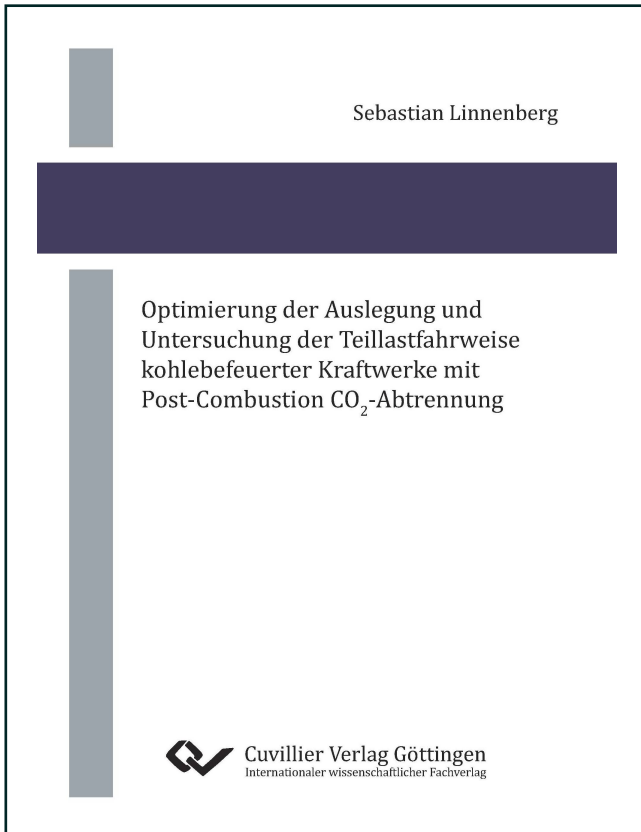




Sebastian Linnenberg (Autor)

Optimierung der Auslegung und Untersuchung der Teillastfahrweise kohlebefeuerter Kraftwerke mit Post-Combustion CO₂-Abtrennung



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6286>

Copyright:

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

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



1 EINLEITUNG

Um die mit der steigenden globalen Erwärmung verbundenen Folgen für den Menschen und seine Umwelt zu begrenzen, ist eine Reduzierung des anthropogenen Anteils der globalen Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen unumgänglich [1]. Eine Schlüsselrolle bei der Reduzierung dieser Emissionen fällt der Energiewirtschaft zu. So hat die Verbrennung fossiler Energieträger für die Stromerzeugung einen Anteil von 41 % an den globalen CO₂-Emissionen [2].

Die energiepolitischen Maßnahmen zur Verringerung der von der Energiewirtschaft freigesetzten CO₂-Emissionen sind (vgl. auch [3]):

- Erhöhung des Anteils CO₂-armer Primärenergieträger (Kernkraft, erneuerbaren Energien und Erdgas) an der Stromerzeugung;
- Verbesserung der Energieeffizienz;
- Entwicklung und Anwendung der Kohlendioxidabtrennung und der unterirdischen Speicherung (CCS).

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Nach einer Prognose der Internationalen Energieagentur (IEA), welche alle auf Länderebene getätigten politischen Zusagen und Pläne zur Verringerung der Treibhausgasemissionen berücksichtigt (*new policies scenario*), kann davon ausgegangen werden, dass kohlebefeuerte Dampfkraftwerke trotz der Erhöhung des Anteils CO₂-armer Primärenergieträger auch in den nächsten Jahren einen hohen Anteil an der globalen Stromerzeugung haben werden. Dabei ist festzustellen, dass die derzeitigen politischen Zusagen und angekündigten Ziele nicht ausreichen, um die Erderwärmung auf das geforderte Ziel von 2 °C zu begrenzen [4]. Die politischen Klimaschutzziele können daher nur dann erreicht werden, wenn die Erhöhung des Anteils CO₂-armer Primärenergieträger an der Stromerzeugung durch die Steigerung der Energieeffizienz und die Einführung von CCS-Technologien ergänzt wird.

CCS-Technologien ermöglichen die Abtrennung und anschließende Lagerung des CO₂ aus den Rauchgasen fossilbefeuerter Dampfkraftwerke. Insbesondere der Einsatz der Post-Combustion CO₂-Abtrennung gilt als vielversprechend und bietet die Möglichkeit der Nachrüstung bereits bestehender Kraftwerke [5].



Die Steigerung der Energieeffizienz auf der Erzeugerseite durch die Realisierung hoher Wirkungsgrade ist in kohlebefeuelten Dampfkraftwerken sowohl mit als auch ohne CO₂-Abtrennung eine wichtige Maßnahme, um die anthropogenen CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren bzw. den Ressourcenbedarf dieser Anlagen zu senken. Insbesondere bei Dampfkraftwerken mit CO₂-Abtrennung führt der zusätzliche hohe Energiebedarf der CO₂-Abtrennung zu einer geringeren Nettoleistung und zu höheren Stromerzeugungskosten, sodass eine Gesamtprozessoptimierung im Hinblick auf das Erreichen eines hohen Wirkungsgrads eine Voraussetzung für den wirtschaftlichen Betrieb ist.

Um die Stromerzeugung an die sich über den Tag ständig ändernde Verbraucherlast anzupassen, müssen kohlebefeuelte Dampfkraftwerke (insb. Steinkohlekraftwerke) häufig in Teillast betrieben werden¹. Die Anforderungen an die Flexibilität kohlebefeuelter Dampfkraftwerke müssen auch für Kraftwerke mit CO₂-Abtrennung berücksichtigt werden.

Aus dem Einfluss der energiepolitischen Maßnahmen auf den zukünftigen Betrieb kohlebefeuelter Dampfkraftwerke lassen sich die folgenden Aufgabenstellungen ableiten, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden:

- Um die hohen Wirkungsgradverluste, die mit der Implementierung eines Post-Combustion CO₂-Abtrennungsprozesses in ein bestehendes kohlebefeueltes Dampfkraftwerk verbunden sind, zu minimieren, ist die energetische Optimierung des Gesamtprozesses von besonderer Bedeutung. Dabei ist sowohl das Optimierungspotenzial im Hinblick auf die Prozessschaltung und Auslegung der Anlage als auch die Optimierung der wesentlichen Betriebsparameter im Hinblick auf den Volllastfall des integrierten Gesamtprozesses – bestehend aus Kraftwerksprozess, CO₂-Rauchgaswäsche und CO₂-Verdichter – zu untersuchen.
- Aufgrund der Tatsache, dass die Forderung einer hohen Lastflexibilität auch für Kohlekraftwerke mit CO₂-Abtrennung gültig ist, sind in einem

¹ Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anforderung an die Flexibilität kohlebefeuelter Dampfkraftwerke in den nächsten Jahren durch den steigenden Anteil der erneuerbaren Energieträger, wie z. B. Wind und Sonne, an der Stromerzeugung und dem damit verbundenen steigenden fluktuierenden Charakter der Stromeinspeisung ansteigt.



weiteren Schritt die Folgen der Teillastfahrweise auf den integrierten Gesamtprozess zu identifizieren und zu bewerten.

Vor dem Hintergrund der hohen Investitionskosten für die großtechnische Realisierung der betrachteten Prozesse werden in dieser Arbeit Prozessmodelle herangezogen, um die genannten Fragestellungen zu beantworten. Die Verwendung von mathematisch-physikalischen Modellen hat sich im Bereich der Forschung und Entwicklung als schnelles und kostengünstiges Mittel etabliert, um neuartige Prozesse zu bewerten (vgl. auch [6]).

1.2 Anforderungen an die Modellerstellung

Bei der Integration einer CO₂-Rauchgaswäsche in einen bestehenden Kraftwerksprozess (Retrofit-Integration) werden große Mengen Niederdruckdampf aus der Dampfturbine entnommen, um den Wärmebedarf für die Regeneration des Lösungsmittels bereitzustellen. Die Dampfentnahme aus der Dampfturbine führt dazu, dass die Temperatur- und Druckniveaus sowie die Massenströme im Niederdruck (ND)-Teil der Dampfturbine, im Kühlwassersystem und in der ND-Vorwärmstrecke gravierend von den Vollastbedingungen (Auslegungsbedingungen) abweichen. Somit wird ein großer Teil des Wasser-Dampf-Kreislaufs bei Teillast betrieben (lokale Teillast), während die Luft- und Rauchgasseite weiterhin ihrem Auslegungszustand (Vollast) entspricht. Wird zusätzlich die Brennstoffzufuhr des Kraftwerksprozesses reduziert, werden der Wasser-Dampf-Kreislauf und die Luft- und Rauchgasseite (z. B. Dampferzeuger, Saugzug, Frischlüfter) bei Teillast betrieben (globale Teillast). Damit verbunden sind u. a. veränderte Rauchgasparameter, veränderte Dampfparameter sowie ein reduzierter Frischdampfmassenstrom und die daraus resultierenden veränderten Druckverhältnisse in der Dampfturbine. Aus den genannten Gründen wird ein detailliertes, teillastfähiges Simulationsmodell des Kraftwerksprozesses benötigt, das den Einfluss der Dampfentnahme und der Kraftwerksteillast auf die Luft- und Rauchgasseite und die Wasser-Dampf-Seite abbilden kann.

Um prädiktive Aussagen über die chemische Absorption von CO₂ aus den Rauchgasen von Kohlekraftwerken in Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern (z. B. Rauchgasvolumenstrom) und Randbedingungen (z. B. Kolonnenauslegung) machen zu können, ist die Verwendung von Rate-Based-Modellen für die Darstellung der Absorptions- und der Desorptionskolonne notwendig. Mithilfe dieser Modelle ist eine realitätsnahe Auslegung und Optimierung eines CO₂-Abtrennungsprozesses möglich, da die spezifischen Eigenschaften von Kolonnen-

einbauten und die Auswirkungen des Kolonnendesigns berücksichtigt werden². Bei Kraftwerksteillast kommt es zu einer Veränderung der Rauchgasparameter, sodass das Simulationsmodell auch für die Betrachtung von Teillastzuständen gültig sein muss.

Um den Einfluss des CO₂-Volumenstroms, des Eintrittsdrucks, verschiedener Regelungsmöglichkeiten (z. B. Leitschaukelverstellung, Bypass-Regelung) sowie einer mehrstraßigen Verdichterausführung auf den elektrischen Eigenbedarf und den Kühlbedarf zu untersuchen, wird ein detailliertes Modell eines CO₂-Verdichters benötigt. Die Veränderung der Kraftwerkslast bzw. der Betriebsparameter Eintrittsdruck und CO₂-Abtrennungsrate der CO₂-Rauchgaswäsche führen dazu, dass das Modell des CO₂-Verdichters auch für die Betrachtung von Zuständen, die vom Auslegungszustand abweichen, geeignet sein muss.

1.3 Stand der Wissenschaft und Forschung

In der Literatur ist eine Vielzahl von Arbeiten verfügbar, die sich mit der Modellierung des integrierten Gesamtprozesses – bestehend aus Kraftwerksprozess, CO₂-Rauchgaswäsche und CO₂-Verdichter – beschäftigen. Bei diesen Arbeiten liegt der Schwerpunkt der Modellierung meist auf einem der betrachteten Teilprozesse, sodass nicht alle drei Teilprozesse in einem ausreichend hohen Detaillierungsgrad abgebildet werden.

In einer Vielzahl von Arbeiten wird der Kraftwerksprozess mithilfe von Korrelationen [7, 8, 9], die auf dem Carnot-Wirkungsgrad basieren, oder mithilfe von reduzierten Kraftwerksmodellen [10, 11, 12] vereinfacht dargestellt. Insbesondere der Einfluss der nachträglichen (Retrofit-) Integration einer CO₂-Rauchgaswäsche auf den Gesamtprozess kann mit diesen Modellen nur unzulänglich untersucht werden. Weiterhin ist es mit den vereinfachten Kraftwerksmodellen nur begrenzt möglich, den Einfluss sämtlicher Prozessgrößen der CO₂-Abtrennung und des CO₂-Verdichters (Wärmebedarf, Kühlbedarf und elektrischer Eigenbedarf) auf den Gesamtprozess zu untersuchen.

In den Arbeiten von OEXMANN [3] und LUCQUIAUD [13] wird der Kraftwerksprozess detailliert abgebildet. Allerdings wird die CO₂-Rauchgaswäsche in der Arbeit von

² Gleichgewichtsstufenmodelle sind für diese Art von Betrachtung nicht geeignet.

LUCQUIAUD nur durch die Annahme konstanter Schnittstellengrößen berücksichtigt, wodurch eine Optimierung und Auslegung des Gesamtprozesses nicht möglich ist. Im Gegensatz dazu verwendet OEXMANN eine detaillierte Modellierung der CO₂-Rauchgaswäsche mithilfe eines Gleichgewichtsansatzes. Dieser Ansatz erlaubt zwar eine Optimierung des Gesamtprozesses für den Vollastfall, ist aber für die in dieser Arbeit vorgenommene detaillierte Auslegung der CO₂-Rauchgaswäsche und für Teillastuntersuchungen nicht geeignet.

Bei der Modellierung des integrierten Gesamtprozesses wurde der Fokus bisher auf Untersuchungen bei Kraftwerksvollast gelegt. Die Untersuchung des integrierten Gesamtprozesses bei Teillast wurde bisher nur von LUCQUIAUD mithilfe eines in gPROMS® erstellten, teillastfähigen Modells eines steinkohlebefeuerten Kraftwerks vorgenommen [13]. Wie bereits erwähnt, wurde die CO₂-Rauchgaswäsche in [13] nicht simuliert, sondern es wurden lediglich konstante Schnittstellengrößen für die CO₂-Abtrennung angenommen, wodurch eine Optimierung des Gesamtprozesses nicht möglich ist.

1.4 Vorgehensweise

Für eine realitätsnahe Untersuchung des Gesamtprozesses – bestehend aus Kraftwerksprozess, CO₂-Rauchgaswäsche und CO₂-Verdichter – ist ein grundlegendes Verständnis der Teilprozesse notwendig. Dabei weichen insbesondere die Anforderungen an die Auslegung und den Betrieb der CO₂-Rauchgaswäsche deutlich von vergleichbaren verfahrenstechnischen Prozessen ab. Aus diesem Grund erfolgt in Kapitel 2 eine umfassende Darstellung der wesentlichen Grundlagen der Post-Combustion CO₂-Abtrennung mit Rauchgaswäschen. Weiterhin werden das betrachtete steinkohlebefeuerte Dampfkraftwerk und der CO₂-Verdichter erläutert. Abschließend werden Möglichkeiten und Grenzen der Integration einer CO₂-Rauchgaswäsche und eines CO₂-Verdichters in den Kraftwerksprozess dargestellt und diskutiert.

Für die Untersuchung des integrierten Gesamtprozesses müssen zunächst geeignete Prozessmodelle für die Simulation des Kraftwerksprozesses, der CO₂-Rauchgaswäsche und des CO₂-Verdichters erstellt werden, die den in Abschnitt 1.2 genannten Anforderungen entsprechen. Auf Basis der in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen wird die Modellerstellung für die genannten Teilprozesse in Kapitel 3 umfassend erläutert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Darstellung der Randbedingungen und Annahmen, die so gewählt wurden, dass die erstellten Simulati-



onsmodelle sowohl für den Volllast- als auch für den Teillastfall realitätsnahe Ergebnisse liefern.

Für eine umfassende Untersuchung des Gesamtprozesses ist das Verständnis des Kraftwerksprozesses für den Volllast- und den Teillastfall von besonderer Bedeutung. Insbesondere die Rauchgasparameter und der Dampfzustand in der Überströmleitung zwischen MD- und ND-Turbine haben einen großen Einfluss auf das Zusammenspiel zwischen Kraftwerksprozess und CO₂-Abtrennung. In Kapitel 4 werden daher zunächst die Simulationsergebnisse des Kraftwerksmodells ohne CO₂-Abtrennung für den Volllastfall und verschiedene Teillastfälle dargestellt und diskutiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung derjenigen Betriebsgrößen, die einen entscheidenden Einfluss auf die Untersuchungen des Gesamtprozesses beim Betrieb mit CO₂-Abtrennung haben.

Für die weiteren Untersuchungen in dieser Arbeit ist die Definition eines Volllastfalls (Referenzfalls) des Gesamtprozesses notwendig. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5 die CO₂-Rauchgaswäsche und der CO₂-Verdichter im Hinblick auf einen minimalen Wirkungsgradverlust für den Volllastfall des integrierten Gesamtprozesses ausgelegt und hinsichtlich der wesentlichen Betriebsparameter optimiert³. Ein weiterer Schwerpunkt des Kapitels 5 liegt auf der detaillierten Untersuchung des Einflusses der Dampfantnahme aus dem Kraftwerksprozess auf die energetische Optimierung des Gesamtprozesses.

Prozessparameter und Randbedingungen des steinkohlebefeuerten Dampfkraftwerks und der CO₂-Rauchgaswäsche können einen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad des Gesamtprozesses haben. Aus diesem Grund müssen diese Größen sowohl bei der Simulation als auch bei der Bewertung der Post-Combustion CO₂-Abtrennung unbedingt berücksichtigt werden. Der Einfluss ausgewählter Prozessparameter und Randbedingungen des Dampfkraftwerks und der CO₂-Rauchgaswäsche auf den Wirkungsgradverlust des Gesamtprozesses wird in Kapitel 6 untersucht.

Das Ziel von Kapitel 7 ist es, u. a. auch im Hinblick auf die erhöhten Anforderungen an die Flexibilität kohlebefuerter Kraftwerke, Erkenntnisse über den Einfluss einer reduzierten Kraftwerkslast auf den Gesamtprozess zu erlangen. Ausgehend von

³ Der Kraftwerksprozess wird aufgrund der Annahme einer Retrofit-Integration nicht für den Betrieb mit CO₂-Abtrennung optimiert.

dem für den Vollastfall ausgelegten Gesamtprozess (Referenzfall) erfolgt eine Optimierung der wichtigsten Betriebsparameter, um auch für den Teillastfall einen minimalen Wirkungsgradverlust des Gesamtprozesses zu erreichen.

Zusammenfassend ist das Lastverhalten der drei Teilprozesse Kraftwerk, CO₂-Rauchgaswäsche und CO₂-Verdichter in Bezug auf den Aufbau dieser Arbeit in Tabelle 1-1 dargestellt.

Tabelle 1-1: Lastverhalten der Teilprozesse in Bezug auf den Aufbau dieser Arbeit

Kapitel	Kraftwerk		Rauchgas- wäsche	Verdichter
	Wasser- Dampf-Seite	Luft- und Rauchgasseite		
Kapitel 4.1	Volllast	Volllast	-	-
Kapitel 4.2	Teillast	Teillast	-	-
Kapitel 5	lokale Teillast	Volllast	Volllast	Volllast
Kapitel 6	lokale Teillast	Volllast	Volllast	Volllast
Kapitel 7	Teillast	Teillast	Teillast	Teillast