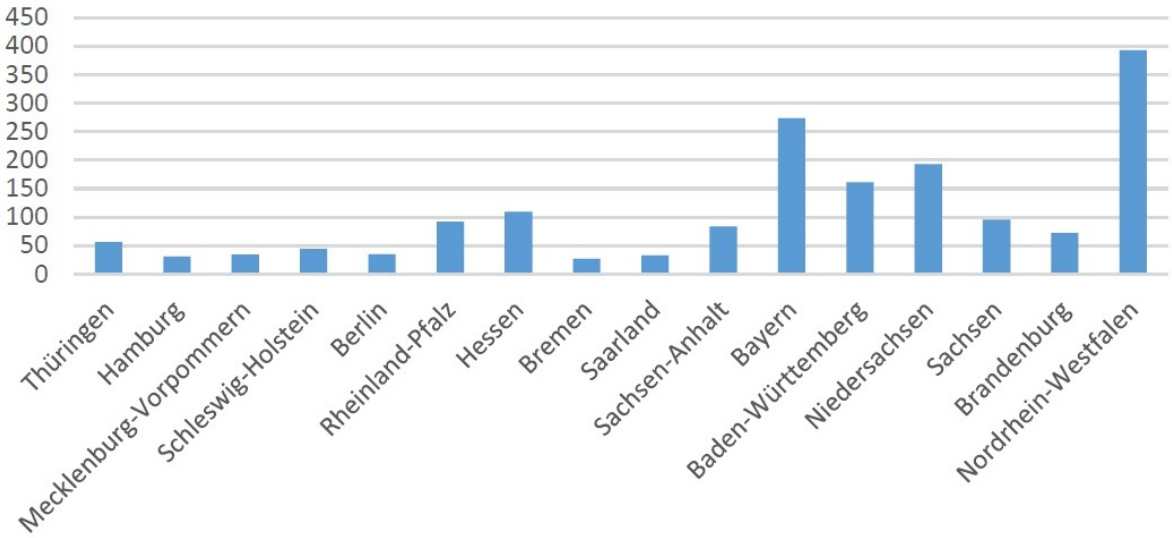


Abbildung 7.4: Verteilung der Anlagen auf die Bundesländer

7.2 Verteilung der CO_2-Emission auf die Emittertypen

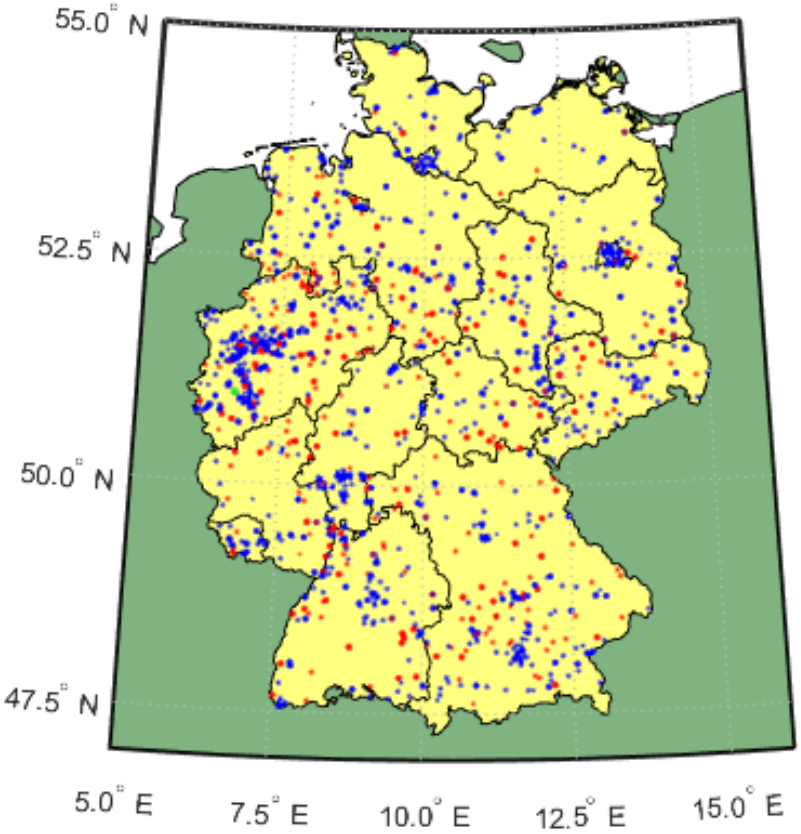


Abbildung 7.5: Matlab Karte der CO_2-Emitter in Deutschland nach Anlagentyp

In Abbildung 7.5 werden Kraftwerke in Blau, Industrieemitter in Rot und Raffinerien in Grün dargestellt. Die Punktgröße steigt auf log10 Skala nach der CO_2-Emission.[1] Die Vermutung, dass die Ballungen an Großstädten von Kraftwerken verursacht werden, bestätigt sich. Weiter fällt auf, dass große Industrieemitter eher in ländlichen Gebieten stehen. In küstennahen Gebieten befinden sich wenig Emitter.
NRW hat eine hohe Kraftwerksdichte. In Bayern, Thüringen und Rheinland-Pfalz finden sich anteilig besonders viele Industrieemitter.

Der Vergleich von Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8 zeigen anschaulich, dass Kraftwerke durchschnittlich mehr CO_2 emittieren als Industrieemitter. Kraftwerke haben mit etwa

1 Die Emitter wurden übereinander dargestellt. Dadurch kann es zu ungenauer Darstellung oder zu Nichtdarstellung kleinerer Emitter führen, da sie von größeren überdeckt werden.

Tabelle 7.1: Verteilung der CO_2-Emission auf Emittertypen

	Kraftwerke	Raffinerien	Industriebetriebe	Gesamt
Summe CO_2-Emission	370.976.217 t	3.635.868 t	67.705.086 t	442.317.171 t
Anzahl Emitter	1.186	4	542	1.732
øCO_2-Emission pro Anlage	312.796,1358 t	908.967 t	124.917,1328 t	255.379,429 t

310.000 Tonnen CO_2 pro Jahr im Schnitt die zweieinhalb fache CO_2-Emission von Industriebetrieben. Siehe Tabelle 7.1 Raffinerien sind um den Faktor 3 größer als Kraftwerke. Allerdings enthalten die Daten nur 4 Raffinerien, der Durchschnitt ist bei dieser kleinen Anzahl nicht repräsentativ. Da Kraftwerke die meisten und größeren Emitter stellen, stellen sie auch den Großteil des emittierten CO_2 .
Abbildung 7.6, die die Größenverteilung der Emitter zeigt, bestätigt dies. Auffällig ist, dass die größten Emitter fast ausschließlich von Kraftwerken gestellt werden. Raffinerien bewegen sich alle in der gleichen Größenordnung mit einem einheitlich großem Wert von 6.

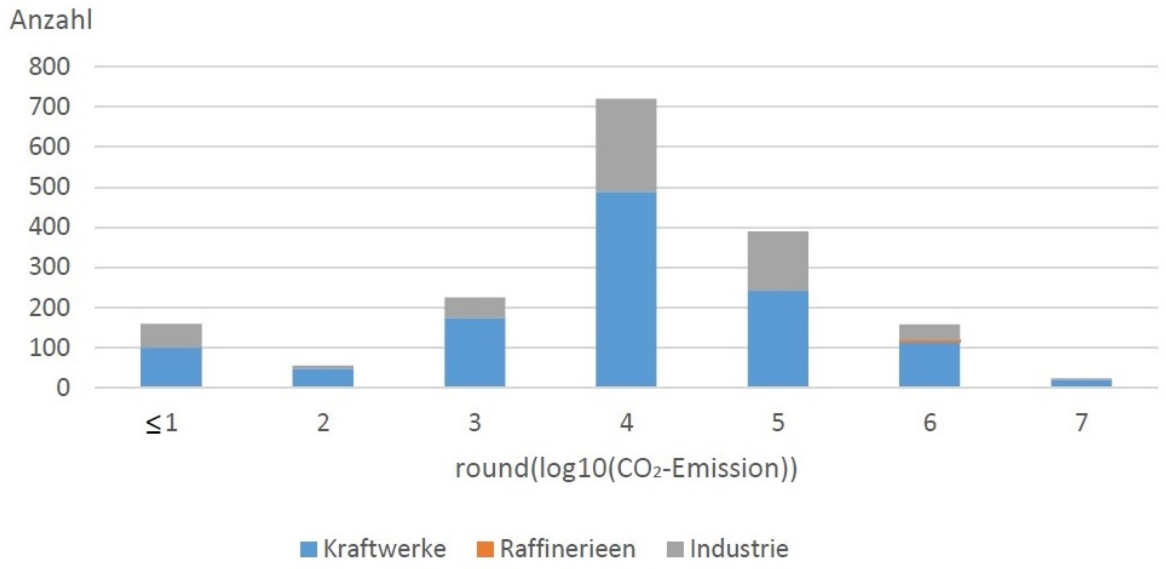


Abbildung 7.6: Größenverteilung der CO_2-Emitter nach Typ

Abbildung 7.7: Verteilung der Anlagen auf Emittertypen

Abbildung 7.8: Verteilung der CO_2-Emission auf Emittertypen

7.3 Verteilung optimaler Methanisierungsstandorte auf die Bundesländer

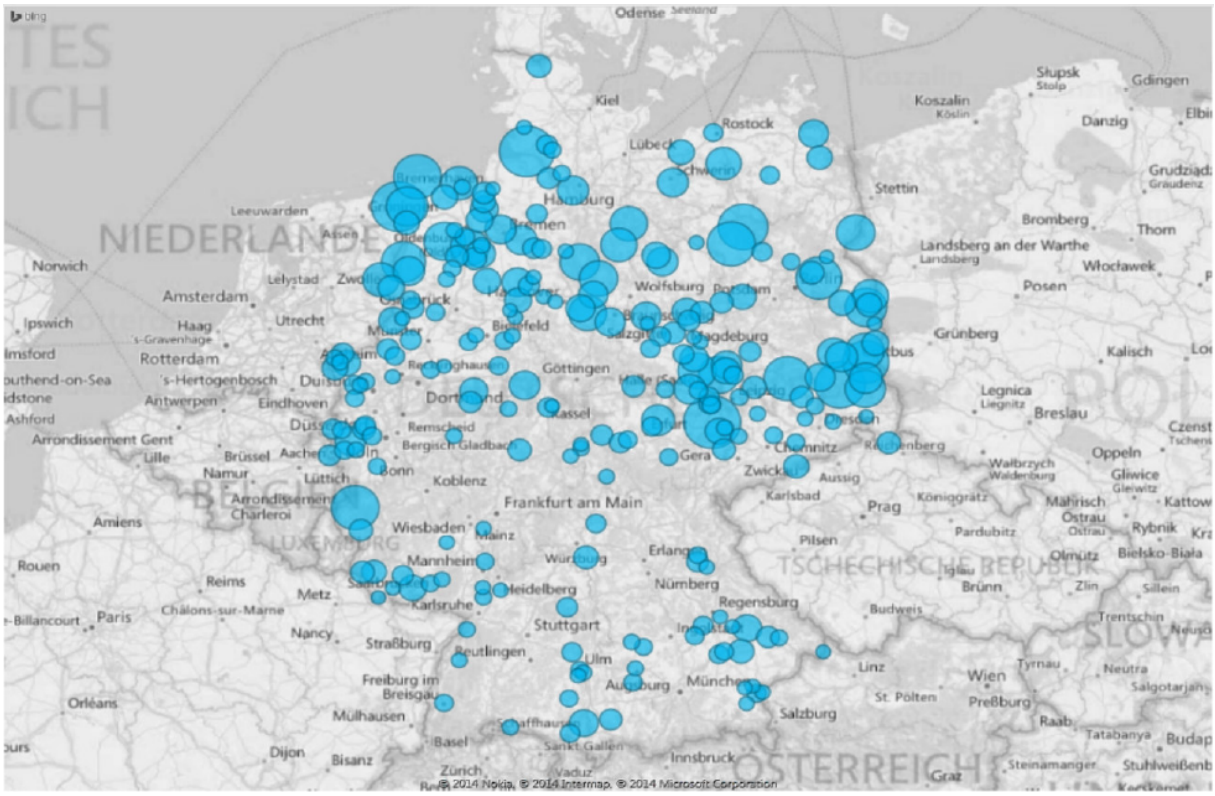


Abbildung 7.9: Darstellung aller optimalen Standorte nach Methanisierungspotential in Power View

Betrachtet man die Karte der optimalen Standorte Abbildung 7.9 erkennt man Ballungen in nördlichen Bundesländern und an der westlichen Staatsgrenze. In Süddeutschland sind nur vereinzelt kleine optimale Standorte zu finden.
Filtert man nur große optimale Methanisierungsstandorte, siehe Abbildung 7.10, wird der Unterschied noch deutlicher. In Bayern und Baden-Württemberg finden sich nur zwei Standorte, die mehr als 26000 MWh/a Methanisierungspotential haben. Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und NRW stellen die größten optimalen Standorte. Abbildung 7.11 bestätigt dies. Auch in Summe dominieren diese vier Bundesländer die Statistik des Methanisierungspotentials, angeführt von Niedersachsen mit einem Methanisierungspotential an optimalen Standorten von etwa 1,8 TWh pro Jahr. Insgesamt bieten die optimalen Standorte ein Methanisierungspotential von etwa 5,76 TWh pro Jahr.

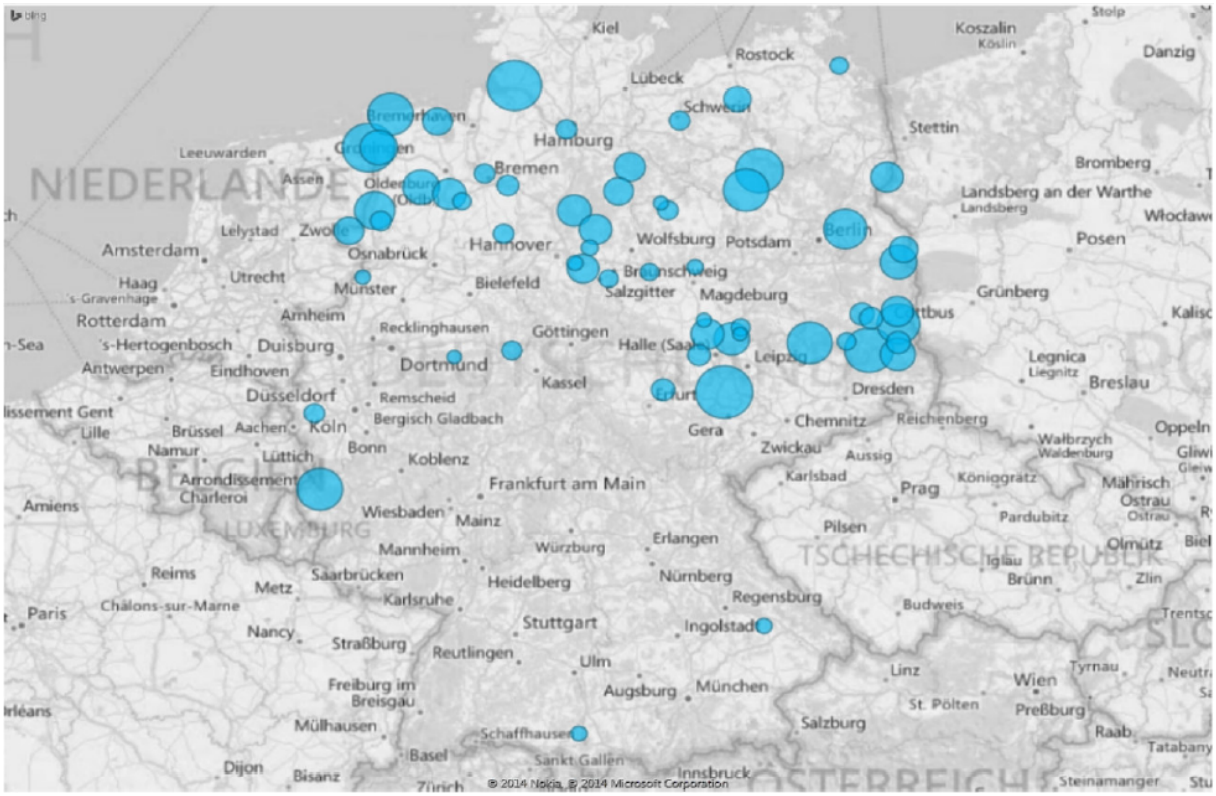


Abbildung 7.10: Darstellung großer optimaler Standorte ab einem Methanisierungspotential von 26230,68 MWh/a in Power View

Aber aus welchem Grund ist NRW trotz seiner besonders hohen Emission nur auf Platz 4 des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten? Dazu betrachten wir die Verfügbarkeit von CO_2 und EE-Strom an optimalen Standorten in Abbildung 7.12. Wie in Abschnitt 5.9 erläutert, ist das Methanisierungspotential durch das Minimum von CO_2- oder Stromangebot limitiert. Man erkennt, dass ein großes Überangebot von CO_2 vorliegt. Das Stromangebot wird zum Großteil von Windenergie gestellt. Das erklärt die Ballung der optimalen Standorte im Norden und Ostdeutschland. Vor allem in den Ostdeutschen Flächenländern finden sich die meisten Windkraftwerke in Deutschland. Das führt zu häufiger Überschneidung von Windenenergie mit CO_2-Emission. Folglich finden sich dort die meisten optimalen Standorte.

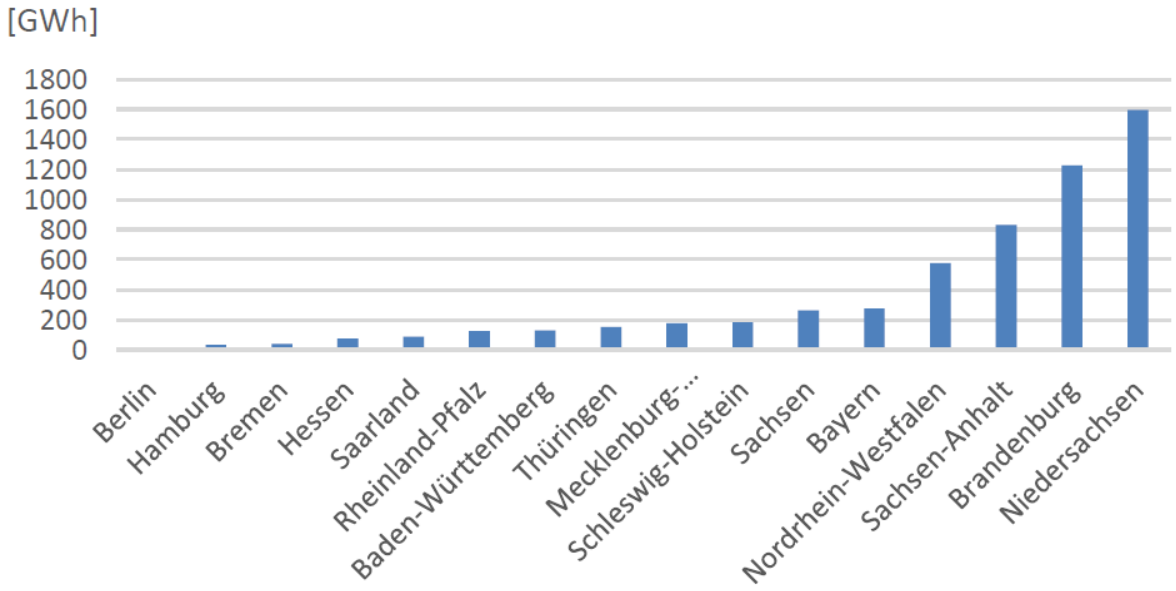


Abbildung 7.11: Verteilung des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten auf die Bundesländer

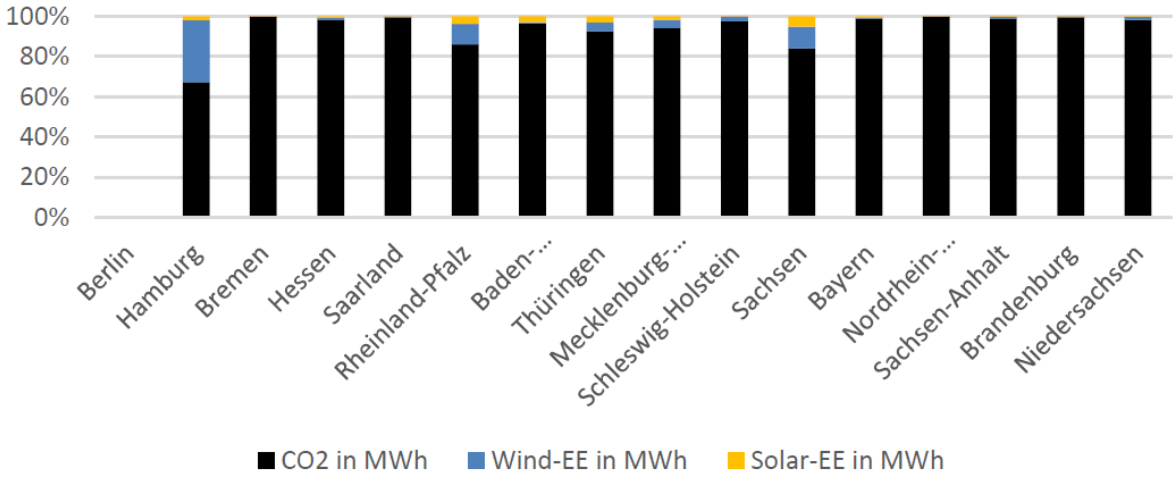


Abbildung 7.12: Optimale Standorte: Anteilige Verfügbarkeit von CO_2 , Wind-EE und Solar-EE

7.4 Größenverteilung optimaler Standorte

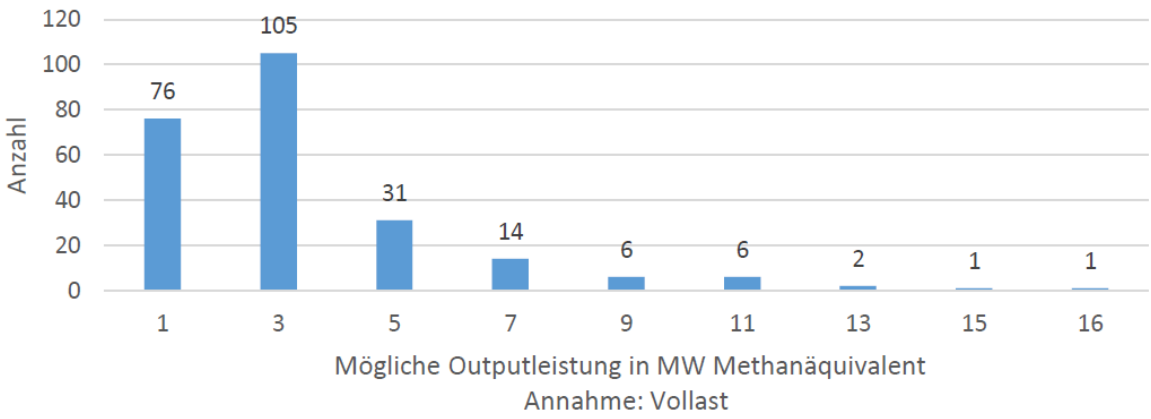


Abbildung 7.13: Größenverteilung des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten

Um die mögliche Anlagengröße an optimalen Standorten zu visualisieren, wurde in Abbildung 7.13 die Verteilung der möglichen Outputleistung in MW Methan-Äquivalent der optimalen Standorte unter Annahme von Vollast abgebildet, also einer Laufzeit von 8760 Stunden pro Jahr. Die elektrische Anschlussleistung ist entsprechend der doppelte Wert der Outputleistung. Der Großteil der Anlagen bewegt sich im niedrigen einstelligen MW Bereich. Es ist zu beachten, dass die Outputleistung meist durch das Angebot an erneuerbarer Energie limitiert ist, nicht durch das vorhandene CO_2 .
Beispielhaft betrachten wir die häufigste Anlagengröße von 3 MW Outputleistung. Das entspricht einer Anlage mit 6 MW elektrischer Anschlussleistung. Es können im Jahr 52,56 GWh Strom entnommen und 5256 Tonnen CO_2 gebunden werden.

8 Zusammenfassung & Ausblick

In Deutschland werden etwa 422 Mio. Tonnen CO_2 von zertifikathandelspflichtigen Anlagen ausgestoßen. Hiervon emittieren Kraftwerke etwa 370 Mio. Tonnen, Industrieemitter 68 Mio. Tonnen und Raffinerien etwa 4 Mio. Tonnen CO_2 . Kraftwerke bieten großflächig die besten Abscheidungsbedingungen. Es sind Aufgrund des Oxyfuel-Verfahrens zukünftig Einsparungen zu erwarten. Dazu ergeben sich Synergieeffekte mit der Elektrolyse.
Nordrhein-Westfalen emittiert mit 200 Mio. Tonnen jährlich am meisten CO_2 . Bayern fällt mit vielen Anlagen bei geringer Emission auf.
Kurzfristig optimale Standorte wurden so definiert, dass sie das Stromnetz entlasten können und keinen CO_2- und H_2-Transport voraussetzen. Es wurden etwa 240 optimale Standorte identifiziert mit einem Methanisierungspotential von etwa 5,76 TWh Methan-Äquivalent. Der limitierende Faktor des Methanisierungspotentials an optimalen Standorten ist das Stromangebot aus erneuerbaren Energien. Es ist ein Überangebot von CO_2 vorhanden. Die meisten und größten optimalen Standorte finden sich in Niedersachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Nordrhein-Westfalen.
Mögliche Verbesserungen am Datenmodell:

- Da die Kombination von Gaskraftwerken und Methanisierung besonders vielversprechend ist, empfiehlt es sich, die Anlagendaten um den eingesetzten Brennstoff zu erweitern, um Standorte mit Gaskraftwerken filtern zu können.
- Da Raffinerien mit hoher CO_2-Reinheit des Abgases sehr günstige Abscheidungskosten bieten, und Raffinerien eine große Abgasmenge pro Anlage produzieren, empfiehlt es sich, die Datengrundlage der Raffinerien zu verbessern.
- Die verwendeten Geodaten basieren auf den Längen- und Breitengraden der PLZ. Sie können durch das Einpflegen der genauen Längen- und Breitengrade der Anlagen und EE-Erzeuger verbessert werden.

- Die Auswahlkriterien der optimalen Standorte kann um einen Fernwärmeanschluss erweitert werden, um die Abwärme der Methanisierung zu nutzen.

Abschließend eine Power View Darstellung der CO_2-Emitter in Bayern Abbildung 8.1. [1] Industriebetriebe in Rot, Kraftwerke in Orange.
Wie erwartet befinden sich an den Städten München, Ingolstadt und Nürnberg der Großteil der Kraftwerke, Industriebetriebe eher in ländlichen Regionen. Die hohe Kraftwerksdichte in München bietet gute Abscheidungsbedingungen. Allerdings müsste das Angebot an erneuerbarer Energie ausgebaut werden, um das CO_2-Potential nutzen zu können.
Selbiges gilt auch deutschlandweit. Durch den Ausbau erneuerbarer Energien wird das Methanisierungspotential an optimalen Standorten weiter steigen.

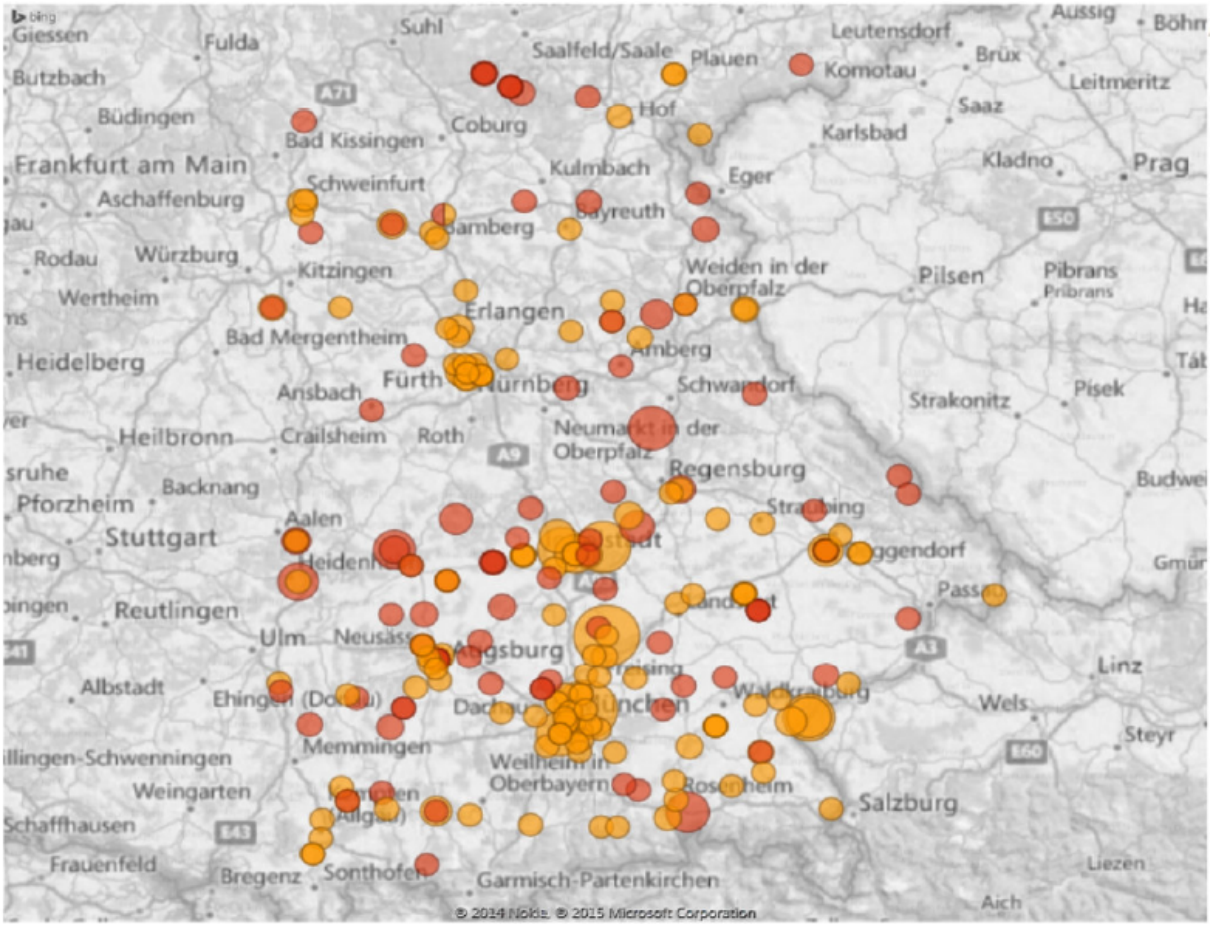


Abbildung 8.1: Power View Darstellung der CO_2-Emitter in Bayern

1 Durch Einschränkung auf einen lat/lon-Bereich wird Bayern nicht genau gefiltert.

Literatur- und Quellenverzeichnis

[dJufV11] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Anhang 1 (zu § 1, § 2 Absatz 1 bis 3 Satz 1, Absatz 4 Satz 1, Absatz 5 Nummer 3, § 3 Absatz 1 Nummer 2, 5, 9 und 12, § 4 Absatz 1 Satz 1, § 7 Absatz 2 Satz 1 Nummer 1, § 24, § 27 Absatz 1 Satz 2 und § 28 Absatz 1 Nummer 4) Einbezogene Tätigkeiten und Treibhausgase*, Website, 2011, Online erhältlich unter `http://www.gesetze-im-internet.de/tehg_2011/anhang_1_43.html`; Fundstelle: BGBl. I 2011, 1488 - 1491; Zuletzt abgerufen am 17. Januar 2015.

[DPR06] Sebastian Warkentin Dr. Peter Gerling Dr. Franz May Stephan Knopf Dr. Peter Radgen, Clemens Cremer, *Verfahren zur CO_2-Abscheidung und -Speicherung Abschlussbericht*, Tech. report, Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2006.

[fKuGB11] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), *Verwaltungsgrenzen Deutschland (De, Länder, Rgbz, Kreise)*, Website, 2011, Online erhältlich unter `http://www.arcgis.com/home/item.html?id=ae25571c60d94ce5b7fcbf74e27c00e0`; Zuletzt abgerufen am 17. Januar 2015.

[fSeD14] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS), *EnergyMap*, Website, 2014, Online erhältlich unter `http://www.energymap.info/download.html`; Stand November 2014.

[Ins11] Global CCS Institute, *The global status of CCS: 2011*, Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd (Global CCS Institute), Global Carbon Capture and Storage Institute Ltd, GPO Box 828, Canberra ACT 2601, Australia, 2011.

[Ope12] OpenGeoDB, *Geodaten der PLZ*, Website, 2012, Online erhältlich unter `http://www.fa-technik.adfc.de/code/opengeodb/PLZ_2012-10.tab`; Zuletzt abgerufen am 17. Januar 2015.

[STM08] Edward S. Rubin Sean T. McCoy, *An engineering-economic model of pipeline transport of CO_2 with application to carbon capture and storage*, international journal of greenhouse gas control 2 (2008).

[TK12] Wim Turkenburg André Faaij Takeshi Kuramochi, Andrea Ramírez, *Comparative assessment of CO_2 capture technologies for carbon-intensive industrial processes*, Progress in Energy and Combustion Science 38 (2012), 87–112.

[UB13] Deutsche Emissionshandelsstelle DEHSt Umwelt Bundesamt, *Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2008-2012 (Stand 28.02.2013)*, PDF auf Website, 2013, Online erhältlich unter: `http://www.dehst.de/SharedDocs/Downloads/Archiv/Zuteilung_2008-2012/NAP%20II/20130228-NAP-Tabelle.pdf;jsessionid=B7B04E06FC6EBF508AFA1FBE6F98E4C5.2_cid284?__blob=publicationFile`; zuletzt abgerufen am 16. Januar 2015.

[Var12] Axel Vartmann, *Weltweit größte Power-to-Gas-Anlage zur Methan-Erzeugung geht in Betrieb*, Presseinformation, ZSW, Frauenhofer IWES, SolarFuel GmbH, Oktober 2012.

A Anhang

A.1 Kurzbeschreibung erstellter Matlab-Funktionen

Folgend eine Kurzbeschreibung größerer Matlabfunktionen und -skripten:

- entfernungPLZ1PLZ2():
  Erstellt aus einem Quellenvektor und einem Senkenvektor von PLZ eine Distanzmatrix in km.
- getPLZCO2Matrix():
  Erstellt aus der Emissionstabelle die zugehörige PLZ-Matrix, in der die Emission auf jeder PLZ summiert ist.
- plotEmitter():
  Plottet Emitterdaten auf der Deutschlandkarte.
- plotmap():
  Ruft eine Deutschlandkarte mit Bundesländern und Küstenlinie auf.
- CorrectCO2AnlagenregisterFromWrongPLZ.m:
  Importiert die Emitterliste, ersetzt die fehlerhaften PLZ und speichert eine Tabelle.
- GrosseSolarTabelleueberPLZsummieren.m:
  Iterativer Import der Solartabelle. Erstellt eine Tabelle der summierten Solarproduktion jeder PLZ.
- import[...] Funktionen:
  Erstellte Importfunktionen für verschiedene Tabellen- und Matrixtypen.
- optimaleStandorteZusammenfuegen.m:
  Erstellt aus den Tabellen der optimalen Wind- und Solarstandorte eine Tabelle der optimalen Standorte mit Potentialen in MWh Methan-Äquivalent.

A.2 Tabelle CO_2-Emission der Bundesländer

Bundesland	Summe CO_2-Emission	Anlagenanzahl
Thüringen	2956533	56
Hamburg	3558640	31
Mecklenburg-Vorpommern	3693208	34
Schleswig-Holstein	6730146	44
Berlin	7243717	35
Rheinland-Pfalz	8371119	92
Hessen	9135956	109
Bremen	9694120	27
Saarland	15272782	33
Sachsen-Anhalt	17532621	83
Bayern	20454507	273
Baden-Württemberg	25830522	161
Niedersachsen	29332408	193
Sachsen	30710734	95
Brandenburg	47513533	72
Nordrhein-Westfalen	204286625	393
Gesamt	442317171	1731

A.3 Tabelle optimaler Standorte der Bundesländer

Bundesland	CO_2 in MWh	Stromproduktion in MWh	Windenergie in MWh	Solarenergie in MWh	Anzahl optimaler Standorte	Methanisierungspotential in MWh
Hamburg	68522.22222	33270.60766	31137.16504	2133.442628	1	33270.60766
Niedersachsen	81919100	1593459.451	1363748.122	229711.3294	50	1593459.451
Bremen	24841744.44	37647.43882	36864.81149	782.6273322	2	37647.43882
Nordrhein-Westfalen	646852572.2	578041.8868	370972.1533	207069.7335	40	578041.8868
Hessen	4364588.889	73940.09326	37328.00847	36612.08479	9	73940.09326
Rheinland-Pfalz	779488.8889	126241.715	93187.50464	33054.21037	6	126241.715
Baden-Württemberg	3434127.778	128173.3275	19475.27264	108698.0548	13	128173.3275
Bayern	26234594.44	275009.1854	40255.97866	234753.2068	27	275009.1854
Saarland	19074722.22	87713.98854	59749.57918	27964.40936	6	87713.98854
Berlin	0	0	0	0	0	0
Brandenburg	243637500	1226840.058	813512.7913	413327.2669	24	1226840.058
Mecklenburg-Vorpommern	2786261.111	174692.5197	117858.7475	56833.77217	7	174692.5197
Sachsen	1382727.778	262815.9306	178224.8431	84591.08746	13	262815.9306
Sachsen-Anhalt	74014216.67	829937.2486	644877.5678	185059.6807	28	829937.2486
Thüringen	1841850	150593.1311	88573.84589	62019.28519	10	150593.1311
Schleswig-Holstein	6934377.778	181765.1543	169965.9445	11799.20983	6	181765.1543
Summe	**1138166394**	**5760141.737**	**4065732.335**	**1694409.401**	**242**	**5760141.737**

A.4 Tabelle optimaler Standorte

PLZ	lat	lon	CO_2-Emission in MWh	Stromproduktion in MWh	Windenergie in MWh	Solarenergie in MWh	Methanisierungspotential in MWh
26736	53.4477534	7.09389926	735044	136413	132246	4167	136413
6682	51.12863	12.0246062	4483233	119727	117321	2406	119727
25541	53.9145295	9.12868584	993744	111938	108877	3061	111938
26723	53.3613796	7.11682201	227928	105926	103509	2418	105926
1968	51.5211336	14.0254798	543406	92056	4813	87243	92056
16909	53.1553231	12.5096396	296283	90194	54018	36176	90194
26553	53.6600782	7.41825319	317700	83868	81739	2129	83868
16866	52.9829649	12.32574	83761	182501	178995	3506	83761
54597	50.2100768	6.4430839	89189	83717	75343	8374	83717
4895	51.5876483	13.2064305	332483	82800	63548	19252	82800
16356	52.6320037	13.6965805	76733	96870	68734	28137	76733
3052	51.7622304	14.4293634	1841200	76685	69736	6949	76685
49733	52.7979565	7.19946896	70028	98634	86869	11765	70028
26725	53.3624405	7.2559499	67194	63531	61746	1784	63531
26169	53.0090019	7.84202549	133333	61624	43945	17679	61624
15236	52.3304137	14.4313314	999339	61324	58294	3030	61324
2979	51.4808045	14.4208852	86339	58123	44576	13547	58123
6780	51.625629	12.129394	171344	58078	52497	5581	58078
29303	52.7977433	9.9545819	76672	54574	49550	5024	54574
26197	52.9465598	8.23151245	1116522	53729	23342	30386	53729
6420	51.6701348	11.7940203	722311	53209	52519	691	53209
16303	53.0978777	14.2721243	21415494	52469	45939	6530	52469
29331	52.6281688	10.2488952	435178	52158	50193	1965	52158
3185	51.8779406	14.4152418	135690228	52158	14237	37921	52158
31249	52.2706803	10.0774275	14861383	49896	48212	1684	49896
21368	53.1887642	10.7213248	330139	49696	48629	1067	49696
49824	52.61541	6.84474006	276894	47135	39312	7824	47135
29525	52.9719078	10.5664291	816689	46794	41127	5666	46794
26388	53.5949049	8.06763334	274094	46296	45284	1012	46296
15326	52.4455759	14.5021613	986039	44805	43337	1468	44805
18273	53.793078	12.206469	130806	42854	14890	27964	42854
3130	51.5920052	14.4285362	69707067	38057	22354	15704	38057
3222	51.8541016	13.9276632	85844	37025	35462	1563	37025
99610	51.149866	11.1821658	55750	37021	34116	2905	37021
3226	51.8155505	14.052186	39639	36374	25039	11336	36374
6317	51.4744252	11.6798224	2752433	35732	13515	22217	35732

28832	53.0226551	9.03922226	94100	34765	33244	1520	34765
49716	52.7057389	7.28363975	487533	33783	22522	11262	33783
21129	53.5244225	9.84882193	68522	33271	31137	2133	33271
28237	53.130241	8.71526852	24811878	33213	32746	468	33213
31595	52.588571	8.98007637	538272	33181	26550	6630	33181
29416	52.8011794	11.2489052	255533	33002	30936	2065	33002
19061	53.6021673	11.411044	624378	32959	23416	9542	32959
52428	50.9286797	6.36692001	1011900	32680	29087	3593	32680
34414	51.5168986	9.09389679	147439	32503	21653	10850	32503
38239	52.17868	10.4285334	19678272	31184	30452	732	31184
6779	51.7313459	12.2517729	37200	30869	30354	515	30869
3238	51.6008449	13.7177879	30867	129300	72466	56834	30867
38350	52.2392244	10.9946281	12108728	30547	28710	1837	30547
27793	52.8820206	8.40221481	180728	30203	26596	3607	30203
17509	54.0908294	13.6142483	182967	30188	29019	1169	30188
31311	52.4616123	10.1678124	234656	28828	25702	3126	28828
94315	48.8798251	12.5724228	134067	28188	0	28188	28188
39326	52.2843497	11.6241155	898394	28089	21205	6884	28089
31319	52.3211244	9.96711209	42933	27893	25110	2783	27893
88299	47.811711	10.0191254	401211	27826	6191	21635	27826
48599	52.1923956	7.03445788	154189	27356	17637	9720	27356
6406	51.7973275	11.7465898	296261	26981	16496	10485	26981
29410	52.8655672	11.1511638	122444	26744	20966	5778	26744
6766	51.6705321	12.2414476	82689	26626	17508	9117	26626
59581	51.4565752	8.29608314	80183	26378	20674	5704	26378
26919	53.3351412	8.46185987	78428	25726	24010	1716	25726
66424	49.3258742	7.34222253	540611	25613	18269	7344	25613
6712	51.0313421	12.1326543	3003489	25462	17869	7593	25462
47546	51.7506489	6.31018907	25406	25585	19859	5726	25406
49453	52.602383	8.50299229	372433	25237	20191	5046	25237
15517	52.377454	14.0620402	24489	30805	2309	28495	24489
14772	52.4379923	12.4993347	237261	24345	0	24345	24345
32469	52.4018609	8.99192752	14124078	24283	13566	10717	24283
3172	51.9595002	14.5761587	170878	23903	16916	6987	23903
26931	53.2248172	8.38706831	23878	28308	25830	2478	23878
49828	52.5313016	7.00897323	187772	23689	9375	14313	23689
23970	53.9063077	11.5427674	89533	23251	13876	9375	23251

26446	53.4575235	7.84023663	85617	21714	18202	3512	21714
26831	53.1976626	7.2486068	21400	28919	26490	2428	21400
47574	51.6955467	6.1236574	21256	21625	11923	9702	21256
84130	48.6221776	12.4790571	439283	21050	0	21050	21050
17389	53.851774	13.7095813	456367	20957	19950	1006	20957
9526	50.6560546	13.3422048	20950	39345	37927	1418	20950
15234	52.3565914	14.4793037	29206	20832	14455	6377	20832
24983	54.7618973	9.31916289	19844	32917	29811	3106	19844
66679	49.505369	6.7377729	19733	21680	17391	4288	19733
97199	49.6630741	10.0534111	643439	19543	14656	4887	19543
16321	52.6876971	13.5872751	108744	19465	17479	1986	19465
4838	51.4957577	12.6860934	24689	18629	0	18629	18629
39164	52.0658055	11.4210322	671383	18006	14038	3968	18006
66693	49.4999187	6.55693622	41911	17777	16237	1540	17777
49429	52.8339579	8.3095147	414300	17704	8910	8793	17704
26935	53.4109176	8.45291419	50606	17545	15972	1573	17545
35260	50.8326925	9.0160575	335461	17393	14133	3260	17393
54634	49.9645998	6.5319792	142811	17393	11208	6185	17393
2763	50.9087877	14.7868394	84728	17250	10322	6928	17250
26954	53.4972321	8.45520697	340511	16857	11731	5126	16857
49661	52.855001	8.0309747	361783	16852	9055	7796	16852
1609	51.3933056	13.4276268	16633	37298	29813	7486	16633
59872	51.3396644	8.24432788	59711	16612	7253	9358	16612
39288	52.2808863	11.8682494	545178	16531	10090	6441	16531
99734	51.5062032	10.7951417	124300	16346	6952	9393	16346
41517	51.0554622	6.5825548	223581811	16312	15899	413	16312
39307	52.3804906	12.1755538	51239	16205	5768	10438	16205
94447	48.7819327	12.8978757	2388722	16172	0	16172	16172
21683	53.6458113	9.46971546	4413172	16080	15506	574	16080
7580	50.8387211	12.2111706	395511	15964	1	15963	15964
87634	47.8527045	10.4388277	164394	15729	9765	5964	15729
46446	51.8512404	6.24760453	247261	15712	10985	4727	15712
39126	52.1935639	11.6642361	16356	15569	12963	2606	15569
52074	50.7745701	6.03822518	215817	15359	14806	553	15359
27283	52.9395149	9.23658504	84650	15345	13640	1705	15345
46342	51.8973794	6.95624397	57422	15043	7986	7057	15043
99817	50.9908226	10.3015717	182717	15012	11553	3459	15012

99880	50.9100739	10.5869012	68056	14810	13134	1675	14810
6886	51.8711898	12.6184972	694622	14496	6900	7597	14496
92249	49.613775	11.7991278	90656	14382	6651	7731	14382
48499	52.3231485	7.35198236	601322	14203	11462	2741	14203
6217	51.3222647	11.9861245	208361	13975	3363	10612	13975
31628	52.5526315	9.16134107	119011	13931	12874	1057	13931
52525	51.0539327	6.08955358	13700	31476	19195	12281	13700
34134	51.283519	9.46425681	343150	13635	12666	969	13635
39387	52.0294242	11.2133461	13467	63992	61430	2562	13467
66606	49.466276	7.18821963	229283	13324	7852	5472	13324
39418	51.8416757	11.5817284	2481783	13244	6702	6542	13244
25588	53.9802157	9.44183231	13217	15134	14656	478	13217
74523	49.1123937	9.76046035	185878	13066	518	12548	13066
48727	51.9917219	7.31323988	128083	13037	4597	8440	13037
41515	51.0884728	6.60018126	102839	12876	11736	1140	12876
27404	53.2892448	9.28618501	251994	12676	6907	5769	12676
47661	51.5219039	6.4329812	26244	12331	7733	4598	12331
99195	51.0820406	11.0852657	12294	19419	17133	2287	12294
6258	51.3960983	11.981856	31232683	12156	3302	8854	12156
16816	52.9024106	12.8060095	106339	12150	4106	8045	12150
73312	48.6123436	9.83663696	75539	12144	9012	3133	12144
27308	52.9308705	9.36091265	16706	11750	9666	2084	11750
97424	50.0371923	10.2073925	937278	11655	6635	5020	11655
93309	48.9093341	11.8860813	844728	11555	0	11555	11555
6749	51.6232518	12.3570996	1465239	11369	0	11369	11369
52249	50.8290688	6.27147228	111350150	11287	8473	2813	11287
48488	52.4036661	7.30720447	25872	11207	7231	3976	11207
26203	53.0545104	8.15459975	51294	11205	7451	3754	11205
38820	51.9027947	11.0603514	53628	11173	64	11109	11173
48734	51.824595	7.06390572	36950	11098	3384	7714	11098
88239	47.6952624	9.80632844	25550	11072	0	11072	11072
33106	51.7223083	8.68763719	103033	10990	1433	9557	10990
84030	48.5873766	12.1319339	116806	10945	195	10750	10945
50129	50.9811076	6.7043575	156941472	10666	9275	1391	10666
17153	53.6761379	12.9263695	10628	13997	7642	6355	10628
32791	51.9852781	8.77586021	217183	10517	6699	3818	10517
18069	54.1021219	12.0447794	1291583	10488	9065	1423	10488

84508	48.1491355	12.7196002	1312817	10432	0	10432	10432
6179	51.4638797	11.8139981	10217	122757	117645	5113	10217
93333	48.7932517	11.7541842	7244617	10130	0	10130	10130
6237	51.307882	12.0143053	18440544	10106	5852	4255	10106
99867	50.9422746	10.7056505	163178	9848	0	9848	9848
84051	48.6198496	12.2138392	12222	9716	5	9711	9716
47906	51.3795784	6.43721151	259783	9689	2637	7052	9689
86399	48.2750892	10.7894585	111789	9616	0	9616	9616
49479	52.2797295	7.69848067	26864361	9400	83	9318	9400
79108	48.0413631	7.83171768	974200	9398	3754	5645	9398
41836	51.0440422	6.23179838	9244	32625	28554	4072	9244
33428	51.9718665	8.21463079	21178	9238	3057	6181	9238
6526	51.4734321	11.2939508	56956	9050	336	8715	9050
92655	49.6863328	11.8015908	36189	8991	0	8991	8991
7407	50.7553776	11.3478177	717206	8894	5684	3210	8894
88400	48.0918332	9.78924083	328117	8863	0	8863	8863
59368	51.6792944	7.62412426	17871128	8842	1276	7566	8842
68623	49.6171091	8.47140044	125717	8824	0	8824	8824
9648	50.9886714	12.9852705	345572	8820	6354	2466	8820
66851	49.3743858	7.6180596	130083	8723	6636	2087	8723
9599	50.914522	13.3340226	158583	8723	5058	3665	8723
1561	51.297691	13.635587	99172	8455	0	8455	8455
47533	51.8033157	6.12415246	293339	8409	2706	5704	8409
4349	51.3909662	12.4492022	11239	8405	8238	167	8405
16515	52.7997451	13.2607407	48050	8329	1276	7054	8329
86641	48.6703517	10.951849	88672	8325	0	8325	8325
53879	50.6567657	6.78627741	716406	8288	6117	2171	8288
49632	52.7297224	7.95942001	190883	8228	2987	5242	8228
25524	53.9272541	9.52670509	12078	8136	6332	1804	8136
25436	53.6943199	9.6760744	292594	8115	6062	2053	8115
47495	51.5564942	6.60979534	4312294	8087	3965	4122	8087
27801	52.9682431	8.41823366	11078	7877	2842	5035	7877
94491	48.7716517	13.072826	217400	7697	0	7697	7697
47551	51.7593032	6.20570427	61633	7530	3383	4147	7530
89081	48.4205421	9.95438845	57367	7502	0	7502	7502
26188	53.1202881	7.99255752	226283	7394	2345	5049	7394
4600	50.9787275	12.4396083	77611	7318	0	7318	7318

76437	48.8635235	8.18769613	153939	7207	0	7207	7207
52353	50.8335561	6.45501579	44989	7185	5993	1192	7185
34497	51.2669165	8.84027573	17272	7180	2312	4868	7180
6729	51.0672322	12.2253436	5069167	7019	3220	3799	7019
89231	48.3842407	10.010071	145150	6980	0	6980	6980
76661	49.2223281	8.44708431	48100	6959	0	6959	6959
49638	52.619339	7.87359755	403811	6954	5279	1674	6954
57223	50.9823653	7.98551025	60594	6943	5653	1290	6943
78224	47.7646429	8.86986561	305039	6938	0	6938	6938
26386	53.5570982	8.11584387	19668906	6921	6501	420	6921
33790	52.0431189	8.3286123	113783	6741	3169	3572	6741
47475	51.5168077	6.51922448	19572	6672	3803	2869	6672
86609	48.726495	10.766263	43794	6613	0	6612	6613
36269	50.8502581	9.97562802	1358922	6559	4303	2256	6559
32657	52.0370652	8.89945105	128544	6439	1992	4447	6439
4668	51.2145485	12.7343133	6428	41423	30945	10478	6428
86368	48.4316796	10.8252675	218933	6252	0	6252	6252
1454	51.1322204	13.9174779	299589	6229	4991	1238	6229
67663	49.4197871	7.799186	67333	6161	0	6161	6161
98617	50.5462137	10.3735173	45228	5961	0	5961	5961
77704	48.5229999	8.06772977	827844	5959	0	5959	5959
89079	48.3506824	9.93098923	24133	5843	0	5843	5843
36132	50.7651653	9.81494514	20739	5711	806	4905	5711
84489	48.163374	12.8114624	10094733	5703	6	5697	5703
31515	52.4384858	9.39216766	450483	5674	3089	2585	5674
29683	52.9074704	9.73822817	169433	5623	4085	1538	5623
1662	51.1625203	13.4806311	11078	5583	0	5583	5583
25770	54.1543195	9.08386706	5602900	5526	4229	1297	5526
45896	51.6072346	7.02851589	79746083	5405	5231	174	5405
31582	52.6407899	9.23150063	14244	5397	891	4505	5397
69168	49.3015349	8.71680204	27211	5395	0	5395	5395
92242	49.5543152	11.9423723	143578	5363	1977	3386	5363
83308	48.0341145	12.563374	332239	5333	0	5333	5333
65428	49.9830749	8.4493725	1756883	5271	0	5271	5271
67346	49.3303235	8.43747932	104189	5255	0	5255	5255
84503	48.2310046	12.659118	5978	5197	0	5197	5197
39249	51.9713477	11.8476826	59022	5179	2020	3159	5179

19322	52.996062	11.7810967	33656	5169	0	5169	5169
48607	52.2150074	7.18239068	5133	28823	21520	7302	5133
93104	48.896127	12.3415683	100372	5105	0	5105	5105
30926	52.3874268	9.57443767	146411	5083	3835	1248	5083
32457	52.2266088	8.94575733	7525428	4996	1084	3913	4996
55543	49.8286682	7.87529135	245883	4993	0	4993	4993
84570	48.2095763	12.5387359	116939	4972	0	4972	4972
66287	49.3217778	7.03275414	8934544	4929	0	4929	4929
36266	50.8914194	9.97461031	377089	4844	3108	1736	4844
15890	52.1626718	14.5637415	10720556	4842	0	4842	4842
93055	49.0047154	12.1499497	240344	4804	0	4804	4804
38372	52.1648361	11.0152495	32794	4704	2803	1901	4704
59073	51.7163262	7.83400578	18461	4598	3492	1106	4598
39218	52.0184088	11.7409795	119039	4589	0	4589	4589
94110	48.6172796	13.7646794	9456	4565	367	4199	4565
2625	51.185667	14.4365868	217728	4532	0	4532	4532
34123	51.2976283	9.52410538	29356	4523	0	4523	4523
27570	53.5391912	8.59540923	29867	4434	4119	315	4434
32427	52.3002356	8.86308108	134489	4404	3404	1000	4404
66333	49.2200323	6.80530231	9308639	4391	0	4391	4391
16225	52.8480791	13.8174272	29939	4380	0	4380	4380