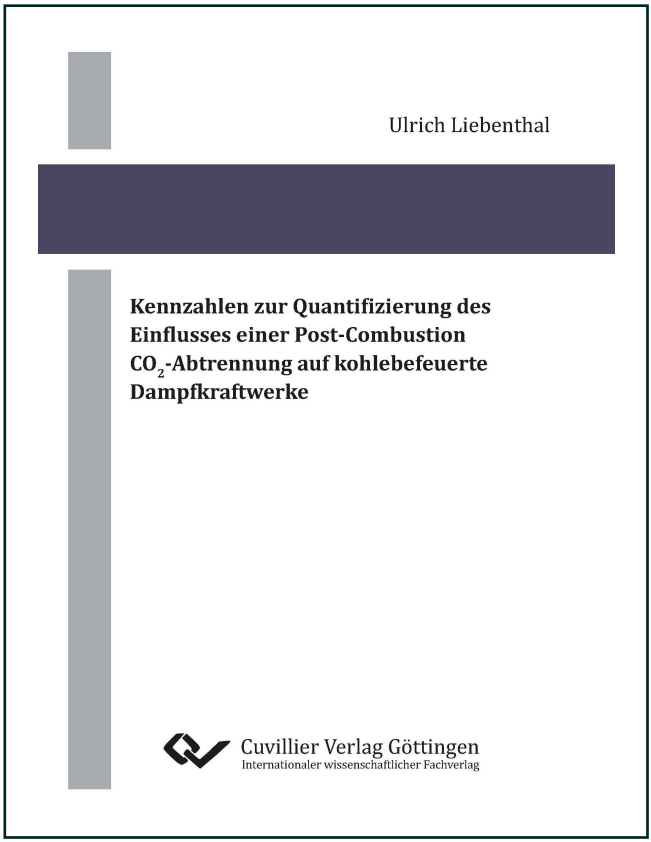
Ulrich Liebenthal (Autor)

# Kennzahlen zur Quantifizierung des Einflusses einer Post-Combustion CO2-Abtrennung auf kohlebefeuerte Dampfkraftwerke




https://cuvillier.de/de/shop/publications/6561

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

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts wird ein Wandel des Klimas festgestellt, der bisher nicht auf natürliche Effekte zurückgeführt werden konnte. Die erste Dekade des 21. Jahrhunderts war in Bezug auf die Jahresdurchschnittstemperatur die wärmste seit Aufzeichnung der Wetterdaten. Der Klimawandel wird mit dem Anstieg der Treibhausgase begründet, die zum Teil anthropogenen Ursprungs sind. Dabei hat Kohlenstoffdioxid ($CO_2$) trotz geringen Anteils in der Atmosphäre einen erheblichen Einfluss auf den Treibhauseffekt [1, 2]. Auf eine Reduzierung der anthropogenen Treibhausgase hat man sich im Rahmen des Kyoto Protokolls geeinigt, jedoch keine verpflichtenden Grenzen festgelegt [3].

In Deutschland konnte 2010 ein Anteil von 42 % der $CO_2$-Emissionen auf die Energiewirtschaft zurückgeführt werden. Davon fällt ein Großteil auf die festen Brennstoffe zurück (44 %), die vor allem zur Stromerzeugung eingesetzt werden [4]. Um diesen Anteil der anthropogenen $CO_2$-Emissionen zu reduzieren, können drei unterschiedliche Pfade verfolgt werden:

- Substitution fossiler Brennstoffe durch $CO_2$-ärmere Brennstoffe;
- Erhöhung des Wirkungsgrades fossilbefeuerter Kraftwerke und effizientere Nutzung von Wärme und Strom;
- Abtrennung und Speicherung von $CO_2$ aus fossilbefeuerten Kraftwerken (*Carbon Capture and Storage* – CCS).

Dem Trend der letzten Jahre folgend, werden regenerative Energieträger auch in den kommenden Jahren nur einen Teil des Energiebedarfs decken können. Mit dem Ausstieg aus der Kernenergie bleibt insbesondere Kohle auch in den nächsten Dekaden ein wesentlicher Bestandteil der deutschen Energieversorgung. Global betrachtet ist der Anteil der kohlebefeuerten Anlagen an der Stromerzeugung in den letzten 40 Jahren gestiegen [5].

Da das $CO_2$-Einsparpotenzial durch Wirkungsgradverbesserung eingeschränkt ist, führt nur die Abtrennung und Speicherung von $CO_2$ aus dem Rauchgas kohlebefeuerter Kraftwerke zu einer signifikanten Reduzierung der $CO_2$-Emissionen. Dazu existieren drei Technologierouten, die sich grundlegend in der Art der Abtrennung unterscheiden. Neben der Pre-Combustion $CO_2$-Abtrennung und dem



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Oxyfuelprozess stellt die Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung das bisher am weitesten entwickelte Verfahren dar[1].

## 1.1 Motivation

Unter den Verfahren zur Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung ist vor allem die nasschemische Absorption Gegenstand umfangreicher Forschungsvorhaben. In diesem Prozess wird das Rauchgas stromabwärts von den üblichen Reinigungsschritten (Entstickung, Entstaubung und Entschwefelung) in eine Absorptionskolonne geführt, in der das $CO_2$ an ein im Gegenstrom herabrieselndes Lösungsmittel chemisch gebunden wird. Für die Regeneration des Lösungsmittels ist thermische Energie (Wärmebedarf) in Form von Dampf notwendig, der dem Kraftwerksprozess entnommen wird. Da dieser Dampf keine Arbeit in den Turbinen leisten kann, führt die Dampfentnahme zu einer Reduzierung der elektrischen Nettoleistung und bei gleichem Brennstoffaufwand entsprechend zu einer Abnahme des Nettowirkungsgrades [6].

Der Wärmebedarf variiert je nach verwendetem Lösungsmittel und gewählter Prozessführung erheblich und gilt in der Literatur oft als Maß zur Evaluierung eines Abtrennungsverfahrens. Damit werden jedoch weitere Schnittstellengrößen wie z. B. die erforderliche Dampfqualität oder die elektrischen Verbraucher innerhalb des Abtrennungsprozesses vernachlässigt. Darüber hinaus werden beim Vergleich verschiedener Verfahren z. T. unterschiedliche Randbedingungen verwendet, die eine Vergleichbarkeit erschweren oder ausschließen.

Bei der nasschemischen Absorption handelt es sich um ein Verfahren, dessen Simulation Programme erfordert, welche die chemischen Reaktionen und gleichzeitig die Prozessführung ausreichend genau abbilden können (z. B. AspenPlus®, Chemasim, ProTreat, CHEMCAD, $CO_2$Sim). Für die Modellierung eines Dampfkraftwerks in gleicher Detaillierung ist in diesen Programmen ein hoher Aufwand sowohl bei der Modellerstellung als auch bei der Simulation erforderlich. Aus diesem Grund und da die Kraftwerkssimulation z. T. andere Kompetenzen erfordert, wird in der Literatur oft kein Gesamtprozess, sondern die $CO_2$-Abtrennung als isolierter Prozess dargestellt. Eine Prozessintegration und eine Gesamtprozessoptimierung

[1] Für detaillierte Informationen über die Technologierouten wird verwiesen auf [75].



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sind dabei nicht Gegenstand der Untersuchungen. Es wird davon ausgegangen, dass das energetische Optimum des Abtrennungsprozesses (niedrigster Wärmebedarf) auch das Optimum des Gesamtprozesses darstellt. Allerdings trifft dies nur bei Verwendung bestimmter Lösungsmittel zu [7].

## 1.2 Ziel und Abgrenzung der Arbeit

Das wissenschaftliche Interesse im Bereich der Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung kohlebefeuerter Dampfkraftwerke ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Dabei konkurrieren Verfahren miteinander, welche unterschiedliche Lösungsmittel und verschiedene Prozesstopologien verwenden. Als primäres Ziel wird ein Prozess angestrebt, der zu möglichst geringen Leistungseinbußen des Dampfkraftwerks führt. Die Forschungsgebiete, die an einer entsprechenden Prozessevaluierung (für einen Prozess basierend auf nasschemischer Absorption) beteiligt sind, lassen sich in drei Gruppen aufteilen:

1. Untersuchung der physikochemischen Eigenschaften der Lösungsmittel und Erstellung von thermodynamischen Stoffwertemodellen [8, 9, 10];
2. Erstellung von Modellen zur Abbildung der Absorption und Desorption sowie Simulation des Abtrennungsprozesses [11, 12, 13, 14, 15, 16];
3. Modelle zur Integration des Abtrennungsprozesses in den Kraftwerksprozess zur Gesamtprozessevaluierung [17, 18, 19, 20].

Es wird deutlich, dass eine Gesamtprozessevaluierung nur dann detailliert durchgeführt werden kann, wenn kompetenzübergreifende Kooperationen zwischen unterschiedlichen Institutionen entstehen. Es hat sich gezeigt, dass solche Kooperationen gerade für die Evaluierung neuartiger Prozesse[2] vergleichsweise selten umgesetzt werden. Besonders die Interaktion von Gruppe zwei und Gruppe drei erfolgt oft nur für bereits hinreichend erforschte Abtrennungsprozesse.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Bewertungssystem für Post-Combustion $CO_2$-Abtrennungsprozesse entwickelt, das eine Gesamtprozessevaluierung zulässt, ohne auf eine detaillierte Kraftwerks- oder $CO_2$-Verdichtermodellierung zurückgrei-

[2] Als neuartige Prozesse werden sowohl der Einsatz neuartiger Lösungsmittel als auch neuartiger Prozesstopologien bezeichnet.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

fen zu müssen. Das Bewertungssystem basiert auf physikalisch und empirisch hergeleiteten Kennzahlen, die für

- eine energetische Gesamtprozessbetrachtung und –optimierung für nachgerüstete (Retrofit) und neu gebaute Anlagen (Greenfield),
- einen Vergleich unterschiedlicher Prozessvarianten oder Lösungsmittel,
- eine Abschätzung des Potenzials einer Wärmeintegration,
- eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Randbedingungen auf den Gesamtprozess,
- eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Kraftwerkskonfigurationen auf den Gesamtprozess

herangezogen werden können.

Forschungsgruppen wie z. B. unter der Leitung von Gary T. Rochelle (UT)[3] und Hallvard F. Svendsen (NTNU)[4] beschäftigen sich seit mehr als neun Jahren mit der Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung basierend auf nasschemischer Absorption und zählen dabei zu den weltweit führenden Institutionen. Diese und ähnlich orientierte Forschungsgruppen können unter Verwendung des in dieser Arbeit erstellten Bewertungssystems detaillierte und transparente Gesamtprozessuntersuchungen durchführen, ohne dabei auf die Kompetenz der Kraftwerkstechnik angewiesen zu sein. Besonderer Fokus liegt daher auf einer möglichst einfach anwendbaren Gestaltung des Bewertungssystems bei gleichzeitig hoher Genauigkeit der darin enthaltenen mathematischen Korrelationen.

Ein weiteres Anwendungsfeld ergibt sich für Kraftwerksbetreiber, die durch die Anpassung der wichtigsten Randbedingungen die Auswirkungen der Nachrüstung einer $CO_2$-Abtrennungsanlage auf ein spezielles Kraftwerk im Hinblick auf den Gesamtprozess abschätzen können.

---

[3] *Department of Chemical Engineering, University of Texas* (UT)

[4] *Institute for Chemical Process Technology, Norwegian University of Science and Technology* (NTNU)



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

## 1.3 Vorgehensweise

Eine Gegenüberstellung der nach dem derzeitigen Stand der Technik angewendeten Methoden zur Bewertung von $CO_2$-Abtrennungsprozessen in Kapitel 2 soll verdeutlichen, dass die in der Literatur verfügbaren Methoden z. T. keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern.

In Kapitel 3 wird der integrierte Gesamtprozess erläutert. Dabei geht es vor allem um die Bereitstellung der energetischen Schnittstellengrößen zwischen Dampfkraftwerk, $CO_2$-Abtrennungsanlage und $CO_2$-Verdichtung. Darüber hinaus werden verschiedene Integrationsvarianten vorgestellt, die im weiteren Verlauf der Arbeit näher untersucht werden.

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf Seiten der $CO_2$-Abtrennungsanlage, sondern auf der Integration der $CO_2$-Abtrennungsanlage in ein Dampfkraftwerk zur Erstellung eines Systems zur Bewertung des Gesamtprozesses liegt, ist die detaillierte Modellbildung eines Dampfkraftwerks notwendig. Die Modellbildung des Dampfkraftwerks und der $CO_2$-Verdichtung unter Verwendung realitätsnaher Randbedingungen wird in Kapitel 4 vorgestellt.

Für den integrierten Gesamtprozess erfolgen umfangreiche Sensitivitätsanalysen, bei denen Schnittstellengrößen zwischen Kraftwerk und Abtrennungsanlage (z. B. Wärmebedarf und erforderliche Dampfqualität), zwischen Abtrennungsanlage und $CO_2$-Verdichtung (z. B. $CO_2$-Eintrittsdruck in den $CO_2$-Verdichter) sowie allgemeine Randbedingungen (z. B. Kühlwasserbedingungen und Druck in der Überströmleitung) variiert werden.

In Kapitel 5 werden mit Hilfe der Simulationsergebnisse für in dieser Arbeit definierte Kennzahlen mathematische Korrelationen entwickelt, welche die Zusammenhänge und Abhängigkeiten von den variierten Größen mit hoher Genauigkeit im Vergleich zu den Simulationsergebnissen abbilden. Darüber hinaus wird ein Algorithmus vorgestellt, der die Optimierung der $CO_2$-Verdichterkonfiguration im Hinblick auf den Gesamtprozess ermöglicht. Die Korrelationen und der Optimierungsalgorithmus werden auf Basis von *Visual Basic* in *Microsoft Excel*® implementiert, und es wird eine möglichst einfach anwendbare Benutzeroberfläche generiert, die direkt mit Simulationsprogrammen für den $CO_2$-Abtrennungsprozess gekoppelt werden kann.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Kapitel 6 werden die Korrelationen zur Gesamtprozessbewertung für zwei verschiedene $CO_2$-Abtrennungsprozesse herangezogen. Darüber hinaus werden die Einflüsse wichtiger Randbedingungen der Prozessintegration quantifiziert.

In Kapitel 7 folgt neben einer Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse ein Ausblick auf weiterführende Untersuchungsmöglichkeiten.

In Abbildung 1.1 ist der Umfang dieser Arbeit als grau hinterlegter Bereich schematisch dargestellt. Der $CO_2$-Abtrennungsprozess wird dabei als Black Box behandelt, die in Form von Schnittstellengrößen berücksichtigt wird.

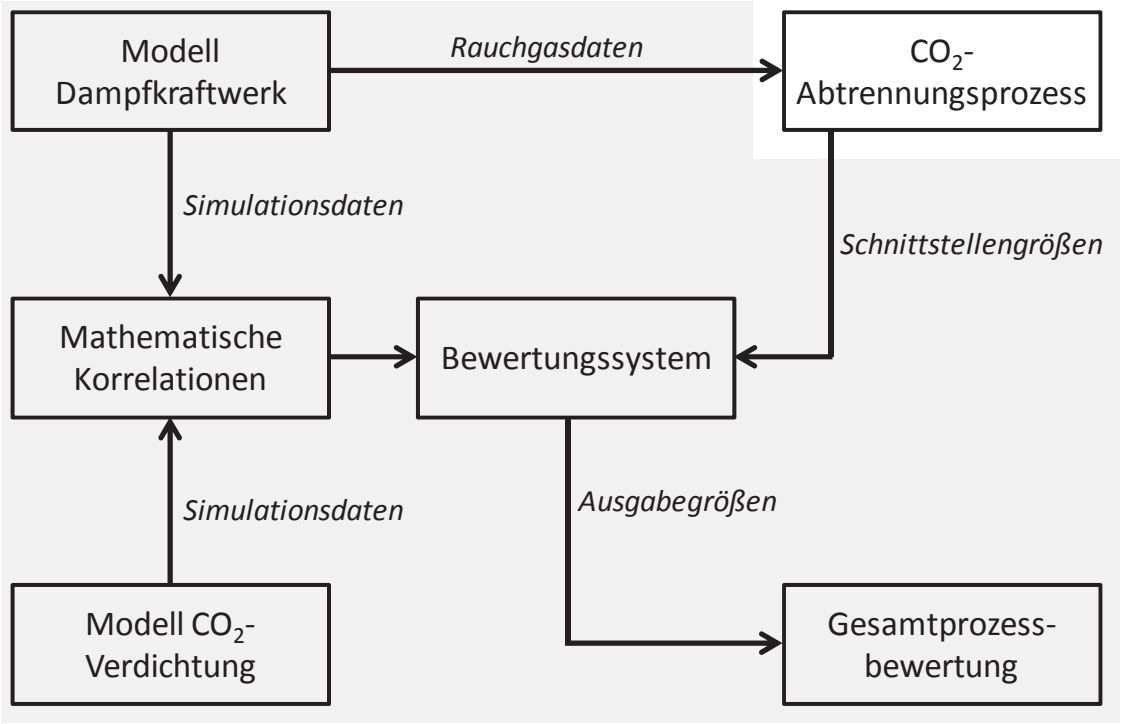



**Abbildung 1.1: Umfang der Arbeit (grau hinterlegter Bereich)**



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

# 2 STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Bei einer Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung (*Post-Combustion Capture* - PCC) wird Kohlenstoffdioxid aus dem Rauchgas konventioneller Kraftwerke nach den üblichen Reinigungsschritten (Entstickung, Entstaubung und Entschwefelung) abgetrennt. In Abbildung 2.1 ist ein Kohlekraftwerk mit integrierter $CO_2$-Abtrennungsanlage schematisch dargestellt. Verglichen mit dem Oxyfuel- und dem Pre-Combustion-Verfahren ist der Integrationsaufwand einer Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung gering und eignet sich daher neben einem Neubau insbesondere auch für die Nachrüstung bestehender Kraftwerke. Der wesentliche Nachteil des PCC-Verfahrens sind die Wirkungsgradeinbußen, die auf den Energiebedarf der Abtrennungsanlage und der $CO_2$-Verdichtung zurückzuführen sind. Der Großteil der Verluste entsteht durch den Wärmebedarf, der dem Kraftwerksprozess für die Regenerierung des Lösungsmittels in Form von niederkalorischem Dampf entzogen wird. Darüber hinaus erfordert der Antrieb der Strömungsmaschinen innerhalb der Abtrennungsanlage elektrische Energie. Die dritte energetische Schnittstellengröße bildet der Kühlbedarf der Abtrennungsanlage, der sich je nach Abtrennungsprozess aus der Rauchgaskühlung, der Lösungsmittelkühlung und der $CO_2$-Kühlung während der Verdichtung ergibt. In einer Gesamtprozessbewertung müssen alle Schnittstellengrößen (Wärmebedarf, elektrischer Bedarf und Kühlbedarf) Berücksichtigung finden. Für eine detaillierte Beschreibung des PCC-Verfahrens wird auf [21] verwiesen.

Zur energetischen Bewertung von Prozessen zur Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung existieren in der Literatur nur wenige Ansätze. Der Fokus liegt dabei stets auf einer Umrechnung des Wärmebedarfs zur Lösungsmittelregeneration in einen elektrischen Leistungsverlust des Kraftwerks. Im Folgenden werden diese Ansätze vorgestellt und verglichen. Die dabei verwendeten Größen werden in Abbildung A.1 (Anhang A.1) dargestellt.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

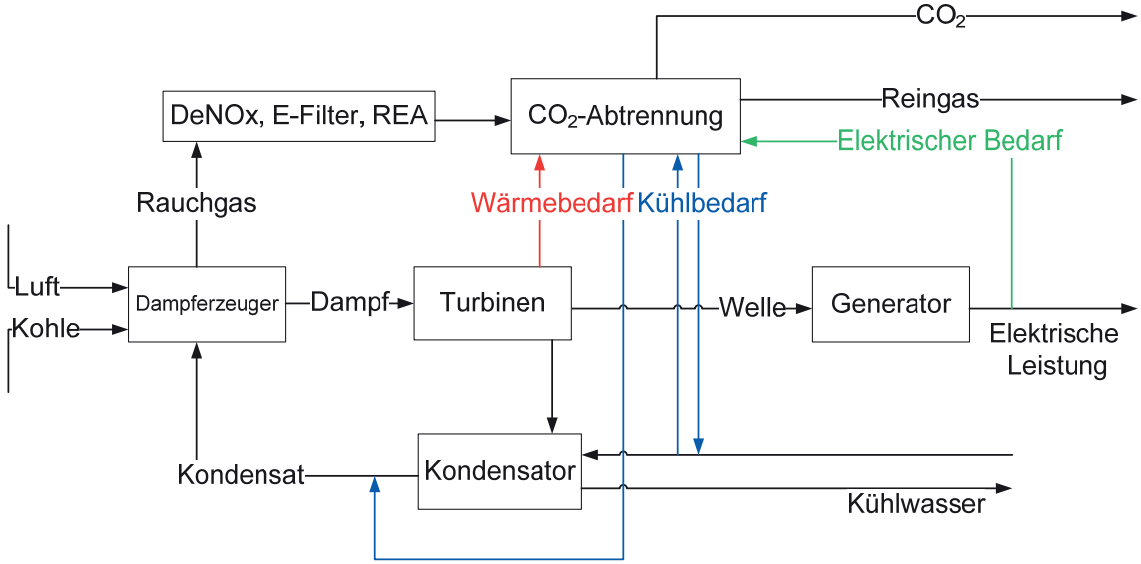



**Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Kohlekraftwerks mit Post-Combustion $CO_2$-Abtrennung**

## 2.1 Verfügbare Ansätze zur Prozessbewertung

### Ansatz 1

Bolland und Undrum führen in [22] einen Faktor $\alpha$ ein, der das Verhältnis von elektrischem Leistungsverlust zu Wärmeauskopplung beschreibt („*The ratio of incremental power reduction to incremental heat output*“). Als Kraftwerksprozess wird dabei ein Gas- und Dampfprozess (GuD) verwendet. Für ein kohlebefeuertes Dampfkraftwerk (DKW) lässt sich der generelle Ansatz, jedoch nicht das Ergebnis der Arbeit übertragen. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, hat die Qualität des entnommenen Dampfes einen großen Einfluss auf den Faktor $\alpha$. Eine Wärmeauskopplung bei 200 °C Sattdampftemperatur führt zum Beispiel zu einem etwa doppelt so großen elektrischen Leistungsverlust wie eine Wärmeauskopplung bei 100 °C Sattdampftemperatur.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

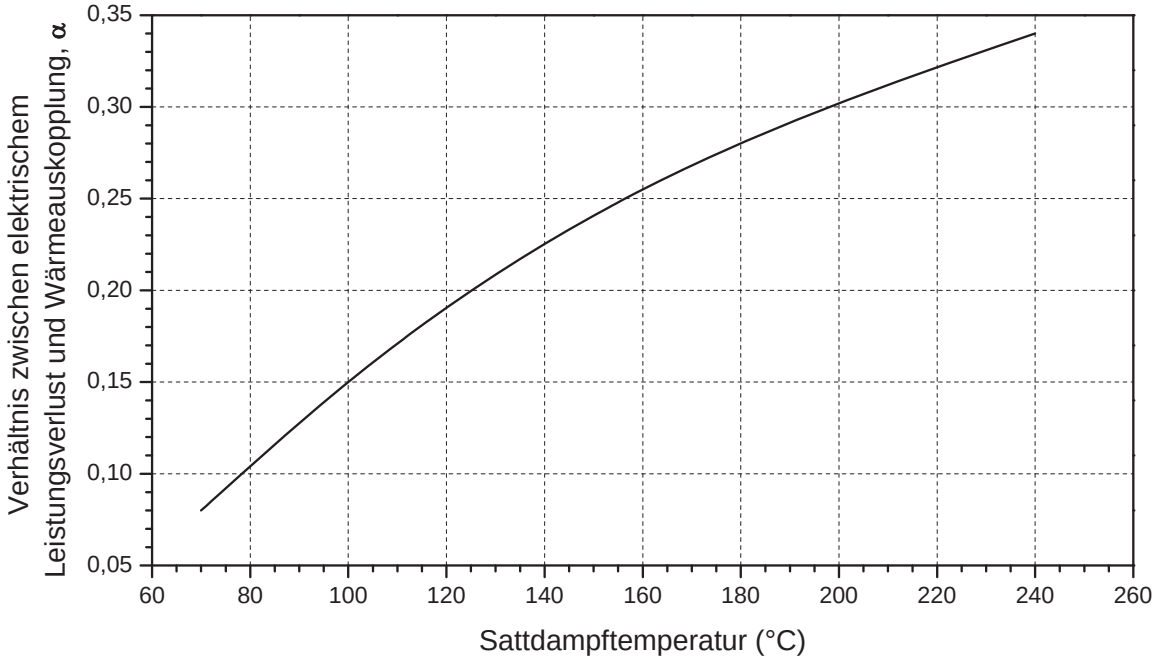



**Abbildung 2.2: Verhältnis zwischen elektrischem Leistungsverlust und der Sattdampftemperatur der Wärmeauskopplung bei einem GuD-Prozess [22]**

### ANSATZ 2

GÖTTLICHER bewertet in [23] unterschiedliche Lösungsmittel mit dem mathematischen Ansatz aus Gleichung (1).

$$\propto = \frac{h(p_{\text{ext}}, T_{\text{ext}}) - h(p_{\text{cond}}, x_{\text{cond}}) + \eta_{el}(h'(p_{\text{ext}}) - h'(p_{\text{cond}}))}{h(p_{\text{ext}}, T_{\text{ext}})} \tag{1}$$

Dabei ist $\propto$ das Verhältnis zwischen thermischer und elektrischer Energie, $h$ die Dampfenthalpie, $h'$ die Sättigungsenthalpie, $p_{\text{ext}}$ der Druck des entnommenen Dampfes, $T_{\text{ext}}$ die Temperatur des entnommenen Dampfes, $x_{\text{cond}}$ der Dampfgehalt am Austritt der Niederdruckturbine, $p_{\text{cond}}$ der Kondensatordruck und $\eta_{el}$ der Wirkungsgrad des Niederdruckteils des Kraftwerks.

Der Ansatz beruht auf einer vereinfachten physikalischen Berechnung, in der neben der Qualität des entnommenen Dampfes auch der Kondensatordruck des Kraftwerks berücksichtigt wird. Die Anwendung dieses Bewertungsansatzes ist nur dann möglich, wenn die exakten Dampfzustände der Entnahme und des Niederdruckturbinenaustritts bekannt sind. Darüber hinaus wird ein Wirkungsgrad



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

$\eta_{el}$ benötigt, der nicht eindeutig definiert ist und somit Interpretationsspielraum lässt.

**Ansatz 3**

Einen wesentlich einfacher anwendbaren Ansatz (Gleichung (2)) liefern OYENEKAN und ROCHELLE in [14].

$$W_{\mathrm{eq}} = W_{\mathrm{pump}} + 0{,}75 \cdot Q \cdot \frac{(T_{\mathrm{reb}} + 10\ \mathrm{K}) - 313\ \mathrm{K}}{T_{\mathrm{reb}} + 10\ \mathrm{K}} + W_{\mathrm{comp}} \tag{2}$$

Dabei ist $W_{\mathrm{eq}}$ die äquivalente Arbeit (entspricht hier dem elektrischen Leistungsverlust), $W_{\mathrm{pump}}$ die Arbeit der Pumpen im Abtrennungsprozess, $W_{\mathrm{comp}}$ die Arbeit der $CO_2$-Verdichtung, $Q$ der Wärmebedarf und $T_{\mathrm{reb}}$ die Reboilertemperatur.

Der mittlere Summand stellt den Leistungsverlust durch den Wärmebedarf dar und ähnelt in seiner Form dem Carnot-Faktor. Der Zahlenwertfaktor 0,75 ist dem Umstand geschuldet, dass der Kraftwerksprozess nicht verlustfrei abläuft und wird dabei (missverständlich) als Turbinenwirkungsgrad bezeichnet. Mit den Summanden $W_{\mathrm{pump}}$ und $W_{\mathrm{comp}}$ werden auch die Verluste, die nicht auf die Dampfentnahme zurückzuführen sind, berücksichtigt.

**ANSATZ 4**

OEXMANN ET AL. haben diesen Ansatz in [24] zu Gleichung (3) und (4) weiterentwickelt.

$$P_{\mathrm{reg}} = \eta_{\mathrm{eff}} \cdot \dot{Q} \cdot \frac{T_{\mathrm{cond}}}{T_{\mathrm{ext}}^{\mathrm{sat}}(p_{\mathrm{ext}})} \tag{3}$$

$$\eta_{\mathrm{eff}} = 0{,}7855 + 0{,}01485 p_{\mathrm{ext}} \tag{4}$$

Dabei ist $P_{\mathrm{reg}}$ der elektrische Leistungsverlust für die Dampfentnahme, $\eta_{\mathrm{eff}}$ der effektive Wirkungsgrad, $T_{\mathrm{cond}}$ die Kondensattemperatur des Kraftwerks, $T_{\mathrm{ext}}^{\mathrm{sat}}$ die Sättigungstemperatur des entnommenen Dampfes und $p_{\mathrm{ext}}$ der Druck der Dampfentnahme. Der wesentliche Unterschied zu der Korrelation von OYENEKAN und ROCHELLE besteht in dem Faktor $\eta_{\mathrm{eff}}$, der die Abweichung zu dem Carnot-Faktor in Abhängigkeit von der Dampfentnahme und nicht als konstanten Wert beschreibt.

**ANSATZ 5**

NAZARKO bewertet in [16] verschiedene Betriebsparameter einer Abtrennungsanlage mit einem konstanten Verhältnis zwischen elektrischer und thermischer Ener-



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.