

*Jonas-Leon Rolle
Maximilian-Timotheus Ullrich
Thomas May*

Das Problem der Kohlenstoffdioxidemission – Ursachen, Folgen und gegensteuernde Maßnahmen

**»Das Problem der Kohlenstoffdioxidemission –
Ursachen, Folgen und gegensteuernde Maßnahmen«**

Seminarfacharbeit

Schule:

von-Bülow-Gymnasium, Neudietendorf

Namen der Schüler:

Jonas-Leon Rolle, A17|3

Maximilian-Timotheus Ullrich, A17|3

Thomas May, A17|3

Seminarfachlehrer:

Dr. rer. nat. Steffen Möller

Fachbetreuer:

Dr. rer. nat. Peter Scholz

Abgabetermin:

06.10.2016

Inhaltsverzeichnis

1. Vorwort.....	3
2. Das Problem der erhöhten Kohlenstoffdioxidemission.....	5
2.1 Ursachen.....	5
2.2 Auswirkung auf den Klimawandel.....	7
2.3 Gegenmaßnahmen.....	9
2.3.1 Kyoto-Protokoll.....	9
2.3.2 Energiewende in Deutschland.....	10
2.3.3 Bedeutung der Energiezwischenspeicherung.....	11
3. Technisch genutzte Verfahren zur Zwischenspeicherung elektrischer Energie.....	12
3.1 Pumpspeicherkraftwerk.....	12
3.2 Druckluftspeicherkraftwerke.....	13
3.2.1 Druckluft-Gas-Kombikraftwerk.....	13
3.2.2 Adiabatisches Druckluftspeicherkraftwerk.....	14
3.3 Wasserstoff als Energiespeicher.....	14
3.4 Redox-Flow-Zellen.....	15
3.5 Weitere Energiespeicher.....	16
4. Neue Idee – Zwischenspeicherung elektrischer Energie als Methan mit Zwischenstufe Calciumcarbonat.....	17
4.1 Prinzip des Verfahrens.....	17
4.1.1 Absorption von Kohlenstoffdioxid.....	20
4.1.2 Thermische Zersetzung von Calciumcarbonat.....	21
4.1.3 Elektrolyse von Wasser.....	22
4.1.4 Herstellung von Methan nach Sabatier.....	25
4.2 Beschreibung der verwendeten Analysemethoden.....	26
4.2.1 pH-Wert-Bestimmung.....	26
4.2.2 Gaschromatographie.....	26
4.2.3 Thermogravimetrie.....	27

5. Untersuchung des Teilprozesses	
der Absorption von Kohlenstoffdioxid.....	28
5.1 Material und Methoden.....	28
5.1.1 Versuchsaufbau.....	28
5.1.2 Herstellung von Calciumhydroxid.....	29
5.1.3 Herstellung des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches.....	32
5.1.4 Aufnahme der Eichkurve.....	34
5.1.5 Absorption von Kohlenstoffdioxid.....	35
5.1.6 Analyse von Calciumcarbonat.....	40
5.2 Diskussion der Ergebnisse.....	42
5.2.1 Absorption von Kohlenstoffdioxid.....	43
5.2.2 Analyse von Calciumcarbonat.....	45
6. Ausblick.....	49
7. Nachwort.....	50
8. Danksagung.....	52
9. Chemisches Stoffverzeichnis.....	54
10. Quellenverzeichnis.....	60
10.1 Literaturquellen.....	60
10.2 Internetquellen.....	60
10.3 Abbildungsverzeichnis.....	65
11. Anhang.....	66
11.1 Rohdaten (digitalisiert).....	66
11.2 Auszeichnungen.....	67
12. Selbstständigkeitserklärung.....	68

1. Vorwort

Globale Veränderungen in der Natur sind nicht umkehrbar. Trotzdem versucht der Mensch, die Umwelt nach seinen Wünschen und Vorstellungen zu formen. Oft äußern sich diese Taten durch eine Erhöhung des Lebensstandards. Die damit verbundenen negativen Auswirkungen werden oftmals zu spät erkannt oder werden bewusst nicht wahrgenommen. Ein aktuelles Beispiel ist die immer stärkere Kohlenstoffdioxidemission. Sie nimmt seit der Nutzung von Energie aus fossilen Brennstoffen und der Erfindung des Verbrennungsmotors vor mehr als 100 Jahren¹ exponentiell zu. Den Konsequenzen dieser Auswirkungen wird erst seit 24 Jahren mit der UNO-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED) im Jahr 1992² Aufmerksamkeit zuteil. Aus diesem Grund muss die heutige Generation die Verantwortung für alle nachfolgenden übernehmen. So ist es eine Hauptaufgabe der Wissenschaft geworden, Lösungen für dieses Problem zu finden.

Im Rahmen dieser Arbeit schildern wir das Problem der erhöhten Kohlenstoffdioxidemission und deren Auswirkung auf das Klima. In diesem Kontext stellen wir die Bedeutung eines Energiezwischenspeichers dar und erläutern bereits bestehende Verfahren zur Energiezwischenspeicherung. Als eigenen Beitrag zu dieser Thematik haben wir außerdem eine neue Idee zur Energiezwischenspeicherung entwickelt. Einen Schwerpunkt stellt dabei die Untersuchung der Absorption von Kohlenstoffdioxid in Form von Carbonat als Teilprozess eines Energiespeichers dar.

Bekanntermaßen wird Kohlenstoffdioxid durch Laugen in Form von Carbonat gebunden. Für unsere Versuche wählten wir Calciumhydroxid als preiswert zu erwerbendes Absorptionsmittel. Ziele der praktischen Arbeit waren:

1. Zu untersuchen wie schnell eine bestimmte Menge Kohlenstoffdioxid aus unterschiedlichen Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemischen in dem Zeitraum bis zur Sättigung der Lauge absorbiert wird.
2. Zu untersuchen aus welchem Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisch die Absorptionsreaktion am effektivsten abläuft.

1 Vgl. <http://www.kfz-tech.de/Biblio/Verbrennung/VerbrennungsmotorG01.htm>

2 Vgl. https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/weltgipfel_rio_de_janeiro_1992_539.htm

Mit den geplanten Versuchen wird kein Neuland betreten, da diese Art von Versuchen bereits durchgeführt wurde. Im Vordergrund stand insbesondere das Vertrautmachen mit wissenschaftlichen Arbeitsmethoden, ausgehend von der Planung über die Durchführung bis hin zur Auswertung der praktischen Versuche und deren schriftliche Darlegung.

Um die praktische Untersuchung der Absorption von Kohlenstoffdioxid auf einem wissenschaftlichen Niveau durchführen zu können, suchten wir Unterstützung am Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Dort wurden uns alle benötigten Chemikalien, Geräte und Apparaturen zur Verfügung gestellt. Die verwandten Methoden orientieren sich an Standardverfahren der chemischen und physikalischen Analyse. Diese werden zu Studienzwecken in dem genannten Institut eingesetzt.

In den vergangenen zwei Jahren haben wir wiederholt am Wettbewerb »Jugend forscht« teilgenommen und uns mit dem Problemkreis des Klimawandels beschäftigt. Mit jeder Teilnahme steigerte sich die Intensität der aufgetragenen Arbeit und das investierte Zeitvolumen. Dieser Elan und die Freude am wissenschaftlichen Arbeiten wurde einstimmig auf die Seminarfacharbeit übertragen. So entwickelte sich aus dem anfänglichen Titel von »Jugend forscht« »CO₂ Abfall des Fortschritts?! Oder Schlüssel zu neuer Technik?« das jetzige Thema dieser Seminarfacharbeit »Das Problem der Kohlenstoffdioxidemission – Ursachen, Folgen und gegensteuernde Maßnahmen«.

2. Das Problem der erhöhten Kohlenstoffdioxidemission

2.1 Ursachen

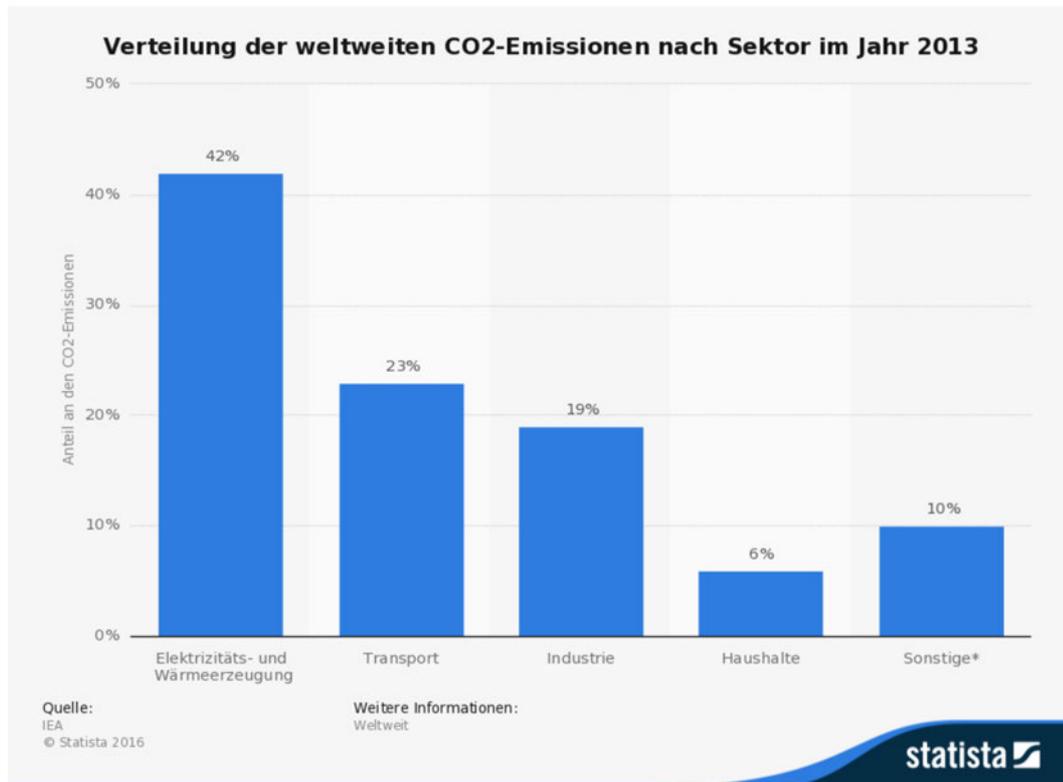


Abb. 1: Verteilung der weltweiten Kohlenstoffdioxidemission nach Sektoren im Jahr 2013

Die Endprodukte von Verbrennungsreaktionen sind unter anderem Kohlenstoffdioxid und Wasser (neben SO₂ und NO_x und unvollständig verbrannten Energieträgern). Fossile Brennstoffe wie Kohle, Öl und Erdgas werden zur Energieerzeugung verbrannt. Daher sind 95 % der Kohlenstoffdioxidemissionen in Deutschland auf Verbrennungsprozesse zurückzuführen.³ Die größte Emissionsquelle weltweit ist die Elektrizitäts- und Wärmezeugung mit einem Anteil von 42 %.⁴ Die zweitgrößte Quelle ist der Transport, bei dem z. B. Benzin oder Diesel verbrannt wird. Dies macht 23 % aus, da bei fast jeder motorisierten Beförderung eine hohe Emission anfällt. Die Industrie bildet mit einem Anteil von 19 % den drittgrößten Faktor. Bei der in Deutschland ausgeprägten Chemie und Stahl-

3 Vgl. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>

4 Vgl. <http://strom-report.de/strom-vergleich/>

industrie wird sehr viel Kohlenstoffdioxid emittiert. Auch in anderen Industriezweigen wie der Zementindustrie tritt der gleiche Fall auf.⁵ Haushalte sind neben sonstigen Emittenten mit 6 % der geringste Sektor. Viele elektronische Geräte verbrauchen in der Gesamtheit große Mengen an Strom. Die Heizungen der Haushalte, die nicht mit regenerativer Energie heizen, verbrauchen Strom oder Brennstoffe wie Kohle oder Gas.⁶

Eine weitere Ursache ist die Brandrodung oder Abholzung des Regenwaldes. Einerseits wird durch die Vernichtung des Waldes ein wichtiger Kohlenstoffdioxid-speicher irreparabel zerstört, andererseits wird durch Brandrodung Kohlenstoffdioxid emittiert. Aufgrund der Zerstörung der komplexen Nährstoffsymbiose im Regenwald kann die gerodete oder abgeholzte Fläche auch nur für eine begrenzte Zeit landwirtschaftlich genutzt werden.⁷ So wird immer mehr Regenwald gerodet. Das gleiche Problem tritt bei trockengelegten Mooren auf, die viermal so viel Kohlenstoffdioxid speichern wie der Regenwald.⁸ Ganze 4 % der deutschen Kohlenstoffdioxidemission entstehen so.⁹

Der Wechsel zwischen Warm- und Kaltzeiten wurde in den vergangenen Jahrtausenden »durch Veränderungen der Erdumlaufbahn und der Rotationsachse verursacht«.¹⁰ Durch diese Veränderungen erwärmen sich die Ozeane, dabei wird die Kohlenstoffdioxidlöslichkeit verringert und dieses wird an die Atmosphäre abgegeben. So entsteht der entscheidende Erwärmungseffekt, der zur Warmzeit führt und die Messungen vergangener Warm- und Kaltzeiten in Bezug auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration und der Temperatur bestätigt. Aufgrund dieser Theorie ist davon auszugehen, dass in kommenden Jahrzehnten bis Jahrhunderten der Ozean als Kohlenstoffdioxidemittent massive Probleme bereiten wird.¹¹

5 Vgl. <http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Klimabilanz/Laendervergleich/Deutschland/Industrie/Deutschland-CO2-Industrie.html>

6 Vgl. <https://www.stromauskunft.de/die-klimaschuetzer/co2-emissionen/>

7 Vgl. <https://www.abenteuer-regenwald.de/wissen/pflanzen>

8 Vgl. <http://www.business-biodiversity.eu/default.asp?Menue=155&News=295>

9 Vgl. <http://www.wiwo.de/technologie/green/living/umwelt-co2-der-klimakiller-aus-dem-moor/13547866.html>

10 <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-der-co2-anstieg-ist-nicht-ursache-sondern-folge-des-klimawandels>

11 Vgl. ebd.

Temporäre Temperaturschwübe im Klima entstehen durch Vulkanausbrüche. Der Hauptgrund dieser ist jedoch nicht das Kohlenstoffdioxid, sondern es sind Aerosole wie Sulfataerosole, die durch einen Ausbruch in die Atmosphäre gelangen. Durch eine Rückstreuung der Sonnenstrahlen kommt es außerdem zu einer abkühlenden Wirkung. Kohlenstoffdioxid, welches beim Ausgasen oder bei Vulkanausbrüchen in die Atmosphäre gelangt, beträgt rund 1 % der anthropogenen Emission.^{12,13} An dem Beispiel des Eyjafjallajökull (Island) ist dies sehr gut zu verstehen. Durch die abgesagten Flüge, aufgrund der Aschewolke, wurde mehr Kohlenstoffdioxid eingespart, als beim Ausbruch ausgestoßen wurde.¹⁴

2.2 Auswirkung auf den Klimawandel

Kohlenstoffdioxid¹⁵ ist ein Gas, das am Treibhauseffekt beteiligt ist. Als solches kann es Infrarotstrahlung reflektieren. Wenn kurzwellige Sonnenstrahlen auf die Erdoberfläche treffen, werden diese anteilig absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die erwärmte Erdoberfläche emittiert daraufhin Infrarotstrahlung, welche die Erde durch die Atmosphäre verlässt. Jedoch reflektieren Treibhausgase die Infrarotstrahlung teilweise zurück auf die Erde. So wird die Erde erneut erwärmt.

Der natürliche Treibhauseffekt ist dafür verantwortlich, dass die globale Durchschnittstemperatur bei ca. 15 °C liegt.¹⁶ Ohne jeglichen Treibhauseffekt würde diese bei nur -18 °C liegen.¹⁷ Es werden genug Infrarotstrahlen durch die Atmosphäre reflektiert, als auch durchgelassen. Im Gegensatz dazu besteht der anthropogene Treibhauseffekt aus Treibhausgasen, die zusätzlich vom Menschen in die Atmosphäre gebracht werden. Deshalb sind zu viele Treibhausgase in der Atmosphäre, die zu viel Infrarotstrahlung reflektieren. Dadurch heizt sich die Erde auf.

12 Vgl. <https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-vulkane-emittieren-mehr-kohlendioxid-als-die-menschen>

13 Vgl. <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Vulkanismus>

14 Vgl. <http://www.informationisbeautiful.net/2010/planes-or-volcano/>

15 siehe chemisches Stoffverzeichnis

16 Vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=5ijfVTLZFVE>

17 Vgl. <https://klima-kollekte.de/de/info/natürlicher-und-anthropogener-treibhauseffekt>

Kohlenstoffdioxid liefert zwar nur einen schwachen Beitrag zu dem Treibhauseffekt. Es ist jedoch mit einem Anteil von 87,9 % das am häufigst vorkommende Molekül, welches den Treibhauseffekt fördert.¹⁸ Deshalb kommt dem Kohlenstoffdioxid neben den anderen Treibhausgasen eine besondere Bedeutung bei dem Einfluss auf den Klimawandel zu.

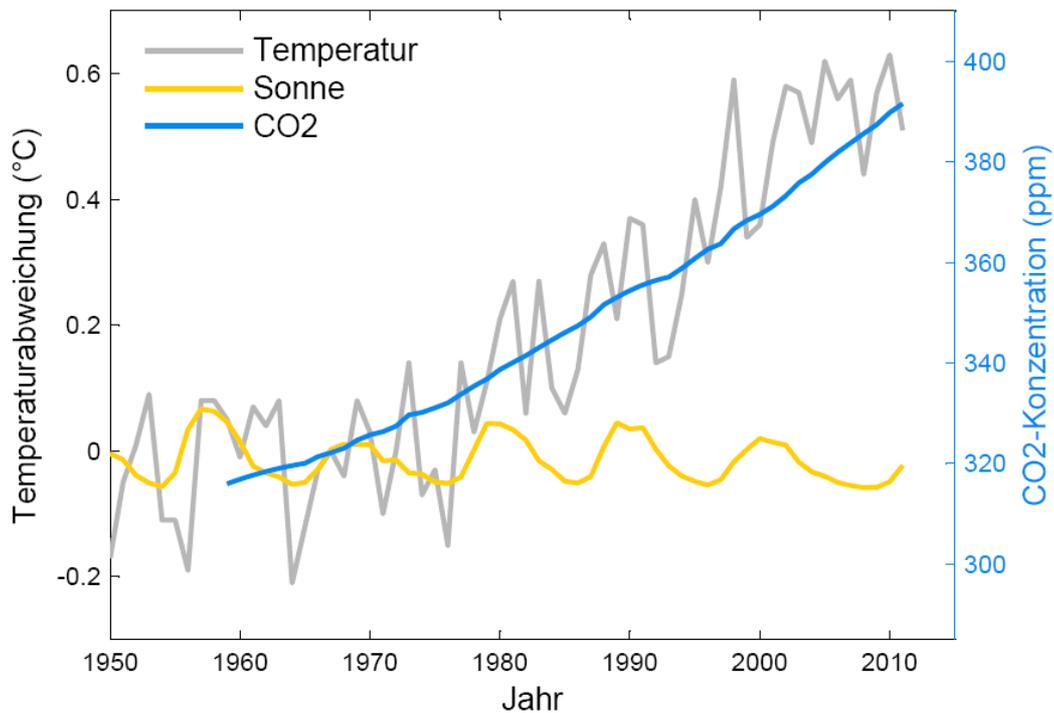


Abb. 2: Kohlenstoffdioxid- und Temperaturanstieg in den letzten 60 Jahren

Wie in der Abbildung 1 zu sehen, steigt die globale Erwärmung mit der Zunahme an Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre. Dies wurde zuerst von dem Chemiker Charles Keeling auf wissenschaftlich fundierte Weise festgehalten, der ab 1958 den Kohlenstoffdioxidanstieg in der Atmosphäre dokumentierte.¹⁹

18 http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/6_abb_anteile-thg-emi_2016-01-20_1.png

19 Vgl. <http://www.transatlantikblog.de/2008/08/10/charles-keeling-co2-kurve/>

2.3 Gegenmaßnahmen

2.3.1 Kyoto-Protokoll

Das Kyoto-Protokoll ist ein zusätzliches Abkommen der Klimarahmenkonvention, welches die Reduzierung der Treibhausgase regelt und unterzeichnende Staaten rechtlich an diesen Vertrag bindet. Das am 11. Dezember 1997 beschlossene Protokoll trat am 16. Februar 2005 in Kraft.²⁰ Im Protokoll sind Regelungen zur Emissionssenkung enthalten, die – wenn sie nicht eingehalten werden – Sanktionen mit sich ziehen. Um einen Anreiz zum Unterschreiten der Emissionswerte zu bieten, wurde der Emissionshandel eingeführt. Jeder der sich verpflichteten Staaten bekommt soviel Emissionsrechte zugesprochen, wie im Vertrag vereinbart. Wenn die Staaten diese unterschreiten, können sie die Rechte an Staaten verkaufen, die zu viel emittieren und eigentlich Sanktionen bekommen würden. Dies ist aber gleichzeitig ein großer Kritikpunkt, da es durch den Handel keine konsequente Treibhausgasregulierung geben kann. Bis heute ratifizierten 191 Staaten das Protokoll.²¹

Im Jahr 2012 endete die erste Verpflichtungsperiode und ein neuer Vertrag kam nicht zustande, da mehrere Staaten aufgrund von zu hohen Sanktionszahlungen kein weiteres Interesse hatten. Schon beim ersten Abkommen gab es das Problem, dass die USA es nicht ratifizierten, obwohl sie einer der Hauptemittenten sind. Dass nun auch Staaten wie Kanada, Russland und Japan sich der Fortführung des Kyoto-Protokolls enthalten, ist für die fortführende Vereinbarung weitaus weniger relevant. Die beteiligten Staaten sind nicht – wie beim ersten Vertrag – für 55 % der klimaschädlichen Emissionen der Industriestaaten verantwortlich, sondern nur noch für 15 %.²² Von den 37 Industriestaaten sind 27 Staaten Mitglieder in der EU. Die zweite Verpflichtungsperiode dauert von 2013 bis 2020, wonach dann ein internationales Abkommen für alle Länder eingeführt werden soll.²³

20 Vgl. https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/kyoto_protokoll_1108.htm

21 Vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=7EiJo0lvvGw>

22 Vgl. ebd.

23 Vgl. <http://klimawandel-bekaempfen.dgvn.de/un-klimaschutz/der-kyoto-prozess/>

2.3.2 Energiewende in Deutschland

Die Energiewende ist der erfolgreiche Verzicht auf die Nutzung fossiler Brennstoffe und der Atomkraft. Diese werden durch erneuerbare Energien ersetzt. Gleichzeitig soll eine effizientere Nutzung der Energie zu einer Verringerung des Verbrauchs führen.

Nach der Katastrophe in einem Atomkraftwerk in Fukushima (Japan) beschloss der deutsche Bundestag am 30. Juni 2011 den Ausstieg aus der Atomkraft und die stufenweise Abschaltung der Reaktoren bis 2022. Atomkraftwerke machen 12 % der Energieversorgung in Deutschland aus. Um die künftig fehlende Energie mit emissionsfreien Mitteln zu decken, werden erneuerbare Energien eingesetzt. Deutschland kann die fehlende Energie nicht mit Energie von Kraftwerken, die fossile Brennstoffe nutzen, decken. Denn damit würden es die Regelungen der Klimarahmenkonvention zur Senkung der Treibhausgase nicht mehr einhalten. Die Maßnahmen zur Förderung der erneuerbaren Energien wurden schon sehr viel früher beschlossen. Mit dem Stromeinspeisegesetz (StromEinspG) vom 7. Dezember 1990 wurde der Grundstein dafür gelegt, dass nur Strom aus regenerativen Energieträgern problemlos eingespeist werden kann.²⁴ In Folge des Kyoto-Protokolls wurde das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 beschlossen. Darin wurde die staatliche Förderung von erneuerbaren Energien festgelegt. Das Gesetz wird fortlaufend aktualisiert.²⁵

Ziele der Energiewende wurden meist in Etappen bis 2050 geplant. Bis dahin wird angestrebt, den Bruttostromverbrauch mit 80 % erneuerbaren Energien zu decken. Außerdem wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zwischen 80 und 95 % angestrebt. Als Bezugswert wurde die gemessene Treibhausgasemission aus dem Jahr 1990 verwendet. Neben anderen Beschlüssen wurde sich auf die Reduktion des Stromverbrauchs um 25 % bis zum Jahr 2008 geeinigt.²⁶

24 Vgl. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=72462

25 Vgl. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html;jsessionid=A6190E9C940A732036F89AFA67F02950?cms_docId=71110

26 Vgl. <http://www.co2online.de/klima-schuetzen/energiewende/energiewende-definition-ziele-uebersicht/>

2.3.3 Bedeutung der Energiezwischenspeicherung

Erneuerbare Energien wie Wasser- und Windkraft, Photovoltaik oder Solarthermie haben im Gegensatz zu klassischen Kraftwerken, wie Kohlekraftwerke, keine konstante Energieabgabe. Wenn zum Beispiel in Norddeutschland viel Wind herrscht und Windparks überdurchschnittlich viel Energie liefern, aber im Süden von Deutschland Energie fehlt, kann schwankende Leistung durch effiziente Stromtrassen ausgeglichen werden. Das viel größere Problem stellt aber eine komplette Abwesenheit von Wind und Sonne dar. Ohne eine Lösung dieser Problematik wäre an einen kompletten Umstieg auf erneuerbare Energien nicht zu denken. Zu groß wäre das Risiko des kompletten Stromausfalls und der einhergehenden Folgen.

Energiezwischenspeicher können bei Leistungsüberschuss Energie aufnehmen und zwischenspeichern. In Zeiten eines Energiemangels wird die Energie wieder genutzt und kann das Stromdefizit ausgleichen.

3. Technisch genutzte Verfahren zur Zwischenspeicherung elektrischer Energie

Wie im Punkt 2.3.3 erläutert, spielen Energiezwischenspeicher eine große Rolle bei der Energiewende. So werden im Folgenden die wichtigsten Zwischenspeicher erklärt.

3.1 Pumpspeicherkraftwerk

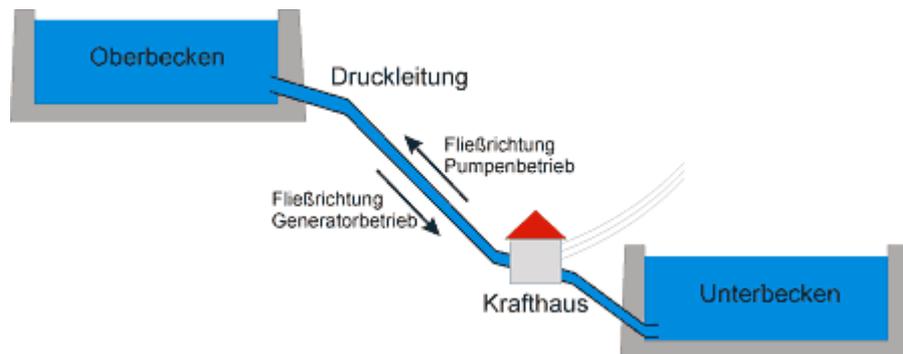


Abb. 3: Aufbau eines Pumpspeicherkraftwerkes

Pumpspeicherkraftwerke bestehen aus zwei sich in der Höhe unterscheidende Becken oder Seen. Im Falle eines Energieüberflusses kann Wasser mit dem vorhandenen Strom vom tiefer gelegten Unterbecken in das höher gelegene Oberbecken gepumpt werden. Wenn jedoch Strommangel herrscht, wird Wasser aus dem Oberbecken abgelassen und treibt beim Herunterfließen Turbinen an. Die Turbine ist an einen Generator angeschlossen, der die Kraft in Strom umwandelt und den Strommangel ausgleicht. Pumpspeicherkraftwerke haben einen ungefähren Wirkungsgrad von 80 %²⁷ pro Pumpzyklus und zeichnen sich deshalb besonders gut für das Speichern von Strom aus. Dazu sind sie auf Anhieb nutzbar und brauchen keine großartige Startzeit.²⁸

Der Eingriff in die Natur stellt jedoch ein enormes Problem dar. Ganze Landschaften werden geflutet und Stauseen gebaut. Denn zwei nebeneinander liegende Gewässer mit Höhenunterschied gibt es in der Regel nicht. So muss mindestens ein Gewässer künstlich angelegt werden.²⁹

27 Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>

28 Vgl. <http://energiespeicher.blogspot.de/2011/08/pumpspeicherkraftwerke.html>

29 Vgl. <http://www.stromgewinnung.com/pumpspeicherkraftwerk.shtml>

3.2 Druckluftspeicherkraftwerke

Ein Druckluftspeicherkraftwerk ist im Prinzip dem Pumpspeicherkraftwerk relativ ähnlich. Bei Energieüberschuss wird Außenluft in unterirdischen Kammern komprimiert und bei Spitzenlastzeiten durch eine Turbine geleitet. Der angeschlossene Generator produziert so Strom. Allerdings ist diese Form des Energiespeichers sehr selten, da die physikalischen Eigenschaften von Gas den Betrieb erschweren.

3.2.1 Druckluft-Gas-Kombikraftwerk

Bei diesem Kraftwerk wird zunächst die Außenluft durch einen Kompressor verdichtet, dabei erwärmt sie sich stark. Um eine Beschädigung der Anlage zu verhindern, wird mit einem Wärmetauscher die Wärme abgeführt und geht verloren. Dieser Faktor ist der erste Grund, weshalb das Kraftwerk keine allzu hohe Effizienz aufweist. Der zweite Grund ist, dass bei der Herstellung von Strom in der Turbine die Luft aufgrund der Expansion wieder abkühlt. So würde die Turbine vereisen. Um dies zu verhindern, wird ein Gasturbinenkraftwerk verwendet. In diesem wird die Luft in der Turbine mit Erdgas vermischt. Mit der Verbrennung des Erdgas-Luft-Gemisches wird eine Vereisung verhindert. So gelangt einerseits Kohlenstoffdioxid in die Umwelt und andererseits ist das Kraftwerk kein reiner Energiespeicher mehr, sondern eine sofort abrufbare Energiequelle. Angaben zum Wirkungsgrad, bezogen auf das Vermögen Energie zu speichern, lassen sich nicht berechnen, da das Erdgas hinzugeführt werden muss.

Beispiele für eine solche Art von Kraftwerk sind das Kraftwerk McIntosh in den USA und das Kraftwerk Huntorf in Deutschland. Das Druckluft-Gas-Kombikraftwerk McIntosh zeichnet sich durch einen Rekuperator, also einem Wärmeüberträger, aus. Dieser wird von der Verbrennungswärme der Gasturbinen erwärmt und gibt diese Wärme an die Erdgas-Luft ab.³⁰ So wird diese vor dem Eintritt in die Gasturbine vorgewärmt. Damit wird das Kraftwerk effizienter zum regulärem Druckluft-Gas-Kombikraftwerk Huntorf.³¹

30 Vgl. http://www-docs.tu-cottbus.de/cebra/public/DownloadDokumente/Innovationstag/2007/16_Huebner.pdf

31 Vgl. <https://www.youtube.com/watch?v=ql4H1jDDiSg>

3.2.2 Adiabatisches Druckluftspeicherkraftwerk

Diese Form des Kraftwerkes unterscheidet sich hauptsächlich dadurch, dass die sich beim Komprimieren erheizende Luft in Wärmespeicher geleitet wird. Die Luft erhitzt den Wärmespeicher und gelangt dann in die unterirdischen Kammern. Jedoch ist sie jetzt auf ca. 40 °C abgekühlt. Bei Strombedarf strömt die Luft erneut durch die immer noch erhitzten Wärmekammern und wird dort erwärmt. So wird das Vereisen der Turbinen ohne Verwendung eines zusätzlichen Verbrennungsmotors verhindert. Damit kommen adiabatische Druckluftspeicherkraftwerke auf einen realisierbaren Wirkungsgrad von ca. 70 %. Allerdings gibt es bisher nur Projekte und kein fertig realisiertes Kraftwerk.

Das adiabatische Druckluftspeicherkraftwerk ist aufgrund der Wärmespeicher, die mit der Zeit auskühlen, nur für relativ kurze Zeitspannen gedacht. Andernfalls wäre der Energieverlust durch die Abkühlung der Wärmespeicher zu hoch. Deshalb ist es dafür ausgelegt, eine kurzzeitige Windstille oder Spitzenstromlast im Stromnetz auszugleichen.³²

3.3 Wasserstoff als Energiespeicher

Um Wasserstoff³³ als Energieträger nutzen zu können, wird mit der Wasserstoffelektrolyse Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff getrennt. Der Wirkungsgrad bei diesem Vorgang beträgt ca. 70 %, jedoch gibt es auch schon Anlagen, die einen höheren Wirkungsgrad erreichen.³⁴ Bei Stromüberschuss kann diese Reaktion jederzeit herbeigeführt werden.

32 Vgl. http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03a_Crotogino_CAES-Windausgleich_VDI.pdf

33 siehe chemisches Stoffverzeichnis

34 Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserelektrolyse>

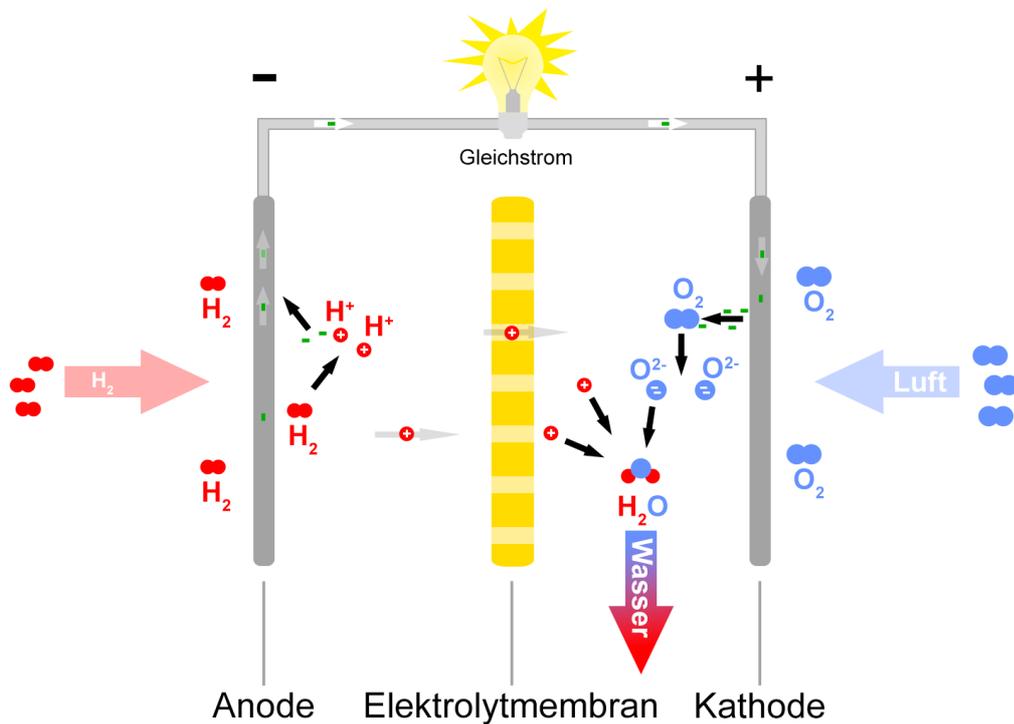


Abb. 4: Aufbau einer Wasserstoff-Brennstoffzelle

Die Wasserstoff-Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die den Wasserstoff mit dem Sauerstoff in der Luft wieder zu Wasser reagieren lässt, dabei wird elektrischer Strom abgegeben. So wird die chemische Energie in elektrische umgewandelt, ohne dass relevante Wärme entsteht. In Abbildung 4 ist dieser Vorgang zu sehen. Diese Brennstoffzelle kommt je nach Typ auf einen Wirkungsgrad von ungefähr 60 bis 70 %.³⁵

Wenn man die Gesamteffizienz der Elektrolyse und der Brennstoffzelle verrechnet, liegt der Wirkungsgrad bei ungefähr 42 bis 49 %.

3.4 Redox-Flow-Zellen

Der auch Redox-Flow-Batterie genannte Energiespeicher, ist eine galvanische Zelle, bei der die Elektrolyte voneinander getrennt zirkulieren. Die Kreisläufe sind durch eine Membran gekoppelt, durch welche diese Ionen austauschen können. Durch unterschiedliche Elektrolyte wird eine Zellspannung von 1 bis 2,2 V er-

³⁵ Vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Brennstoffzelle.html>

reicht. Da sie einen sehr hohen Wirkungsgrad und eine hohe Lebensdauer haben, eignen sie sich gut um Energie zu speichern. Große Nachteile sind jedoch der hohe Preis, eine geringe Energiedichte und das damit verbundene große Gewicht.

Deshalb ist eine längere Speicherung nicht rentabel, eine Pufferspeicherung jedoch schon. Das größte Batteriesystem steht in Japan, dieses speichert elektrische Energie aus einer Windkraftanlage. Ein weiteres Anwendungsgebiet stellen Energieproduzenten wie zum Beispiel eine Photovoltaikanlage dar. Dort kann überschüssige Energie in der Batterie gespeichert werden, anstatt sie überflüssigerweise in das Stromnetz einzuspeisen. In der Nacht oder bei kurzfristigem Energiebedarf kann dann die Energie genutzt werden.

3.5 Weitere Energiespeicher

Neben den erklärten Energiespeichern gibt es noch weitere vielversprechende Projekte, wie z. B. Power-to-Gas. Dabei wird aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff Methan³⁶ hergestellt, welches als Energieträger genutzt werden kann.³⁷ Superkondensatoren oder auch Supercaps genannte Kondensatoren sind allgemein sehr leistungsfähige Kondensatoren. Der Vorteil gegenüber Batteriespeichern ist der, dass sie eine extrem hohe Lebensdauer und Flexibilität beim Laden und Entladen haben.³⁸

36 siehe chemisches Stoffverzeichnis

37 Vgl. <https://www.zukunft-erdgas.info/markt/erneuerbares-erdgas/power-to-gas>

38 Vgl. <http://www.all-electronics.de/superkondensatoren-als-abnutzungsfreie-energiespeicher-statt-akkumulatoren/>

4. Neue Idee – Zwischenspeicherung elektrischer Energie als Methan mit Zwischenstufe Calciumcarbonat

4.1 Prinzip des Verfahrens

Im Rahmen der Teilnahme bei dem Wettbewerb »Jugend forscht« und in Zusammenarbeit mit hilfreichen Unterstützern wurde in den letzten zwei Jahren eine Idee von einem Energiezwischenspeicher entwickelt. Dieser basiert auf der Nutzung des sonst wenig in der chemischen Industrie genutzten Kohlenstoffdioxids. Die Ursprungsidee bestand darin, Kohlenstoffdioxid aus den Abgasen von Kohlekraftwerken zu absorbieren. Aus dieser Grundlage heraus entstand die Idee eines Kreislaufes, welcher möglichst umweltfreundlich, effizient und komplett neuartig sein soll. Das entwickelte Prinzip besteht aus vier Teilreaktionen, die unabhängig voneinander ablaufen, als Kreislauf jedoch perfekt funktionieren und eine Alternative für bestehende Methoden der Energiezwischenspeicherung bieten. Die Teilreaktionen im Einzelnen werden in der fortlaufenden Arbeit genauer erläutert.

Die Hauptidee unseres chemischen Energiezwischenspeichers besteht darin, die ungenutzte Energie von Wind, Sonne oder Gezeiten in elektrischen Strom umzuwandeln und mit Hilfe von diesem anschließend Methan aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff herzustellen. Die Energie von abgestellten Windkraftträdern oder zeitlich ungenutzten Photovoltaikanlagen, die bei unterlassener Abschaltung das Stromnetz überlasten würden, wird verwendet, um die endothermen Reaktionen des Kreislaufes zu starten. Wenn dann in das Stromnetz zu wenig Energie durch die erneuerbaren Energien eingespeist wird, starten die exothermen Reaktionen und speisen Energie ein, welche die Lücke fehlender Energie schließen soll, sodass jeder Haushalt und jede Firma in Deutschland weiterhin den Strom beziehen kann, der benötigt wird.

Wenn ein Überschuss an Energie vorhanden ist, geschieht in dem Kreislauf folgendes. Mit der überschüssigen Energie wird eine Wasserstoffelektrolyse durchgeführt, um hochwertig reinen elementaren Wasserstoff zu gewinnen. Ebenfalls wird Calciumcarbonat³⁹ durch die Energie soweit erhitzt, bis es thermisch in Calciumoxid⁴⁰ und Kohlenstoffdioxid zersetzt wird. Unter Verwendung eines Katalysators wird aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid Methan hergestellt.

Das für die Herstellung benötigte Kohlenstoffdioxid läuft ebenfalls in einer Art Kreislauf. Um die angestrebte Umweltfreundlichkeit zu erreichen, wird die Emission von Treibhausgasen unter allen Umständen vermieden. So muss das bei der Verbrennung des Methans entstehende Kohlenstoffdioxid zu möglichst hoher Prozentzahl innerhalb des Kreislaufes gehalten werden. Hierbei verwendet man die Methode der Salzbildung nach einer Reaktion von Kohlenstoffdioxid und der Lauge Calciumhydroxid⁴¹. Es entsteht Calciumcarbonat.

Um die benötigte Menge der Lauge zu gewinnen, wird das entstehende Calciumcarbonat der Absorption thermisch zersetzt. Als Reaktionsprodukt dieser endothermen Reaktion entstehen festes Calciumoxid und gasförmiges Kohlenstoffdioxid in reiner Form, welches wieder bei der Herstellung von Methan in dem Kreislauf genutzt wird. Das Calciumoxid wird mit Wasser vermischt und reagiert zu der benötigten Lauge Calciumhydroxid, womit deren Wiedergewinnung auch gesichert ist.

Letztendlich wird bei vorliegendem Energiemangel das Methan verbrannt und mit modernster Turbinentechnologie Strom gewonnen. Die Reaktionsprodukte der Verbrennungs- und Absorptionsreaktionen werden verwendet, um Ausgangsprodukte wiederzugewinnen, sodass ein Kreislauf entsteht.

Das Speichermedium für die Energie stellt das Methan dar. Der Speicher des für den Kreislauf essentiell wichtigen Kohlenstoffdioxids ist das Calciumcarbonat. Calciumcarbonat ist als Salz ungefährlich, da es die Umwelt nicht belastet und auch keine Brand- oder Explosionsgefahr besteht. Als Feststoff ist es effizient, einfach und sicher zu lagern. Ein Transport ist somit viel einfacher zu bewerkstel-

39 siehe chemisches Stoffverzeichnis

40 siehe chemisches Stoffverzeichnis

41 siehe chemisches Stoffverzeichnis

ligen. Hinzu kommt, dass das Verfahren überall anwendbar ist, wo ein Energieüberschuss vorliegt. Es ist also möglich, dieses Verfahren auf der gesamten Welt zu nutzen, wo immer auch dieser Überschuss vorliegt.

Ein wichtiger Faktor ist, dass das Verfahren einen ressourcenschonenden Ablauf besitzt. Als funktionierender Kreislauf werden alle Chemikalien, die am Prozess beteiligt sind, aus den Produkten vorhergehender Reaktionen wiedergewonnen, sodass ein Kreislauf entsteht. Dies bedeutet, dass nur geringfügige Ausgaben für den Nachkauf von verbrauchten Chemikalien entstehen. Es benötigt auch nur einen vergleichsweise geringen Eingriff in die Natur. Ein unterirdischer Anlagenbau und -betrieb sollte kein Problem darstellen, sodass kaum ein bzw. kein Eingriff in das Landschaftsbild bei der Realisierung notwendig würde. Außerdem bleibt so landwirtschaftliche Nutzfläche erhalten.

Das Besondere an diesem Energiezwischenspeicher ist der ungefährliche »Ruhemodus«. Der Kreislauf kann aus zwei schnell verfügbaren Chemikalien gestartet werden, die weder gefährlich, noch giftig, noch umweltschädlich sind. Die Ausgangsstoffe Wasser und Calciumcarbonat reichen aus, um den Kreislauf zu beginnen. Das Wasser wird elektrolytisch zerlegt und somit der Wasserstoff hergestellt, der während des Sabatier-Prozesses mit Kohlenstoffdioxid zu Methan reagiert. Aus der thermischen Zersetzung von Calciumcarbonat erhält man das Kohlenstoffdioxid für den Sabatier-Prozess und das Calciumoxid, welches zur Herstellung von Calciumhydroxid gebraucht wird. Das heißt, dass bei einem Aufbau einer solchen Anlage ausschließlich normaler Kalkstein und Wasser zu dem Standort transportiert werden müssten. Die Anlage vor Ort müsste weder an bestehende Gasleitungen angeschlossen werden, noch müssen gar neue Leitungen verlegt werden, da alles vor Ort ablaufen kann. Nur die Anbindung an das Stromnetz ist erforderlich, um eine Energieeinspeisung zu ermöglichen und zu erleichtern.

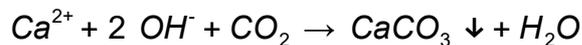
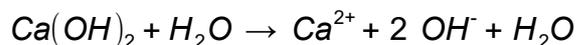
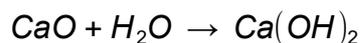
Ein weiterer Vorteil ist ein durchweg klimafreundliches Verfahren, wobei die Idee den Schritt Richtung erneuerbare Energien unterstützen soll, sodass nicht nur klimafreundlich sondern auch klimaschonend gearbeitet wird. Anhand der praktischen Tätigkeiten im Labor in Jena konnten auch für die Realisierung des Absorptionsprozesses wertvolle Erkenntnisse mitgenommen werden. Die Absorpti-

on des Kohlenstoffdioxids und die Herstellung des Calciumhydroxids läuft nicht nur gleichzeitig, sondern auch im selben Gefäß ab. Um den Nachschub an Calciumoxid regulieren zu können und so die Laugenbildung zu garantieren, wird lediglich eine Einrichtung zur Zufuhr von Calciumoxid benötigt. Das Speichermedium Calciumcarbonat bietet als Salz mit einer Dichte von 2,73 g/l eine effiziente und sichere Möglichkeit der Lagerung. Ein Gas würde weitaus mehr Lagerraum benötigen und wäre mit viel mehr Risiken verbunden.

4.1.1 Absorption von Kohlenstoffdioxid

Der erste Teil des Kreislaufes, welcher genauer beschrieben werden soll, bezieht sich auf unsere Anfangsidee. In dem Verfahren wird das Kohlenstoffdioxid mit Hilfe von Calciumhydroxid in Form von Calciumcarbonat gebunden. Es entsteht festes Calciumcarbonat und Wasser. Bei der Salzbildungsreaktion ist eine weiße Trübung der Lösung zu erkennen. Jedoch besitzt das zur Herstellung benötigte Calciumoxid eine Wasserlöslichkeit von 1,65 g/l. Das heißt, sobald man bei einer Laugenkonzentration von über 0,165 % arbeitet, bleibt festes ungelöstes Calciumcarbonat in dem Gefäß zurück. Ungelöstes Calciumcarbonat trübt die Lauge nach der Herstellung weiß. Den erfolgreichen Ablauf der Reaktion anhand der Trübung zu erkennen, lässt sich schon vor Start der Messreihe ausschließen.

Chemisch passiert bei der Herstellung der Lauge und anschließendem Einleiten von Kohlenstoffdioxid folgendes:



Die Reaktion zur Herstellung der Lauge aus Metalloxid und Wasser verläuft exotherm. Das Produkt ist Calciumhydroxid. Ungelöstes Calciumoxid bleibt als Feststoff zurück. Das entstehende Calciumhydroxid geht in Lösung. Es bilden sich Calcium- und Hydroxid-Ionen. Calciumhydroxid hat eine minimal bessere Wasserlöslichkeit als Calciumoxid, weshalb sich das gesamte Calciumhydroxid

lösen kann. Schlussendlich reagieren die Calcium- und Hydroxid-Ionen mit dem Kohlenstoffdioxid und speichern dies in Form von Calciumcarbonat.

Bedingt durch diese Bindung in Form von Calciumcarbonat erfolgt in der Lösung eine Verringerung der Konzentration an Hydroxid-Ionen. Die Reaktion senkt den pH-Wert der Lösung in Richtung des neutralen Bereichs. Die Herabsetzung des pH-Werts bedingt die Lösung von dem noch festen Calciumoxid. Es entsteht neues Calciumhydroxid. Das Calciumhydroxid geht auf Grund seiner Wasserlöslichkeit komplett in Lösung. Es entstehen Calcium- und Hydroxid-Ionen. Die neuen Hydroxid-Ionen bewirken einen Anstieg des pH-Wertes. Ein Wechsel aus pH-Wert-Senkung, welche eine Calciumhydroxidbildung bewirkt und folgendem pH-Wert-Anstieg bei der Carbonatbildung, funktioniert solange, wie ungelöstes Calciumoxid in dem System enthalten ist. Unter diesen Umständen könnte es sehr lange dauern, bis sich ein neutraler pH-Wert eingestellt.

Als pH-Wert-Indikator, um diesen Wechsel während der Absorptionsreaktion sichtbar zu machen, wäre Bromthymolblau⁴² denkbar. Dieser zeigt den Übergang von basisch zu neutral durch eine Entfärbung eines tiefen Blautons bis hin zu einer Verfärbung in einen dezenten Gelbton. Theoretisch sollte bei einer Untersuchung der Umschlagpunkte ein klarer Übergang zu erkennen sein. Der Einfluss der ungelösten Calciumoxid-Moleküle und deren tatsächliche Wirkung auf den pH-Wert könnten bei einer Titration sichtbar gemacht werden.

4.1.2 Thermische Zersetzung von Calciumcarbonat

Die thermische Zersetzung des Speichermediums Calciumcarbonat ist für den Kreislauf sehr wichtig, da zum einen Kohlenstoffdioxid frei wird und zum anderen Calciumoxid als Feststoff zurückbleibt. Beide Chemikalien sind für weitere Schritte des Kreislaufs essentiell. Das Kohlenstoffdioxid wird zur Methanherstellung benötigt. Calciumoxid hingegen ermöglicht die Reaktion zur Herstellung von Calciumhydroxid.

42 siehe chemisches Stoffverzeichnis

Die Reaktion der thermischen Zersetzung von Calciumcarbonat ist eine endotherme Reaktion, welche erst ab einer hohen Temperatur abläuft. Die Zersetzungstemperatur liegt bei 800 °C.

Unter folgender Reaktion würde Calciumcarbonat bei benötigter Temperatur zerlegt werden:



Die thermogravimetrische Analyse bietet als wissenschaftliche Methode eine Möglichkeit, den Masseverlust während der Reaktion aufzuzeichnen und legt eine Datenbasis zu Analyse dar. Ebenfalls interessant wäre es auch zu ermitteln, ob die exakte Dauer der thermischen Zersetzung bei einer sehr hohen Temperatur von 1200 °C schneller als bei einer hohen Temperatur von 900 °C abläuft.⁴³

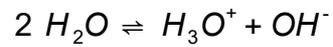
4.1.3 Elektrolyse von Wasser

Wasserelektrolyse ist ein elektrochemisches Verfahren zur Oxidation von Wasser. Es entstehen dabei Wasserstoff und Sauerstoff. Das Verfahren gewinnt in der Industrie und Wissenschaft immer mehr Bedeutung, da bei zurückgehender Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen in Zukunft Wasserstoff ein alternativer Ausgangsstoff zur Energieerzeugung sein könnte. In dem Energiezwischenspeicher liefert die Elektrolyse einerseits den Wasserstoff für die Methanherstellung, andererseits wird der Sauerstoff, der bei der Verbrennung von Methan verbraucht wird, wieder in die Umluft geleitet.

Mithilfe von elektrischer Energie reagiert Wasser in zwei Teilreaktionen an zwei Elektroden zu Wasserstoff und Sauerstoff. Die Elektroden tauchen beide in Wasser ein. Diesem Wasser kann in geringer Konzentration Säure oder auch Lauge zugefügt werden. Dadurch wird die Anzahl an Oxonium- und an Hydroxidionen erhöht und eine Begünstigung der Reaktion erreicht.

43 Vgl. <http://anorganik.chemie.vias.org/calciumcarbonat.html>

Da sich bei der Elektrolyse Ionen zu der entgegengesetzt geladenen Elektrode bewegen, müssen im Wasser bestimmte Ionen vorhanden sein. Die Oxonium- und Hydroxid-Ionen entstehen durch die Autodissoziation von Wasser. Sie beschreibt ein chemisches Reaktionsgleichgewicht nach folgender Gleichung:



Das Gleichgewicht liegt sehr stark auf der Seite des Wassers. Jedoch besitzt chemisch reines Wasser aufgrund dieser Erscheinung eine geringe elektrische Leitfähigkeit. Dadurch erst wird die Elektrolyse von Wasser ermöglicht.

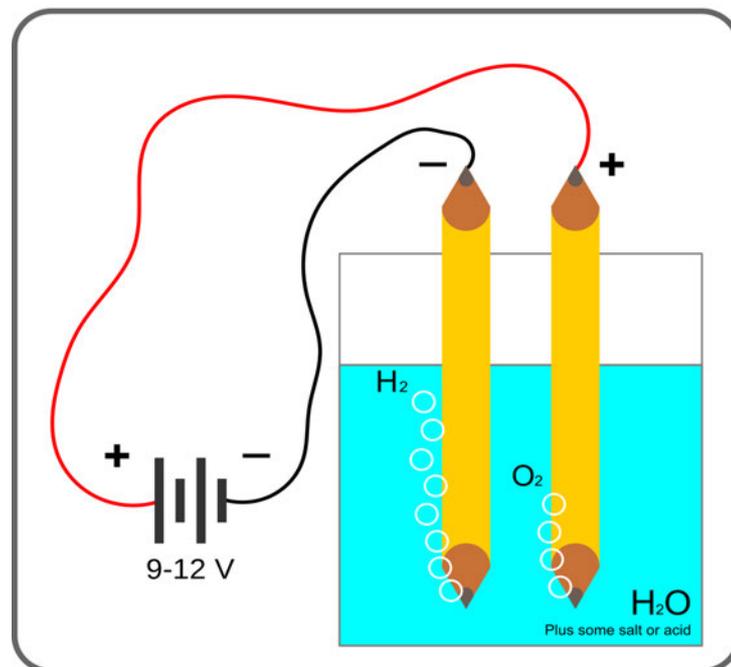
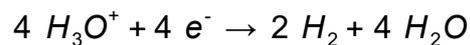


Abb. 5: Vereinfachter Aufbau der Elektrolyse von Wasser

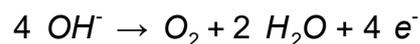
Durch den Anschluss der Elektroden an einer Stromquelle entsteht zwischen den Elektroden ein elektrisches Feld. Die Kräfte, die in dem Feld vorliegen, bewegen die Ionen zu der jeweiligen Elektrode.

Positiv geladene Oxonium-Ionen bewegen sich in diesem elektrischen Feld zu der negativ geladenen Elektrode hin. An der Kathode findet folgende Reduktion statt: Oxoniumionen werden durch Elektronenaufnahme zu Wasserstoff und Wasser reduziert. Der entstehende Wasserstoff steigt an der Kathode in Bläschen zur Wasseroberfläche hin auf und kann dort entnommen und anschließend für die Methanherstellung verwendet werden.

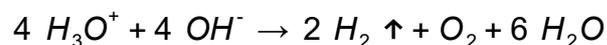
Diese Reaktionsgleichung stellt die Abläufe an der Kathode dar:



Die negativ geladenen Hydroxid-Ionen wandern zur positiv geladenen Elektrode. An der Anode reagieren Hydroxid-Ionen unter Elektronenabgabe zu Sauerstoff und Wasser. Die Oxidation von Hydroxid-Ionen läuft folgendermaßen ab:



Die Gesamtreaktion der ablaufenden Redoxreaktion lautet:



Die benötigten Ionen entstehen durch die Dissoziation von Wasser:



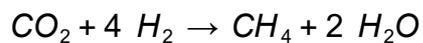
Da zurzeit großtechnische Anlagen zu der Elektrolyse von Wasser noch fehlen, stellt diese Reaktion einen noch wissenschaftlich zu untersuchenden und zu bearbeitenden Teil des Kreislaufs dar. Im Labormaßstab funktioniert die Reaktion allerdings reibungslos.^{44, 45}

44 Vgl. <http://www.chemieunterricht.de/dc2/echemie/h2o-elek.htm>

45 Vgl. <http://www.chemieunterricht.de/dc2/wasser/w-eigendiss.htm>

4.1.4 Herstellung von Methan nach Sabatier

Mithilfe der Sabatier-Reaktion kann aus industriell nahezu wertlosem Kohlenstoffdioxid, energiereiches Methan hergestellt werden. Der Sabatier-Prozess beschreibt eine Reaktion, bei der Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff zu Wasser und Methan reagieren. Benannt nach dem französischen Chemiker Paul Sabatier wird Kohlenstoffdioxid zu Methan reduziert. Das heißt, es wird die maximale Anzahl an Elektronen zugeführt und aufgenommen, weshalb die äußerste Elektronenschale des Kohlenstoffes komplett besetzt ist. Unter dieser Reaktion läuft der Sabatier-Prozess ab:



Damit dieser Prozess effektiv betrieben werden kann, werden erhöhte Temperatur und Druck benötigt. Das setzt eine sehr hohe Aktivierungsenergie voraus. Es muss viel Energie aufgewendet werden, um die erforderlichen Temperatur- und Druckwerte zu erreichen. Katalysiert wird der Prozess durch Metallkatalysatoren wie beispielsweise durch einen Nickelkatalysator. Besser geeignet wäre Ruthenium auf einem Aluminiumoxidsubstrat. Alternativen sind auch Platin, Palladium oder Rhodium. Komplette ohne einen Katalysator würde die Aktivierungsenergie viel höher liegen.⁴⁶

⁴⁶ Vgl. <http://www.chemie.de/lexikon/Sabatier-Prozess.html>

4.2 Beschreibung der verwendeten Analysemethoden

4.2.1 pH-Wert-Bestimmung

Säure-Basen-Indikatoren oder pH-Wert-Indikatoren sind chemische Stoffe, die zur visuellen Bestimmung des pH-Wertes einer chemischen Lösung genutzt werden. Dabei zeigen unterschiedliche Indikatoren unterschiedliche Farben bei dem gleichen pH-Wert einer Lösung an. In Abbildung 6 sind diese für verschiedene Indikatoren dargestellt.

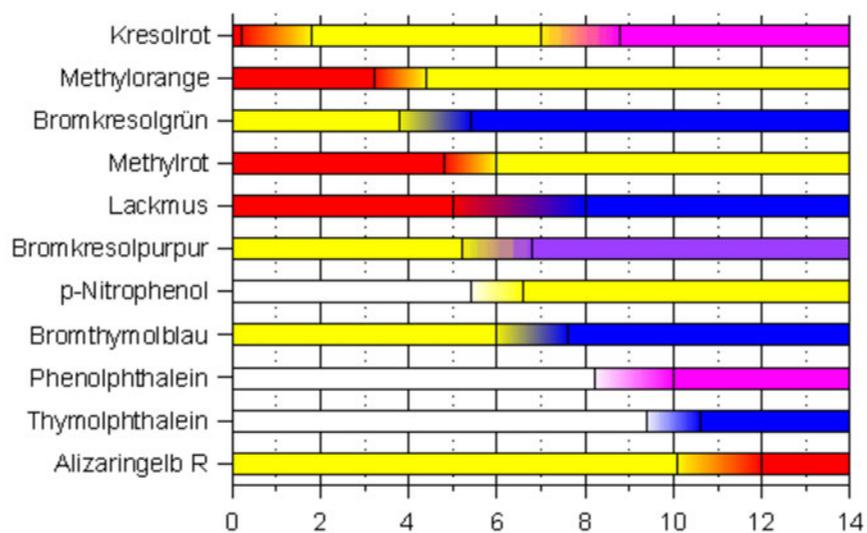


Abb. 6: Umschlagbereiche von Säure-Basen-Indikatoren

4.2.2 Gaschromatographie

Der Gaschromatograph (GC) ist ein Gerät, mit dem es möglich ist, Gemische aus Gasen oder Stoffen, die sich verdampfen lassen, in einzelne chemische Komponenten aufzutrennen. Zunächst wird das zu analysierende Gasgemisch verdampft und durch ein Trägergas (Helium oder Stickstoff) zu einer Trennsäule transportiert. An dieser wird das verdampfte Gasgemisch in seine einzelnen Bestandteile aufgespalten. Mit Hilfe eines Detektors können die einzelnen Stoffkomponenten in einem Gaschromatogramm dargestellt werden.⁴⁷

⁴⁷ Vgl. <http://www.chemieunterricht.de/dc2/chromato/gcprinzh.htm>

4.2.3 Thermogravimetrie

Bei der Thermogravimetrie oder thermogravimetrischen Analyse (TG) wird die Änderung der Masse eines Probestoffes in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht. Die Probe wird in einem Ofen bis zu einer Temperatur von 1600 °C erhitzt. Durch kontinuierliche Messung der Masse mittels einer Feinwaage kann die Masseänderung aufgezeichnet werden. Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung des Probestoffes können durch Massezunahme bzw. -abnahme bei einer bestimmten Temperatur gezogen werden.⁴⁸

48 Vgl. http://www.chemie.de/lexikon/Thermogravimetrische_Analyse.html

5. Untersuchung des Teilprozesses der Absorption von Kohlenstoffdioxid

5.1 Material und Methoden

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Absorption von Kohlenstoffdioxid ist ein Teilprozess des Verfahrens zur Zwischenspeicherung elektrischer Energie, wie sie im Punkt 4 beschrieben wurde. Der Versuch teilt sich in zwei Teilschritte: die Absorption von Kohlenstoffdioxid und die Analyse von Calciumcarbonat. Für die Absorption von Kohlenstoffdioxid wurden drei unterschiedliche Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemische gewählt. Die Konzentration an Kohlenstoffdioxid in den Gemischen betrug 3 Vol.-%, 5 Vol.-% bzw. 10 Vol.-%.

5.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Das genutzte Kohlenstoffdioxid lagert in einer Druckgasflasche und wird mit einem Druckminderer entnommen. Zur Herstellung bestimmter Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid (CO_2) in Luft kommen zwei Volumenstromregler (MFC) zum Einsatz. Die benötigte Luft wird in komprimierter Form durch die zur Verfügung stehende Druckgasleitung bereitgestellt. Mit Hilfe eines Flowcomputers (WMR) werden die zwei Volumenstromregler angesteuert. Das erzeugte Gasgemisch wird durch Schlauchverbindungen zum Doppelwandreaktor geleitet. Der Eintrag des Gasgemisches in die alkalische Lösung im Doppelwandreaktor erfolgt über ein Gaseinleitungsrohr mit eingeschmolzener Glasfritte. (Diese wurde zur Vergrößerung der Reaktionsoberfläche eingesetzt.) An dem Doppelwandreaktor ist ein Kryostat angeschlossen. Unter dem Doppelwandreaktor befindet sich ein Magnetrührer und in diesem der zugehörige Magnetrührer. Der aus dem Reaktor entweichende Abluftstrom wird durch ein Kapillarröhrchen zum, mit Hilfe eines Computers angesteuerten, Gaschromatographen (GC) geleitet. Zwischen dem Reaktor und dem Gaschromatographen befindet sich ein einstellbares Druckregelventil. Die Abgabe der überschüssigen Abluft erfolgt durch das offene Ende des Kapillarröhrchens in die Raumluft.

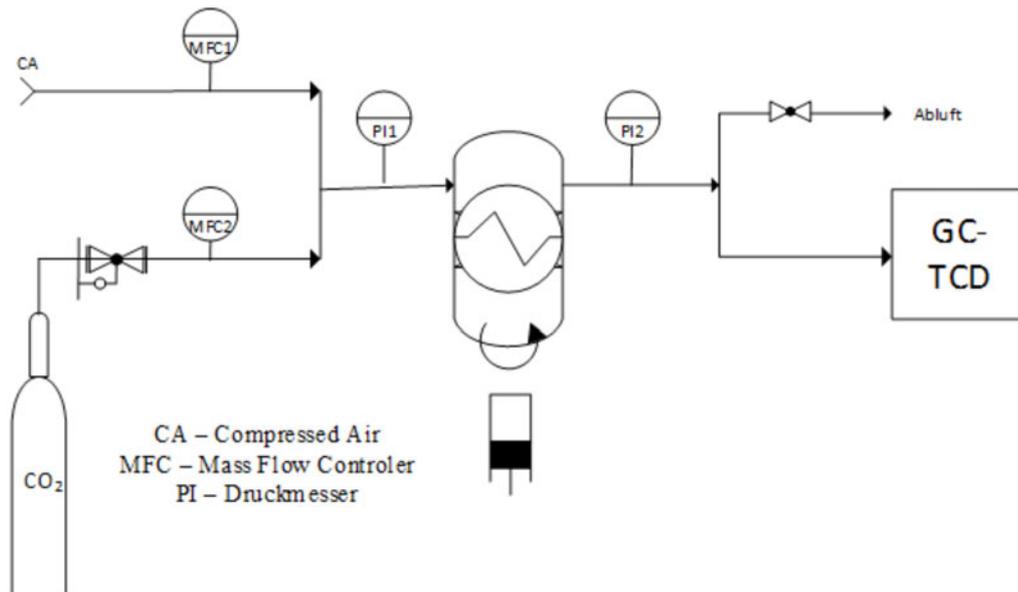


Abb. 7: Schematischer Versuchsaufbau

5.1.2 Herstellung von Calciumhydroxid

Als vorbereitende Tätigkeit für die Absorption von Kohlenstoffdioxid musste die Lauge Calciumhydroxid $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ hergestellt werden. Für die drei veranschlagten Versuche wurde die gleiche Konzentration von 10 g/l Calciumoxid $[\text{CaO}]$ in Wasser verwendet. Dazu wurde in einen Doppelwandreaktor zu einem Liter Wasser nach und nach zehn Gramm Calciumoxid (Abb. 8) gegeben. Um vergleichbare Messwerte bei den drei Versuchen zu erhalten, wurde die Temperatur der Lauge und somit des Doppelwandreaktors auf 15 °C gesenkt und über die Zeit der Versuche konstant gehalten. Es kam ein Kryostat der Firma *Julabo* mit der Modellbezeichnung *F25* zum Einsatz (Abb. 9).



Abb. 8: Feinwaage mit Calciumoxid



Abb. 9: Kryostat (Julabo F25)

Mit Hilfe des im Doppelwandreaktor eingesetzten Magnetrührers (Abb. 10) wurde während der Versuche eine homogene Konzentration des Calciumhydroxids im ganzen Volumen der Lösung sichergestellt. Zu dem temperierten Calciumhydroxid wurde als visuelle Veranschaulichung des pH-Wertes der Lösung während der Reaktion der pH-Wert-Indikator Bromthymolblau gegeben (Abb. 10). Der Einsatz eines präziseren pH-Messgerätes direkt im Doppelwandreaktor war an dieser Stelle aufgrund des Platzmangels im Reaktor nicht möglich.



Abb. 10: Doppelwandreaktor mit Magnetrührer und Indikator

5.1.3 Herstellung des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches

Durch Mischung von Kohlenstoffdioxid und Luft im richtigen Verhältnis ließ sich eine bestimmte Konzentration eines Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches herstellen. Das verwendete Kohlenstoffdioxid hatte eine Reinheit von $\leq 99,5\%$. Zur Dosierung der Gase im gewünschten Verhältnis kamen zwei MFC's mit der Bezeichnung *SLA 5800* der Marke *Brooks Instrument B. V.* zum Einsatz (Abb. 11). Einer bestimmte die Durchflussmenge von Luft und der andere die Durchflussmenge von Kohlenstoffdioxid. Die Volumenstromregler wurden mit Hilfe eines Flowcomputers der Marke *Westphal Mess- und Regeltechnik Vertriebs-GmbH*, dem Modell *WMR 4000* angesteuert (Abb. 12). Weiterhin erfolgte für den Versuch die Festlegung des Anlagendrucks der gesamten Apparatur auf 1,05 bar und des Volumenstroms der Gasmischung auf 5 l/h. Ein höherer Durchsatz an Gasvolumen war nicht wählbar, da sonst durch den Gasstrom Flüssigkeit in den Gaschromatographen gelangt wäre und diese dann das Analyseergebnis verfälschen würde. Die für die gewünschte Konzentrationen einzustellenden Volumenströme am Flowcomputer sind in der Tabelle 1 nachzulesen. Da der verwendete MFC auf Stickstoff geeicht war, mussten die einzustellenden Werte der Volumenströme unter Zuhilfenahme des Gasfaktors von 0,74 angepasst werden.

Volumenanteil CO₂	Volumenstrom Luft [l/h]	Volumenstrom CO₂ [l/h]	Einstellung MFC für CO₂ [l/h]
3 Vol.-%	4,85	0,15	0,2027
5 Vol.-%	4,75	0,25	0,3378
10 Vol.-%	4,5	0,5	0,6757

Tabelle 1: Einzustellende Volumenströme für den Flowcomputer



Abb. 11: Volumenstromregler (MFC)



Abb. 12: Flowcomputer (WMR 4000)

5.1.4 Aufnahme der Eichkurve

Sobald die in den vorangegangenen Punkten beschriebenen Vorbereitungen abgeschlossen waren, konnte die Aufnahme einer Eichkurve gestartet werden. Dies war notwendig um herauszufinden, ob der Detektor des Gaschromatographen in den gewählten Volumenkonzentrationen im linearen Bereich seiner Bestimmungsgrenze misst. Für diesen Zweck sind die Peakflächen für Kohlenstoffdioxid bei verschiedenen Volumenkonzentrationen, wie in Tabelle 2 aufgelistet, bestimmt worden. Aus den ermittelten Werten wurde eine Eichkurve erstellt (Abb. 13). So war es möglich festzustellen, ab welchem Zeitpunkt die Lauge kein Kohlenstoffdioxid mehr absorbierte und gesättigt war. Für die Eichmessungen wurde der Doppelwandreaktor gegen eine leere Gaswaschflasche ausgetauscht.

Volumen- anteil CO₂	Volumenstrom CO₂ [l/h]	Stoffmenge CO₂ [mol/h]	Masse CO₂ [g/h]	Peakfläche CO₂ [pA*s]
0 Vol.-%	0	0	0	2,4748
0,2 Vol.-%	0,01	0,00040	0,01765	8,8997
0,74 Vol.-%	0,037	0,00148	0,06532	44,6310
1,4 Vol.-%	0,07	0,00281	0,12357	88,1637
3 Vol.-%	0,15	0,00602	0,26479	155,1122
5 Vol.-%	0,25	0,01003	0,44132	290,0330
10 Vol.-%	0,5	0,02006	0,88264	563,8810
20 Vol.-%	1	0,04011	1,76528	1130,0897

Tabelle 2: Messwerte zur Aufnahme der Eichkurve in einem Bereich von 0 Vol.-% bis 20 Vol.-%

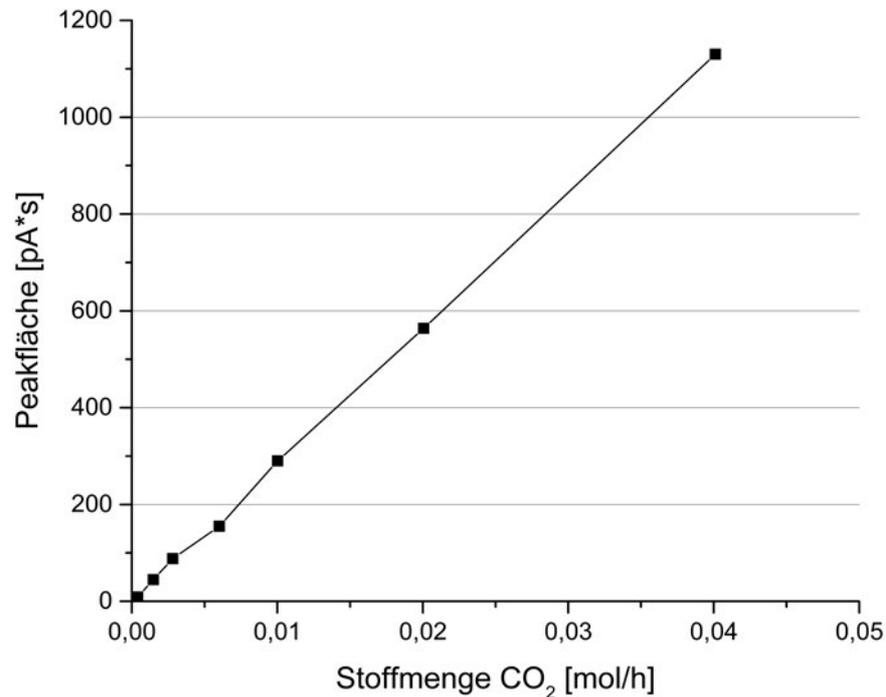


Abb. 13: Eichkurve von CO₂ in einem Bereich von 0 Vol.-% bis 20 Vol.-%

Unter Verwendung der Eichkurve konnte der Kohlenstoffdioxidgehalt der verwendeten Luft für die Herstellung der Gasmische auf 0,0831 mmol/h genau bestimmt werden, was einem Gehalt von 0,038 Vol.-% entspricht. Ausgehend davon ist es möglich, die Stoffmenge des Kohlenstoffdioxids, welche über den Zeitraum der Messungen von der Kalkmilch absorbiert wird, zu berechnen.

5.1.5 Absorption von Kohlenstoffdioxid

Alle bei den Versuchen eingesetzten Gasmischungen wurden nach der im Punkt 5.1.3 beschriebenen Vorgehensweise hergestellt. Die zuerst eingesetzte Kohlenstoffdioxid-Luft-Mischung enthielt 3 Vol.-% Kohlenstoffdioxid. Die Absorption des Kohlenstoffdioxids wurde mit einer gaschromatographischen Untersuchung nachverfolgt. Mit dem Beginn wurde auch die Einleitung des zu absorbierenden Gasmisches zur gaschromatographische Untersuchung der Abluft am Gaschromatographen gestartet (Abb. 14). Die Untersuchung erfolgte an einem GC 7890A System der Firma Agilent Technologies. Die Probe wurde in einer Gasschleife (250 µl) gesammelt und anschließend mit einem Gasventil in das Einlasssystem

gegeben. Als Einlasssystem diente ein *Split-Splitless-Inlet*. Für die Auftrennung der Komponenten wurde eine *HP-Plot/Q-Trennsäule* (30 m × 0,320 mm × 20 µm) verwendet. Weitere Einstellungen am Gaschromatographen sind in Tabelle 3 nachzulesen.

Parameter	Einstellung
Splitverhältnis	1:25; 110,73 ml/min
Temperatur Inlet	150 °C
Druck Inlet	15 psi
Ofenprogramm	1 min 60 °C 2,5 min 100 °C mit 40 °C/min
Messzeit	5,5 min
Säulendruck	15 psi
Trärgas	N ₂
Detektor	TCD 200 °C, N ₂ , 10 ml/min

Tabelle 3: Einstellungen am Gaschromatographen

Der Zeitrahmen der Absorption belief sich vom Zeitpunkt $t = 0$ mit dem Beginn der Einspeisung des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches in die Calciumcarbonat-Lösung bis zu dem Zeitpunkt, an dem kein Kohlenstoffdioxid mehr aus dem eingeleiteten Gasmisch absorbiert wurde. Dieser Fall trat ein, sobald der zuvor ermittelte Wert an Peakflächen erreicht wurde. Als zweiter Anhaltspunkt für das Ende des Versuchs diente der dem flüssigen Versuchsmedium zugegebene pH-Wert-Indikator, der bei einer neutralisierten Lösung seine blaue Färbung verliert (Abb. 10 und 15). Da bei den gewählten Versuchsbedingungen ein Versuch bis zu 12 Stunden in Anspruch nahm, wurde dieser Versuch über Nacht fortgeführt.

Unabhängig davon wurde in einem separaten Versuch der Wechsel aus Bildung und Verbrauch der Hydroxid-Ionen der hergestellten Lauge mit Hilfe einer Titration nachverfolgt. Dabei wurde 100 ml Lauge mit einer Konzentration von 10 g/l CaO in Wasser gegen 0,1 M Salzsäure titriert. Mit Hilfe einer Bürette wurde tropfenweise Salzsäure zugegeben. Dabei nahm, wie zuvor beschrieben, die Neutra-

lisationsreaktion der Calciumhydroxidlösung eine sehr lange Zeit in Anspruch. Als pH-Indikator wurde Bromthymolblau genutzt, um die Änderung vom basischen in den neutralen Bereich erkennbar zu machen. Parallel dazu wurde für präzisere pH-Wert-Bestimmungen ein *MP220 pH-Meter* der Firma *Mettler Toledo* verwendet. Als pH-Sonde diente eine *InLab@413-Elektrode*. Die pH-Elektrode wurde vor dem Gebrauch mit technischen Pufferlösungen der Firma *WTW* kalibriert.

Während des Versuchs waren die sichtbaren gelben Strudel, die bei jedem zugegebenen Tropfen verdünnter Salzsäure zu sehen waren, besonders markant. Nahe des neutralen Bereichs ist eine vorübergehende gelbliche Färbung erkennbar, welche jedoch nach einigen Sekunden wieder von einer Blaufärbung verdrängt wurde. Ein Umschlag über den Neutralpunkt hinaus, in einen leicht sauren Bereich, mit einer bleibenden Gelbfärbung war erst nach Zugabe von 220 ml 0,1 M Salzsäure zu erkennen. Daher bestätigte sich die Annahme, dass fortwährend ungelöste Calciumoxid-Moleküle mit dem Wasser zu Calciumhydroxid reagieren, dieses anschließend in Lösung geht und gleichzeitig den pH-Wert beeinflusst.



Abb. 14: Gaschromatograph (GC 7890A System)



Abb. 15: Doppelwandreaktor mit gesättigter Lösung

Die gewonnenen Messdaten der Absorption von Kohlenstoffdioxid wurden mit Hilfe des Programms *OriginPro 2016G* ausgewertet und in Form von Diagrammen dargestellt. Die Messwerttabellen befinden sich im Anhang 11.1.

Im folgenden Arbeitsschritt wurde die gesättigte Lösung mit Hilfe einer Filternutsche filtriert (Abb. 16). Der feuchte, weiße Calciumcarbonat-Filterkuchen wurde für 24 Stunden bei einer Temperatur von 90 °C in einem Trockenschrank getrocknet. Das Endprodukt lag als weißes Pulver vor (Abb. 17).

Die zuvor beschriebenen Arbeitsschritte, wie die Herstellung von Calciumhydroxid und die Herstellung des Gasgemisches, die Absorption von Kohlenstoffdioxid und das Abfiltrieren der gesättigten Lösung, wurden nach einer Reinigung der Geräte mit den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen von 5 Vol.-% und 10 Vol.-% in der Luft wiederholt.



Abb. 16: Filternutsche



Abb. 17: Hergestelltes Calciumcarbonat (CaCO_3)

5.1.6 Analyse von Calciumcarbonat

Das durch Filtration gewonnene und im Trockenschrank getrocknete Pulver wurde thermogravimetrisch auf seine Bestandteile hin untersucht. Diese TGA/DTA-Untersuchung erfolgte an dem Gerät *DTG-60 Simultaneous DTA-TG Apparatus* der Firma *Shimadzu* (Abb. 18). Als Referenzmaterial wurde $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ eingesetzt. In dem zweiten Tiegel wurde mit Hilfe eines Spatels eine kleine Menge des zu analysierenden Calciumcarbonats gegeben (Abb. 19). Die Messung erfolgte in synthetischer Luft mit einem Volumenstrom von 7,8 l/h. Das Calciumcarbonat wurde von 25 °C bis auf 1000 °C mit einer konstanten Heizrate von 10 °C/min erhitzt. Nach zwei Stunden ist dieser Versuch beendet. Im Anschluss wurden die Messwerte mit dem Programm *OriginPro 2016G* ausgewertet und in Form einer TGA/DTA-Kurve dargestellt. Alle aufgenommenen Messwerte sind im Anhang zu finden.

Die Analyse wurde ebenso mit den getrockneten Reaktionsprodukten der Versuche mit den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen von 5 Vol.-% und 10 Vol.-% in Luft durchgeführt. Um die Ergebnisse der drei thermogravimetrischen Analysen vergleichen zu können, wurde eine vierte Analyse mit käuflich erworbenem Calciumcarbonat durchgeführt.

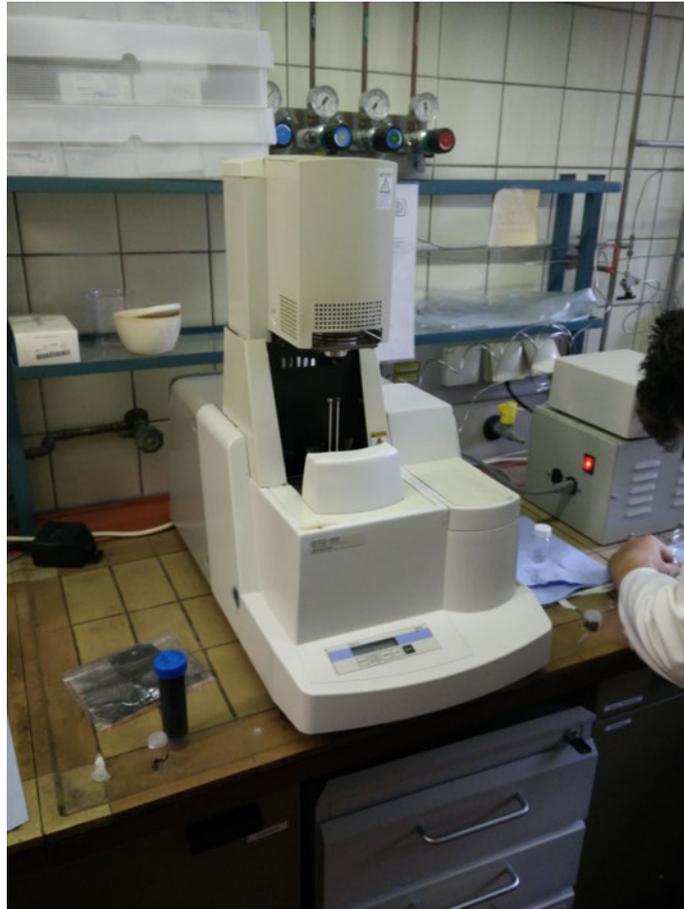


Abb. 18: Shimadzu DTG-60

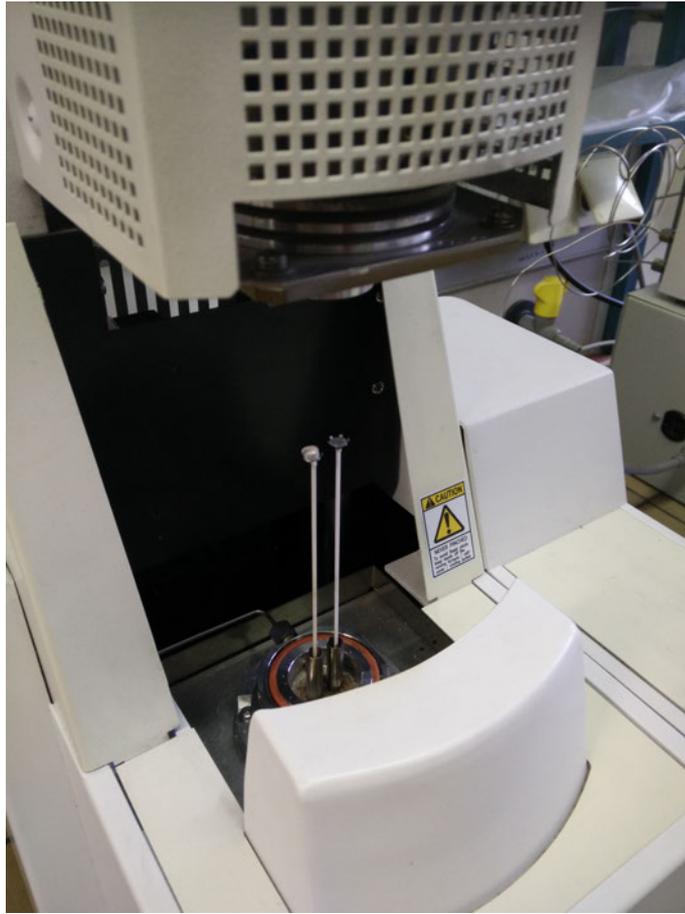


Abb. 19: Shimadzu DTG-60 – Heizkammer mit zwei Tiegeln

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Zur Auswertung der Versuche wurden fünf Diagramme erstellt. In einem Diagramm sind die Ergebnisse der Absorptionsversuche von Kohlenstoffdioxid in den drei festgelegten Volumenkonzentrationen von Kohlenstoffdioxid in der Luft dargestellt. Vier weitere zeigen die thermogravimetrischen Analyseergebnisse der drei synthetisierten und des käuflich erworbenen Calciumcarbonats. Diese werden nachfolgend weiter kommentiert.

5.2.1 Absorption von Kohlenstoffdioxid

In der folgenden Abbildung 20 ist der untersuchte Absorptionsprozess der drei Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemische in den drei verschiedenen Volumen-Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid dargestellt. Dabei ist die Kohlenstoffdioxidkonzentration auf der y-Achse im Verhältnis zur vergangenen Zeit auf der x-Achse aufgetragen. Der schwarze Graph zeigt den ersten Versuch mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von 3 Vol.-%, der rote den Versuch mit 5 Vol.-% und der blaue Graph den Versuch mit 10 Vol.-%.

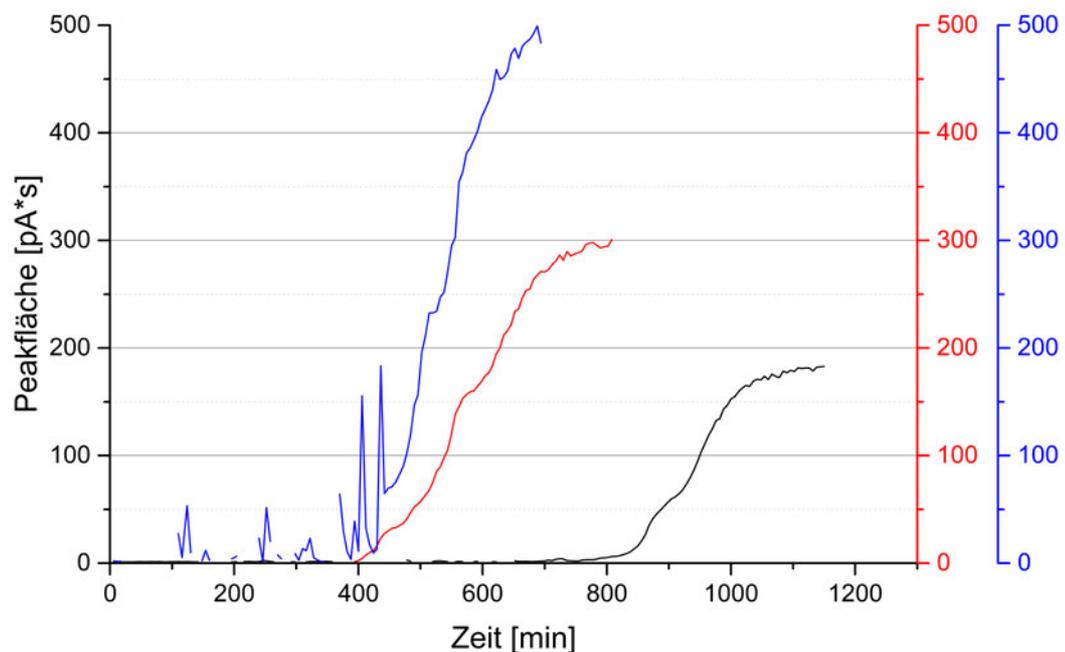


Abb. 20: Absorption von Kohlenstoffdioxid mit den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen 3 Vol.-%, 5 Vol.-% und 10 Vol.-% in der Luft

Beim Vergleich der gewonnenen Graphen konnte bestätigt werden, dass eine höhere Kohlenstoffdioxidkonzentration die Absorptionsreaktion von Kohlenstoffdioxid begünstigt, da so die Lauge in einem kürzeren Zeitraum umgesetzt wurde (Abb. 20). Es ist festzustellen, dass die Zeit bis zum Ende der Versuche nicht linear mit der Erhöhung der Kohlenstoffdioxidkonzentration abnimmt. Diese Aussage bezieht sich auf die untersuchten Konzentrationsbereiche an Kohlenstoffdi-

oxid von 3 Vol.-% bis 10 Vol.-%. So wurde die benötigte Zeit zur Sättigung der Lauge bei den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen 3 Vol.-% und 10 Vol.-% in der Luft nahezu halbiert. Im Allgemeinen ist jedoch zu sagen, je höher die Kohlenstoffdioxidkonzentration im Gasgemisch ist, desto schneller wird die Lauge gesättigt, da so mehr Kohlenstoffdioxid in einer kürzeren Zeitspanne gebunden werden kann.

Im Folgenden wird eine genauere Betrachtung der einzelnen Graphen durchgeführt. Im Graphen des Versuchs mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von 5 Vol.-% liegt die Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Abluft bis ungefähr zur Minute 400 unter dem Messbereich des Gaschromatographen. Dies zeigt, dass bis zu diesem Zeitpunkt das bis dahin eingeleitete Kohlenstoffdioxid zu 100 % absorbiert wird. Im Vergleich zu dieser vollkommenen Absorption sind die Lücken in der Struktur des Graphen mit der Kohlenstoffdioxidkonzentration von 3 Vol.-% Kohlenstoffdioxid und die teilweise großen Peaks in dem Graphen mit 10 Vol.-% auffällig. Dieses Phänomen ist durch die zeitverzögerte Auflösung des Calciumoxids zu erklären. Aufgrund der Geschwindigkeit des verzögerten Auflösens des Calciumoxids fallen die Auswirkungen im Versuch mit 3 Vol.-% vergleichsweise moderat zu denen im Versuch mit 10 Vol.-% aus.

Es zeigt sich, dass nach Auswertung der Versuche die formulierte Zielstellung erfüllen werden konnte. Mit den Untersuchungsergebnissen wurden bereits bekannte chemische und physikalische Erkenntnisse der Bildung von Calciumcarbonat im Hinblick auf die Kohlenstoffdioxidabsorption bestätigt. Zum Beispiel wird im Verlauf der Absorptionsreaktion die Lauge neutralisiert, dabei entstehen Wasser und das gewünschte Calciumcarbonat.

Prinzipiell sind in allen Teilschritten der Versuche unter anderem nachgenannte Fehler möglich:

- nicht konstante Temperatur der Ausgangsgase,
- ungleiche Konzentration der Lauge im Reaktor,
- nicht genau kalibrierte Messgeräte (Gaschromatograph, Feinwaage) und
- keine konstanten Raumbedingungen (Luftdruck, Temperatur, Feuchte).

Einige der eben genannten Fehler könnten durch erneutes Durchführen der gleichen Versuche reduziert und teilweise vermieden werden (Validierung der Ergebnisse). Um eine präzisere Aussage über die effektivste Kohlenstoffdioxidkonzentration für die Absorptionsreaktion treffen zu können, müsste der Versuch mit anderen Verhältnissen des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches wiederholt werden. Die Nennung der aufgezeigten Fehler bedeutet jedoch nicht, dass die Fehler bei der Versuchsdurchführung aufgetreten sind und die Ergebnisse in Frage gestellt werden müssen.

5.2.2 Analyse von Calciumcarbonat

In den folgenden vier Abbildungen 21 bis 24 sind die DTA-TG Kurven der thermogravimetrischen Analyse von Calciumcarbonat zu sehen. Diese stellen jeweils den Zusammenhang zwischen dem Gewicht des Calciumcarbonats und der Temperatur dar. Weiterhin ist mit Hilfe der DTA-Kurve eine Aussage über endotherme oder exotherme Prozesse möglich.

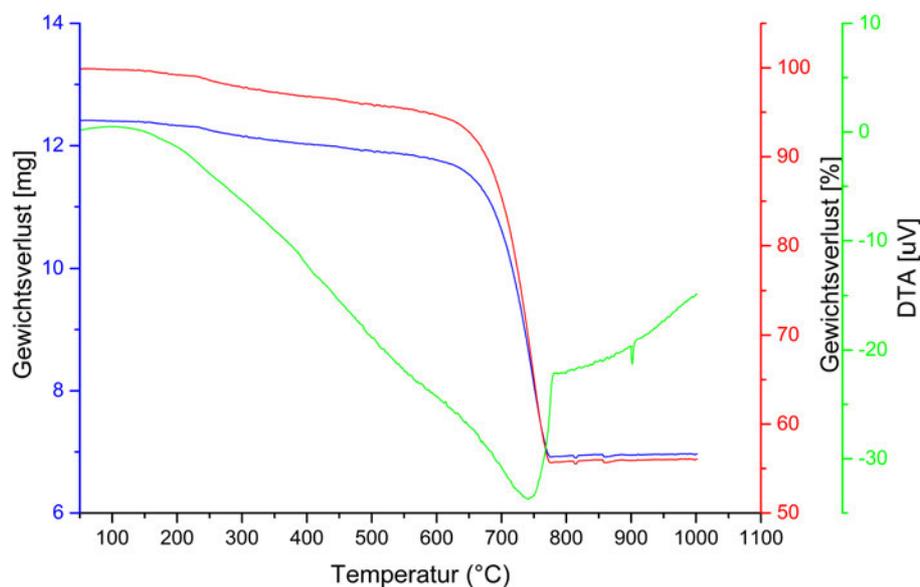


Abb. 21: Analyse von Calciumcarbonat des Versuchs mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von 3 Vol.-%

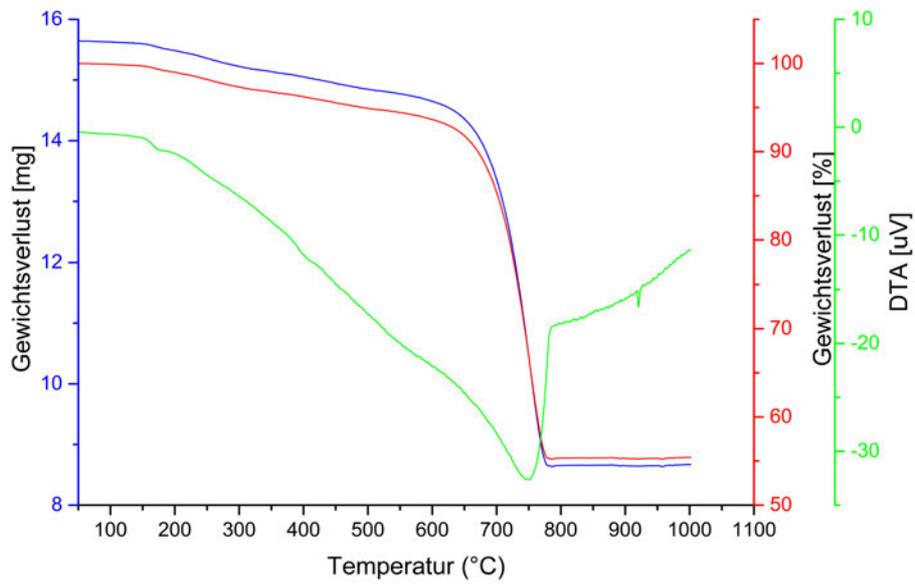


Abb. 22: Analyse von Calciumcarbonat des Versuchs mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von 5 Vol.-%

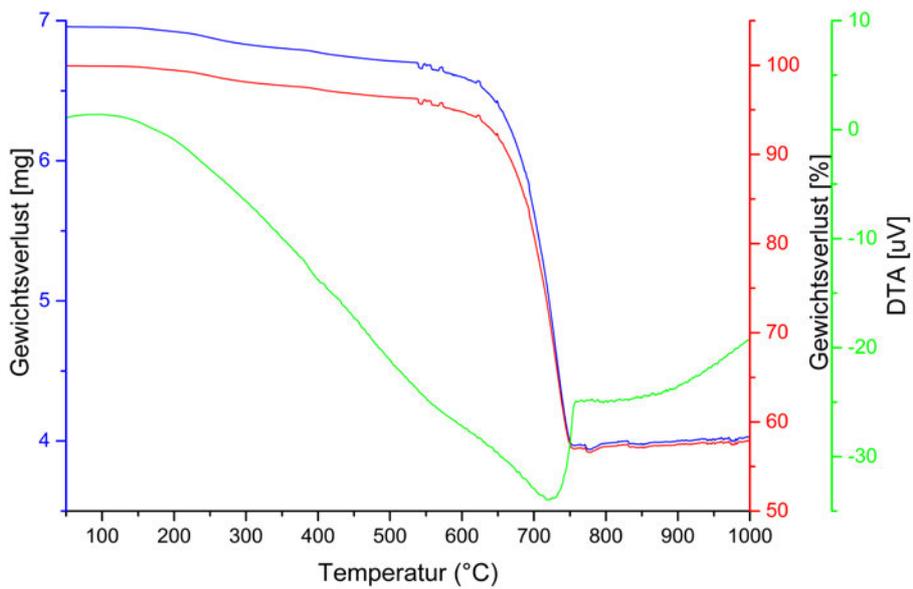


Abb. 23: Analyse von Calciumcarbonat des Versuchs mit einer Kohlenstoffdioxidkonzentration von 10 Vol.-%

Die Untersuchung des Calciumcarbonats, welches aus den Absorptionsversuchen mit den Kohlenstoffdioxidkonzentrationen 3 Vol.-%, 5 Vol.-% und 10 Vol.-% aus der Luft gewonnen wurde, ergab, dass die Graphen der thermogravimetrischen Analyse einen nahezu identischen Verlauf aufzeigen (Abb. 21 bis 23). Dabei wird einem Bereich von 650 °C bis 800 °C ein starker Gewichtsverlust von ca. 40 % in Form eines endothermen Prozesses registriert. In diesem Temperaturbereich erfolgte die Zersetzung von Calciumcarbonat zu Calciumoxid und Kohlenstoffdioxid.

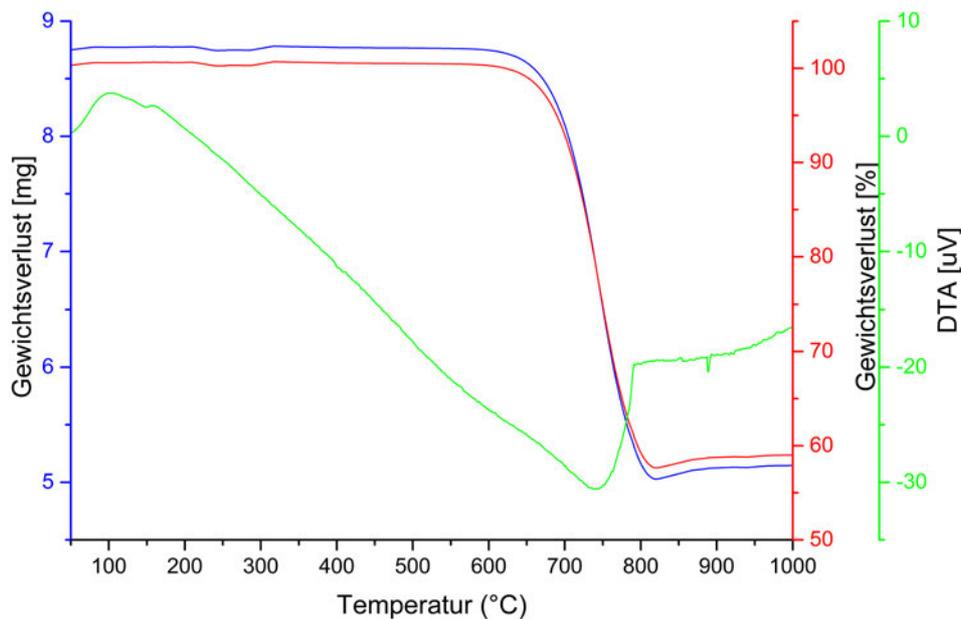


Abb. 24: Analyse von käuflich erworbenem Calciumcarbonat

Beim Vergleich der Analysen mit der von käuflich erworbenem Calciumcarbonat lässt sich als Erstes die Zersetzung von Calciumcarbonat im Bereich 650 °C bis 800 °C bestätigen (Abb. 24). Weiterhin ist im Vergleich auffällig, dass im Bereich von 200 °C bis 650 °C ein Gewichtsverlust zu verzeichnen ist. Eine Erklärung dafür könnte die Bildung von Calciumhydrogencarbonat sein, das in diesem Temperaturbereich zersetzt wird. Außerdem wäre es möglich, dass sich Kristallwasser, welches beim Trocknen des Calciumcarbonats nicht verdampft, nun ablöst.

Diese oben genannten Abweichungen beim Vergleich mit käuflich erworbenem Calciumcarbonat weisen eventuell auf kleine Fehler im Versuchsaufbau hin oder können auch mit den gewählten Versuchsbedingungen einhergehen. Durch erneutes Durchführen unter abgeänderten Reaktionsbedingungen könnten diese geringfügigen Unterschiede vermindert werden. Diese Unterschiede könnten aber auch bei der Filtration des Reaktionsprodukts aus dem Doppelwandreaktor entstanden sein, da diese mit Hilfe der Nutsche sehr lange dauerte und so Verunreinigungen in den Calciumcarbonat-Filterkuchen hätten gelangen können. Trotzdem bestätigen die durchgeführten Analysen von Calciumcarbonat erneut, dass Kohlenstoffdioxid erfolgreich in Form von Calciumcarbonat absorbiert wurde.

6. Ausblick

Die Untersuchung der Absorptionsreaktion ist mit dem Verändern des Faktors der Konzentration des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches noch nicht abgeschlossen. Die Faktoren Druck, Temperatur, Volumenstrom und die Änderung der verwendeten Lauge werden weitere wichtige Erkenntnisse liefern. Als Alternative zu Calciumhydroxid würde sich Kupferhydroxid anbieten. Inwiefern dies eine Wirkung auf Teilprozesse des Verfahrens hervorruft, bedarf einer weiteren theoretischen und praktischen Aufarbeitung, welche bei vorhandener Zeit einen nächsten Schritt zum Vorantreiben des Prozesses darstellen würde.

Außerdem hat der technische Fortschritt im Bereich der Wasserelektrolyse und der Sabatier-Reaktion einen großen Einfluss darauf, wie schnell die von uns angestrebte Kreislaufführung der Energiezwischenlagerung vom Labormaßstab über einen Technikumsmaßstab in ein großtechnisch anzuwendenden Prozess umzusetzen werden kann. Jedoch soll die Idee einer tatsächlichen Realisierung nicht verworfen werden. Aus den Untersuchungen der Absorptionsreaktion und der theoretischen Aufarbeitung aller Teilreaktionen haben sich nützliche Erkenntnisse für eine mögliche Umsetzung des Prozesses gewinnen lassen.

Eine wesentliche Hürde stellt jedoch die Separierung des Calciumcarbonats dar. Dieses muss irgendwann aus der Lösung entfernt werden, um die weitere Funktionalität garantieren zu können. Eine Filtration könnte zu viel Zeit in Anspruch nehmen und den Kreislauf entschleunigen. Zur Lösung dieses Problems müssten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

7. Nachwort

Nach mittlerweile zwei langen Jahren, die schnell vergingen, haben wir das von uns ausgewählte Projekt fertiggestellt. In diesen zwei Jahren war es uns möglich, neue Erkenntnisse im Bereich der Erarbeitung einer wissenschaftlichen Arbeit zu sammeln und im Rahmen dieser auch neues Wissen auf vielen Gebieten, sowohl der technischen Chemie, der Physik als auch der Geografie zu erlangen. Weiterhin war es uns möglich, viele Erfahrungen zu machen, die auch über die Seminarfacharbeit hinaus sehr wertvoll sind und die für eine spätere Berufslaufbahn wichtig werden könnten. Ein Beispiel hierfür stellt die wiederholte Präsentation unseres Projektes im Rahmen des Wettbewerbs »Jugend forscht« und auf anderen Veranstaltungen, unter anderem der »Langen Nacht der Technik« der Technischen Universität in Ilmenau, dar. Außerdem wurde uns durch die erfolgreiche Teilnahme am Wettbewerb »Jugend forscht« eine Vorstellung unserer Ergebnisse im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit in Berlin ermöglicht. Nach der oben genannten Präsentation in Berlin hat Tankred Schipanski, Bundestagsabgeordneter des Wahlkreises Gotha – Ilm-Kreis, eine Gesprächsrunde mit unserer Gruppe an unserer Schule arrangiert.

Abschließend lässt sich sagen, dass die anfangs gestellten Ziel erreicht werden konnten. Als Erstes untersuchten wir erfolgreich, wie schnell eine bestimmte Menge Kohlenstoffdioxid aus unterschiedlichen Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemischen in dem Zeitraum bis zur Sättigung der Lauge absorbiert wird. Des Weiteren konnten wir feststellen, bei welcher Konzentration des Kohlenstoffdioxid-Luft-Gemisches die Absorptionsreaktion am effektivsten abläuft. Außerdem konnten wir ein Verfahren zur Energiezwischenspeicherung theoretisch beleuchten und mit ein wenig Glück einen kleinen Beitrag für die Zukunft der Menschheit leisten.

Wir erhoffen uns, dass wir mit dieser Arbeit einige Leser und angehende Naturwissenschaftler anregen konnten, sich für den Klimaschutz zu interessieren, um eventuell auch Eigeninitiative zu ergreifen und sich ebenfalls der Forschung in dieser Richtung zu widmen. Klimaschutz funktioniert nicht ohne Veränderungen. Diese beginnen mit der Einstellung gegenüber der Verantwortung, die wir als Menschheit für unsere Nachfahren haben. Die Erde kann ohne den Menschen existieren, aber die Menschen nicht ohne die Erde.

Klimaschutz funktioniert nicht ohne Veränderungen in der menschlichen Denkweise und nicht ohne Veränderungen des menschlichen Handelns. Diese Erkenntnis spiegelt sich immer mehr in aktuell-politischen Inhalten wieder.

»Ein Weiter-So gibt es nicht. Der Klimaschutz ist die größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts.«

– Angela Merkel, Bundeskanzlerin, 2007

Schon der Dichter William Shakespeare erkannte vor 400 Jahren, dass der Mensch sein Schicksal selbst in die Hand nehmen muss.

»It is not in the stars to hold our destiny but in ourselves.«

– William Shakespeare

Allein das Sparen warmen Wassers und das effizientere Nutzen von elektrischer Energie dient dem Schutz der Umwelt und aller Ressourcen. Diese Art von Veränderungen dienen neben dem Klimaschutz auch als Vorbild für alle Menschen und der Verbreitung eben dieser Idee. Sei es in Politik, Medien, Wissenschaft oder im eigenen Haushalt.

8. Danksagung

An dieser Stelle möchten wir allen Personen und Firmen danken, die uns bei der Erstellung unserer Seminarfacharbeit unterstützt haben. Zu besonderem Dank sind wir Herrn Dr. Steffen Möller, Chemielehrer am von-Bülow-Gymnasium Neudietendorf, verpflichtet, der uns geholfen hat, unsere grundlegende Idee weiter zu entwickeln.

Ganz besonders gilt unser Dank Herrn Dr. Peter Scholz und Herrn Dipl.-Chem. Johannes Buchheim, die diese Arbeit als Fachbetreuer begleitet haben und uns am Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena bei der praktischen Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen. Sie haben uns dazu gebracht, über unsere Grenzen hinaus zu denken. Vielen Dank für die Geduld und Mühen.

Ein weiteres Dankeschön gebührt Herrn Dr. Dietrich Feist, der uns zur Einführung in das Thema der Treibhausgasemission und der Atmosphärenforschung Einblick in das Schaffen des Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena ermöglichte.

Weiterhin möchten wir unseren Eltern für die vielen Stunden des Korrekturlesens und für den Transport zu den Konsultationsterminen nach Jena einen besonderen Dank aussprechen.

Herr Dr. rer. nat. Peter Frank Scholz

Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Art der Unterstützung: Beratung bei der Konkretisierung des Themas und Bereitstellung der Laborausstattung.

Herr Dipl.-Chem. Johannes Buchheim

Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Art der Unterstützung: Beratung bei der Konkretisierung des Themas und Versuchsbetreuer während der praktischen Tätigkeit im Labor.

Herr Dr. rer. nat. Steffen Möller

von-Bülow-Gymnasium Neudietendorf

Art der Unterstützung: Unterstützung bei Themenwahl.

Herr Dr. Dietrich Feist

Max-Planck-Institut für Biogeochemie Jena

Art der Unterstützung: Einblick in das Thema gewinnen und Unterstützung bei der Themenwahl.

Frau Hannah Theis

ADDITIVE Soft- und Hardware für Technik und Wissenschaft GmbH

Art der Unterstützung: Bereitstellung des Programms *OriginPro 2016G* zur Auswertung der Messergebnisse.

9. Chemisches Stoffverzeichnis⁴⁹

Kohlenstoffdioxid

Summenformel:



Strukturformel:

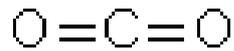


Abb. 25: Strukturformel Kohlenstoffdioxid

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	gasförmig
Farbe:	farblos
Geruch:	geruchlos
Molare Masse:	44,01 g/mol
Dichte:	1,978 kg/m ³ (0 °C, 1013 mbar)
Schmelzpunkt:	kein Schmelzpunkt bei Normaldruck
Siedepunkt:	kein Siedepunkt bei Normaldruck
Wasserlöslichkeit:	löslich 3,3 g/l (0 °C, 1013 mbar)

⁴⁹ [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestisdeu:sdbdeu\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu$3.0)

Wasserstoff

Summenformel:



Strukturformel:



Abb. 26: Strukturformel Wasserstoff

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	gasförmig
Farbe:	farblos
Geruch:	geruchlos
Molare Masse:	2,02 g/mol
Dichte:	0,0899 kg/m ³ (0 °C, 1013 mbar)
Schmelzpunkt:	-259 °C
Siedepunkt:	-252,76 °C
Wasserlöslichkeit:	schlecht löslich 81,6 mg/l (20 °C, 1013 mbar)

Methan

Summenformel:



Strukturformel:

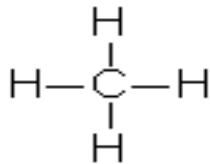


Abb. 27: Strukturformel Methan

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	gasförmig
Farbe:	farblos
Geruch:	geruchlos
Molare Masse:	16,04 g/mol
Dichte:	0,718 kg/m ³ (0 °C, 1013 mbar)
Schmelzpunkt:	-182,47 °C
Siedepunkt:	-161,5 °C
Wasserlöslichkeit:	schlecht löslich 26 ml/l (20 °C, 1013 mbar)

Calciumcarbonat

Summenformel:



Strukturformel:

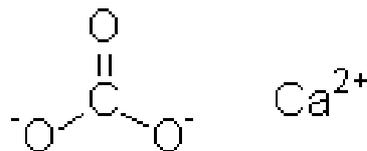


Abb. 28: Strukturformel Calciumcarbonat

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	fest
Farbe:	weiß, Kristalle oder Pulver
Geruch:	geruchlos
Molare Masse:	100,09 g/mol
Dichte:	2,73 g/cm ³ (Calcit, 20 °C, 1013 mbar)
Schmelzpunkt:	zersetzt sich beim Erhitzen
Siedepunkt:	kein Siedepunkt
Wasserlöslichkeit:	14 mg/l (20 °C, 1013 mbar)
pH-Wert:	9,5-10,5 (20 °C, 100 g/l)

Calciumoxid

Summenformel:



Strukturformel:

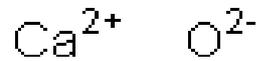


Abb. 29: Strukturformel Calciumoxid

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	fest
Farbe:	weiß, Pulver
Geruch:	geruchlos
Molare Masse:	56,08 g/mol
Dichte:	3,37 g/cm ³ (20 °C, 1013 mbar)
Schmelzpunkt:	2580 °C
Siedepunkt:	2850 °C (100 hPa)
Wasserlöslichkeit:	1,65 g/l (20 °C, 1013 mbar)
pH-Wert:	12,6 (20 °C, gesättigte Lösung)

Calciumhydroxidlösung (20 %)⁵⁰

Zusammensetzung:

20 % Calciumhydroxid

80 % Wasser

Summenformel:



Strukturformel:

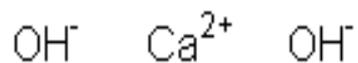


Abb. 30: Strukturformel Calciumhydroxid

⁵⁰ Vgl.

<http://www.moellerchemie.com/fileadmin/moellerchemie/Medienpool/Sicherheitsdatenblatt/Kalkmilch%2020.pdf>

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	flüssig
Farbe:	weiß
Geruch:	charakteristisch
Molare Masse:	74,09 g/mol (Feststoff)
Dichte:	1,11 g/cm ³ (20 °C, 1013 mbar)
Wasserlöslichkeit:	1,7 g/l (20 °C, 1013 mbar)
pH-Wert:	12,6 (20 °C)

Bromthymolblau⁵¹

Summenformel:



Strukturformel:

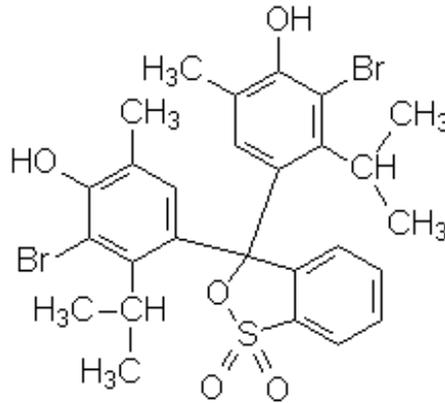


Abb. 31: Strukturformel Bromthymolblau

Eigenschaften:

Aggregatzustand:	fest
Farbe:	violett
Geruch:	schwach essigsäureartiger Geruch
Molare Masse:	1,25 g/cm ³
Dichte:	nicht bestimmt
Schmelzpunkt:	zersetzt sich beim Erhitzen
Siedepunkt:	kein Siedepunkt
Wasserlöslichkeit:	1,7 g/l (20 °C, 1013 mbar)

51 Vgl. https://www.carlroth.com/downloads/sdb/de/T/SDB_T117_DE_DE.pdf

10. Quellenverzeichnis

10.1 Literaturquellen

Geisler, Jonas: Sabatier-Reaktion, Die katalytische Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Methan als Möglichkeit der chemischen Energiespeicherung, Bachelorarbeit, Institut für Technische Chemie und Umweltchemie der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2014

10.2 Internetquellen

<http://www.kfz-tech.de/Biblio/Verbrennung/VerbrennungsmotorG01.htm>

[10.08.2016] Huppertz, H.

https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/weltgipfel_rio_de_janeiro_1992_539.htm

[10.08.2016]

<https://www.youtube.com/watch?v=5ijfVTLZFVE>

[27.07.2016] Müller, Miriam

<https://klima-kollekte.de/de/info/natuerlicher-und-anthropogener-treibhauseffekt>

[27.07.2016]

http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/6_abb_an-teile-thg-emi_2016-01-20_1.png

[27.07.2016]

<http://www.transatlantikblog.de/2008/08/10/charles-keening-co2-kurve/>

[27.07.2016]

<http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>

[27.07.2016]

<http://strom-report.de/strom-vergleich/>

[27.07.2016]

<http://www.co2-emissionen->

[vergleichen.de/Klimabilanz/Laendervergleich/Deutschland/Industrie/Deutschland-CO2-Industrie.html](http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Klimabilanz/Laendervergleich/Deutschland/Industrie/Deutschland-CO2-Industrie.html)

[27.07.2016]

<https://www.stromauskunft.de/die-klimaschuetzer/co2-emissionen/>

[27.07.2016]

<https://www.abenteuer-regenwald.de/wissen/pflanzen>

[27.07.2016] Glassner, Isabel

<http://www.business-biodiversity.eu/default.asp?Menu=155&News=295>

[27.07.2016] Pernsteiner, Johannes

<http://www.wiwo.de/technologie/green/living/umwelt-co2-der-klimakiller-aus-dem-moor/13547866.html>

[27.07.2016] Zaremba, Nora Marie

<https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-der-co2-anstieg-ist-nicht-ursache-sondern-folge-des-klimawandels>

[27.07.2016] Cook, John

<https://www.klimafakten.de/behauptungen/behauptung-vulkane-emittieren-mehr-kohlendioxid-als-die-menschen>

[28.08.2016]

<http://wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/Vulkanismus>

[28.08.2016]

<http://www.informationisbeautiful.net/2010/planes-or-volcano/>

[28.08.2016] McCandless, David; Bartels, Ben

https://www.nachhaltigkeit.info/artikel/kyoto_protokoll_1108.htm
[27.07.2016]

<https://www.youtube.com/watch?v=7EiJo0lvvGw>
[27.07.2016]

<http://klimawandel-bekaempfen.dgvn.de/un-klimaschutz/der-kyoto-prozess/>
[27.07.2016]

[https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?
cms_docId=72462](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html?cms_docId=72462)
[27.07.2016]

[https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html;jsessio-
nid=A6190E9C940A732036F89AFA67F02950?cms_docId=71110](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html;jsessionid=A6190E9C940A732036F89AFA67F02950?cms_docId=71110)
[27.07.2016]

[http://www.co2online.de/klima-schuetzen/energiewende/energiewende-definition-
ziele-uebersicht/](http://www.co2online.de/klima-schuetzen/energiewende/energiewende-definition-ziele-uebersicht/)
[27.07.2016] Adolph, Karin

<https://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>
[10.08.2016]

<http://energiespeicher.blogspot.de/2011/08/pumpspeicherkraftwerke.html>
[10.08.2016] Heindl, Eduard

<http://www.stromgewinnung.com/pumpspeicherkraftwerk.shtml>
[10.08.2016]

[http://www-docs.tu-
cottbus.de/cebra/public/DownloadDokumente/Innovationstag/2007/16_Hueb-
ner.pdf](http://www-docs.tu-cottbus.de/cebra/public/DownloadDokumente/Innovationstag/2007/16_Huebner.pdf)
[10.08.2016] Hübner, Sabine

<https://www.youtube.com/watch?v=qI4H1jDDiSg>

[10.08.2016]

[http://www.fze.uni-](http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03a_Cro-togino_CAES-Windausgleich_VDI.pdf)

[saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03a_Cro-togino_CAES-Windausgleich_VDI.pdf](http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03a_Cro-togino_CAES-Windausgleich_VDI.pdf)

[10.08.2016]

<https://de.wikipedia.org/wiki/Wasserelektrolyse>

[10.08.2016]

<http://www.chemie.de/lexikon/Brennstoffzelle.html>

[10.08.2016]

<https://www.zukunft-erdgas.info/markt/erneuerbares-erdgas/power-to-gas>

[2.09.2016] Azuma-Dicke, Norbert

<http://www.all-electronics.de/superkondensatoren-als-abnutzungsfreie-energiespeicher-statt-akkumulatoren/>

[2.09.2016] Roth, Wolf-Dieter

<http://anorganik.chemie.vias.org/calciumcarbonat.html>

[19.07.2016] Lohniger, Hans

<http://www.chemieunterricht.de/dc2/echemie/h2o-elek.htm>

[21.08.2016] Wiechoczek, Dagmar

<http://www.chemieunterricht.de/dc2/wasser/w-eigendiss.htm>

[04.08.2016] Wiechoczek, Dagmar

<http://www.chemie.de/lexikon/Sabatier-Prozess.html>

[01.08.2016]

<http://www.chemieunterricht.de/dc2/chromato/gcprinzh.htm>

[22.07.2016] Wiechoczek, Dagmar

http://www.chemie.de/lexikon/Thermogravimetrische_Analyse.html

[23.07.2016]

[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu$3.0)

[f=templates\\$fn=default.htm\\$vid=gestisdeu:sdbdeu\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates$fn=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu$3.0)

[13.08.2016]

[http://www.moellerchemie.com/fileadmin/moellerchemie/Medienpool/Sicherheits-](http://www.moellerchemie.com/fileadmin/moellerchemie/Medienpool/Sicherheitsdatenblatt/Kalkmilch%2020.pdf)
[datenblatt/Kalkmilch%2020.pdf](http://www.moellerchemie.com/fileadmin/moellerchemie/Medienpool/Sicherheitsdatenblatt/Kalkmilch%2020.pdf)

[13.08.2016]

https://www.carlroth.com/downloads/sdb/de/T/SDB_T117_DE_DE.pdf

[13.08.2016]

10.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. Deckblatt:

http://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/earth_and_limb_m1199291564l_color_2stretch_mask_0.jpg

[17.09.2016]

Abb. 1:

http://scilogs.spektrum.de/wblogs/gallery/16/world_climate_widget_kor_rekt.png

[07.09.2016]

Abb. 2:

<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/>

[07.09.2016]

Abb. 3:

<http://www.tec-institut.de/images/tec/Speicherakkus/Abbildung%2019.jpg>

[17.09.2016]

Abb. 4:

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/Brennstoffzelle_funktionsprinzip.png

[17.09.2016]

Abb. 5:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/49/Electrolysis.svg/2000px-Electrolysis.svg.png>

[17.09.2016]

Abb. 6:

<http://www.chemieunterricht.de/dc2/indikator/images/iimg0201.gif>

[22.07.2016]

Abb. 7: Dipl.-Chem. Johannes Buchheim, [13.07.2015]

11. Anhang

11.1 Rohdaten (digitalisiert)

Die Rohdaten der Absorptionsversuche sowie der thermogravimetrischen Analyse liegen der Arbeit digitalisiert auf einer CD bei.

11.2 Auszeichnungen

Wettbewerb »Jugend forscht« 2015

Thema: »100 % CO₂ -frei«

Urkunde:

Regionalsieg beim Regionalwettbewerb Westthüringen

Sonderpreise:

»Sonderpreis Umwelttechnik« beim Regionalwettbewerb Westthüringen

– Deutsche Bundesstiftung Umwelt

»Sonderpreis Klimaschutz« beim Landeswettbewerb Thüringen

– Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit

Wettbewerb »Jugend forscht« 2016

Thema: »CO₂ Abfall des Fortschritts?! Oder Schlüssel zu neuer Technik?«

Urkunde:

Regionalsieg beim Regionalwettbewerb Westthüringen

Sonderpreis:

»Sonderpreis Erneuerbare Energien« beim Landeswettbewerb Thüringen

– Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Wettbewerb »Die blaue Libelle« 2016

Thema: »CO₂ Abfall des Fortschritts?! Oder Schlüssel zu neuer Technik?«

»Thüringer Klimaschutzpreis« 2016

– Klimaschutzstiftung Jena-Thüringen und Ostthüringer Zeitung

12. Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, vor allem die Gliederungspunkte 4.1 und 6 selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die vorliegenden Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Jonas-Leon Rolle, 28.09.2016

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, vor allem die Gliederungspunkte 4.2 und 5 selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die vorliegenden Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Thomas May, 28.09.2016

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, vor allem die Gliederungspunkte 2 und 3 selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe und keine anderen als die vorliegenden Hilfsmittel verwendet habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Maximilian-Timotheus Ullrich, 28.09.2016