



Michael Wieczorek (Autor)

Errichtung, Betrieb und Erweiterung einer 1 MW-Versuchsanlage zur Erforschung des Carbonate Looping-Verfahrens zur Abtrennung von CO₂ aus Rauchgasen



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6752>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1. Einleitung

Mit dem Beginn der Industrialisierung und der damit einhergehenden Nutzung fossiler Brennstoffe hat sich der Kohlenstoffdioxidanteil in der Atmosphäre stetig erhöht [4]. Verschiedene Studien zeigen einen deutlichen Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration in der Luft. Zu nennen ist hier insbesondere die Arbeit von C.D. KEELING, der die CO₂-Konzentration am Mauna Loa auf Hawaii, also fernab großer CO₂-Emittenten, seit 1958 kontinuierlich gemessen hat [5]. Durch diese Messungen lässt sich ein Anstieg der CO₂-Konzentration von 315 ppmv seit Beginn dieser Messreihe auf ca. 397 ppmv am Ende des Jahres 2013 [6] nachweisen. **Abbildung 1-1** stellt die gemessenen Daten der CO₂-Konzentration an dieser Station dar, wobei zu beachten ist, dass es sich bei den Messwerten bis 1958 um die Ergebnisse von Messungen aus Eisbohrkernen handelt.

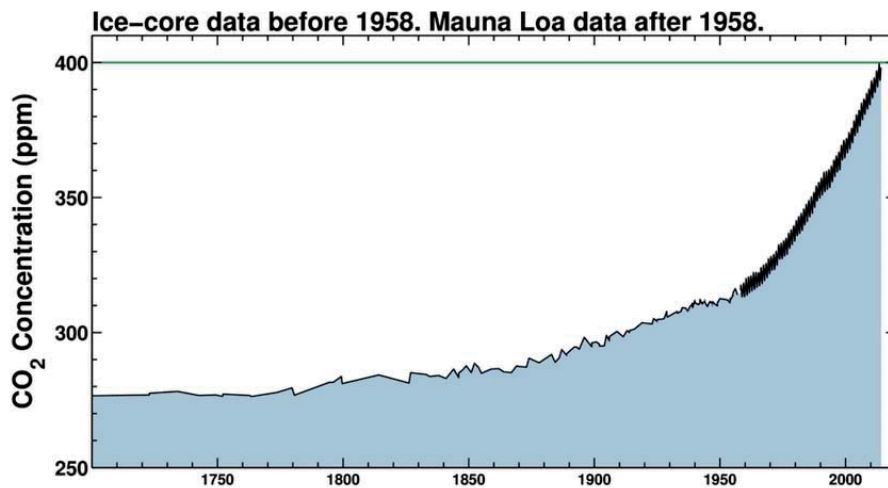


Abbildung 1-1: CO₂-Konzentration, gemessen am Mauna Loa, Bildquelle: [6]

Es besteht Grund zu der Annahme, dass eine erhöhte Konzentration von Treibhausgasen (wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid) in der Atmosphäre zu einer Veränderung des Erdklimas beiträgt [7]. Um dieser anthropogenen Klimaveränderung entgegenzuwirken, wurden in einer Vielzahl von Konferenzen (beispielsweise in Berlin (1995), Genf (1996) und schließlich 1997 in Kyoto) Maßnahmen beschlossen, den Ausstoß von Treibhausgasen zu begrenzen [8]. So verpflichtete sich beispielsweise Deutschland, seine Treibhausgasemissionen um 21 %, bezogen auf das Referenzjahr 1990, zu reduzieren [9].

Nach wie vor jedoch wird der Primärenergieverbrauch in Deutschland zu knapp 79 % aus der Nutzung fossiler Brennstoffe gedeckt, wie in **Abbildung 1-2** dargestellt.

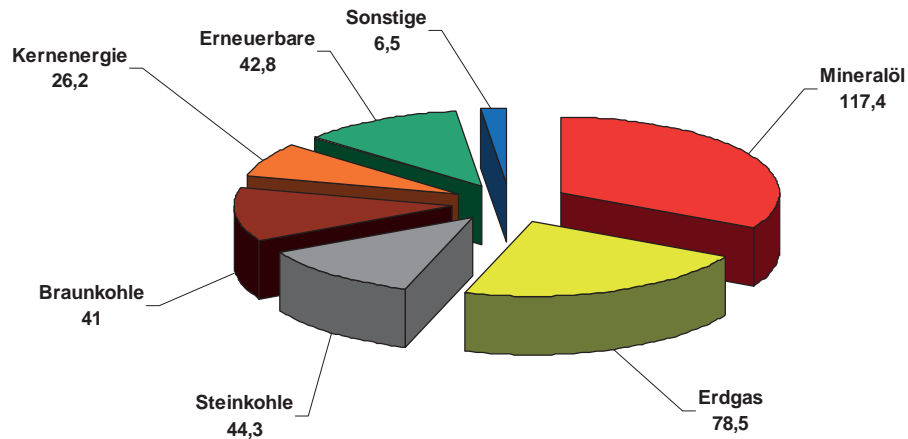


Abbildung 1-2: Primärenergieverbrauch in Deutschland in Mio. t SKE, 1.-3. Q. 2013, [1]

Die Freisetzung von CO₂ erfolgt hauptsächlich durch Kraftwerke, Industrieprozesse, Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Müll [10]. Der globale CO₂-Ausstoß aus fossilen Energieträgern lag im Jahr 2012 bei 34,43 Mrd. t, wovon 0,816 Mrd. t auf die Bundesrepublik entfielen [11].

Obwohl der Ausbau der erneuerbaren Energien kontinuierlich voranschreitet, tragen fossile Energieträger zu fast 57 % zur Bruttostromerzeugung in Deutschland bei, wie in **Abbildung 1-3** dargestellt (vgl. auch [12]). Durch das im Jahre 2011 beschlossene Atom-Moratorium wurde es zusätzlich nötig, die weggefallene Grundlaststromproduktion aus Kernkraftwerken beispielsweise durch Braunkohlestrom zu ersetzen. Dies führte dazu, dass 162 TWh Strom aus Braunkohle im Jahr 2013 erzeugt wurden [12] und somit das Niveau erstmals wieder über dem von 1991 [13] mit 158,3 TWh [14] lag.

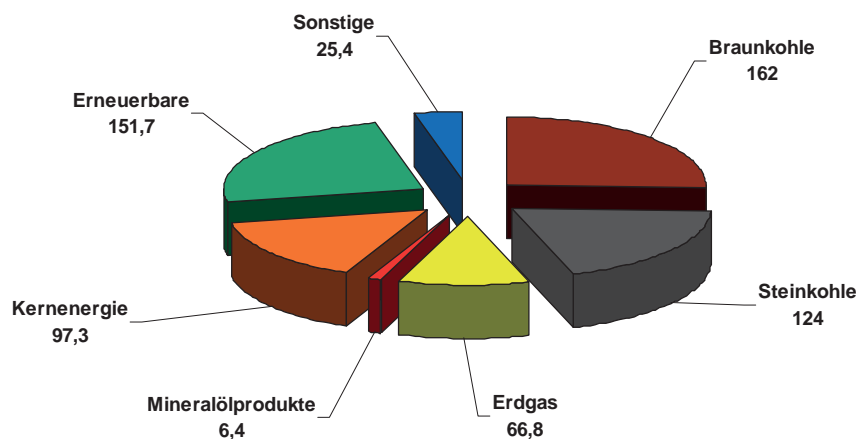


Abbildung 1-3: Bruttostromerzeugung in Deutschland 2013 in TWh [14]

In den 1980er Jahren wurden zunehmend Maßnahmen zur Reinigung von Kraftwerksrauchgasen durch Entschwefelung, Entstickung und Entstaubung ergriffen. Hierdurch konnten lokale Probleme, wie die Versauerung des Bodens (durch Schwefeldioxid- und Stickoxidemissionen) und die Staubbelastung des unmittelbaren Kraftwerksumfeldes, gelöst bzw. reduziert werden. Die Emission von Kohlenstoffdioxid stellt jedoch ein globales Problem dar, welches auch zu globalen Auswirkungen, wie dem Anstieg des Meeresspiegels durch ein mit der globalen Erwärmung einhergehendem Abschmelzen des arktischen und antarktischen Eises, führen kann [10].

Mit Blick auf das Wohl der Erdbevölkerung und kommender Generationen muss es also vorrangiges Ziel sein, die Freisetzung von CO₂ aus den vorstehend genannten Hauptemittenten zu minimieren.

1.1 Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein unsichtbares, ungiftiges, unbrennbares, dreiatomiges Gas [15]. Sein kritischer Druck beträgt 73,8 bar, seine kritische Temperatur 31 °C [16]. Es ist das Produkt von Verbrennungsvorgängen fossiler Brennstoffe, findet sich in der Atemluft und wird von Pflanzen in der Photosynthese verstoffwechselt. Es besteht jedoch der Verdacht, dass eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre den „anthropogenen Treibhauseffekt“ mit verstärkt [17].

1.2 Treibhauseffekt

Unter dem natürlichen Treibhauseffekt wird ein Mechanismus verstanden, der dazu führt, dass die von der Sonne auf die Erde eingestrahlte Energie nicht wieder direkt in das Weltall abgegeben wird. Wäre dies der Fall, läge die Temperatur der Erde im Mittel bei ca. -18 °C [18].

Stattdessen führen die Strahlungseigenschaften der die Erde umgebenden Atmosphäre zum Erreichen eines Temperaturniveaus, das die Entwicklung von Leben erst ermöglicht [19].

Tabelle 1-1: Zusammensetzung trockener Luft [15]

Komponente	Konzentration in Vol.-%
Stickstoff	78,08
Sauerstoff	20,95
Argon	0,933
Kohlenstoffdioxid	0,034
Neon	0,0018
Sonstige	0,0012

Luft besteht, wie in **Tabelle 1-1** dargestellt, vorrangig aus Stickstoff, Sauerstoff, Argon und Kohlenstoffdioxid. Insbesondere das in der Erdatmosphäre vorhandene Kohlenstoffdioxid lässt kurzwellige Strahlung, wie sie von der Sonne aus auf die Erde einstrahlt, ungehindert passieren, wohingegen der Erdboden diese aufnimmt und sie im langwelligen IR-Bereich wieder abstrahlt (Wiensches Verschiebungsgesetz der Strahlungsmaxima) [20]. Diese Infrarotstrahlung wird jedoch von den in der Atmosphäre befindlichen Gasen stark absorbiert, was zu einer Rückstrahlung auf den Erdboden führt. Hierdurch stellt sich auf der Erdoberfläche eine Temperatur von durchschnittlich 15 °C ein, die zu optimalen Lebensbedingungen führt [21]. Eine Erhöhung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre führt zu einer verstärkten Absorption und Rückstrahlung an den Erdboden, so dass sich im Gegenzug eine erhöhte Temperatur der Erdoberfläche einstellt. Das Vermögen eines Treibhausgases als Bestandteil der Atmosphäre zur Klimaer-

wärmung beizutragen, wird als „global warming potential“ (GWP) des Gases bezeichnet und ist auf CO₂ normiert, das somit den Wert 1 trägt [7]. Wie in **Tabelle 1-2** dargestellt, weisen Gase wie Methan oder Schwefelhexafluorid erheblich höhere GWP-Werte als Kohlenstoffdioxid auf, stellen aber in der emittierten Menge einen weitaus geringeren Anteil dar (**Abbildung 1-4**), so dass die Minimierung von CO₂-Emissionen eine Schlüsselrolle zur Begrenzung des anthropogenen Treibhauseffektes spielt.

Tabelle 1-2: GWP-Werte, Ausschnitt aus [7]

Spezies	Trivialname	20-Jahres-GWP
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	1
CH ₄	Methan	56
N ₂ O	Lachgas	280
SF ₆	Schwefelhexafluorid	16300

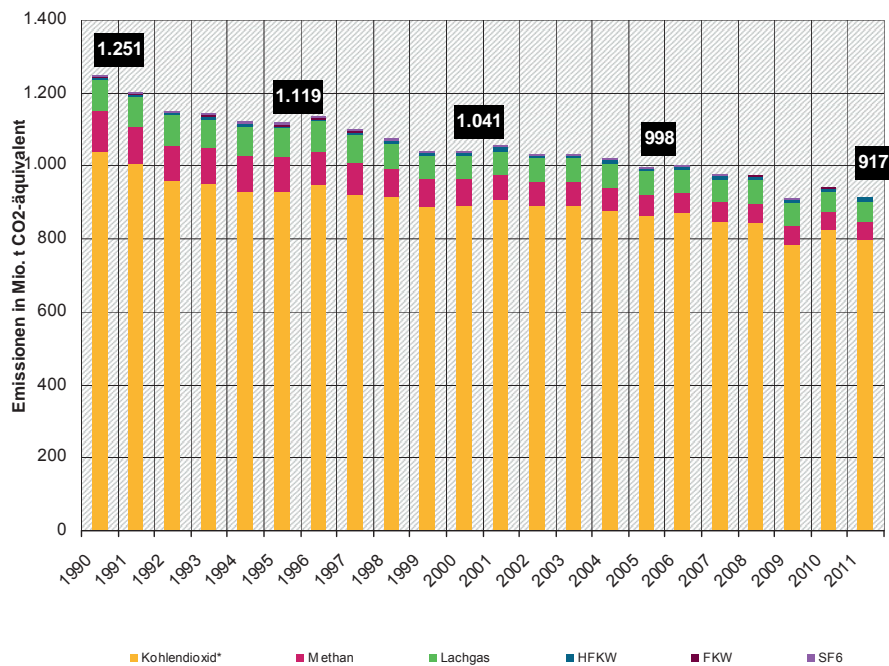


Abbildung 1-4: Treibhausgasemissionen in Deutschland von 1990 bis 2013, Bild aus [22]

1.3 Senkung der CO₂-Emissionen aus Prozessen zur Stromerzeugung

Wie zuvor dargestellt, wird mehr als die Hälfte der Stromproduktion in Deutschland durch fossile Energieträger gedeckt. Zur Senkung dieser CO₂-Emissionen sind beispielsweise Maßnahmen wie der Wechsel auf erneuerbare Energien, der Umstieg auf Brennstoffe, die im Vergleich zu Kohle ein besseres C/H-Verhältnis haben (wie zum Beispiel Erdgas), Wirkungsgradsteigerung der Kraftwerke sowie die Abtrennung des im Rauchgas enthaltenen Kohlenstoffdioxids möglich. Insbesondere die letzten beiden Möglichkeiten werden in den beiden folgenden Kapiteln näher erläutert, da sie für kohlegefeuerte Kraftwerke besonders interessante Optionen darstellen.

1.3.1 Wirkungsgraderhöhung

Die Erhöhung des Wirkungsgrades eines auf fossilen Brennstoffen beruhenden Kraftwerksprozesses stellt zunächst eine Methode zur Betriebskostenoptimierung für den Betreiber dar, da durch den geringeren spezifischen Brennstoffbedarf gleichfalls die Stromgestehungskosten sinken. Zum anderen reduziert sich durch den geringeren Brennstoffbedarf auch die Emission von Luftschadstoffen, für die ggf. bei Überschreitung zugeteilter Mengen Pönalen entrichtet bzw. CO₂-Zertifikate zugekauft werden müssten.

Der Wirkungsgrad η lässt sich als das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand bzw. abgeführter Leistung P_{ab} zu zugeführter Leistung P_{zu} definieren:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (1-1)$$

Bei fossil gefeuerten Kraftwerken entspricht die abgeführte Leistung der in das Netz eingespeisten elektrischen Leistung, während sich die zugeführte Leistung aus dem Brennstoffmassenstrom \dot{m}_{Br} sowie dem (unteren) Heizwert H_i des eingesetzten Energieträgers ergibt:

$$P_{zu} = \dot{m}_{Br} \cdot H_i \quad (1-2)$$

Der thermische Wirkungsgrad eines Kraftwerks lässt sich durch Multiplikation der Einzelwirkungsgrade der Komponenten darstellen [20]. Jede Verbesserung eines Einzelwirkungsgrades, beispielsweise durch Optimierung des Dampferzeugers, ergibt somit eine Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades. Der durch den Carnot-Prozess vorgegebene maximale Wirkungsgrad kann jedoch niemals erreicht werden. Gemäß Gl. (1-3) ergibt sich der carnotsche Wirkungsgrad η_c aus der Temperatur der Wärmesenke T_{KK} sowie der höchsten Prozesstemperatur T_{HK} :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{KK}}{T_{HK}} \quad (1-3)$$

Daraus folgt, dass eine Anhebung der Temperatur des heißen Prozessendes (dies sind beim konventionellen Dampfkraftwerk die Frischdampf- und die Zwischenüberhitzertemperatur) oder eine Temperaturabsenkung am kalten Ende (Umgebungstemperatur) den Gesamtwirkungsgrad steigen lassen.

Eine Erhöhung der Frischdampfparameter ist jedoch nur begrenzt möglich, da die hohe Temperatur von bis zu 720 °C [20] z. B. in Bezug auf Festigkeit und Kriechverhalten extreme Anforderungen an die im Kraftwerksbau verwendeten metallischen Werkstoffe stellt. Hierzu sind noch umfangreiche Untersuchungen bzw. Komponententests notwendig. Ein solches Forschungsprojekt ist beispielsweise das Projekt COMTES 700 im Rahmen des COORETEC-Programms [23]. Selbst bei der Verfügbarkeit solch hochwarmfester Materialien für den Kraftwerksbau ist jedoch eine Erhöhung der Nettowirkungsgrade auf lediglich 50 % absehbar [20], so dass sich durch diese Maßnahme die spezifischen CO₂-Emissionen nur um ca. 6 % senken lassen.

1.3.2 Abtrennung von Kohlenstoffdioxid aus Rauchgasen

Die zur Verbrennung fossiler Brennstoffe genutzte Luft besteht, wie in **Tabelle 1-1** dargestellt, zu etwa 78 Vol.-% aus Stickstoff und zu fast 21 Vol.-% aus Sauerstoff. Während der Sauerstoff bei der Verbrennung mit Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen hauptsächlich zu Kohlenstoffdioxid und Wasser reagiert, nimmt der mitgeführte Stickstoffstrom in Bezug auf den Gesamtmassestrom nur in stark untergeordneten Maßen an den chemischen Reaktionen im Verbrennungsraum teil. Nach der Entstickung (DeNOX), Entstaubung und Entschwefelung (REA) besteht ein kohlestämmiges Rauchgas typischerweise aus den in **Tabelle 1-3** dargestellten Komponenten.

Tabelle 1-3: Typische Rauchgaszusammensetzung, vgl. [24, 25]

Komponente	Konzentration in Vol.-%
Stickstoff	77,5
Sauerstoff	6
Kohlenstoffdioxid	16
Sonstige (NO _x , SO _x , Edelgase, etc.)	0,5

Hieraus geht hervor, dass das entstehende Rauchgas hauptsächlich zu etwa 78 Vol.-% aus Stickstoff und zu 16 Vol.-% aus Kohlenstoffdioxid besteht. Damit das Kohlenstoffdioxid nicht in die Atmosphäre gelangt, besteht prinzipiell die Möglichkeit, den gesamten Rauchgasvolumenstrom direkt am Kamin abzugreifen, zu komprimieren und einer Lagerung (siehe Kapitel 2.6) zuzuführen.

Eine Mitkompression und Lagerung des unschädlichen Stickstoffs würde allerdings zu unnötig vergrößerten Kosten für Gastransport, Kompression und Lagerung führen, weshalb das Gemisch in seine Hauptbestandteile Stickstoff und Kohlenstoffdioxid aufgetrennt werden muss. Der Stickstoff kann danach wieder an die Atmosphäre abgegeben werden, aus der er bei der Zufuhr der Verbrennungsluft angesaugt wurde. Das nunmehr aufkonzentrierte Kohlenstoffdioxid kann der weiteren Verwendung oder Lagerung zugeführt werden.

1.4 Zielsetzung

Am Institut für Energiesysteme und Energietechnik der Technischen Universität Darmstadt wird ein neuartiges Verfahren zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid aus Rauchgasen im Technikummaßstab betrieben und erprobt. Dieses „Carbonate Looping-Verfahren“ soll dabei für den Industrieinsatz unter realistischen Bedingungen getestet werden und in der Endausbaustufe CO₂ aus dem Abgas einer kohlegefeuerten Brennkammer abscheiden.

Errichtung, Aufbau und Betrieb der Versuchsanlage sowie die Kopplung der Brennkammer an diese werden in dieser Arbeit dargestellt sowie die gewonnenen Forschungsergebnisse und Optimierungsmöglichkeiten erläutert. Darüber hinaus wird die Entwicklung eines Messsystems dargelegt, welches eine Untersuchung sowohl des dem Carbonate Looping-Prozess zugeleiteten Rauchgases als auch der Gasatmosphären in den Reaktoren der Versuchsanlage ermöglicht.

Das Analysespektrum umfasst dabei Permanentgase (O_2 , CO_2 , CO , CH_4) sowie korrosive (z. B. COS , HCl , H_2S) bzw. das Carbonate Looping-Verfahren beeinflussende Komponenten (SO_2). Durch die Nutzung eines solchen Systems können zusätzlich beispielsweise auch Aussagen über die CO_2 -Konzentrationsverteilung in den Versuchsreaktoren getroffen werden und so die Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen überprüft werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dazu ein System entwickelt, das die direkte Entnahme von Gasen aus den zirkulierenden Wirbelschichtreaktoren bzw. dem Flammenbereich der kohlebefeuerter Brennkammer erlaubt. Diese Sonde besteht aus Werkstoffen, welche die störenden Reaktionen zwischen korrosiven Gaskomponenten und den Materialien der Zufuhrleitungen zur Gasanalytik unterbinden können. Zur Detektion und Quantifizierung der Gasspezies wird ein Gaschromatograph mit angeschlossenem Massenspektrometer (GC/MS-Kopplung) sowie ein infrarotspektrometrisch und auch paramagnetisch arbeitender Gasanalysator genutzt.

Dieses Messsystem wurde dabei so ausgelegt, dass es auch unter großer Partikelbelastung, wie sie in den Wirbelschichtreaktoren oder dem Brennernahbereich besteht, zuverlässig funktionsfähig ist und reproduzierbare Messwerte liefern kann.

Aufgrund ihrer Verwendung in einer Versuchsanlage werden an die Flexibilität einer Versuchsbrennkammer hohe Anforderungen gestellt. So soll ein kohlestämmiges Rauchgas für den Carbonate Looping-Prozess erzeugt werden, dessen Einfluss hinsichtlich seiner Zusammensetzung auf die CO_2 -Abscheideeffizienz untersucht werden soll. Des Weiteren soll die Brennkammer mittelfristig mit einem durch den Autor mitentwickelten Online-Korrosionsmesssystem instrumentiert werden, um einen weiteren Beitrag zur praxisnäheren Einbindung dieses Messverfahrens zu leisten und das Aggregat im gleichen Zuge vor schädigenden Atmosphären zu schützen. Zusätzlich sind für zukünftige Projekte Untersuchungen der Synthesegasverbrennung (aus einem HTW-Verfahren) oder eine Zufeuerung von Biomasse geplant.

Die Anforderungen an die Brennkammer und ihre Vernetzung untereinander sind in **Abbildung 1-5** dargestellt.

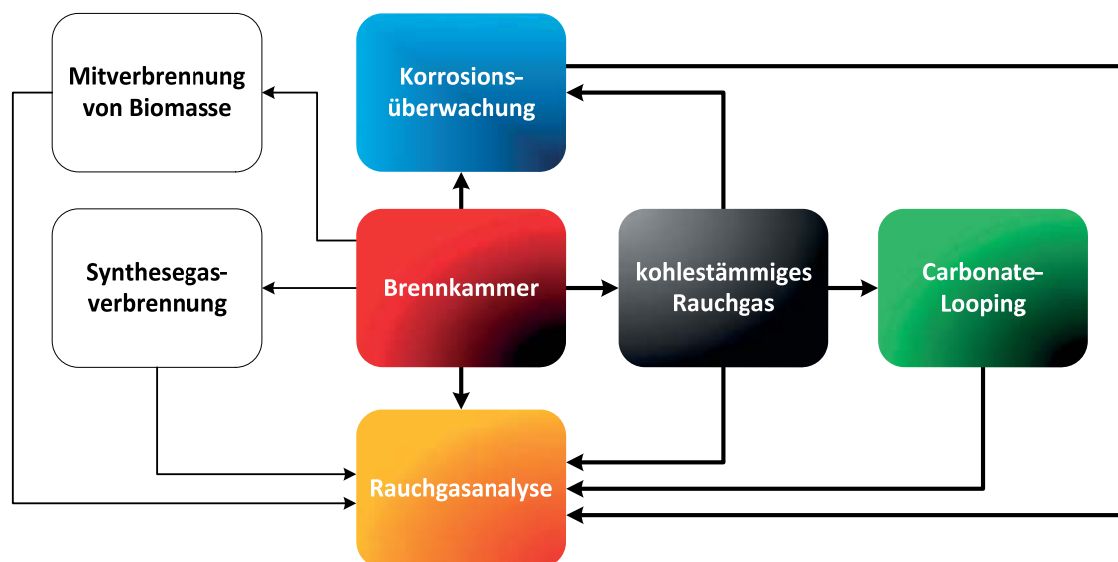


Abbildung 1-5: Anforderungen an die Brennkammer

Die vorstehende Grafik zeigt die zentrale Stellung der Brennkammer in der Versuchsanlage. Ebenso wird die herausgehobene Stellung einer zuverlässigen und örtlich flexibel einsetzbaren Rauchgasanalyse deutlich, um die Vorgänge in der Carbonate Looping-Versuchsanlage und der kohlegefeuerten Brennkammer erfassen zu können. Die Verknüpfungen zwischen Brennkammer, Versuchsanlage, Korrosionsüberwachung und Rauchgasanalyse sind in **Abbildung 1-5** als stärker akzentuierte Pfeillinien dargestellt. Sie werden in dieser Arbeit als „roter Faden“ verfolgt. Dabei gliedert sich die Arbeit in die folgenden Abschnitte:

Abschnitt 1:

- Zusammenfassung des Standes von Wissenschaft und Technik der Verfahren zur Abtrennung von Kohlenstoffdioxid (Kapitel 2 bis 2.3.5)
- Beschreibung des Prozessprinzips der zirkulierenden Wirbelschicht und der theoretischen Grundlagen (Kapitel 2.4)
- Zusammenstellung von Möglichkeiten zur Verwendung und Lagerung von Kohlenstoffdioxid (Kapitel 2.5 bis 2.6)

Abschnitt 2:

- Darstellung von Errichtung und Aufbau der Carbonate Looping-Anlage (Kapitel 3) sowie Beschreibung der verwendeten Messtechnik (Kapitel 4)
- Darstellung der mit der Carbonate Looping-Anlage erreichten Versuchsergebnisse und des erzielten wissenschaftlichen Fortschritts (Kapitel 5 bis 5.3.3)
- Zusammenstellung der erarbeiteten Maßnahmen zur Optimierung der Carbonate Looping-Anlage (Kapitel 5.4 und 5.5)

Abschnitt 3:

- Beschreibung von Auslegung und Aufbau einer Kohlenstaubbrennkammer und Entwicklung eines Kopplungskonzeptes zur Carbonate Looping-Anlage (Kapitel 6)
- Inbetriebnahme der Brennkammer (Kapitel 7 bis 7.2)
- Ankopplung der Brennkammer an die nachgeschaltete Carbonate Looping-Anlage und Darstellung der daraus gewonnenen Erkenntnisse (Kapitel 7.3)
- Zusammenstellung von Einflüssen des kohlestämmigen Rauchgases auf das Carbonate Looping-Verfahren (Kapitel 7.3.1)

Abschnitt 4:

- Beschreibung des speziell entwickelten Rauchgasentnahmesystems (Kapitel 8 bis 8.4)
- Ergebnisse und Auswertung der Rauchgasmessungen im Flammenbereich der Brennkammer (Kapitel 8.5)
- Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick (Kapitel 9)

1.5 Strategie bei Errichtung und Erweiterung der Versuchsanlage

Der Aufbau einer Versuchsanlage mit einer thermischen Leistung von 1 MW erfordert umfassende Arbeiten in den Bereichen Berechnung und Auslegung, terminliche und technische Planung, Aufbau und Montage, Koordination von Eigen- und Fremdpersonal sowie Inbetriebnahme und Betrieb. Des Weiteren müssen während der Betriebsphasen gewonnene Erfahrungen analysiert, auftretende Probleme (beispielsweise in den Bereichen Werkstofftechnik, Schweißtechnik, Fertigung und Prozessführung) systematisch gelöst und die gefundenen Lösungen umgesetzt werden. Um eine Übersicht über die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Maßnahmen zu erhalten, wird im Folgenden dargelegt, wie die einzelnen Arbeitspakete bearbeitet wurden und in einen zeitlichen Kontext gebracht.

2009:

- Einarbeitung in die Wirbelschichttechnologie und die Theorie des Carbonate Looping-Verfahrens
- Überprüfung und Erstellung eines Anlagen-, Stahlbau- und Aufstellungskonzeptes
- CAD-Konstruktion und Zeichnungserstellung der Reaktorbauteile nach vorheriger Dimensionierung

2010:

- Fertigung der Reaktorbauteile (z. B. Reaktoren, Umlaufschleusen, Zyklone) durch Eigen- und Fremdpersonal
- Vormontage der Versuchsreaktoren und Anpassung der Reaktorstahlmäntel
- Demontage der Reaktorstahlmäntel und Einbringen der feuerfesten Auskleidung mit anschließender Remontage der Reaktoren
- Anschluss der Peripherie, wie z. B. Kühlsystem, Gebläse und Ventilatoren sowie der Feuerungsaggregate
- Instrumentierung der Anlage
- Erste Funktionstests während der Inbetriebnahme
- Beginn der Errichtung der Brennkammer

2011:

- Inbetriebnahme von Einzelaggregaten (z. B. Gebläse, Brenner, Kohletransportsystem) und schließlich des gesamten Anlagenteils zur CO₂-Abtrennung

2012:

- Versuchsphase und Erkenntnisgewinn
- Inbetriebnahme der Brennkammer und Ankopplung an die Versuchsanlage

2013:

- Versuchsphase und Erkenntnisgewinn
- Entwicklung und Aufbau eines Heißgasentnahmesystems
- Versuchsphase und Erkenntnisgewinn

2. Stand von Wissenschaft und Technik

Die Minderung der Kohlenstoffdioxidemissionen aus den Abgasen von Verbrennungsprozessen durch CO₂-Abtrennung umfasst die folgenden vier Schritte:

1. Vermeidung einer Durchmischung der Kohlenstoffdioxidfracht aus dem Brennstoff mit dem an die Umwelt emittierten Rauchgasstrom
2. Transport des extrahierten Kohlenstoffdioxids
3. Lagerung des Kohlenstoffdioxids, bei Weiterverwendung als Zwischenlagerung, oder als Endlagerung
4. Weiterverwendung des Kohlenstoffdioxids, beispielsweise als Edukt in der chemischen Industrie

Das Hauptproblem aller CO₂-Abtrennverfahren besteht darin, dass hierzu wieder Energie, beispielsweise in Form von Wärme oder mechanischer Arbeit, aufgewendet werden muss. Dies führt, auf den Kraftwerksprozess als Ganzes angewandt, zu großen Wirkungsgradeinbußen, die dazu führen können, dass der Gesamtwirkungsgrad einer Anlage mit CO₂-Abtrennung um bis zu 40 % geringer sein kann als ohne [25]. Der hierdurch höhere spezifische Brennstoffverbrauch widerspricht jedoch dem Prinzip der Ressourcenschonung und muss daher möglichst gering gehalten werden.

Verbesserungsmaßnahmen in Bezug auf die Anlagentechnik haben über einen Zeitraum von 1990 bis 2011 zu einer Steigerung des Stromerzeugungswirkungsgrades von 36,5 % auf knapp 42,4 % geführt [26]. Jedoch ist eine erhebliche Steigerung der Kraftwerkswirkungsgrade (Stand 2012: ca. 41-43 % bei Braunkohlekraftwerken, ca. 45-47 % bei Steinkohlekraftwerken [27]) in Anbetracht der erheblichen Anforderungen an die verwendeten Materialien und deren physikalischen Grenzen nicht abzusehen [20] (vgl. Kapitel 1.3.1). Daher stellt eine hocheffiziente und energiesparende Kohlenstoffdioxidabtrennung einen entscheidenden Schritt zur Senkung der Treibhausgasemissionen dar.

Die Verfahren zur Emissionsminderung von Kohlenstoffdioxid aus fossilen Verbrennungsprozessen lassen sich ferner in die folgenden Gruppen einteilen:

1. Pre-Combustion-Verfahren: Der im Brennstoff enthaltene Kohlenstoff wird vor der Verbrennung entfernt. Das entstehende Synthesegas kann somit CO₂-frei verbrannt werden.
2. Oxyfuel-Verfahren: Der Brennstoff wird mit reinem Sauerstoff verbrannt, was dazu führt, dass der entstehende Rauchgasstrom hauptsächlich nur aus CO₂ und Wasser besteht.
3. Post-Combustion-Verfahren: Verfahren, die sich an den ansonsten konventionell durchgeführten Verbrennungsprozess anschließen. Ziel ist die Abtrennung des Kohlenstoffdioxids aus dem Rauchgasstrom.

Einige der oben genannten und vielversprechenden Verfahren werden in den folgenden Kapiteln erläutert und abschließend das dieser Arbeit zugrundeliegende Post-Combustion-Verfahren „Carbonate Looping“ dargestellt.