

**BACHELORARBEIT**

# **Multikriterielle Bewertung von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien für niedrig konzentrierte Industrieemissionen**

---

vorgelegt am 20. Februar 2026  
Paul Fynn Schönbohm ( )

1. Prüfer: Prof. Dr. Sebastian Timmerberg

2. Prüfer: Mike Blicher

---

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE**

**WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Fakultät Life Science

Studiengang Umwelttechnik

Ulmenliet 20

21033 Hamburg

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                             |            |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Gendererklärung .....</b>                                                | <b>IV</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                           | <b>V</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                             | <b>VI</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                                          | <b>VII</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                                    | <b>1</b>   |
| 1.1 Relevanz des Themas .....                                               | 1          |
| 1.2 Problemstellung und Zielsetzung .....                                   | 1          |
| 1.3 Gang der Untersuchung.....                                              | 2          |
| <b>2 Theoretischer Hintergrund.....</b>                                     | <b>3</b>   |
| 2.1 Nachgeschaltete CO <sub>2</sub> -Abscheidetechnologien .....            | 3          |
| 2.1.1 Absorption .....                                                      | 5          |
| 2.1.2 Adsorption .....                                                      | 8          |
| 2.1.3 Membran .....                                                         | 11         |
| 2.1.4 Kryogen.....                                                          | 13         |
| 2.2 Industrieemissionen mit niedrigen CO <sub>2</sub> -Konzentrationen..... | 13         |
| 2.2.1 Aluminiumproduktion.....                                              | 14         |
| 2.2.2 Kupfer-Recycling .....                                                | 15         |
| 2.2.3 GuD-Kraftwerke .....                                                  | 15         |
| <b>3 Methodik.....</b>                                                      | <b>16</b>  |
| 3.1 Ausgewählte technologische Kriterien .....                              | 16         |
| 3.1.1 Spezifischer Energiebedarf .....                                      | 17         |
| 3.1.2 CO <sub>2</sub> -Abscheiderate .....                                  | 18         |
| 3.1.3 CO <sub>2</sub> -Reinheit .....                                       | 18         |
| 3.1.4 Technologischer Reifegrad.....                                        | 19         |
| 3.1.5 NO <sub>x</sub> -/SO <sub>x</sub> -Selektivität .....                 | 20         |
| 3.2 Datensammlung durch systematische Literaturrecherche .....              | 21         |
| 3.2.1 Suchstrategie und Datenbanken .....                                   | 22         |
| 3.2.2 Ein- & Ausschlusskriterien .....                                      | 22         |
| 3.2.3 Datenerfassung.....                                                   | 23         |

|          |                                                    |             |
|----------|----------------------------------------------------|-------------|
| 3.3      | <i>Gespräche mit Experten</i> .....                | 24          |
| 3.4      | <i>Multikriterielle Entscheidungsanalyse</i> ..... | 24          |
| 3.4.1    | Gewichtung der Kriterien mittels AHP .....         | 25          |
| 3.4.2    | Bewertung der Alternativen mittels TOPSIS.....     | 28          |
| 3.4.3    | Sensitivitätsanalyse .....                         | 29          |
| <b>4</b> | <b>Ergebnisse</b> .....                            | <b>30</b>   |
| 4.1      | <i>Ergebnisse der AHP-Analyse</i> .....            | 31          |
| 4.2      | <i>Ergebnisse der TOPSIS-Analyse</i> .....         | 36          |
| 4.3      | <i>Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse</i> .....   | 39          |
| <b>5</b> | <b>Diskussion</b> .....                            | <b>42</b>   |
| 5.1      | <i>Beantwortung der Forschungsfrage</i> .....      | 42          |
| 5.2      | <i>Vergleich zur Literatur</i> .....               | 43          |
| 5.3      | <i>Bedeutung der Sensitivitätsanalyse</i> .....    | 43          |
| 5.4      | <i>Limitationen der Arbeit</i> .....               | 44          |
| <b>6</b> | <b>Fazit und Ausblick für die Forschung</b> .....  | <b>46</b>   |
| 6.1      | <i>Fazit</i> .....                                 | 46          |
| 6.2      | <i>Ausblick für die Forschung</i> .....            | 46          |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b> .....                  | <b>VII</b>  |
|          | <b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....             | <b>XIII</b> |
|          | <b>Nutzung von KI</b> .....                        | <b>XIV</b>  |
|          | <b>Anhangsverzeichnis</b> .....                    | <b>XV</b>   |
|          | <b>Anhang</b> .....                                | <b>XVI</b>  |

## Gendererklärung

Aus Gründen der verbesserten Lesbarkeit wird in nachfolgender Bachelorarbeit auf die sprachliche Unterscheidung der männlichen, weiblichen und diversen Form verzichtet. Das verwendete generische Maskulinum gilt im Sinne der Gleichbehandlung, sofern nicht anders gekennzeichnet, gleichermaßen für alle Geschlechter. Wo immer möglich, wird eine geschlechtsneutrale Formulierung angestrebt.

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ABBILDUNG 1:</b> SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER DREI ABSCHIEDEVERFAHREN: (A) VORGESCHALTET, (B) NACHGESCHALTET UND (C) OXYFUEL ..... | 4  |
| <b>ABBILDUNG 2:</b> GRUNDLEGENDE TECHNOLOGIEN DER CO <sub>2</sub> -ABSCHIEDUNG .....                                                  | 5  |
| <b>ABBILDUNG 3:</b> ÜBERSICHT ÜBER TECHNOLOGISCHE, ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE VERGLEICHSKRITERIEN .....                              | 17 |
| <b>ABBILDUNG 4:</b> PROZESS DER SYSTEMATISCHEN LITERATURRECHERCHE .....                                                               | 23 |
| <b>ABBILDUNG 5:</b> DARSTELLUNG DER HIERARCHIE DES ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS .....                                                 | 26 |
| <b>ABBILDUNG 6:</b> NORMIERTE GEWICHTUNG DER KRITERIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINER VERBRENNUNG .....                    | 33 |
| <b>ABBILDUNG 7:</b> NORMIERTE GEWICHTUNG DER KRITERIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINEM PROZESS .....                        | 35 |
| <b>ABBILDUNG 8:</b> GEGENÜBERSTELLUNG DER NORMIERTEN GEWICHTUNG .....                                                                 | 36 |
| <b>ABBILDUNG 9:</b> RELATIVE NÄHE DER ABSCHIEDETECHNOLOGIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINER VERBRENNUNG .....               | 37 |
| <b>ABBILDUNG 10:</b> RELATIVE NÄHE DER ABSCHIEDETECHNOLOGIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINEN PROZESS.....                   | 39 |

# Tabellenverzeichnis

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>TABELLE 1:</b> TYPISCHE CO <sub>2</sub> -KONZENTRATIONEN IM ABGAS VERSCHIEDENER KRAFTWERKE UND INDUSTRIEPROZESSEN ..... | 14 |
| <b>TABELLE 2:</b> UMRECHNUNG DES TRL-WERTES IN EINE TOPSIS-BEWERTUNG NACH KIM, SALMAN UND LEONARD (2022) .....             | 20 |
| <b>TABELLE 3:</b> NO <sub>x</sub> -/SO <sub>x</sub> -SELEKTIVITÄT NACH KIM, SALMAN UND LEONARD (2022) .....                | 21 |
| <b>TABELLE 4:</b> ZUFÄLLIGER INDEX (RI) FÜR VERSCHIEDENE MATRIXGRÖßEN (SEPAHI ET AL., 2025).....                           | 27 |
| <b>TABELLE 5:</b> PAARWEISER VERGLEICH DER KRITERIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINER VERBRENNUNG .....           | 32 |
| <b>TABELLE 6:</b> PAARWEISER VERGLEICH DER KRITERIEN FÜR CO <sub>2</sub> -EMISSIONEN AUS EINEM PROZESS....                 | 34 |
| <b>TABELLE 7:</b> ERGEBNISSE DER SA FÜR CO <sub>2</sub> -ABSCHEIDUNG NACH EINER VERBRENNUNG.....                           | 40 |
| <b>TABELLE 8:</b> ERGEBNISSE DER SA FÜR CO <sub>2</sub> -ABSCHEIDUNG NACH EINEM PROZESS .....                              | 41 |

# Abkürzungsverzeichnis

|                       |                                                                       |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| AHP .....             | <i>Analytical Hierarchy Process</i>                                   |
| CO .....              | <i>Kohlenstoffmonoxid</i>                                             |
| CO <sub>2</sub> ..... | <i>Kohlenstoffdioxid</i>                                              |
| Gew.% .....           | <i>Massenanteil</i>                                                   |
| H <sub>2</sub> .....  | <i>Wasserstoff</i>                                                    |
| NO <sub>x</sub> ..... | <i>Stickoxide</i>                                                     |
| O <sub>2</sub> .....  | <i>Sauerstoff</i>                                                     |
| SA .....              | <i>Sensitivitätsanalyse</i>                                           |
| SLR .....             | <i>systematische Literaturrecherche</i>                               |
| SO <sub>x</sub> ..... | <i>Schwefeloxide, Schwefeloxide</i>                                   |
| TOPSIS .....          | <i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution</i> |
| Vol.-% .....          | <i>Volumenanteil</i>                                                  |

# 1 Einleitung

## 1.1 Relevanz des Themas

Die Begrenzung der globalen Erwärmung auf unter 2 °C erfordert neben dem Ausbau erneuerbarer Energien und Effizienzmaßnahmen auch die Reduktion industrieller CO<sub>2</sub>-Emissionen (Umweltbundesamt, 2025). Ein Teil dieser CO<sub>2</sub>-Emissionen gilt als schwer vermeidbar, da für bestimmte CO<sub>2</sub> emittierende Prozesse bislang keine technischen oder wirtschaftlichen etablierten Alternativen existieren. Hier können CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capturing and Storage, CCS) sowie CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Nutzung (Carbon Capturing and Utilization, CCU) einen Beitrag zur Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität leisten. Das Umweltbundesamt berücksichtigt CCS bereits in der Strategie für Deutschland zur Erreichung der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 und setzt bereits für das Jahr 2040 ein Ziel von 6 Mio. t. eingespeichertem CO<sub>2</sub> pro Jahr an (Umweltbundesamt, 2025).

Der Fokus von Forschung und Demonstrationsprojekten lag bisher vor allem auf Emissionsquellen mit hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas, wie beispielsweise der Zement- oder Stahlproduktion oder klassischen Kohlekraftwerken (Bahman et al., 2023; Wilberforce et al., 2019). Emissionsintensive Prozesse mit niedrigeren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas wurden dagegen nur selten untersucht. Typisch für diese Anwendungen sind Konzentrationsbereiche von etwa 1 bis 5 Vol.-% an CO<sub>2</sub>, wie sie bspw. in der Aluminiumproduktion oder im Kupferrecycling auftreten. In diesem Konzentrationsbereich existieren bislang nur wenige etablierte CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien, da technologische und wirtschaftliche Hindernisse bestehen. Dazu gehören insbesondere die geringe Abscheidetreibkraft durch niedrige CO<sub>2</sub>-Partialdrücke, die die Abscheidung erschwert, sowie hohe Energieverbräuche bei der Regeneration des Abscheidemediums (Kanniche et al., 2022).

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Vor dem in Kapitel 1.1 gezeigten Hintergrund gewinnt eine systematische und vergleichende Analyse von CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien für niedrig konzentrierte Industrieemissionen an Relevanz. Mithilfe einer Bewertung von technologischen Optionen wie Absorption, Adsorption, Membranverfahren und Kryogene Verfahren anhand verschiedener Kriterien, die in Kapitel 3.1 näher behandelt werden, lassen sich ihre Stärken und Schwächen für spezifische



Anwendungen darstellen. Eine multikriterielle Bewertung der technologischen Optionen kann Forschung und Industrie eine fundierte Orientierung bieten.

Dementsprechend soll in dieser Arbeit die Frage beantwortet werden, *welche nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien sich aus technologischer Sicht am besten für Industrieemissionen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentration im Bereich von 1 bis 5 Vol.-% eignen.*

### 1.3 Gang der Untersuchung

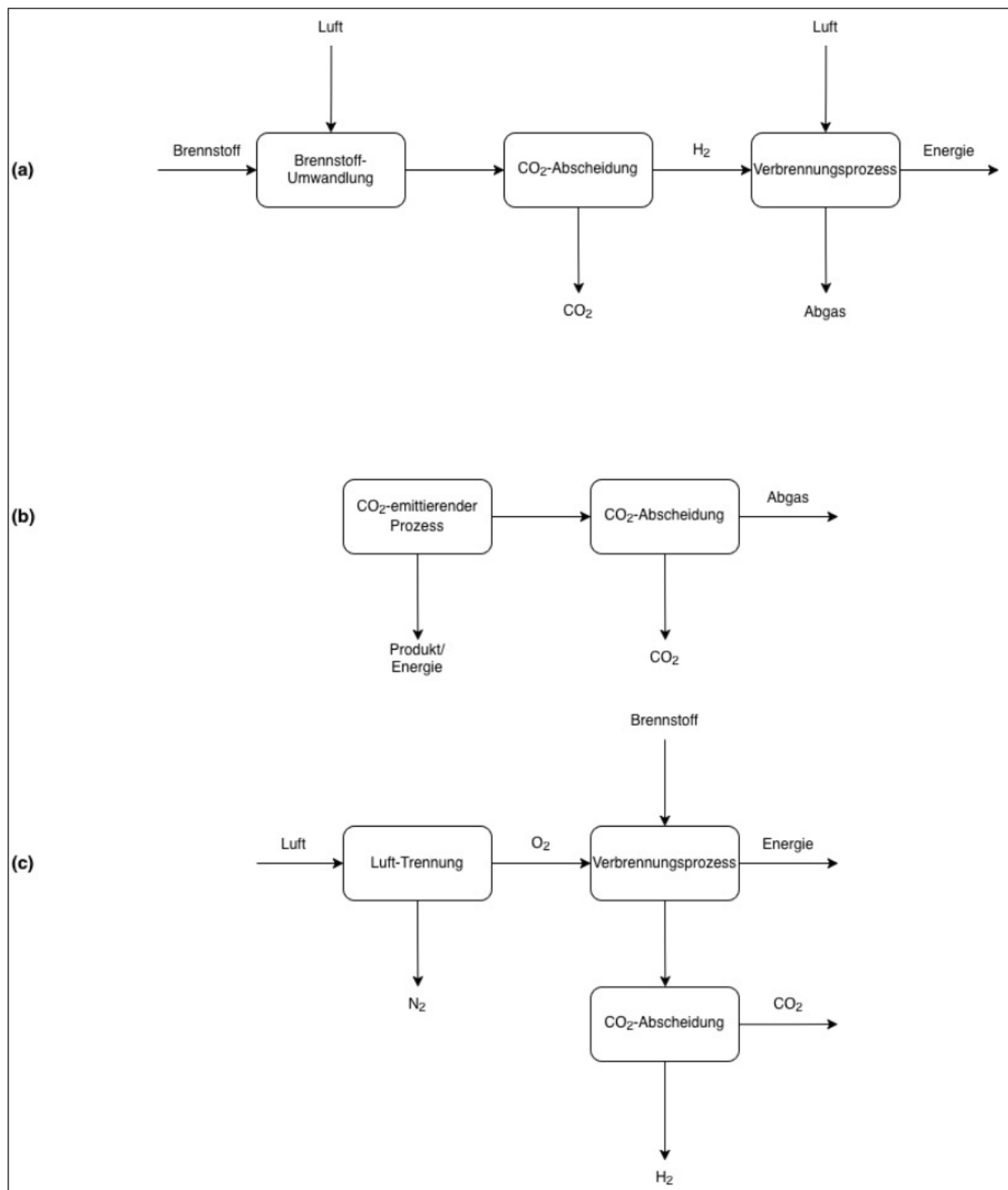
Im Anschluss an die Einleitung werden zunächst die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargelegt, um fundiertes Wissen zu vermitteln und somit die Beantwortung der Leitfrage der Arbeit zu ermöglichen. Einführend werden die Themen nachgeschaltete CO<sub>2</sub>-Abscheidung sowie Industrieemissionen mit niedriger CO<sub>2</sub>-Konzentration definiert und erläutert. Die Darstellung der Grundlagen stützt sich methodisch auf eine systematische Literaturrecherche. Auf Basis weiterführender Untersuchungen zu verschiedenen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien werden fünf Kriterien für einen technologischen Vergleich ausgewählt, die anschließend mithilfe der AHP-Methode gewichtet werden. Die Festlegung der AHP-Gewichtung erfolgt auf Grundlage von Expertengesprächen. Im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche werden für verschiedene CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien im Bereich niedriger CO<sub>2</sub>-Konzentrationen Daten zu den ausgewählten Kriterien erhoben. Diese Daten werden anschließend unter Einbezug der AHP-Gewichtung mit der TOPSIS-Methode ausgewertet und zu einer vergleichenden Bewertung zusammengeführt. Das abschließende Fazit fasst die zentralen Ergebnisse zusammen und versucht die Forschungsfrage zu beantworten.

## 2 Theoretischer Hintergrund

Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die theoretischen Grundlagen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit Fokus auf nachgeschalteten Abscheidetechnologien. Die wichtigsten technologischen Ansätze, darunter Absorption, Adsorption, Membran- und Kryogene Verfahren, werden systematisch hinsichtlich ihrer Funktionsweise, ihrer aktuellen Vor- und Nachteile sowie der typischerweise verwendeten Materialien beschrieben. Anschließend wird definiert, was unter Industrieemissionen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu verstehen ist und welche Probleme es in diesem Bereich gibt. Damit schafft das Kapitel 2 die theoretische Basis für die darauffolgende Bewertung verschiedener CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien.

### 2.1 Nachgeschaltete CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien

Bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung unterscheidet man zwischen drei Verfahren: Oxyfuel, vorgeschaltet und nachgeschaltet. Beim **Oxyfuel**-Verfahren findet die CO<sub>2</sub>-emittierende Verbrennung in einer sauerstoffreichen Atmosphäre statt, indem zuvor der Stickstoff aus der Luft abgeschieden wird (siehe (c) in Abbildung 1). Das resultierende Abgas besteht dadurch nahezu ausschließlich aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, wodurch eine einfache CO<sub>2</sub>-Abscheidung möglich wird. Bei der **vorgeschalteten** CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird der Brennstoff vor der eigentlichen Verbrennung in ein Gasgemisch (vor allem H<sub>2</sub> und CO) umgewandelt. Durch eine Wassergas-Shift-Reaktion entsteht daraus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> (siehe (a) in Abbildung 1). Anschließend kann das CO<sub>2</sub> durch adsorptive Druckverfahren abgetrennt werden. (Hekmatmehr et al., 2024) Bei dem **nachgeschalteten** Verfahren kommt die CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie nach dem CO<sub>2</sub>-emittierenden Prozess zum Einsatz (siehe (b) in Abbildung 1) (Madejski et al., 2022).



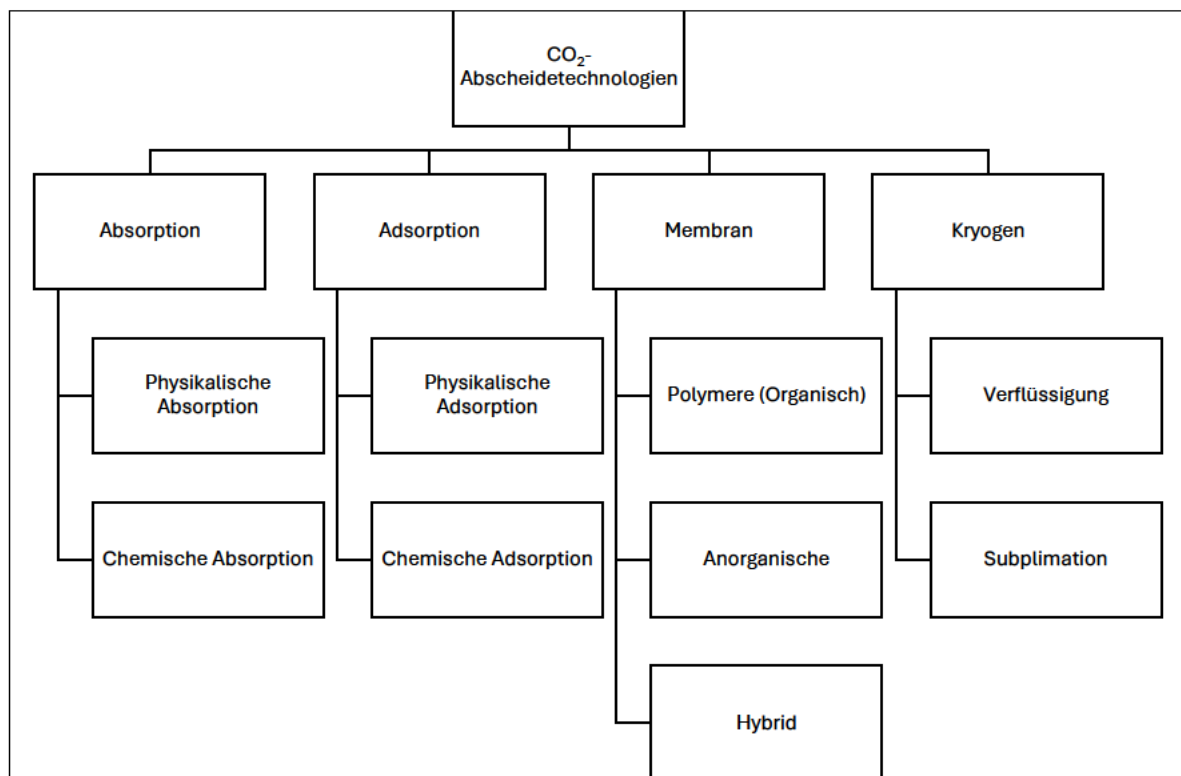
**Abbildung 1:** schematische Darstellung der drei Abscheideverfahren: (a) vorgeschaltet, (b) nachgeschaltet und (c) Oxyfuel

Quelle: eigene Abbildung

Diese Arbeit konzentriert sich auf die nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien, da diese aufgrund ihrer Integrierbarkeit in bereits bestehende Industrieanlagen und den Einsatz bei nicht Verbrennungsprozessen die bevorzugten Verfahren sind (Allangawi et al., 2023). In der Literatur wird für die nachgeschaltete CO<sub>2</sub>-Abscheidung meist der Begriff „Post-Combustion“

verwendet, also die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einem Verbrennungsprozess. Dies kann zu Verwirrung führen, da mit diesem Begriff teils auch Prozesse bezeichnet werden, bei denen das CO<sub>2</sub> nicht aus einer Verbrennung stammt, bspw. aus der Aluminiumelektrolyse. Im Folgenden werden alle nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren vereinfacht als CO<sub>2</sub>-Abscheidung bezeichnet, unabhängig davon, ob die Emissionen aus einem Verbrennungsprozess oder einem anderen CO<sub>2</sub>-emittierenden Prozess stammen.

Für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung gibt es verschiedene Technologien, die sich in die vier Kategorien Absorption, Adsorption, Membranverfahren und Kryogen einteilen lassen (Karayil et al., 2024). In Abbildung 2 sind die verschiedenen Ausführungen der Technologien dargestellt.



**Abbildung 2:** Grundlegende Technologien der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Quelle: eigene Abbildung nach (Karayil et al., 2024)

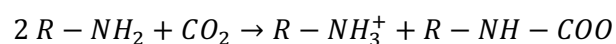
### 2.1.1 Absorption

Die Absorption ist eine der bewährtesten Methoden, um CO<sub>2</sub> aus gasförmigen Stoffströmen abzuscheiden. Es gibt bereits lange Erfahrung mit dem Einsatz dieser Abscheidetechnologie. Dabei wird zwischen chemischer und physikalischer Absorption unterschieden. (Yu et al., 2012)

Bei niedrigen Konzentrationen in einem Gasgemisch verhält sich CO<sub>2</sub> thermodynamisch und kinetisch inert. Dies führt bei der **chemischen Absorption** zu Herausforderungen (Heldebrant

and Kothandaraman, 2019). Deshalb wird die Eigenschaft genutzt, dass CO<sub>2</sub> ein saures Gas ist, da es in Wasser eine Säure bildet (Kohlensäure), wodurch es von nicht sauren Gasen wie Sauerstoff und Stickstoff getrennt werden kann (ebd. 2019). Für die chemische Absorption stehen verschiedene Absorptionsmittel zur Verfügung: Amin-basierte, gemischte Absorptionsmittel und ionische Flüssigkeiten (Allangawi et al., 2023). Darüber hinaus eignet sich auch das Calcium-Looping-Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Cormos, 2015). Die genannten Absorptionsmittel werden im Folgenden näher erläutert.

**Amin-basierte Absorptionsmittel** sind derzeit die am weitesten erforschten und entwickelten Materialien für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung (Allangawi et al., 2023). Die Hauptreaktion zur Bindung von CO<sub>2</sub> lässt sich für primäre Amine folgendermaßen darstellen (Zhai, 2019):



Jedoch haben Amin-basierte Absorptionsmittel den Nachteil, dass diese teilweise volatil und toxisch sind, was zu Umweltbedenken und Verlusten der Amine während des Betriebs führen kann (Gouedard et al., 2012). Neben den damit verbundenen Umweltproblemen können diese Eigenschaften hohe Austauschkosten verursachen. Zudem liegt der Flammpunkt häufig nahe der Temperatur, bei der das CO<sub>2</sub> durch Erhitzen aus der Lösung getrennt wird (Stripping), was zu weiteren Sicherheitsrisiken führt. (Heldebrant and Kothandaraman, 2019)

Die Einbindung von Alkoholen in die Amin-Struktur führt zu Alkanoaminen, die verbesserte Eigenschaften aufweisen. Neben einem höheren Dampfdruck und Flammpunkt, verfügen diese außerdem über eine bessere Wasserlöslichkeit. Bekannte Alkanoamine sind bspw. Monoethanolamin (MEA) und Diethanolamin (DEA). Aufgrund der verbesserten Eigenschaften werden diese Verbindungen bevorzugt als Absorptionsmittel für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung eingesetzt. (Heldebrant and Kothandaraman, 2019) Zu berücksichtigen ist jedoch, dass Alkanoamine als Lösemittel zur Degradation neigen. Dies sorgt für einen Lösemittelverlust und die Bildung von Abfallprodukten, die teilweise negative Auswirkungen auf die Umwelt haben können. Art und Ausmaß der Degradation werden durch andere Gaskomponenten wie O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> beeinflusst. (Gouedard et al., 2012) Ein weiterer Nachteil besteht in dem hohen thermischen Energiebedarf für die Trennung des Carbamat-Ions und somit für die Regeneration des Lösungsmittels. Folglich ist die Wärmebereitstellung für die Regeneration bei der chemischen Absorption der energetisch aufwendigste Schritt im Gesamtprozess. (Zhai, 2019)

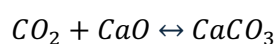
Das klassische Verfahren der chemischen CO<sub>2</sub>-Absorption mit Amin-basierten Absorptionsmitteln umfasst vereinfacht drei Schritte, die Absorption, Regeneration und anschließend das Lösemittel Recycling:

1. **CO<sub>2</sub>-Absorption:** Das Abgas wird auf 40 bis 60 °C gekühlt und von unten in einen Festbettreaktor geführt. Dort wird es mit einer von oben eingeführten CO<sub>2</sub>-armen Lösung in Kontakt gebracht. Die Lösung absorbiert während der Kontaktphase das CO<sub>2</sub> aus dem Abgas. (Yu et al., 2012)
2. **CO<sub>2</sub>-Regeneration:** Die CO<sub>2</sub>-reiche Lösung wird in einen Stripper geleitet, wo diese mittels Wasserdampf auf 120 bis 140 °C erhitzt wird (Heldebrant and Kothandaraman, 2019; Yu et al., 2012). Durch die Erhitzung wird das CO<sub>2</sub> aus der Lösung gelöst. Der Wasserdampf wird anschließend kondensiert, um das CO<sub>2</sub> davon zu trennen (Heldebrant and Kothandaraman, 2019).
3. **Lösungsmittelrecycling:** Die CO<sub>2</sub>-arme Lösung wird gekühlt und zurück zum Absorber gepumpt. (Heldebrant and Kothandaraman, 2019).

Das Absorptionspotential von Amin-basierten Absorptionsmitteln kann durch das **Mischen** verschiedener Komponenten weiter verbessert werden. In den vergangenen Jahren hat dieses Forschungsfeld zunehmende Aufmerksamkeit erlangt. Verschiedene Studien haben nachweisen können, dass ein gezieltes Mischen die CO<sub>2</sub>-Absorptionskapazität steigern kann. Dennoch bestehen in diesem Feld weiterhin Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf die hohen Kosten der Absorptionsmittel, den thermischen Energiebedarf und deren korrosiven Eigenschaften. (Allangawi et al., 2023)

**Ionische Flüssigkeiten** (Ionic Liquids) sind Flüssigkeiten, die Anionen und Kationen enthalten. Die Anionen sind in der Regel organisch, die Kationen dagegen anorganisch. Man unterscheidet zwischen zwei Kategorien. Die Raumtemperatur-ionische Flüssigkeit (room-temperature ionic liquid, RTIL) bindet das CO<sub>2</sub> physikalisch, während die aufgabenspezifische ionische Flüssigkeit (task-specific ionic liquid, TSIL) das CO<sub>2</sub> physikalisch und chemisch bindet. Die Vorteile dieses Absorptionsmittels sind, dass es viele verschiedene Ionen-Kombinationen gibt und die ionischen Flüssigkeiten somit gut an unterschiedliche Kriterien angepasst werden können. Außerdem verfügen diese über einen geringen Dampfdruck, was zu einem geringen Verlust bzw. einer geringen Volatilität führt. Allerdings sind die Kosten im Vergleich zu Alkaloaminen um ein Vielfaches höher und der Forschungsstand ist vergleichsweise unterentwickelt. (Allangawi et al., 2023)

Das **Calcium-Looping** ist ein Verfahren der chemischen Absorption. Dabei reagiert Calciumoxid (CaO) bei 500–600 °C mit CO<sub>2</sub> zu Calciumcarbonat (Cormos, 2015). Dieser Prozess findet in einem zirkulierenden Wirbelschichtreaktor statt und verläuft nach folgender Reaktionsgleichung: (Cormos, 2015)



Das dabei entstehende Gas-Feststoff-System wird in einem Zyklon getrennt. Anschließend wird das gereinigte Abgas an die Atmosphäre abgegeben. Der Feststoff wird in einen weiteren zirkulierenden Wirbelschichtreaktor geführt, in dem die Reaktion bei Temperaturen von 800–1000 °C umgekehrt wird. (Cormos, 2015)



Da diese Reaktion hoch endotherm ist und folglich viel Wärme benötigt, wird die Reaktionswärme durch eine Oxyfuel-Verbrennung von Erdgas bereitgestellt. Das CO<sub>2</sub> aus der Oxyfuel-Verbrennung wird zusammen mit dem aus der Abscheidung stammenden CO<sub>2</sub> abgeführt. Anschließend wird das Calciumoxid wieder an den Anfang des Calcium-Looping-Prozesses befördert. (Cormos, 2015)

Die **physikalische Absorption** dagegen beruht auf reversiblen, physikalischen Wechselwirkungen zwischen dem Absorbens und dem CO<sub>2</sub>. Die Effizienz dieses Verfahrens hängt im Wesentlichen von der Löslichkeit des CO<sub>2</sub> im Lösemittel ab, die durch das Henrysche Gesetz beschrieben wird. Demnach hat vor allem der CO<sub>2</sub>-Partialdruck im Gasgemisch einen hohen Einfluss auf die Löslichkeit, während die Temperatur eine geringere Rolle spielt. Physikalische Absorbenten erzielen die höchsten Absorptionsraten bei hohem Druck und niedriger Temperatur. Die Regeneration findet bei geringem Druck und hoher Temperatur statt. Typische physikalische Absorbentien sind Rectisol, Selexol, Fluor und Purisol. (Soo et al., 2024)

In der Praxis wird die physikalische Absorption vor allem in Prozessen mit hohem CO<sub>2</sub>-Partialdruck eingesetzt, wie beispielsweise in der Erdgasaufbereitung, da dies hohe Abscheideeffizienzen ermöglicht (Yu et al., 2012). Aufgrund dieser Anforderung kommt das Verfahren hauptsächlich in der vorgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidung zum Einsatz, da die Abgasströme dort höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und -Partialdrücke aufweisen (Allangawi et al., 2023).

### 2.1.2 Adsorption

Die CO<sub>2</sub>-Adsorption kann über physikalische oder chemische Mechanismen erfolgen (Webley and Danaci, 2019). Im Folgenden wird der grundlegende Prozess sowie typische Materialien für die CO<sub>2</sub>-Adsorption beschrieben:

Die **physikalische Adsorption** basiert auf intermolekularen Kräften zwischen den CO<sub>2</sub>-Molekülen und der Oberfläche des Adsorbens. Dazu zählen beispielsweise Van-der-Waals-Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen oder Ion-Dipol-Wechselwirkungen. Da bei der physikalischen Adsorption keine neuen chemischen Bindungen entstehen, wird sie als

nicht-destruktiver Prozess klassifiziert. Die Regeneration des Adsorptionsmittels erfordert daher einen geringeren Energieaufwand. Für die physikalische CO<sub>2</sub>-Adsorption gibt es fünf Materialtypen, die üblicherweise in Betracht gezogen werden: Aktivkohle, Kohlenstoff-Nanomaterialien, synthetische Zeolite, natürliche Zeolite und Metall-Organische Gerüste. (Webley and Danaci, 2019)

**Aktivkohle** ist eines der am weitverbreitetsten physikalischen Adsorbentien. Diese kann aus verschiedenen Ausgangsstoffen wie Kohle, Holz oder anderer Biomasse gewonnen werden. Je nach Herstellungsverfahren erfolgt eine saure oder basische Aktivierung. Dadurch lassen sich die Oberflächenchemie und somit die Adsorptionseigenschaften gezielt beeinflussen. Die Selektivität von Aktivkohle gegenüber CO<sub>2</sub> hängt von den funktionellen Gruppen an ihrer Oberfläche ab. Häufig werden stickstoffhaltige Gruppen eingebracht, beispielsweise durch die Behandlung mit Ammoniak (NH<sub>3</sub>) oder organischen Aminen (zum Beispiel R-NH<sub>2</sub>). Nachteile von Aktivkohle sind eine begrenzte CO<sub>2</sub>-Selektivität und CO<sub>2</sub>-Adsorptionskapazität sowie eine Leistungsver schlechterung durch SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub>. Demgegenüber steht, dass Aktivkohle aufgrund der hohen Verfügbarkeit kostengünstiger ist. Außerdem besitzt diese eine gute thermische Stabilität und lässt sich vergleichsweise einfach regenerieren. (Raganati et al., 2021)

**Kohlenstoff-Nanomaterialien** wie beispielsweise Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen stellen eine Weiterentwicklung physikalischer Adsorbentien dar. Ihre nanostrukturierten Oberflächen ermöglichen eine gute Porenverteilung, was zu höheren Adsorptionsraten führt. Darüber hinaus zeichnen sich diese Materialien durch eine vergleichsweise große spezifische Oberfläche, hohe Adsorptionskapazitäten sowie physikalische und chemische Stabilität aus. In der Regel weisen Kohlenstoff-Nanomaterialien auch eine gute Toleranz gegenüber Feuchtigkeit auf. Nachteilig ist jedoch, dass ihre Synthese oft komplex und somit teuer ist. Zudem ist die Selektivität gegenüber CO<sub>2</sub> begrenzt, insbesondere bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken und in Gegenwart von anderen Gasbestandteilen, wie SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub>. (Raganati et al., 2021)

**Synthetische Zeolithe** lassen sich durch bestimmte Syntheseprozesse in ihrer Porengröße und ihren Oberflächeneigenschaften anpassen. Diese verfügen über eine hohe spezifische Oberfläche und Porosität, was zu hohen Adsorptionskapazitäten führt. Außerdem sind sie thermisch stabil. Demgegenüber stehen jedoch hohe Kosten für die Synthese sowie eine geringe Toleranz gegenüber Verunreinigungen und Feuchtigkeit im Abgas. (Raganati et al., 2021)

Im Vergleich zu synthetischen Zeolithen bieten **natürliche Zeolithe** den Vorteil einer hohen Verfügbarkeit und niedrigeren Kosten. Allerdings weisen diese in der Anwendung häufig eine



geringe Produktreinheit und Trennleistung auf. Aufgrund ihrer ungleichmäßigen Struktur sind diese außerdem weniger selektiv und haben eine geringere Adsorptionskapazität. (Raganati et al., 2021)

**Metall-Organische Gerüste** (MOFs) verfügen über hochporöse Strukturen mit anpassbaren Porengrößen. Diese ermöglichen deshalb eine hohe Adsorptionskapazität, sind jedoch teuer in der Herstellung. Zudem sind MOFs oft feuchtigkeitsempfindlich und thermisch instabil. (Raganati et al., 2021)

Bei der **chemischen Adsorption** werden stabile chemische Bindungen zwischen CO<sub>2</sub>-Molekülen und funktionellen Gruppen auf der Oberfläche des Adsorbens gebildet. Hierbei kommen häufig Materialien mit Amingruppen oder Metalloxiden zum Einsatz. Aufgrund der chemischen Bindungen können Regenerationstemperaturen von 300 bis 400 °C erforderlich sein. (Webley and Danaci, 2019)

**Amin-funktionalisierte Adsorbentien** wurden mit dem Ziel entwickelt, die zentralen Nachteile physikalischer Adsorbentien zu überwinden. Dabei sollen die geringen Adsorptionskapazitäten und Selektivitäten bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Partialdrücken verbessert werden. Durch das Einbinden von primären, sekundären oder tertiären Aminen in porösen Trägermaterialien (z. B. Silika oder Aktivkohle) bilden sich chemische Verbindungen zwischen dem CO<sub>2</sub> und der Amin-Gruppe. Aufgrund der chemischen Bindung weisen Adsorptionsmittel mit Amin-Gruppen eine verbesserte Selektivität und Adsorptionskapazität auf. Es gibt jedoch Einschränkungen: So können die Poren des Trägermaterials durch eine zu hohe Beladung mit Aminen blockiert werden, was zu Einschränkungen des Massentransports führen kann. Zudem ist durch die Amindegradation die thermische und oxidative Stabilität begrenzt. (Raganati et al., 2021)

Zur Regeneration von Adsorbentien kommen aktuell vor allem temperatur- und druckbasierte Verfahren zum Einsatz. Am häufigsten werden die Pressure Swing Adsorption (PSA), die Temperature Swing Adsorption (TSA) und hybride Verfahren, die beide Prinzipien kombinieren, verwendet. Des Weiteren gibt es die Vacuum Swing Adsorption (VSA), welches ein spezielles PSA Verfahren darstellt. (Lai et al., 2021)

Beim **PSA-Verfahren** erfolgt die Adsorption bei hohem Druck. Das CO<sub>2</sub>-haltige Gas strömt durch das Adsorbens, bis dieses seinen Gleichgewichtszustand erreicht hat. Anschließend wird der Druck auf Atmosphärendruck abgesenkt, um das Adsorbens zu regenerieren. (Lai et al., 2021) Ein Problem des PSA-Verfahrens ist die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Selektivität bei hohen Drücken. Eine Alternative ist das **VSA-Verfahren**. Hier findet die Adsorption unter

Atmosphärendruck statt, während die Desorption/Regeneration im Vakuum erfolgt. (Raganati et al., 2021)

Beim **TSA-Verfahren** findet die Adsorption bei 50–60 °C statt. Die Regeneration selbst erfolgt durch die Erwärmung auf 150–200 °C (Raganati et al., 2021). Nach der Freisetzung des CO<sub>2</sub> wird das System abgekühlt, um es für den nächsten Adsorptionszyklus vorzubereiten (Lai et al., 2021). Die Desorption des CO<sub>2</sub> und die Erwärmung erfolgen durch die Spülung des Adsorbats mit erhitztem Gas. Bei der konventionellen TSA im industriellen Einsatz wird häufig Stickstoff als Spülgas verwendet. Dies würde das gewünschte CO<sub>2</sub>-Produkt jedoch verdünnen bzw. verunreinigen. Als Alternative für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung kann Wasserdampf verwendet werden, da sich dieser durch Kondensation einfach vom CO<sub>2</sub> trennen lässt. Für die Kondensation ist jedoch ein weiterer Prozessschritt nötig. Zudem weisen viele Adsorbentien, vor allem Physiosorbentien, durch Wasser eine verschlechterte CO<sub>2</sub>-Selektivität auf. Bereits abgeschiedenes CO<sub>2</sub> kann als Spülgas verwendet werden, wodurch sich jedoch die Triebkraft der Desorption verschlechtert, was wiederum zu höheren Regenerationstemperaturen führt. (Raganati et al., 2021)

Heutzutage werden häufig hybride Verfahren wie die Vacuum Temperature Swing Adsorption (VTSA) getestet (Lai et al., 2021). Bei VTSA sorgt zunächst eine Druckabsenkung für die Desorption, gefolgt von einer Temperaturerhöhung, um die Regenerationsprozesse zu verbessern (Lai et al., 2021) Hierdurch wird versucht die Vorteile, der unterschiedlichen Verfahren, die zuvor erläutert wurden, zu kombinieren (Yu et al., 2012).

### 2.1.3 Membran

Membranen für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung dienen als selektive Barrieren, die unter anderem CO<sub>2</sub>-Moleküle bevorzugt durchlassen können, während andere Gase weitgehend zurückgehalten werden. Der Trennprozess beruht auf dem Konzentrations- und Partialdruckunterschied über der Membran. Dieser wirkt als treibende Kraft für die Diffusion der Gasmoleküle. (Gkotsis et al., 2023)

Die Leistungsfähigkeit einer Membran für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird maßgeblich durch zwei Faktoren bestimmt: die CO<sub>2</sub>-Selektivität und die CO<sub>2</sub>-Permeabilität. Die CO<sub>2</sub>-Selektivität gibt an, inwieweit eine Membran CO<sub>2</sub> gegenüber anderen Gasen bevorzugt durchlässt. Eine höhere Selektivität führt zu einer höheren erreichbaren Produktreinheit. Die CO<sub>2</sub>-Permeabilität dagegen kennzeichnet, wie schnell CO<sub>2</sub> durch die Membran diffundiert. Eine höhere Permeabilität ermöglicht eine geringere Membranfläche bei der angestrebten Abscheiderate (Fu et al., 2024)

Für die Nutzung in der CO<sub>2</sub>-Abscheidung wurden bereits zahlreiche Membranmaterialien untersucht. Wichtige Kriterien für die Auslegung sind dabei die Trennleistung, die Materialkosten, die mechanische und thermische Stabilität sowie die chemische Materialbeständigkeit. Es wird zwischen drei Haupttypen von Membranmaterialien unterschieden: Polymermembranen, anorganischen Membranen und gemischte Matrix-Membranen.

**Polymermembranen** basieren auf dem Solution-Diffusion-Mechanismus. Das bedeutet, dass das CO<sub>2</sub> zunächst in der Membran gelöst und anschließend auf der anderen Seite der Membran diffundiert wird. Diese zeichnen sich durch ihre gute mechanische Stabilität, geringe Herstellungskosten und einfache Verarbeitung aus. Ihr größter Nachteil ist jedoch der Kompromiss zwischen Selektivität und Permeabilität, da eine hohe CO<sub>2</sub>-Permeabilität zu einer niedrigeren CO<sub>2</sub>-Selektivität führt. (Gkotsis et al., 2023)

**Anorganische Membranen** besitzen definierte Porenstrukturen und sind chemisch sowie thermisch stabil. Ihr Einsatz wird jedoch durch hohe Kosten, komplexe Herstellungsverfahren und die Sprödigkeit einiger Materialien begrenzt. (Fu et al., 2024)

Bei **gemischten Matrix-Membranen** (Mixed Matrix Membranes) werden die Vorteile beider Materialtypen kombiniert, indem anorganische Membranen als Füllstoffe in eine Polymermembran eingebettet werden. Diese Membranen bieten das Potenzial für verbesserte Trennleistungen bei gleichzeitig einfacherem Herstellungsprozess. Allerdings sind diese noch vergleichsweise wenig erforscht. (Fu et al., 2024)

Die genannten Membranmaterialien können in verschiedenen Konfigurationen wie bspw. Hohlfasermembran, Flachbettmembran oder spiralförmiger Membran vorliegen.

**Hohlfasermembranen** bestehen aus Hunderttausenden feinen Fasern, die zu Bündeln zusammengefasst werden. Diese Struktur bietet eine hohe Oberfläche pro Volumeneinheit und ermöglicht somit einen effizienten Gastransfer. Allerdings können hohe Druckverluste und die Anlagerung von Partikeln oder Flüssigkeiten an den Fasern die Leistung mindern. (Gkotsis et al., 2023)

**Flachbettmembranen** bestehen aus gestapelten Membranplatten in einem Rahmendesign. Dies ermöglicht eine einfache Wartung und den unkomplizierten Austausch der Membran. Außerdem haben sie eine niedrigere Packungsdichte, was zu einer größeren Membranfläche führt. (Gkotsis et al., 2023)

Mit **spiralförmigen Membranen** werden die Vorteile beider oben beschriebenen Systeme vereint. Dabei werden Flachbettmodule spiralförmig um ein Sammelrohr gewickelt, sodass

eine kompakte Bauweise mit einer vergleichsweise großen Oberfläche entsteht. (Gkotsis et al., 2023)

#### 2.1.4 Kryogen

Bei der kryogenen CO<sub>2</sub>-Abscheidung wird das Abgas gezielt abgekühlt, um die unterschiedlichen Tau- und Gefrierpunkte der gasförmigen Bestandteile auszunutzen. Durch diese Abkühlung kommt es zu einer Phasenänderung, die eine Trennung des CO<sub>2</sub> von den übrigen Gasen ermöglicht. Grundsätzlich lassen sich zwei Verfahren unterscheiden: die Verflüssigungs- und die Sublimationsabscheidung.

Bei der **Verflüssigungsabscheidung** wird das Abgas schrittweise gekühlt und gleichzeitig komprimiert, bis das CO<sub>2</sub> vom gasförmigen in den flüssigen Zustand übergeht. Die entstandene Flüssigkeit lässt sich anschließend von den restlichen Gasen trennen. Das auf diese Weise gewonnene CO<sub>2</sub> weist eine hohe Reinheit auf und eignet sich gut für den anschließenden Transport. Allerdings erfordert dieses Verfahren einen hohen Energieeinsatz und aufwendige Prozessbedingungen. (Shen et al., 2022)

Bei der **Sublimationsabscheidung** hingegen wird der direkte Übergang von CO<sub>2</sub> aus der Gasphase in den festen Zustand genutzt. Im Vergleich zur Verflüssigung wird hierbei weniger Energie benötigt. Unter optimalen Bedingungen können CO<sub>2</sub>-Reinheiten von bis zu 99,9 Vol.-% erreicht werden. Das feste CO<sub>2</sub> lässt sich aufgrund seiner hohen Dichte leicht speichern und transportieren. (Shen et al., 2022)

## 2.2 Industrieemissionen mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen

Die Tabelle 1 zeigt typische CO<sub>2</sub>-Abgaskonzentrationen in den Abgasen bei verschiedenen Prozessen. In dieser Arbeit wird sich vorwiegend auf den Bereich zwischen 1 und 5 Vol.-% CO<sub>2</sub>-Konzentration fokussiert. In diesen Bereich fallen Gas-und-Dampf-Kombikraftwerke (GuD-Kraftwerke), die Aluminiumproduktion mittels Elektrolyse und das Recycling von Kupfer. Wie in der Einleitung festgelegt, soll eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei fossilen Energieträgern wie bei einem GuD-Kraftwerk nicht in Betracht gezogen werden. Da es jedoch viele Veröffentlichungen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung an GuD-Kraftwerken gibt, sind auch diese Daten in die Arbeit eingeflossen.

**Tabelle 1:** Typische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Abgas verschiedener Kraftwerke und Industrieprozessen

| Abgas-Quelle                | CO <sub>2</sub> -Konz. [Vol.-%] | Quelle                                   |
|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| GuD-Kraftwerk               | 3 - 4                           | (Wang and Song, 2020)                    |
| Kohlekraftwerk              | 12 - 14                         | (Wang and Song, 2020)                    |
| Wasserstoffproduktion       | 15 - 20                         | (Wang and Song, 2020)                    |
| Stahlproduktion im Hochofen | 20 - 27                         | (Wang and Song, 2020)                    |
| Aluminiumelektrolyse        | 1                               | (Kanniche et al., 2022)                  |
| Zementproduktion            | 14 - 33                         | (Wang and Song, 2020)                    |
| Müllverbrennung             | 10 - 14                         | (Otgonbayar and Mazzotti, 2024)          |
| Kupferrecycling             | 1,7                             | Expertenaussage Aurubis (siehe Anhang 2) |

Im Folgenden werden die CO<sub>2</sub>-emittierenden Prozesse der oben erwähnten Industrien sowie die aktuell bekannten Probleme bei der Einbindung der CO<sub>2</sub>-Abscheidung beschrieben.

### 2.2.1 Aluminiumproduktion

Bei der Aluminiumproduktion reagiert der Sauerstoff aus dem zugeführten Aluminiumhydroxid in einer Elektrolysezelle mit einer Kohlenstoffanode, wodurch CO<sub>2</sub> freigesetzt wird. Dieser Prozess wird als Hall-Heroult-Verfahren bezeichnet und es gibt momentan keine kommerziell verfügbare Alternative dazu. Obwohl an inerten Anoden geforscht wird, die während der Elektrolyse kein CO<sub>2</sub> freisetzen würden, sind diese im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung technologisch weniger ausgereift. (Kanniche et al., 2022)

Für den Einsatz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei der Aluminiumelektrolyse gibt es einige Probleme, die in der Untersuchung von Kanniche et al. (2022) erörtert wurden. Geringe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von teilweise unter einem Prozent sorgen für einen hohen Energieverbrauch und damit verbundene hohe Kosten. Aufgrund hoher O<sub>2</sub>-Konzentrationen sowie des Vorkommens von Fluorwasserstoff (HF), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und Staub besteht außerdem

eine erhöhte Gefahr der Lösemittel-Degradation bei der Abscheidung. Darüber hinaus benötigt eine CO<sub>2</sub>-Abscheideanlage Platz, der nicht immer verfügbar ist. (Kanniche et al., 2022)

Das Problem der niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde bereits untersucht. Um diese von ca. 1 Vol.-% auf 3 bis 10 Vol.-% zu erhöhen, gibt es zwei Optionen. Die erste Option ist eine Reduzierung der Ventilationsrate an der Elektrolysezelle, wodurch das CO<sub>2</sub> weniger verdünnt würde. Die zweite Option ist ein sekundärer Abgasstrom, der näher an der Kohlenstoffanode abgesaugt wird. (Kanniche et al., 2022)

### 2.2.2 Kupfer-Recycling

Bei der Aufbereitung von Kupferschrott wird CO<sub>2</sub> vor allem während des Einschmelzens freigesetzt, da der Kupfer-Schlackestrom häufig noch kunststoffhaltige Bestandteile (z. B. Kabelisolierungen) enthält, die thermisch zersetzt werden. Die Problematik der Umsetzung einer CO<sub>2</sub>-Abscheidung in Kupferrecyclinganlagen ist mit den geringen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verbunden. Dies hat zur Folge, dass die Abscheideanlagen nach dem momentanen Stand der Technik einen hohen Platzbedarf haben und CAPEX-intensiv sind (Anhang 2: Experteninterview Aurubis).

### 2.2.3 GuD-Kraftwerke

Bei einem GuD-Kraftwerk ist die Verbrennung von Erdgas der Prozess, bei dem CO<sub>2</sub> emittiert wird. Aufgrund der Verdünnung des Abgases mit Umgebungsluft liegt die Konzentration hier bei ca. 4 Vol.-%. (Siegelman et al., 2019) Wie bereits erwähnt, wird die CO<sub>2</sub>-Abscheidung für GuD-Kraftwerke in dieser Arbeit nicht näher behandelt, da es für fossile Energieträger Alternativen in Form erneuerbarer Energien gibt. Es gibt jedoch weltweit eine große Menge an Veröffentlichungen zu diesem Thema, weshalb andere Prozesse mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von diesem Forschungsstand profitieren sollten.

GuD-Kraftwerke haben Probleme bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die beispielsweise auch bei der Aluminiumproduktion auftreten. Da das Abgas O<sub>2</sub>-Konzentrationen von ca. 12 Vol.-% aufweist, besteht auch hier eine Gefahr der oxidativen Degradation. Des Weiteren gibt es Probleme mit der Degradation von Lösemitteln durch das Vorkommen von NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>. Eine CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie muss somit die folgenden Anforderungen erfüllen: Sie muss oxidativ und thermisch stabil sein, bei einem geringen CO<sub>2</sub>-Partialdruck stark genug binden, gegenüber Feuchtigkeit tolerant sein und bei einem Kontakt mit NO<sub>x</sub> oder SO<sub>x</sub> stabil bleiben. (Siegelman et al., 2019)

Auch für GuD-Kraftwerke gibt es Vorschläge, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas zu erhöhen. Eine Möglichkeit ist, dass dem Verbrennungsprozess anstelle von Umgebungsluft ein Teil des

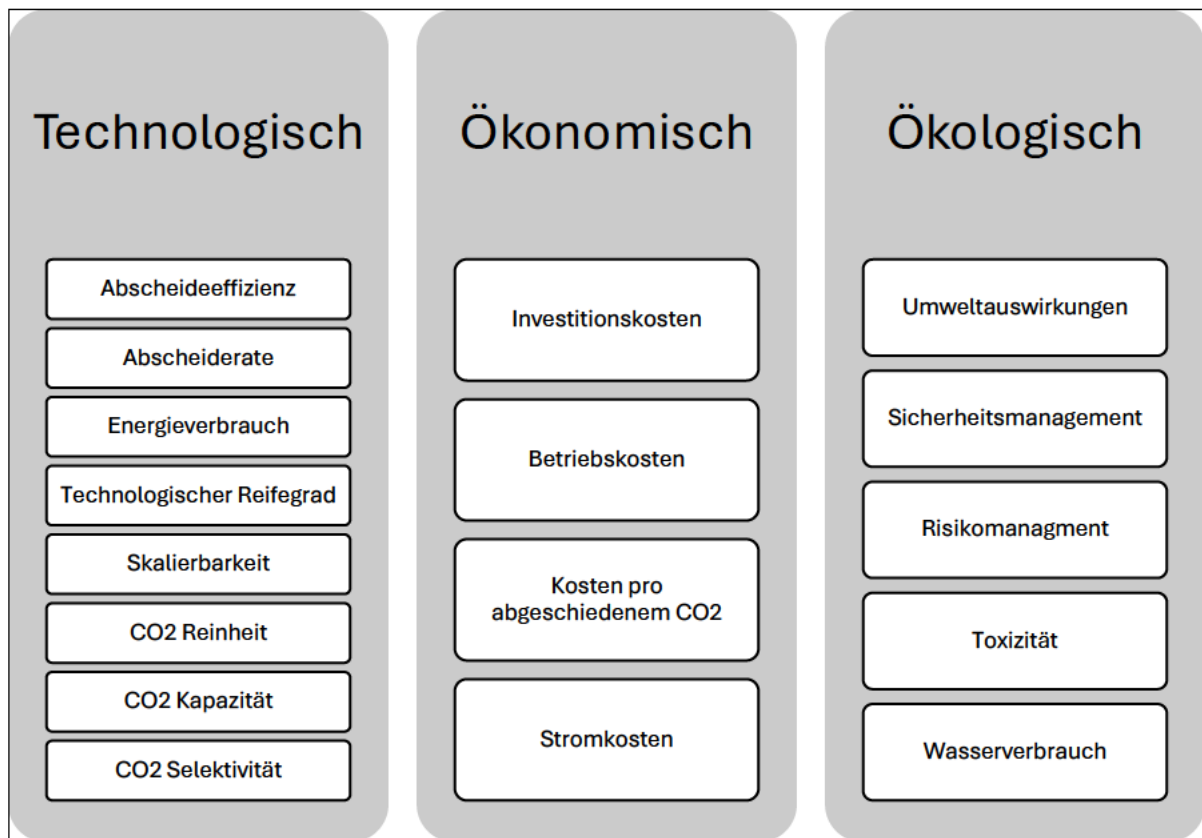
Abgases zugeführt wird, um die Verdünnung zu verringern. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von CO<sub>2</sub>-selektiven Membranen, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration vor der Abscheidung zu erhöhen. (Siegelman et al., 2019)

### 3 Methodik

Um die verschiedenen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien für den Einsatz bei niedrig konzentrierten Industrieemissionen bewerten zu können, wurden mehrere Methoden kombiniert. Zunächst wurden Kriterien ausgewählt, die eine technologische Bewertung ermöglichen. Mithilfe dieser Kriterien wurde eine systematische Literaturrecherche erstellt, um Daten über die Kriterien zu den verschiedenen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien zu sammeln. Im Laufe der Arbeit wurden außerdem Gespräche mit Experten aus relevanten Industrien geführt, um eine Gewichtung der Kriterien mittels AHP zu entwickeln. Mithilfe der gewichteten Kriterien und der Daten aus der systematischen Literaturrecherche wurde eine Rangfolge der untersuchten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien mittels TOPSIS berechnet.

#### 3.1 Ausgewählte technologische Kriterien

Die technologischen Kriterien, die zur Bewertung verschiedener CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien herangezogen wurden, wurden so ausgewählt, dass ein Vergleich zwischen den vier Verfahren (Absorption, Adsorption, Membran, Kryogen) möglich ist. Das bedeutet, dass jedes Kriterium auf alle betrachteten Technologien anwendbar sein muss. Als Grundlage für die Auswahl dienten die multikriteriellen Entscheidungsanalysen von Sepahi, Ilinca und Rousse (2025) und Davarpanah (2024), in denen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien anhand unterschiedlicher Bewertungskriterien untersucht wurden. Die Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der Vergleichskriterien, die den technologischen Aspekt um ökonomische und ökologische Dimensionen erweitern.



**Abbildung 3:** Übersicht über technologische, ökonomische und ökologische Vergleichskriterien

Quelle: eigene Abbildung nach (Davarpanah, 2024; Sepahi, Ilinca und Rousse, 2025)

Da sich die vorliegende Arbeit ausschließlich auf den technologischen Vergleich konzentriert, wurden nur diese Kriterien berücksichtigt. Um die paarweise Gewichtung der Kriterien mittels AHP übersichtlich zu gestalten, wurden fünf technologische Kriterien aus den genannten Studien übernommen, die im Folgenden beschrieben werden. Die Auswahl der Kriterien wurde durch die Frage 7 der Expertengespräche gestützt (siehe Anhang 1).

### 3.1.1 Spezifischer Energiebedarf

Der spezifische Energiebedarf pro Tonne abgeschiedenen CO<sub>2</sub> einer ausgewählten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie setzt sich bei jeder Technologie anders zusammen. Die thermische Energie der Aminwäsche beispielsweise setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen (Layding and Caram, 2024):

- Reaktionswärme: Die Energie zur Umkehrung der chemischen Bindung zwischen CO<sub>2</sub> und dem Absorptionsmittel.
- Fühlbare Wärme (Sensible Heat): Energie zum Aufheizen des Lösungsmittels von der Absorptionstemperatur (auf die Desorptionstemperatur).



- Verdampfungswärme (Vaporization Heat): Energie für die Verdampfung des Wassers im Lösungsmittel während der Regeneration.

In der nachfolgenden Untersuchung wird der spezifische Energiebedarf als Kriterium getrennt nach thermischen und elektrischen Anteil betrachtet. Der spezifische thermische Energiebedarf gibt die Menge an Wärmeenergie an, die pro abgeschiedener Tonne CO<sub>2</sub> erforderlich ist, und wird in GJ pro Tonne CO<sub>2</sub> erfasst. (Layding and Caram, 2024). Der spezifische elektrische Energiebedarf gibt die benötigte Menge elektrischer Energie an und wird in Kilowattstunden (kWh) pro Tonne CO<sub>2</sub> angegeben. (Hugh Barlow et al., 2025).

In den Publikationen der systematischen Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.2) wurden für die untersuchten Absorptions- und Adsorptionstechnologien keine Angaben zum spezifischen elektrischen Energiebedarf gemacht. Deshalb wurden im Folgenden Annahmen auf Basis weiterer Publikationen getroffen.

Für chemische Absorptionsverfahren mit Aminen wurde ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von 40 kWh/t CO<sub>2</sub> ermittelt. Dieser Wert basiert auf einer Untersuchung einer Aminwäsche in einer Müllverbrennungsanlage (Bisinella et al., 2022). Damit liegt dieser Wert zwischen den Angaben von 15 bis 35 kWh/t CO<sub>2</sub> aus der Untersuchung von Acampora et al. (2025) und den 52 kWh/t CO<sub>2</sub> von Gong et al. (2025). In diesem Wert sind der elektrische Energiebedarf der Rezirkulationspumpen des Absorptionsmittels, der Ventilatoren für den Gastransport und der Zirkulation von Kühlwasser enthalten.

Für das Calcium-Looping-Verfahren wurde ein spezifischer elektrischer Energiebedarf von 120 kWh/t CO<sub>2</sub> angenommen, basierend auf der Anwendung in einem Kohlekraftwerk (Arias et al., 2020).

Für das adsorbierende TSA-Verfahren wurden 121 kWh/t CO<sub>2</sub> angesetzt, die bei der Anwendung in einem Kohlekraftwerk anfallen (Plaza et al., 2017).

### 3.1.2 CO<sub>2</sub>-Abscheiderate

Die CO<sub>2</sub>-Abscheiderate gibt den Quotienten zwischen der Menge an aufgefangenem CO<sub>2</sub> und der an der Quelle generierten Menge an CO<sub>2</sub> an und wird in Prozent angegeben (Normann et al., 2017).

### 3.1.3 CO<sub>2</sub>-Reinheit

Die CO<sub>2</sub>-Reinheit ist definiert als der Prozentsatz (oder relative Anteil) des reinen CO<sub>2</sub> in einem abgeschiedenen CO<sub>2</sub>-Strom, ausgedrückt als Volumen- oder Massenprozentanteil nach Abzug aller Verunreinigungen (Porter et al., 2015).

Die Reinheit ist für den späteren Transport und die Speicherung von CO<sub>2</sub> sowie für eine mögliche Weiterverwendung wichtig. So darf beispielsweise der Feuchtigkeitsgehalt nicht zu hoch sein, um Korrosionen in einer Pipeline zu verhindern. Störgase wie Stickstoff können zudem das Komprimieren und Verflüssigen behindern. (Zhai, 2019)

Aus dem norwegischen Northern Lights Projekt, bei dem CO<sub>2</sub> in der Nordsee gespeichert wird, können beispielhafte Spezifikationen für einen Transport und Speicherung von CO<sub>2</sub> entnommen werden. Für flüssiges CO<sub>2</sub> wird ein Minimum von 99,81 mol% CO<sub>2</sub> vorhergesehen. (Northern Lights, 2024)

### 3.1.4 Technologischer Reifegrad

Die qualitative Skala des Technologischen Reifegrades (TRL) wurde in den 1990er Jahren von der NASA entwickelt, um die Reife einer Technologie zu messen und anzugeben. Die Skala umfasst die Entwicklung von der Skizze bis zur vollständigen kommerziellen Umsetzung. (Horizon 2020, 2020)

In dieser Arbeit wird die TRL-Skala der „Research & Development“-Programme der International Energy Agency Greenhouse Gases (IEAGHG) benutzt, wie sie von Rana und Andino (2025) beschrieben wird. Ein TRL von 1 bis 3 kennzeichnet die Erforschungsphase, in der die zugrundeliegenden Prinzipien identifiziert und erste grundlegende Experimente durchgeführt werden. Die Entwicklungsphase (TRL 4 bis 6) umfasst die Umsetzung von Pilotanlagen sowie weitere Tests im Labor in relevanten Einsatzumgebungen. In der letzten Phase (TRL 7 bis 9) wird die Technologie unter einsatznahen bzw. realen Betriebsbedingungen erprobt, bis sie bei einem TRL von 9 als kommerziell verfügbar gilt. (Rana and Andino, 2025)

Für die TOPSIS-Bewertung wurden die TRL-Werte von 1 bis 9 in eine Bewertungsskala von 0 bis 3 umgewandelt. Grundlage dafür war die Bewertungsskala von Kim, Salman und Leonard (2022). Die Umwandlung war notwendig, da die TRL-Angaben in den untersuchten Publikationen meist Bereiche statt feste Werte angegeben wurden. Für die TOPSIS-Auswertung werden jedoch feste Werte benötigt. Die Umrechnung ist in Tabelle 2 dargestellt.

**Tabelle 2:** Umrechnung des TRL-Wertes in eine TOPSIS-Bewertung nach Kim, Salman und Leonard (2022)

| TRL   | TOPSIS-Bewertung |
|-------|------------------|
| < 4   | 0                |
| 5 – 6 | 1                |
| 7 – 8 | 2                |
| 9     | 3                |

Da die Publikationen aus der systematischen Literaturrecherche (Kapitel 3.2) keine Angaben zu den TRLs der behandelten Technologien enthielten, mussten hierfür Annahmen auf Basis anderer Quellen getroffen werden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Absorptionsverfahren erreichen häufig ein TRL von 7 bis 8 (Bukar and Asif, 2024). Einige Amin-basierte Absorptionsverfahren werden schon mit TRLs von 8 bis 9 bewertet, während das Calcium-Looping in aktuellen Studien bei einem TRL von 6 bis 7 verortet wird (Hugh Barlow et al., 2025; Zheng et al., 2025). Die Publikation von Sepahi (2025) konkretisiert die Einstufung weiter, indem MEA-basierte Verfahren mit TRL 9, Calcium-Looping mit TRL 7, AMP mit TRL 7, MDEA mit TRL 8 sowie PZ in Kombination mit AMP mit TRL 7 eingeordnet werden.

Adsorptionsverfahren werden insgesamt als weniger weit entwickelt eingeschätzt und erreichen nach derzeitigen Stand einen maximalen TRL von 6 (Bukar and Asif, 2024). In dem State-of-the-Art Bericht des Global CCS Institutes verschiedener Abscheidetechnologien lassen sich TSA-Verfahren mit TRL von 5 bis 6 finden, dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die zugrunde liegenden Informationen von den jeweiligen Unternehmen selbst bereitgestellt werden (Hugh Barlow et al., 2025).

Membranverfahren befinden sich in einem ähnlichen Entwicklungsstadium wie die Adsorptionsverfahren und werden mit einem TRL von 6 maximal angegeben (Bukar and Asif, 2024). In der Publikation von Sepahi et al. (2025) werden die Membranverfahren einheitlich mit einem TRL von 6 bewertet.

### 3.1.5 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität

Die NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität einer CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie gibt an, ob der Prozess durch die Anwesenheit von NO<sub>x</sub> oder SO<sub>x</sub> gestört wird bzw. ob das Medium der Abscheidetechnologie

dadurch degradiert (Kim et al., 2022). Die Skala von Kim, Salman und Leonard (2022) ermöglicht eine numerische Darstellung der Selektivität (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität nach Kim, Salman und Leonard (2022)

| Definition                                                                               | Wert |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Vorreinigung wird benötigt                                                               | 0    |
| SO <sub>x</sub> & NO <sub>x</sub> degradieren den Prozess                                | 1    |
| Vorreinigung nicht zwanghaft nötig, aber möglicherweise für eine bessere Produktqualität | 2    |
| Vorreinigung wird nicht benötigt                                                         | 3    |

Die Publikationen aus der systematischen Literaturrecherche (siehe Kapitel 3.2) enthielten keine Informationen über die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität der behandelten Technologien. Folglich mussten auch hierfür Annahmen anhand anderer Publikationen getroffen werden, welche im Folgenden beschrieben werden.

Wang et al. (2015) beschreiben für aminbasierte Abscheidetechnologien, dass bei der Reaktion jeder Aminlösung mit sauren Gasen (einschließlich NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>) hitzestabile Salze und andere Degradationsprodukte entstehen, die den Prozess langfristig schädigen. Dementsprechend erhalten diese Abscheidetechnologien einen Score von 0.

Park et al. (2025) weisen für den Membran-Einsatz in GuD-Kraftwerken darauf hin, dass SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> die Membranleistung stark beeinträchtigen können und Vorreinigungsstufen erforderlich sind, was ebenso zu einem Score von 0 führt.

Nach Afandi et al. (2024) degradiert SO<sub>2</sub> den Calcium-Looping-Prozess durch die irreversible Bildung von CaSO<sub>4</sub>, wobei die auftretenden Probleme mit NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> im Allgemeinen nicht so stark wie für aminbasierte- oder Membran-Abscheidetechnologien beschrieben werden. Daher erhält das Calcium-Looping ein Score von 1.

### 3.2 Datensammlung durch systematische Literaturrecherche

Die Datensammlung für diese Arbeit erfolgte durch eine systematische Literaturrecherche (SLR). Das Ziel besteht darin, Daten zu den relevanten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien hinsichtlich der ausgewählten Kriterien im untersuchten CO<sub>2</sub>-Konzentrationsbereich zu finden.

### 3.2.1 Suchstrategie und Datenbanken

Als Datenbank wurde „ScienceDirect“ genutzt, da diese eine große Anzahl an Veröffentlichungen zum Thema CO<sub>2</sub>-Abscheidung aufweist und über die HAW kostenlos zugänglich ist.

Die Suchstrategie basiert auf vordefinierten Suchbegriffen und -kombinationen, die die Art des Verfahrens, die Anwendungskontexte sowie Bewertungskriterien abdecken. Die Oberthemen wurden mittels der booleschen Operation „AND“ verbunden, die Unterthemen mittels „OR“. Insgesamt wurden vier Suchstrings angewendet:

1. "carbon capture" AND "Post-Combustion" AND "techno-economic assessment" AND ("aluminium" OR "copper" OR „NGCC“) AND ("energy requirement")
2. "carbon capture" AND "techno-economic" AND „NGCC“ AND "energy requirement"
3. "carbon capture" AND „NGCC“ AND "energy requirement" AND "capture rate" AND "purity"
4. "carbon capture" AND „Aluminium“ AND "energy requirement" AND "capture rate" AND "purity"

Um den aktuellen Stand der Technik abzubilden, wurde ergänzend ein zeitlicher Suchrahmen festgelegt. Hier wurde der Zeitraum von 2015 bis 2025 gewählt, um den Stand der letzten zehn Jahre darzustellen.

### 3.2.2 Ein- & Ausschlusskriterien

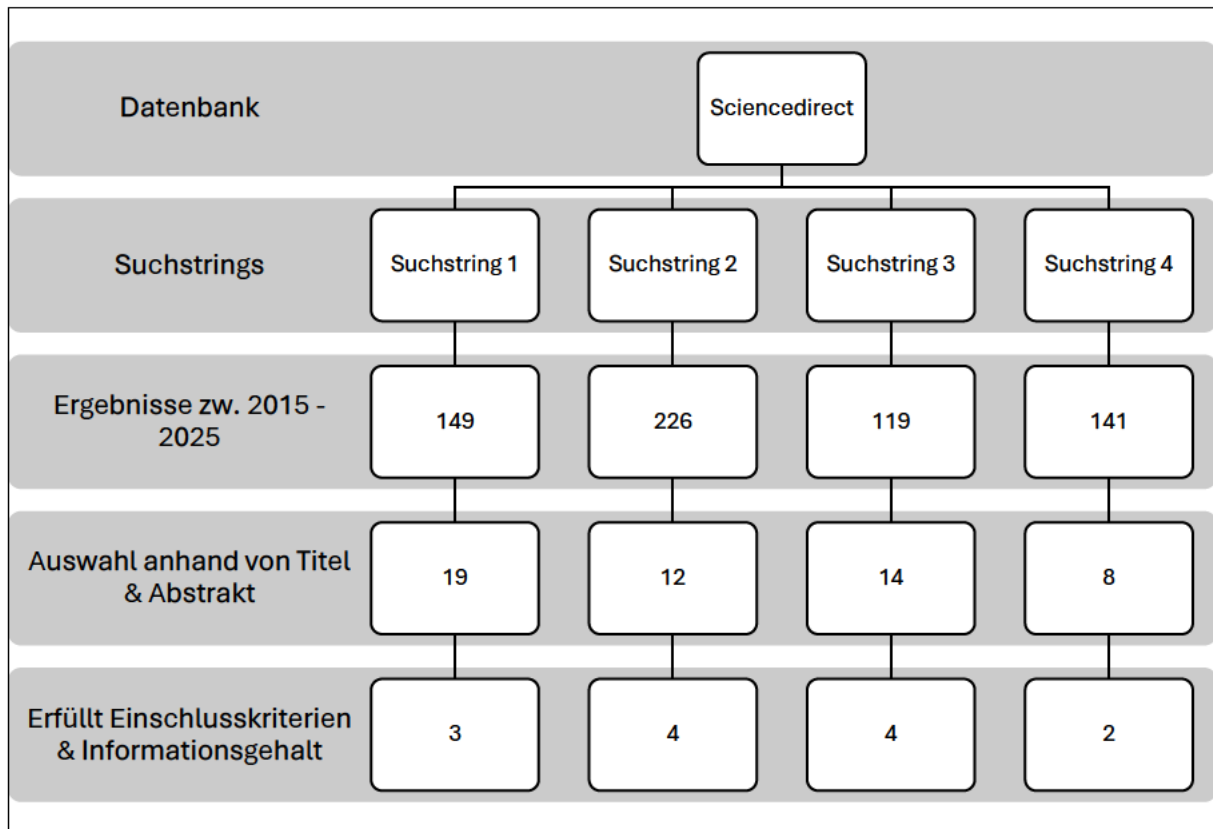
Die Literatursauswahl erfolgte anhand definierter Ein- und Ausschlusskriterien. Eingeschlossen wurden insbesondere begutachtete Fachartikel, Übersichtsarbeiten und techno-ökonomische Studien, die konkrete CO<sub>2</sub>-Abscheidungsverfahren an stationären Punktquellen behandeln und quantitative Kenngrößen bereitstellen.

Ausgeschlossen wurden hingegen Arbeiten, die keine hinreichend detaillierten Prozess- oder Bewertungsdaten enthalten, rein konzeptionelle Beiträge sowie Studien, die sich ausschließlich mit dem Transport, der Speicherung oder der Nutzung von CO<sub>2</sub> befassen, ohne das Abscheidungsverfahren selbst zu analysieren. Außerdem wurden Oxyfuel und Pre-Combustion CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien ausgeschlossen, sowie CO<sub>2</sub>-Konzentrationsbereiche außerhalb des 1 bis 5 Vol.-% Bereiches.

Der Auswahlprozess erfolgte schrittweise: Zunächst wurden Titel und Abstract gescreent, anschließend die Volltexte der vorselektierten Publikationen.

### 3.2.3 Datenerfassung

Aus den in Kapitel 3.2.1 erwähnten Suchstrings ergaben sich insgesamt 635 Suchergebnisse. Mit den Ein- und Ausschlusskriterien und der Screening Methode aus Kapitel 3.2.2 wurden 13 Artikel ausgewählt aus denen Daten entnommen werden konnten (siehe Abbildung 4). Den ausgewählten Artikeln wurde ein weiterer Artikel von Cormos (2015) über Calcium Looping hinzugefügt, welcher bei der Recherche der theoretischen Grundlagen entdeckt wurde.



**Abbildung 4:** Prozess der systematischen Literaturrecherche

Quelle: eigene Abbildung

Für alle in die Auswertung einbezogenen Artikel wurde eine Datenerfassung vorgenommen. Hierzu wurde eine Tabelle in Excel angelegt, in der die Informationen systematisch erfasst wurden, darunter die betrachtete Abscheidetechnologie, der CO<sub>2</sub>-Konzentrationsbereich im Abgas und die Daten für die Bewertungskriterien. Die Tabelle ist dem Anhang 6 zu entnehmen.

Die durch die systematische Literaturrecherche gefundenen Publikationen enthielten meist nur Informationen zum spezifischen Energiebedarf, zur CO<sub>2</sub>-Abscheiderate und zur CO<sub>2</sub>-Reinheit. Für den technologischen Reifegrad sowie die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität der einzelnen Technologien wurde eine weiterführende Literaturrecherche durchgeführt.

### 3.3 Gespräche mit Experten

Um die industrielle Relevanz in die Arbeit einzubeziehen, wurden Gespräche mit Fachexperten aus den ausgewählten Industrien geführt. Diese Gespräche orientierten sich am im Anhang 1 dargestellten Frageschema. Die Auswertung erfolgte stichpunktartig, wobei die Ergebnisse anschließend von den jeweiligen Expertinnen und Experten auf ihre Richtigkeit überprüft wurden. Ziel der Gespräche war es unter anderem herauszufinden, ob die fünf betrachteten Kriterien die technologischen Herausforderungen der Industrie angemessen widerspiegeln oder ob weitere, bislang übersehene Kriterien relevant sein könnten. Im Anschluss an die Gespräche wurden die Expertinnen und Experten gebeten, den paarweisen Vergleich der Kriterien im Rahmen der AHP-Methode durchzuführen.

Als Interviewpartner wurden Experten der Unternehmen Indaver, Trimet, Aurubis sowie der Stadtreinigung Hamburg einbezogen. Aurubis betreibt in Lünen eine Anlage zum Kupferrecycling. Trimet produziert in Hamburg Aluminium im Elektrolyseverfahren. Die Stadtreinigung Hamburg betreibt zwei, künftig drei, Müllverbrennungsanlagen in Hamburg. Indaver betreibt eine Sondermüllverbrennungsanlage in Hamburg.

Für die AHP-Bewertung der Verbrennungsemissionen wurde die Auswertung des Unternehmens Indaver herangezogen (siehe Anhang 7), sowie das Experteninterview mit Indaver (siehe Anhang 5), Aurubis (siehe Anhang 2) und der Stadtreinigung (siehe Anhang 4). Die AHP-Auswertung der Prozessemissionen wurde auf Grundlage des Gesprächs mit Trimet (siehe Anhang 3) entwickelt, wobei zusätzlich die Auswertung des paarweisen Vergleichs von Indaver berücksichtigt wurde.

### 3.4 Multikriterielle Entscheidungsanalyse

Die multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDM – Multi-Criteria Decision Making) ist eine Gruppe analytischer Methoden, die Entscheidungsprozesse unterstützen, bei denen mehrere Kriterien berücksichtigt werden müssen. Das Ziel dieser Ansätze besteht darin, Alternativen systematisch zu analysieren, zu bewerten und nachvollziehbar zu priorisieren. Die Alternativen sind in dieser Arbeit die verschiedenen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien. Zu den verbreiteten MCDM-Methoden zählen Outranking-Methoden wie AHP und TOPSIS. Outranking-Methoden vergleichen Alternativen und Kriterien paarweise und ermitteln daraus eine Hierarchie. Dies wird in dieser Arbeit genutzt, um ein Ranking der geeignetsten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien aufzustellen. Im Folgenden werden die AHP- und TOPSIS-Methode vorgestellt. (Davarpanah, 2024)

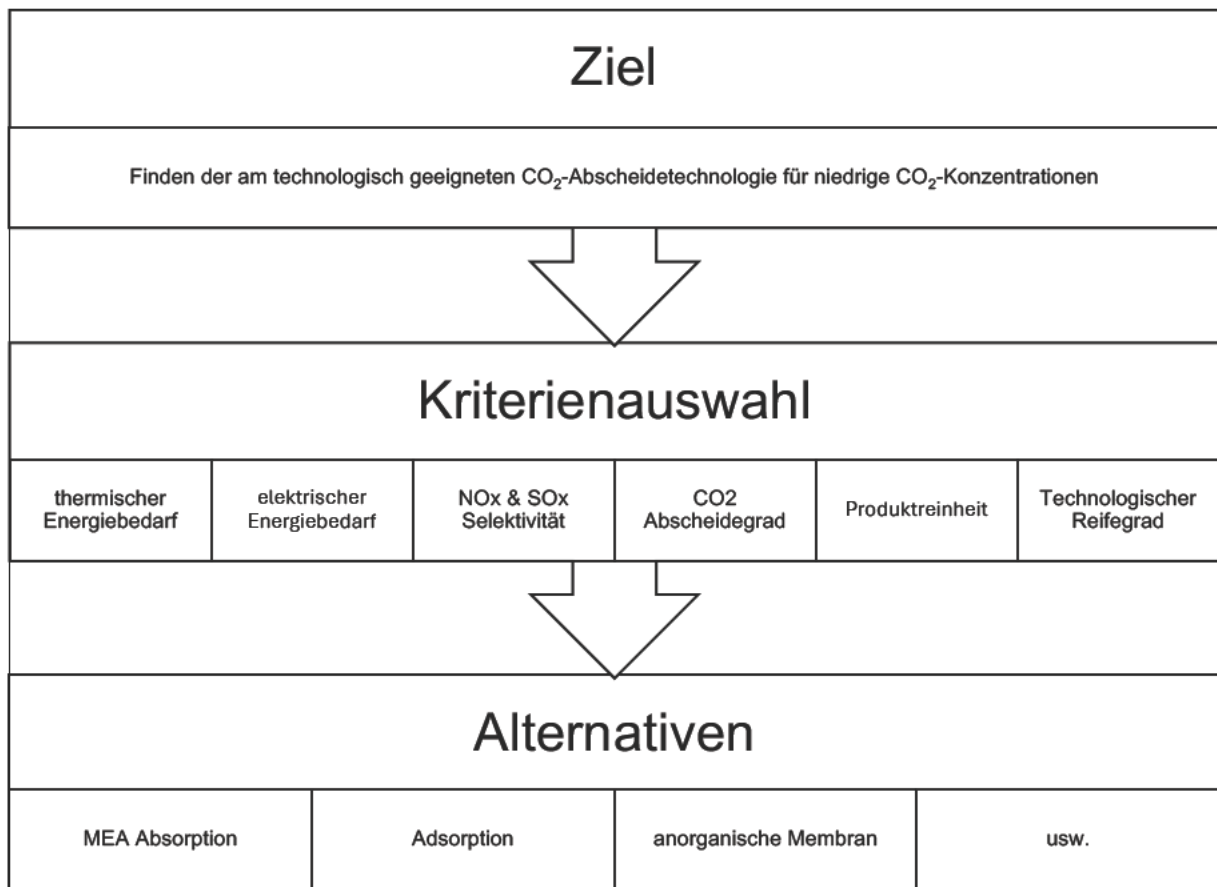
### 3.4.1 Gewichtung der Kriterien mittels AHP

Der AHP ist eine von Thomas Saaty in den 1970er Jahren entwickelte Methode der multikriteriellen Entscheidungsfindung, die bei Problemen mit mehreren Kriterien und Alternativen eingesetzt wird. Das Ziel ist es, Entscheidungen nachvollziehbar zu strukturieren und die beste Alternative systematisch herauszufinden. (Saaty, 1990)

Der AHP besteht aus mehreren Schritten (Saaty, 1990):

1. Dabei wird zuerst das Entscheidungsproblem in eine Hierarchie gegliedert. Ganz oben steht das Ziel, darunter befinden sich die Bewertungskriterien, worauf die möglichen Alternativen folgen (siehe Abbildung 5).
2. Danach erfolgen paarweise Vergleiche zwischen den Kriterien und später zwischen den Alternativen hinsichtlich jedes Kriteriums. Die Vergleiche werden in eine Matrix eingetragen und numerisch, hinsichtlich ihrer paarweisen Priorität, auf einer Skala von eins bis neun bewertet.
3. Aus der Vergleichsmatrix wird, wie nachfolgend beschrieben, mittels mathematischer Verfahren Prioritätsgewichte für die Kriterien und Alternativen berechnet. Eine Konsistenzprüfung stellt sicher, dass die Bewertungen logisch und widerspruchsfrei sind.
4. Zuletzt werden die einzelnen Gewichte zusammengefasst, sodass jede Alternative eine Gewichtung erhält, die der Gesamtbewertung im Entscheidungsprozess entspricht.





**Abbildung 5:** Darstellung der Hierarchie des Analytical Hierarchy Process

Quelle: eigene Abbildung

Das Tool bietet gleich mehrere Vorteile: Es verwendet eine hierarchische Struktur, um ein Entscheidungsproblem systematisch darzustellen und komplexe Sachverhalte übersichtlich aufzubereiten. Zudem stellt es eine Funktion zur Konsistenzprüfung bereit, mit der die Vertrauenswürdigkeit der vergebenen Gewichtungen rechnerisch überprüft werden kann. Auf diese Weise werden subjektive Meinungen in objektive numerische Werte überführt, was einen transparenten und nachvollziehbaren Vergleich der Entscheidungsalternativen ermöglicht. Im Folgenden wird das Vorgehen der AHP-Methode schrittweise erläutert (Sepahi et al., 2025):

**Schritt 1:** Als erstes wird eine Vergleichsmatrix  $W$  erstellt, wo jedes Element  $w_{ij}$  die relative Wichtigkeit vom Kriterium  $i$  im Vergleich zum Kriterium  $j$  darstellt. Dies basiert auf der Saaty-Skala von 1 bis 9. Die Matrix sieht folgendermaßen aus:

$$W = (w_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{pmatrix}$$

Die Matrix ist reziprok, weswegen  $w_{ij} = \frac{1}{w_{ji}}$ , und  $w_{ii} = 1$  für alle  $i$  gilt.

**Schritt 2:** Der geometrische Mittelwert  $GM_i$  für die  $i$ te Zeile wird folgendermaßen berechnet:

$$GM_i = \left( \prod_{j=1}^n w_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}$$

**Schritt 3:** Die normierte Gewichtung  $a_i$  für das Kriterium  $i$  ergibt sich aus:

$$a_i = \frac{GM_i}{\sum_{k=1}^n GM_k}$$

**Schritt 4:** Der gewichtete Summenvektor wird folgendermaßen berechnet:

$$W \cdot a = \text{gewichteter Summenvektor}$$

Hieraus ergibt sich der Konsistenzvektor, in dem der gewichtete Summenvektor durch die normierten Gewichtungen geteilt wird.

**Schritt 5:** Der Eigenvektor  $\lambda_{max}$  wird aus dem Mittelwert des Konsistenzvektors berechnet:

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Konsistenzvektor}_i$$

**Schritt 6:** Der Konsistenzindex ( $CI$ ) wird aus der folgenden Formel berechnet:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

**Schritt 7:** Das Konsistenzverhältnis ( $CR$ ) berechnet sich folgendermaßen:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Dabei ist  $RI$  der zufällige Index welcher abhängig von der Matrixgröße gewählt wird (siehe Tabelle 4).

**Tabelle 4:** zufälliger Index ( $RI$ ) für verschiedene Matrixgrößen (Sepahi et al., 2025)

| Matrixgröße | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-------------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| $RI$        | 0 | 0 | 0,58 | 0,90 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 |

Ein Konsistenzindex ( $CR$ ) von weniger als 0,10 weist auf eine akzeptable Konsistenz hin. Falls der Konsistenzindex höher als 0,10 ist sollte der Vergleich der Kriterien überarbeitet werden

(Saaty, 1990). Sapahi et al. (2025) beschreiben, dass die Ausführung des paarweisen Vergleiches der Kriterien durch eine einzelne Person zu Vorurteilen (engl. „bias“) führen kann. Deshalb werden für die Kriteriengewichtung Expertenmeinungen herangezogen.

Die Berechnung der AHP-Kriteriengewichtung erfolgt durch das MATLAB-Skript im Anhang 8.

### 3.4.2 Bewertung der Alternativen mittels TOPSIS

Die TOPSIS-Methode ist ein Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsanalyse, das von Hwang und Yoon (1981) eingeführt wurde. Ziel ist es, eine Menge von Alternativen so zu bewerten, dass ein Ranking vom besten bis zum schlechtesten Entscheidungskandidat entsteht. Die beste Alternative hat hierbei den geringsten Abstand zur positiven idealen Lösung und gleichzeitig den größten Abstand zur negativ idealen Lösung. (Pandey et al., 2023)

Im Folgenden wird die Schrittweise Durchführung der TOPSIS-Methode nach Penday, Komal und Dincer (2023) beschrieben:

**Schritt 1:** Zu Beginn erfolgt die Auswahl von relevanten Alternativen und Kriterien, welche im Kapitel 3.4.3 beschrieben werden.

**Schritt 2:** Anschließend wird die Menge von  $m$ -Alternativen  $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  betrachtet, die anhand einer Menge von  $n$ -Kriterien  $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  bewertet werden. Erweitert wird dies durch eine Einbindung des Gewichtungsvektors  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  für jedes Kriterium  $n$ , aus dem Ergebnis der AHP-Methode. Die zugrunde liegenden Entscheidungsinformationen werden in einer Entscheidungsmatrix  $A = [a_{ij}]_{m \times n}$  abgebildet, wobei  $a_{ij}$  den aus den Daten extrahierten Wert der Alternative  $A_i$  im Hinblick auf das Kriterium  $C_j$  darstellt.

**Schritt 3:** Da die Kriterien unterschiedliche Einheiten und Größenordnungen besitzen, wird die Entscheidungsmatrix normalisiert, um vergleichbare dimensionslose Werte zu erhalten. Aufgrund der ähnlichen Untersuchung in der Studie von Sepahi, Llinca und Rousse (2025) zu dieser Arbeit, wird deren Normalisierungs-Ansatz gewählt, der sich mit dem Ansatz aus Penday, Komal und Dincer (2023) deckt. Es wird eine Vektor-Normalisierung nach folgendem Schema durchgeführt:

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}}; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

Daraus entsteht die normalisierte Matrix  $R = [r_{ij}]_{m \times n}$ .

**Schritt 4:** Es wird eine gewichtete normalisierte Matrix  $V = [v_{ij}]$  konstruiert. Die Werte für  $v_{ij}$  werden folgendermaßen ermittelt:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

**Schritt 5:** Die positiven ( $V^+$ ) und negativen idealen ( $V^-$ ) Lösungen werden ermittelt. Je nach Auslegung der Kriterien wird der größte Wert aller Alternativen als positiver Idealwert und der kleinste Wert als negativer Idealwert gewählt. Für Kriterien, wo der kleinste Wert der positive Idealwert ist, wird das Schema gedreht. Mathematisch wird das wie folgt formuliert:

$$v_j^+ = \begin{cases} \max(v_{ij}), & \text{wenn } j \text{ einen großen positiven Idealwert hat} \\ \min(v_{ij}), & \text{wenn } j \text{ einen kleinen positiven Idealwert hat} \end{cases}$$

$$v_j^- = \begin{cases} \min(v_{ij}), & \text{wenn } j \text{ einen großen positiven Idealwert hat} \\ \max(v_{ij}), & \text{wenn } j \text{ einen kleinen positiven Idealwert hat} \end{cases}$$

Hieraus wird nun der positiv ideal Vektor  $V^+$  und der negativ ideal Vektor  $V^-$  konstruiert:

$$V^+ = [v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+]$$

$$V^- = [v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-]$$

**Schritt 6:** Für jede Alternative wird die Entfernung von dem positiven Idealwert  $S_i^+$  und dem negativen Idealwert  $S_i^-$  mittels euklidischer Distanz ermittelt:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

**Schritt 7:** Die relative Nähe  $V_i$  zur idealen Lösung wird für jede  $i$ -te Alternative berechnet:

$$V_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$$

Anhand der relativen Nähe können die Alternativen absteigend bewertet werden.

Die Umsetzung der TOPSIS-Analyse ist dem Anhang 9 als MATLAB-Skript zu entnehmen.

### 3.4.3 Sensitivitätsanalyse

Für die AHP-Methode wurde eine Sensitivitätsanalyse (SA) durchgeführt, um zu untersuchen, in welchem Ausmaß Veränderungen der Kriteriengewichtungen Auswirkungen auf die

Rangfolge der ermittelten Technologie-Alternativen haben. Das Ziel dieser Analyse besteht darin, die Stabilität der Entscheidung zu überprüfen, indem untersucht wird, ob kleine Änderungen der Gewichtungen zu einer veränderten Priorisierung der Alternativen führen. (Mühlbacher and Kaczynski, 2013)

Zur Durchführung der SA wurde die One-at-a-time-Methode (OAT) angewendet. Dabei wird jeweils nur eine Kriteriengewichtung schrittweise verändert, während alle anderen Gewichtungen proportional angepasst werden, sodass die Gewichtungen summiert stets eins ergeben. Durch diese Vorgehensweise lässt sich der Einfluss einzelner Gewichtungen auf das Gesamtergebnis beobachten. (Chen et al., 2010)

Basierend auf den in Chen et al. (2010) angegebenen Formeln und Verfahren wurde ein MATLAB-Skript (siehe Anhang 9) entwickelt. Hierbei wird die Kriteriengewichtung jedes Kriteriums in Schritten von  $\pm 1\%$  bis maximal  $\pm 20\%$  verändert, um eine kleine Änderung hervorzurufen. Das Skript ermittelt die Anzahl der notwendigen Schritte, bis eine Veränderung der TOPSIS-Rangfolge eintritt. Die verwendeten Formeln definieren dabei sowohl die prozentuale Anpassung der Gewichtung des ausgewählten Kriteriums als auch die Normalisierung der übrigen Gewichtungen.

Formel für die prozentuale Anpassung der Gewichtung des ausgewählten Kriteriums:

$$W(c_m, pc) = W(c_m, 0) + W(c_m, 0) \cdot pc, 1 \leq m \leq n$$

Formel für die Normalisierung der übrigen Gewichtungen:

$$W(c_i, pc) = (1 - W(c_m, pc)) \cdot \frac{W(c_i, 0)}{1 - W(c_m, 0)}, i \neq m, 1 \leq i \leq n$$

## 4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Auswertungen der AHP- und TOPSIS-Analysen, die auf Daten aus Expertengesprächen und einer systematischen Literaturrecherche basieren, beschrieben. Da sich in den Expertengesprächen unterschiedliche Gewichtungen angedeutet haben, werden die Ergebnisse getrennt für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Emissionen aus einer Verbrennung, wie beim Kupfer-Recycling, und bei Emissionen aus einem Prozess, wie der Aluminiumelektrolyse, betrachtet.

Zunächst werden die normierten Gewichtungen und das Konsistenzverhältnis aus der AHP-Analyse dargestellt. Anschließend wird die aus der TOPSIS-Analyse berechnete Bewertung anhand der relativen Nähe zur idealen Lösung dargestellt. Abschließend wird eine

Sensitivitätsanalyse der AHP-Matrizen durchgeführt, um die Auswirkungen auf das Ergebnis der TOPSIS-Bewertung zu untersuchen.

#### 4.1 Ergebnisse der AHP-Analyse

Im Rahmen der AHP-Analyse wurden die ausgewählten Kriterien paarweise miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer relativen Bedeutung für einen **Verbrennungsprozess** bewertet. Die Vergleichsmatrix für einen Verbrennungsprozess ist in Tabelle 5 dargestellt. Die hervorgehobenen Einträge in Tabelle 5 die eingetragenen Werte dar.

Ein Vergleich des elektrischen und des thermischen Energiebedarfs zeigt, dass der thermische Energiebedarf deutlich wichtiger eingestuft wird. Dies liegt daran, dass bestimmte Verbrennungsanlagen gleichzeitig als Abwärmelieferant für Fernwärme oder Prozessdampf fungieren. Der elektrische Energiebedarf wurde im Vergleich zur CO<sub>2</sub>-Reinheit als ungewiss beurteilt, da die konkreten Reinheitsziele noch nicht eindeutig vorgegeben sind. Gegenüber der NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität wurde der elektrische Energiebedarf hingegen als weniger bedeutsam bewertet, weil eine unzureichende Selektivität zu Lösemitteldegradation und damit zu hohen Ersatz- und Betriebskosten führen kann. Im Vergleich zum TRL wurde der elektrische Energiebedarf ebenfalls nachrangig eingeordnet, da der Reifegrad der Technologie für Investitionsentscheidungen von Unternehmen als zentraler Indikator für das Investitionsrisiko betrachtet wird. Gegenüber der Abscheiderate wurde der elektrische Energiebedarf leicht höher gewichtet, weil Abscheideziele ebenfalls nicht konkret definiert sind, aber für einen positiven Klimaeffekt trotzdem eine möglichst hohe Abscheiderate gewünscht wird. Der Stromverbrauch geht jedoch als Kostenfaktor direkt in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein.

Beim Vergleich des thermischen Energiebedarfs mit der CO<sub>2</sub>-Reinheit ergab sich aufgrund der fehlenden Reinheitsziele ebenfalls keine eindeutige Präferenz. Der thermische Energiebedarf wurde außerdem mit der NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität als gleich wichtig eingestuft, da beide Größen zur betrieblichen Effizienz und Prozessstabilität beitragen. Im Vergleich zum TRL wurde auch hier der technologische Reifegrad als wichtiger bewertet. Gegenüber der Abscheiderate wurde der thermische Energiebedarf deutlich höher gewichtet, da sowohl die Funktion der Anlage als Abwärmelieferant als auch die damit verbundenen Kosten im Vordergrund stehen.

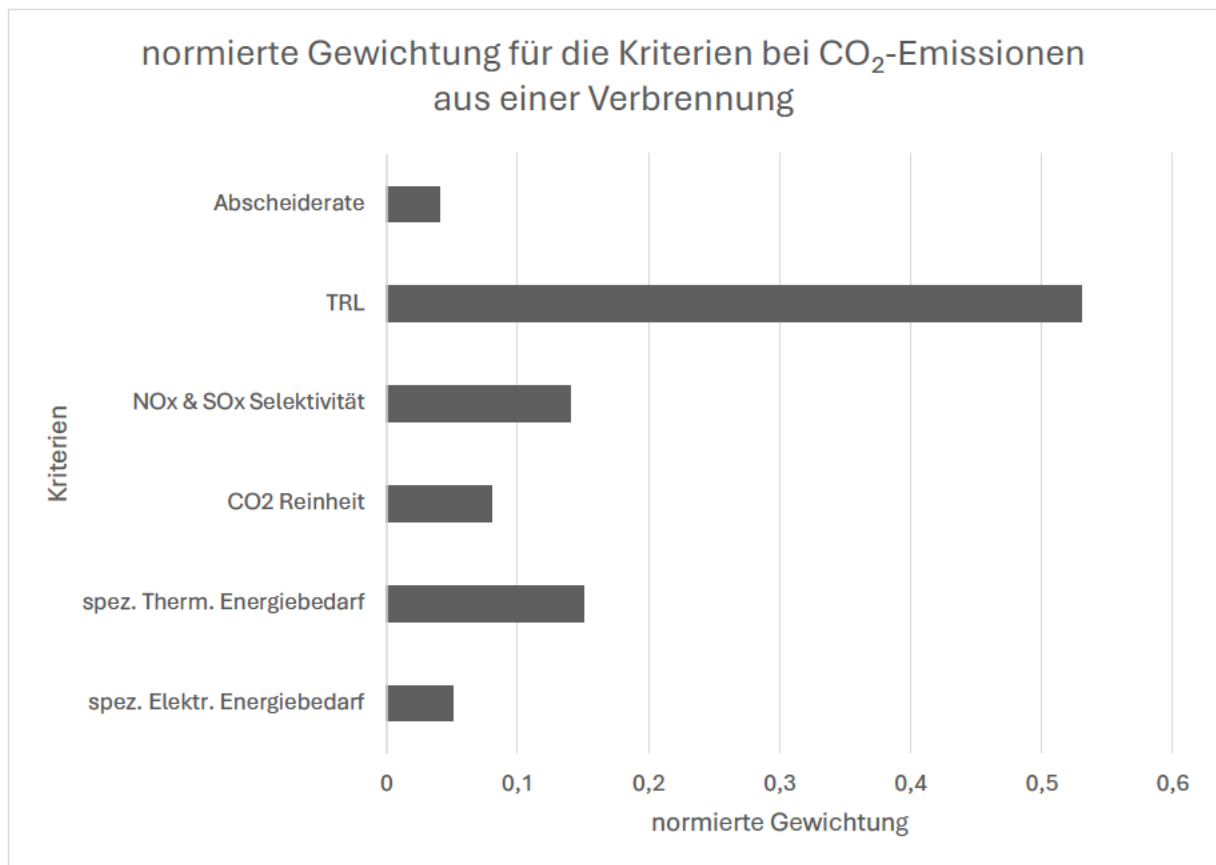
Die CO<sub>2</sub>-Reinheit wurde im Vergleich zum elektrischen und thermischen Energiebedarf als ungewiss angegeben. Im Gegensatz zum TRL wurde die CO<sub>2</sub>-Reinheit klar nachgeordnet, aufgrund des bereits genannten Investitionsrisikos. Auch gegenüber der NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität blieb die Bewertung ungewiss.

**Tabelle 5:** paarweiser Vergleich der Kriterien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einer Verbrennung

|                                                 | spez. Elektr. Energiebedarf | spez. Therm. Energiebedarf | CO <sub>2</sub> -Reinheit | NO <sub>x</sub> -/SO <sub>x</sub> -Selektivität | Technologischer Reifegrad | Abscheiderate | Normierte Gewichtung |
|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------|---------------|----------------------|
| spez. Elektr. Energiebedarf                     | 1                           | 1/5,5                      | 1/1                       | 1/4,5                                           | 1/6                       | 2             | 0,05                 |
| spez. Therm. Energiebedarf                      | 5,5                         | 1                          | 1                         | 1                                               | 1/6                       | 7,5           | 0,15                 |
| CO <sub>2</sub> -Reinheit                       | 1                           | 1/1                        | 1                         | 1                                               | 1/6,5                     | 1             | 0,08                 |
| NO <sub>x</sub> -/SO <sub>x</sub> -Selektivität | 4,5                         | 1/1                        | 1/1                       | 1                                               | 1/7                       | 6             | 0,14                 |
| TRL                                             | 6                           | 6                          | 6,5                       | 7                                               | 1                         | 7,5           | 0,53                 |
| Abscheiderate                                   | 1/2                         | 1/7,5                      | 1/1                       | 1/6                                             | 1/7,5                     | 1             | 0,04                 |
|                                                 |                             |                            |                           |                                                 |                           |               | <b>CR = 0,12</b>     |

Die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität wurde im Vergleich zum TRL ebenfalls als niedriger gewichtet, da hier wieder das Investitionsrisiko entscheidend ist. In der Gegenüberstellung mit der Abscheiderate wurde die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität jedoch als wichtiger bewertet, weil eine unzureichende Selektivität zu Degradation der eingesetzten Medien führen kann und damit entweder hohe Ersatzkosten entstehen oder der Prozess gar nicht erst eingesetzt werden kann.

Die Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der normierten Gewichtung der ausgewählten Kriterien. Die AHP-Analyse zur Gewichtung der ausgewählten Kriterien für einen Verbrennungsprozess ergab, dass der TRL mit 53 % die mit Abstand höchste normierte Gewichtung erreicht. Es folgen der thermische Energiebedarf mit 14 % und die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität mit 15 %. Mit weniger als 10 % normierter Gewichtung haben die CO<sub>2</sub>-Reinheit (8 %), der elektrische Energiebedarf (5 %) und die Abscheiderate (4 %) die geringsten normierten Gewichtungen. Das Konsistenzverhältnis liegt mit 0,12 leicht über dem Grenzwert von 0,10 (vgl. Kapitel 3.4.1).



**Abbildung 6:** normierte Gewichtung der Kriterien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einer Verbrennung

Quelle: eigene Abbildung

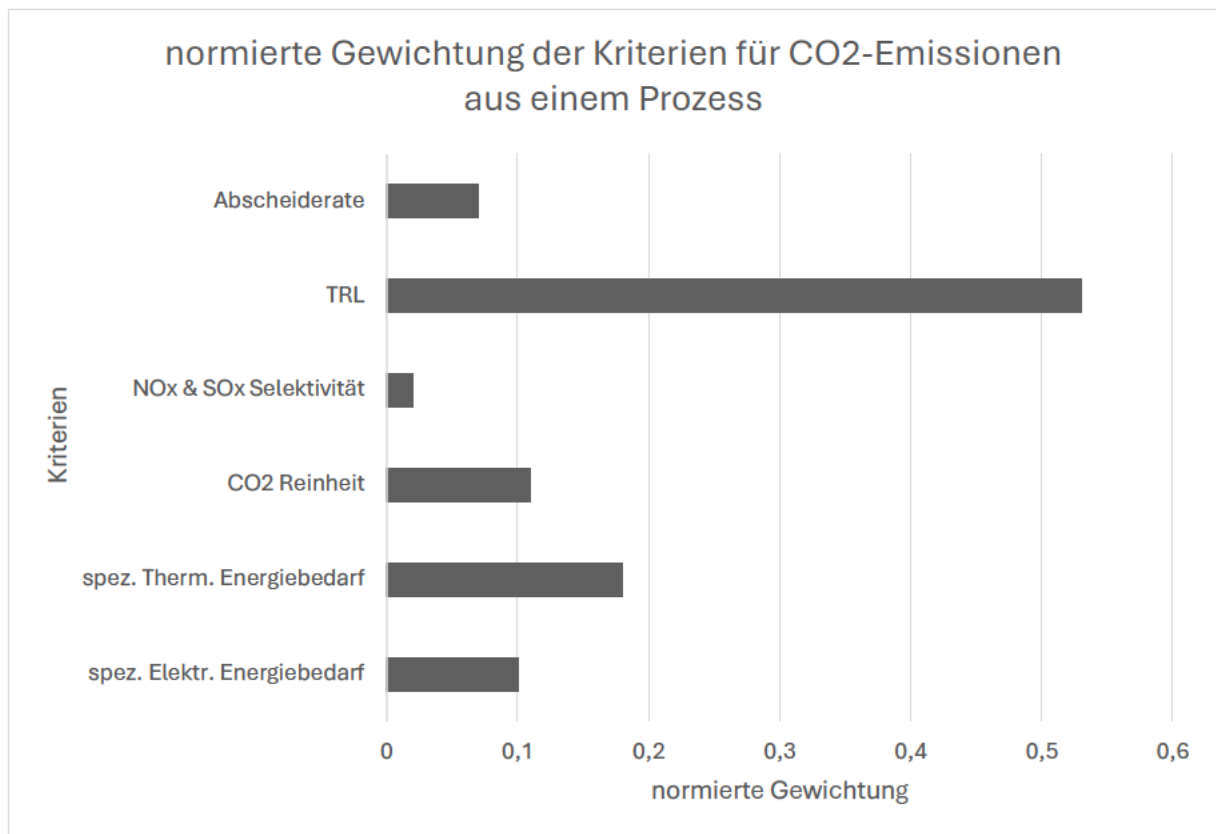
Im Gegensatz zu den Verbrennungsemissionen wurden die Kriterien für **Prozessemissionen** teilweise anders gewichtet. So wurde beispielsweise die Gewichtung des thermischen Energiebedarfs im Verhältnis zum elektrischen Energiebedarf reduziert, da die Aluminiumelektrolyse in diesem Fall nicht als Abwärmelieferant dient. Darüber hinaus wurde die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität im Vergleich zu allen anderen Kriterien als deutlich unwichtiger eingestuft, da Stick- und Schwefeloxide in diesem Prozess nicht oder nur in sehr geringen Mengen entstehen. Die paarweisen Vergleiche der Kriterien sind der Tabelle 6 zu entnehmen.



**Tabelle 6:** paarweiser Vergleich der Kriterien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einem Prozess

|                                                     | spez.<br>Elektr.<br>Energiebedarf | spez.<br>Therm.<br>Energiebedarf | CO <sub>2</sub> -<br>Reinheit | NO <sub>x</sub> -<br>/SO <sub>x</sub> -<br>Selektivität | Technologischer<br>Reifegrad | Abscheiderate | Normierte<br>Gewichtung |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|---------------|-------------------------|
| spez.<br>Elektr.<br>Energiebedarf                   | 1                                 | 1/2                              | 1                             | 6                                                       | 1/6                          | 2             | <b>0,10</b>             |
| spez.<br>Therm.<br>Energiebedarf                    | 3                                 | 1                                | 1                             | 6                                                       | 1/3                          | 7,5           | <b>0,18</b>             |
| CO <sub>2</sub> -<br>Reinheit                       | 1                                 | 1                                | 1                             | 6                                                       | 1/6,5                        | 1             | <b>0,11</b>             |
| NO <sub>x</sub> -/SO <sub>x</sub> -<br>Selektivität | 1/9                               | 1/9                              | 1/9                           | 1                                                       | 1/9                          | 1/9           | <b>0,02</b>             |
| TRL                                                 | 6                                 | 6                                | 6,5                           | 8                                                       | 1                            | 7,5           | <b>0,53</b>             |
| Abscheiderate                                       | 1/2                               | 1/7,5                            | 1                             | 6                                                       | 1/7,5                        | 1             | <b>0,07</b>             |
|                                                     |                                   |                                  |                               |                                                         |                              |               | <b>CR = 0,12</b>        |

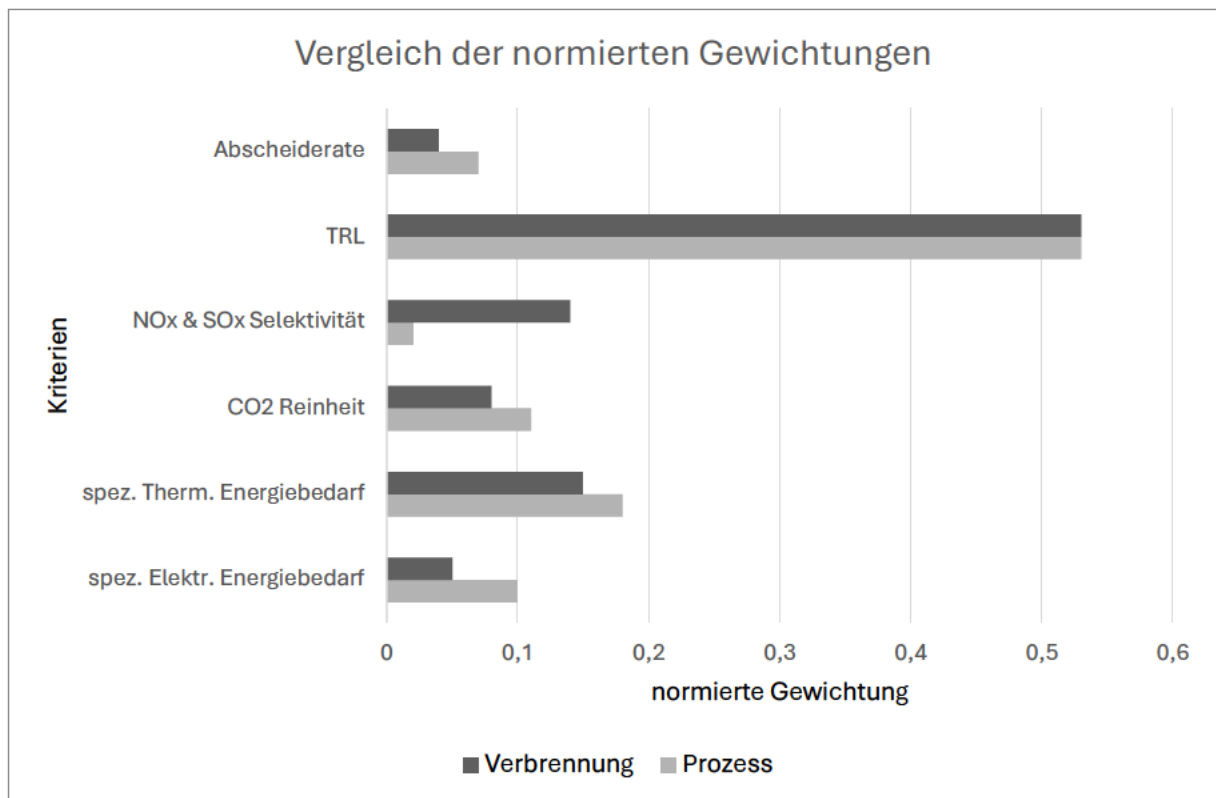
Die Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der normierten Gewichtung der in Tabelle 6 ausgewählten Kriterien in den dargestellten paarweisen Vergleichen. Die AHP-Analyse zur Gewichtung der ausgewählten Kriterien für Prozessemissionen ergab, dass der TRL mit 53 % die mit Abstand höchste normierte Gewichtung erreicht. Es folgen der thermische Energiebedarf mit 18 % und die CO<sub>2</sub>-Reinheit mit 14 %. Danach kommt der elektrische Energiebedarf mit 10 %. Die Abscheiderate erreicht 7 % und die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität 2 %. Das Konsistenzverhältnis liegt mit 0,12 leicht über dem Grenzwert von 0,10 (vgl. Kapitel 3.4.1).



**Abbildung 7:** normierte Gewichtung der Kriterien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einem Prozess

Quelle: eigene Abbildung

Ein Vergleich der normierten Gewichtungen der Kriterien für Verbrennungsemissionen mit jenen der Prozessemissionen ist in Abbildung 8 dargestellt. Hinsichtlich des technologischen Reifegrades zeigen beide Gruppen identische normierte Gewichtungen. Der größte Unterschied ergibt sich bei der NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität, da dieses Kriterium für Verbrennungsemissionen mit 0,14 eine höherer Gewichtung aufweist als für die Prozessemissionen mit 0,02.



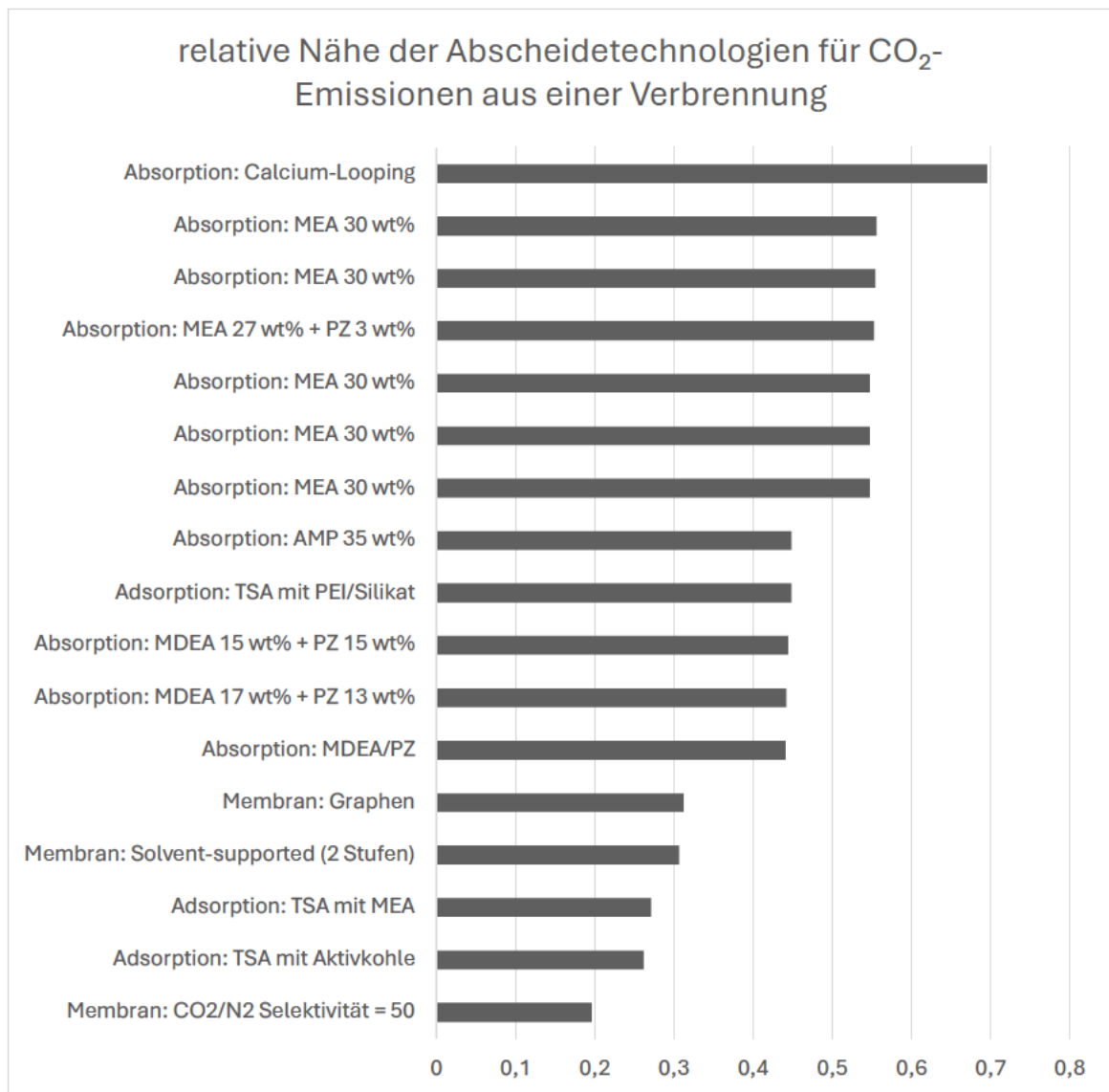
**Abbildung 8:** Gegenüberstellung der normierten Gewichtung

Quelle: eigene Abbildung

Dagegen sind die Gewichtungen der Prozessemissionen für Abscheiderate, CO<sub>2</sub>-Reinheit und spezifischer thermischer Energiebedarf leicht höher. Die Gewichtung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs ist mit 0,05 halb so groß für die Verbrennungsemissionen wie für die Prozessemissionen.

## 4.2 Ergebnisse der TOPSIS-Analyse

Die detaillierten Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche aus Kapitel 3.2 für jedes Bewertungskriterium sowie die Resultate der TOPSIS-Berechnung sind in Anhang 6 dargestellt. Im Folgenden werden zuerst die TOPSIS-Ergebnisse des relativen Abstandes zur idealen Lösung für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Verbrennungsemissionen (siehe Abbildung 9) und im Anschluss für Prozessemissionen (siehe Abbildung 10) zusammengefasst.



**Abbildung 9:** relative Nähe der Abscheidetechnologien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einer Verbrennung

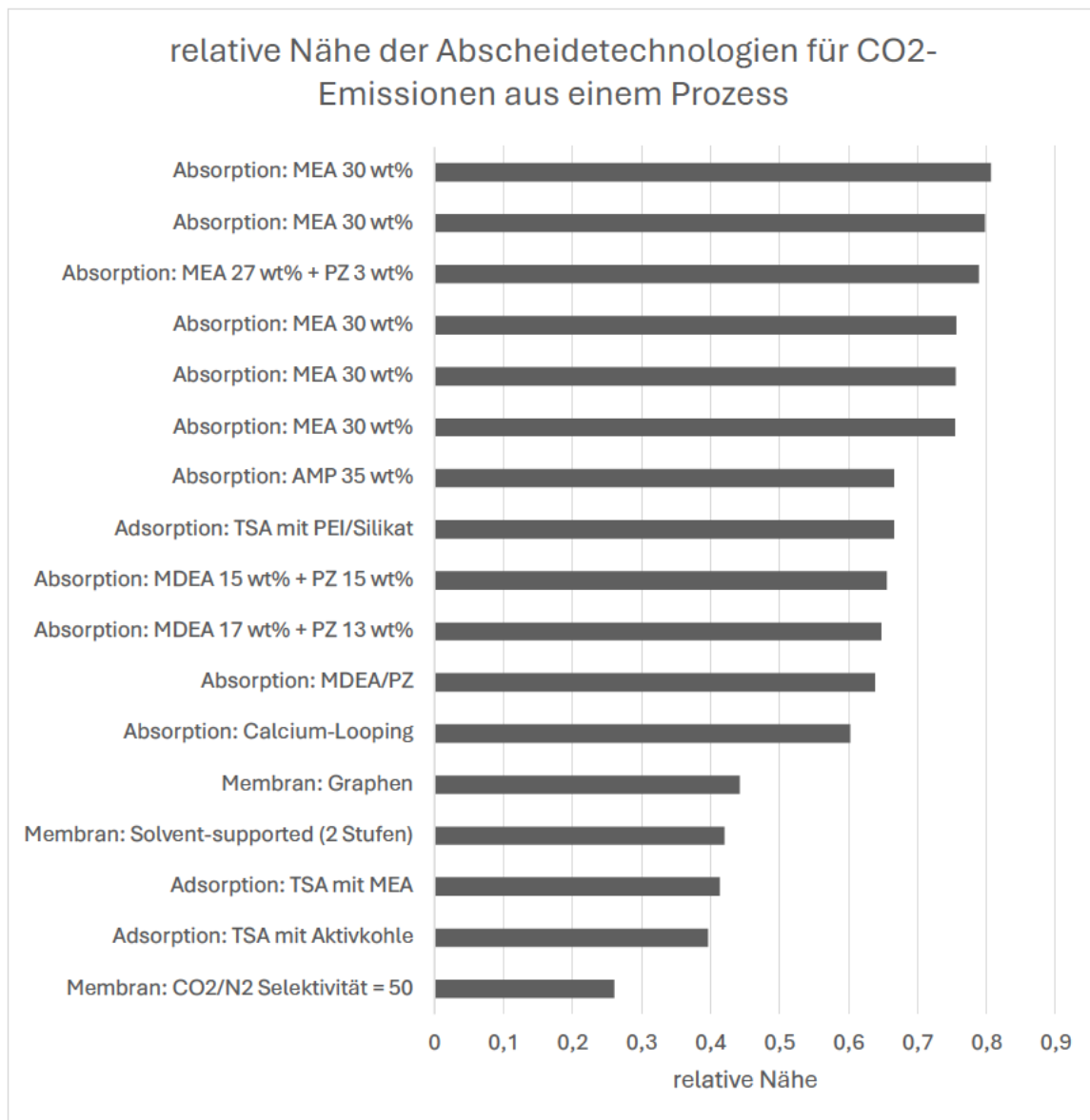
Quelle: eigene Abbildung

Mit einer relativen Nähe von 0,81 erzielt das Calcium-Looping-Verfahren den höchsten Wert einer CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie für Emissionen aus einem **Verbrennungsprozess**. Im mittleren Bereich mit relativen Nähewerten zwischen 0,54 und 0,56 folgen die Verfahren der chemischen Absorption mit MEA sowie die chemische Absorption und einen kleinen Anteil an Piperazin (PZ). Niedrigere Werte im Bereich von 0,44 bis 0,45 weisen die chemische Absorption mit AMP, das adsorptive TSA-Verfahren mit Polyethylenimin (PEI) und einem Silikat als Adsorptionsmittel sowie die chemische Absorption mit MDEA und PZ in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen auf.

Im nächsten Bewertungssegment mit relativen Nähewerten von 0,26 bis 0,31 liegen die Membranverfahren mit Graphen- bzw. lösungsmittelhaltigen Membranen sowie das adsorptive TSA-Verfahren mit MEA und Aktivkohle als Adsorptionsmittel. Den niedrigsten Score von 0,20 erzielt eine rein theoretische Membran, die auf einer angenommenen CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>-Selektivität von 50 basiert.

Bei der TOPSIS-Bewertung der CO<sub>2</sub>- Abscheidetechnologien für **Prozessemissionen** hat ein chemisches Absorptionsverfahren mit 30 Gew.% MEA die höchste relative Nähe mit 0,81. Nahe folgend mit relativen Nähewerten im Bereich von 0,75 bis 0,80 kommen weitere chemische Absorptionsverfahren mit 30 Gew.% MEA und einem Gemisch von 27 Gew.% MEA mit 3 Gew.% PZ. Im mittleren Bereich mit relativen Nähen von 0,60 bis 0,67 liegt die chemische Absorption mit AMP (0,67), ein adsorptives TSA-Verfahren mit PEI und Silikat (0,67), chemische Absorption mit einem MDEA und PZ Gemisch (0,64 – 0,66), sowie das Calcium-Looping-Verfahren (0,60).

Im untersten Bewertungssegment im Bereich von 0,26 bis 0,44 liegen die Membran-Verfahren mit Graphen- (0,44) bzw. lösungsmittelhaltigen (0,42) Membranen. Darauf folgend kommen zwei adsorptive TSA-Verfahren mit MEA (0,41) und Aktivkohle (0,40) als Adsorptionsmittel. Den niedrigsten Score von 0,26 erzielt die rein theoretische Membran.



**Abbildung 10:** relative Nähe der Abscheidetechnologien für CO<sub>2</sub>-Emissionen aus einen Prozess

Quelle: eigene Abbildung

### 4.3 Sensitivitätsanalyse der Ergebnisse

Die Ergebnisse der SA anhand der maximal möglichen prozentualen Veränderung einer Kriteriengewichtung sind für CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einer Verbrennung in Tabelle 7 und für welche aus nach einem Prozesse in Tabelle 8 dargestellt. Dabei wird die maximal mögliche prozentuale Veränderung der Kriteriengewichtung bis zu einer Änderungen in der Rangfolge der Abscheidetechnologien angegeben. Falls in einer Spanne von -20 % bis 20 % keine Veränderung auftrat ist dies mit „Keine Änderung der Rangfolge gekennzeichnet.

**Tabelle 7:** Ergebnisse der SA für CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einer Verbrennung

| Kriterium                                      | Positive maximale Veränderung [%] | Negative maximale Veränderung [%] |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Spezif. Elektr. Energiebedarf                  | 5                                 | -15                               |
| Spezif. Therm. Energiebedarf                   | 17                                | -5                                |
| CO <sub>2</sub> -Reinheit                      | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |
| NO <sub>x</sub> /SO <sub>x</sub> -Selektivität | 18                                | Keine Änderung der Rangfolge      |
| Abscheiderate                                  | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |
| TRL                                            | Keine Änderung der Rangfolge      | -17                               |

Bei der SA der Kriteriengewichtung für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einer Verbrennung konnte festgestellt werden, dass der spezifische elektrische Energiebedarf sensibel auf eine positive Veränderung reagiert, da bereits ab einer Änderung von 5 % die Rangfolge beeinflusst wird. Auf eine negative Veränderung reagiert das Kriterium weniger sensibel, da es erst bei 15 % eine Rangfolgen Änderung gibt. Beim spezifischen thermischen Energiebedarf ergibt sich ein umgekehrtes Bild: Hier verursacht bereits eine Veränderung von -5 % eine Änderung der Reihenfolge und das Kriterium reagiert bei einer positiven Veränderung mit einem Wert von 17 % stabiler. Sonst zeigen nur die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität mit 18 % und der TRL mit -17 % eine Sensibilität gegenüber einer Veränderung der Gewichtung.

**Tabelle 8:** Ergebnisse der SA für CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einem Prozess

| Kriterium                                      | Positive maximale Veränderung [%] | Negative maximale Veränderung [%] |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Spezif. Elektr. Energiebedarf                  | 5                                 | -3                                |
| Spezif. Therm. Energiebedarf                   | 2                                 | -5                                |
| CO <sub>2</sub> -Reinheit                      | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |
| NO <sub>x</sub> /SO <sub>x</sub> -Selektivität | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |
| Abscheiderate                                  | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |
| TRL                                            | Keine Änderung der Rangfolge      | Keine Änderung der Rangfolge      |

Bei der SA der Kriteriengewichtung für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einem Prozess konnte festgestellt werden, dass lediglich der spezifische elektrische und thermische Energiebedarf auf eine Veränderung reagiert. Beide Kriterien sind dabei recht sensibel. Für den spezifischen elektrischen Energiebedarf genügen Veränderungen von 5 % bzw. -3 %, um eine Änderung der Rangfolge hervorzurufen. Beim spezifischen thermischen Energiebedarf sorgen Veränderungen von 2 % bzw. -5 % für eine Änderung der Rangfolge. Die übrigen Kriterien zeigen in einem Bereich von -20 % bis 20 % keine Veränderung der Rangfolge.



## 5 Diskussion

Mit der Forschungsfrage dieser Arbeit sollte herausgefunden werden, welche nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien aus technologischer Sicht am besten für niedrig konzentrierte CO<sub>2</sub>-Emissionen von 1 bis 5 Vol.-% aus der Industrie geeignet sind. Im Folgenden soll die Forschungsfrage beantwortet, ein Vergleich mit der Literatur gezogen, die Bedeutung der Sensitivitätsanalyse erläutert und die Limitationen der Arbeit aufgezeigt werden.

### 5.1 Beantwortung der Forschungsfrage

Die Ergebnisse zeigen, dass das TRL bei beiden Anwendungsfällen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung, nach einer Verbrennung und direkt nach einem Prozess, das wichtigste Entscheidungskriterium ist. Die hohe Gewichtung des TRL spiegelt wieder, dass aus Sicht der Industrie die Investitionsentscheidung vom technologischen Risiko abhängt und somit reifere CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien bevorzugt werden. Diese Auslegung prägt die Bewertung stark, da somit Technologien bevorzugt werden, die eine gewisse Reife vorweisen, aber nicht zwangsläufig die besten weiteren technologischen Eigenschaften, wie bspw. einen guten spezifischen thermischen Energiebedarf, aufweisen.

Neben den TRL rücken für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einer Verbrennung auch der spezifische thermische Energiebedarf und die NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität in den Vordergrund. Der hohe Stellenwert des thermischen Energiebedarfs ergibt sich daraus, dass Anlagen in denen eine Verbrennung stattfindet (bspw. (Sonder-)Müllverbrennung oder Kupfer-Recycling), häufig als Abwärmelieferanten fungieren. Somit muss eine Abwägung der Prioritäten zwischen der CO<sub>2</sub>-Abscheidung und der Nutzung der Abwärme getroffen werden. Die hohe Bedeutung der NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität verdeutlicht für die Industrie, dass neben den Abscheideparametern (CO<sub>2</sub>-Reinheit und Abscheiderate) auch die Frage wichtig ist, inwieweit Störgase eine Degradation des Abscheidemittels verursachen. Von diesem Kriterium sind zum einen die Stabilität der Abscheideperformance und die Notwendigkeit eines Austauschs des Abscheidemittels betroffen. Vor diesem Hintergrund hat die TOPSIS-Bewertung ergeben, dass das Calcium-Looping und die chemische Absorption mittels MEA derzeit die am technologisch geeignetsten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien für einen Verbrennungsprozess sind. Das Calcium-Looping kann aufgrund seiner besseren NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität im Vergleich zur MEA-Technologie eine höhere Bewertung vorweisen. Die MEA-Technologien weisen hingegen bessere spezifische thermische Energiebedarfe und eine höhere technologische Reife auf.

Bei CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien direkt nach einem Prozess, wie bei der Aluminiumelektrolyse, verschieben sich die Bewertungen leicht, obwohl auch hier der TRL die größte Gewichtung hat. Da die Aluminiumelektrolyse bspw. nicht als Abwärmelieferant dient und NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Emissionen hier kaum eine Rolle spielen, verliert der thermische Energiebedarf gegenüber dem elektrischen Energiebedarf etwas an Bedeutung und die NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität hat kaum noch einen Gewichtungsanteil. Unter diesen Voraussetzungen erreichen CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien mit MEA als chemisches Absorptionsmittel die höchste TOPSIS-Bewertung und sind somit am technologisch besten für diesen Anwendungsfall geeignet.

## 5.2 Vergleich zur Literatur

Das Ergebnis, dass das Calcium-Looping Verfahren für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einer Verbrennung im Konzentrationsbereich von 1 - 5 Vol.-% als technologisch am geeignetsten eingestuft wird, deckt sich mit den Befunden von Sepahi et al. (2025). In deren Studie weist das Calcium-Looping-Verfahren in einer TOPSIS-Analyse die größte Nähe zur idealen Lösung für den Einsatz in einem GuD-Kraftwerk auf. Allerdings berücksichtigt Sepahi et al. (2025) neben den technologischen auch ökonomische und ökologische Kriterien, sodass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt gegeben ist.

Für einen Vergleich mit Literaturwerten zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einem Prozess, wie der Aluminiumelektrolyse, liegen bislang keine spezifischen Veröffentlichungen vor. Die Recherche zeigt jedoch, dass die chemische Absorption mit Aminen überwiegend untersucht wird, häufig in Kombination mit einer vorherigen Aufkonzentration des CO<sub>2</sub>-Gehaltes im Abgas (Arachchige et al., 2014; Dayarathna et al., 2014; Kanniche et al., 2022). Das Ergebnis, dass die chemische Absorption mit MEA als die technologisch geeignetste Option bewertet wurde, scheint somit plausibel.

## 5.3 Bedeutung der Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der SA verdeutlichen die Stabilität der Kriteriengewichtung für Abscheiderate, CO<sub>2</sub>-Reinheit, TRL und NO<sub>x</sub>-/SO<sub>x</sub>-Selektivität. Leichte Veränderungen dieser Gewichtungen haben kaum bis keine Auswirkungen auf die endgültige Rangfolge der TOPSIS-Methode. Hingegen erweisen die Gewichtungen des thermischen und elektrischen Energiebedarfs, insbesondere bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung nach einem Prozess, als besonders sensibel. Dies liegt daran, dass der Energiebedarf zwischen den CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien stark variiert. Membranverfahren benötigen vorwiegend elektrische Energie, während chemische Absorption primär thermische Energie benötigt. Kleine Gewichtungsveränderungen kippen daher die Balance zwischen den Verfahren.

## 5.4 Limitationen der Arbeit

Trotz der soliden methodischen Grundlage weist diese Arbeit mehrere Limitationen auf, die die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Dazu gehören unter anderem Lücken in den Daten der systematischen Literaturrecherche, Voreingenommenheit und Lücken in der AHP-Kriteriengewichtung, die Ausschlusslogik in der TOPSIS-Analyse sowie das Treffen von Annahmen. Diese Limitationen werden im Folgenden beschrieben.

Die Datensammlung erfolgte ausschließlich durch **systematische Literaturrecherche**, wobei die gewählten Suchbegriffe und Datenbanken noch erweitert werden könnten, um weitere Publikationen mit einzubeziehen. Zudem fokussiert die Analyse sich allgemein auf niedrig konzentrierte CO<sub>2</sub>-Emissionen (1 – 5 Vol.-%), während spezifische Anwendungsbereiche, wie unterschiedliche Abgaszusammensetzungen, Platzbedarf oder Abwärmemenge, als wichtige Kriterien nur bedingt berücksichtigt wurden. Ein engerer Fokus auf konkrete Prozesse (z. B. Aluminiumelektrolyse) hätte präzisere Aussagen ermöglicht. Die Methodik erlaubt lediglich einen Einblick in publizierte Forschungswerte, wobei Daten aus Pilotanlagen für niedrig konzentrierte CO<sub>2</sub>-Ströme fehlen. Die Literaturbasis ist zudem unausgewogen, da die meisten Publikationen sich auf die Anwendung bei GuD-Kraftwerken beziehen, während die Anwendung im untersuchten CO<sub>2</sub>-Konzentrationsbereich sonst kaum von Publikationen behandelt wird.

Hinsichtlich der Forschungsfrage zur technologischen Eignung ergibt sich eine Einschränkung, da die **AHP-Methode** auf den Meinungen von Branchenexperten basiert. Diese sind vor allem von ökonomischen Risiko- und Kostenüberlegungen geprägt. Dadurch beantwortet diese Arbeit eher die Frage, welche CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien aus Industriesicht am weitesten fortgeschritten sind. Diese Voreingenommenheit hätte durch den Einschluss weiterer Experten aus der Forschung oder von Herstellern von CO<sub>2</sub>-Abscheidungstechnologien vermindert werden können.

Der Consistency Ratio (CR) von 0,12 in der **AHP-Methode** liegt leicht über der empfohlenen Akzeptanzschwelle von 0,10 nach Saaty (1990). Diese Schwelle dient als Orientierung zur Beurteilung der logischen Konsistenz der paarweisen Vergleiche im Vergleich zu zufälligen Matrizen. Bei einer Überschreitung wird empfohlen, den paarweisen Vergleich zu wiederholen, bis der CR-Wert unter der Akzeptanzschwelle liegt. Da die Akzeptanzschwelle jedoch nur ein von Saaty (1990) empfohlener Wert ist, der möglichst klein sein soll und die resultierende Kriteriengewichtung aus der AHP-Methode plausibel ist, wird ein CR-Wert von 0,12 als akzeptabel eingestuft. Außerdem wäre der zeitliche Aufwand für die Experten aus der Industrie zu groß gewesen, um eine Wiederholung des paarweisen Vergleichs zu ermöglichen.

Ein weiterer Faktor ist, dass bei der **TOPSIS-Methode** keine harte Ausschlusslogik angewendet wurde. Dadurch konnten Technologien nicht ausgeschlossen werden, die die Mindestanforderungen der Industrie nicht erfüllen. Dies ließe sich beispielsweise für TRL-Werte unter 6 umsetzen, da nur fortgeschrittenere Technologien für die Industrie von Interesse sind. Dadurch würden die untersuchten CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien weiter eingegrenzt werden.

Des Weiteren mussten bei der **TOPSIS-Methode** einige Annahmen getroffen werden, um die Durchführung der Methode zu ermöglichen. Dies führte dazu, dass die Annahmen nicht unbedingt auf einen Konzentrationsbereich von 1 bis 5 Vol.-% bezogen werden konnten, da hierfür keine Publikationen gefunden wurden. Somit ist die Aussagekraft des Ergebnisses eingeschränkt. Die TOPSIS-Methode bietet außerdem keine Möglichkeit, Spannweiten oder Unsicherheiten der Kriteriendaten zu berücksichtigen, sodass für jedes Kriterium ein eindeutiger, fixer Wert definiert werden musste. Dadurch ist eine Variation einzelner Kriteriendaten nicht berücksichtigt und hätte möglicherweise eine andere Rangfolge ergeben. Für zukünftige Anwendungen wäre die Fuzzy-TOPSIS-Methode eine Möglichkeit, Spannweiten in die Bewertung miteinzubeziehen.

## 6 Fazit und Ausblick für die Forschung

### 6.1 Fazit

Die Untersuchung zeigt, dass der technologische Reifegrad in beiden Anwendungsfällen (Prozess und Verbrennung) das mit Abstand wichtigste Entscheidungskriterium für die Industrie ist und somit einen Vorrang der Marktreife gegenüber der technischen Effizienz festlegt. Die TOPSIS-Bewertung macht deutlich, dass Calcium-Looping und MEA-basierte Absorptionsverfahren im Konzentrationsbereich von 1 bis 5 Vol.-% für Verbrennungsemissionen im Industriebereich am besten geeignet sind, während bei Prozessemissionen hauptsächlich die MEA-basierten Absorptionsverfahren die höchste Bewertung erreichen. Bei den Verbrennungsemissionen rücken dabei zusätzlich zum TRL der spezifische thermische Energiebedarf und die NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität in den Vordergrund, wohingegen bei den Prozessemissionen der spezifische elektrische Energiebedarf relativ zum thermischen wichtiger wird und die NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität kaum Einfluss hat. Die Sensitivitätsanalyse unterstreicht die Robustheit der Kriteriengewichtung gegenüber Änderungen in der Bewertungsrangfolge bei TRL, CO<sub>2</sub>-Reinheit, Abscheiderate und NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub>-Selektivität. Sie weist jedoch eine hohe Sensitivität bei den Kriterien des spezifischen thermischen und elektrischen Energiebedarfs auf. Insgesamt liefert die Arbeit somit eine plausible Entscheidungsgrundlage, wenn auch mit eingeschränkter Aussagekraft aufgrund von Datenlücken, Expertenbias und einem leicht erhöhten CR-Wert, welche CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologie aus Industriesicht derzeit am technologisch fortgeschrittensten ist für niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 1 bis 5 Vol.-%.

### 6.2 Ausblick für die Forschung

Die Ergebnisse der Arbeit liefern mehrere Ansatzpunkte für zukünftige Forschungsprojekte. Das Gespräch mit der Stadtreinigung hat ergeben, dass MOF-basierte Verfahren, das Calcium-Looping und das Hot-Potassium-Carbonate-Verfahren derzeit intensiv beobachtet werden und technologische Fortschritte erzielen konnten. Aufbauend auf der Literaturrecherche zeigte sich außerdem, dass eine vorgeschaltete Aufkonzentration des CO<sub>2</sub>-Gehalts im Abgas ein vielversprechender Schritt für eine effizientere CO<sub>2</sub>-Abscheidung sein könnte. Aus Industriesicht werden der hohe thermische Energiebedarf vieler Technologien und die Degradation der eingesetzten Abscheidemedien weiterhin als Herausforderungen gesehen. Dies könnten Bereiche sein, in denen die Forschung an der Effizienzsteigerung und Stabilität vorhandener und neuer Medien arbeite.

## Literaturverzeichnis

- Abdelsamie, M.M., Hassan Ali, M.I., 2025. Technoeconomic feasibility of integrating carbon capture technology with primary aluminum production using an advanced cogeneration waste heat recovery system. *Chemical Engineering Journal* 519, 165078. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165078>
- Acampora, L., Grilletta, S., Costa, G., 2025. The Integration of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) in Waste-to-Energy Plants: A Review. *Energies* 18, 1883. <https://doi.org/10.3390/en18081883>
- Adu, E., Li, Y., Zhang, Y., Xin, Y., Tontiwachwuthikul, P., 2022. Optimization and energy assessment of technological process for CO<sub>2</sub> capture system of natural gas and coal combustion. *Energy Reports* 8, 7612–7627. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.004>
- Afandi, N., Satgunam, M., Mahalingam, S., Manap, A., Nagi, F., Liu, W., Johan, R.B., Turan, A., Wei-Yee Tan, A., Yunus, S., 2024. Review on the modifications of natural and industrial waste CaO based sorbent of calcium looping with enhanced CO<sub>2</sub> capture capacity. *Heliyon* 10, e27119. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27119>
- Allangawi, A., Alzaimoor, E.F.H., Shanaah, H.H., Mohammed, H.A., Saqer, H., El-Fattah, A.A., Kamel, A.H., 2023. Carbon Capture Materials in Post-Combustion: Adsorption and Absorption-Based Processes. *C* 9, 17. <https://doi.org/10.3390/c9010017>
- Arachchige, U.S.P.R., Kawan, D., Melaaen, M.C., 2014. Simulation of Carbon Dioxide Capture for Aluminium Production Process. *IJMO* 4, 43–50. <https://doi.org/10.7763/IJMO.2014.V4.345>
- Arias, B., Criado, Y.A., Abanades, J.C., 2020. Thermal Integration of a Flexible Calcium Looping CO<sub>2</sub> Capture System in an Existing Back-Up Coal Power Plant. *ACS Omega* 5, 4844–4852. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03552>
- Bahman, N., Al-Khalifa, M., Al Baharna, S., Abdulmohsen, Z., Khan, E., 2023. Review of carbon capture and storage technologies in selected industries: potentials and challenges. *Rev Environ Sci Biotechnol* 22, 451–470. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09649-0>
- Bisinella, V., Nedenskov, J., Riber, C., Hulgaard, T., Christensen, T.H., 2022. Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage. *Waste Manag Res* 40, 79–95. <https://doi.org/10.1177/0734242X211048125>

- Bukar, A.M., Asif, M., 2024. Technology readiness level assessment of carbon capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 200, 114578. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114578>
- Chen, Y., Yu, J., Khan, S., 2010. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software* 25, 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>
- Cormos, C.-C., 2015. Assessment of chemical absorption/adsorption for post-combustion CO<sub>2</sub> capture from Natural Gas Combined Cycle (NGCC) power plants. *Applied Thermal Engineering* 82, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.054>
- Davarpanah, A., 2024. Comparative Evaluation of Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technologies Using Multi-Criteria Decision-Making Approaches. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 12, 9498–9510. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c03025>
- Dayarathna, S., Weerasooriya, A., Hussain, S., Zarsav, M., Mathisen, A., Sørensen, H., Melaaen, M.C., 2014. Simulation of CO<sub>2</sub> capture from an aluminium production plant. Presented at the ENVIRONMENTAL IMPACT 2014, Ancona, Italy, pp. 729–739. <https://doi.org/10.2495/EID140621>
- Fu, J., Ahmad, N.N.R., Leo, C.P., Aberilla, J.M., Dela Cruz, I.J., Alamani, B., Koh, S.P., 2024. Techno-economic and life cycle assessment of membrane separation in post-combustion carbon capture: A review. *Gas Science and Engineering* 129, 205401. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2024.205401>
- Gkotsis, P., Peleka, E., Zouboulis, A., 2023. Membrane-Based Technologies for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture from Flue Gases: Recent Progress in Commonly Employed Membrane Materials. *Membranes (Basel)* 13, 898. <https://doi.org/10.3390/membranes13120898>
- Gong, H., Yang, Y., Deng, B., Fan, Y., Wang, T., Tang, Z., Xu, D., 2025. Taizhou 500kt per year post-combustion carbon capture demonstration project. *Clean En* 9, 15–23. <https://doi.org/10.1093/ce/zkaf011>
- Gouedard, C., Picq, D., Launay, F., Carrette, P.-L., 2012. Amine degradation in CO<sub>2</sub> capture. I. A review. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 10, 244–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.015>
- Hekmatmehr, H., Esmaeili, A., Pourmahdi, M., Atashrouz, S., Abedi, A., Ali Abuswer, M., Nedeljkovic, D., Latifi, M., Farag, S., Mohaddespour, A., 2024. Carbon capture

- technologies: A review on technology readiness level. *Fuel* 363, 130898.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.130898>
- Heldebrant, D.J., Kothandaraman, J., 2019. Solvent-based Absorption, in: Bui, M., Mac Dowell, N. (Eds.), *Carbon Capture and Storage*. The Royal Society of Chemistry, pp. 36–68. <https://doi.org/10.1039/9781788012744-00036>
- Horizon 2020, 2020. Guiding notes to use the TRL self- assessment tool. Horizon 2020.
- Hugh Barlow, SHAHRZAD S M SHAHI, JAVAD JEDDIZAHED, DAVID KEARNS, 2025. State of the Art: CCS Technologies 2025. Global CCS Institute.
- Hwang, C.-L., Yoon, K., 1981. Methods for Multiple Attribute Decision Making, in: Hwang, C.-L., Yoon, K. (Eds.), *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 58–191.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3)
- Jiang, L., Gonzalez-Diaz, A., Ling-Chin, J., Roskilly, A.P., Smallbone, A.J., 2019. Post-combustion CO<sub>2</sub> capture from a natural gas combined cycle power plant using activated carbon adsorption. *Applied Energy* 245, 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.006>
- Kanniche, M., Authier, O., Grandjean, L., Tber, S., Berthier, A., 2022. Techno-Economic Assessment of Amine-Based CO<sub>2</sub> Capture for Aluminium Smelter in France.  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4271839>
- Karayil, A., Elseragy, A., Aliyu, A.M., 2024. An Assessment of CO<sub>2</sub> Capture Technologies towards Global Carbon Net Neutrality. *Energies* 17, 1460.  
<https://doi.org/10.3390/en17061460>
- Kim, S., Salman, M., Léonard, G., 2022. Application of Decision Support Tool (DST) based on Analytical Hierarchy Process for Screening of Carbon Capture Technologies.
- Lai, J.Y., Ngu, L.H., Hashim, S.S., 2021. A review of CO<sub>2</sub> adsorbents performance for different carbon capture technology processes conditions. *Greenhouse Gases: Science and Technology* 11, 1076–1117. <https://doi.org/10.1002/ghg.2112>
- Layding, S.J., Caram, H.S., 2024. A thermodynamic approach to energy requirements for CO<sub>2</sub> capture and a comparison between the minimum energy for liquid and solid sorbent processes. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 137, 104227.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104227>



- Madejski, P., Chmiel, K., Subramanian, N., Kuś, T., 2022. Methods and Techniques for CO<sub>2</sub> Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. *Energies* 15, 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>
- Mühlbacher, A.C., Kaczynski, A., 2013. Der Analytic Hierarchy Process (AHP): Eine Methode zur Entscheidungsunterstützung im Gesundheitswesen. *PharmacoEcon. Ger. Res. Artic.* 11, 119–132. <https://doi.org/10.1007/s40275-014-0011-8>
- Nakao, A., Morlando, D., Knuutila, H.K., 2025. Techno-economic assessment of the multi-absorber approach at an industrial site with multiple CO<sub>2</sub> sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 142, 104326. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2025.104326>
- Normann, F., Garðarsdóttir, S.Ó., Skagestad, R., Mathisen, A., Johnsson, F., 2017. Partial Capture of Carbon Dioxide from Industrial Sources - A Discussion on Cost Optimization and the CO<sub>2</sub> Capture Rate. *Energy Procedia* 114, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1154>
- Northern Lights, 2024. Northern Lights Liquid CO<sub>2</sub> Quality Specifications [WWW Document]. URL [https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2024/03/Northern-Lights-GS-co2-2024\\_03.pdf](https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2024/03/Northern-Lights-GS-co2-2024_03.pdf) (accessed 1.12.26).
- Osagie, E., Biliyok, C., Di Lorenzo, G., Hanak, D.P., Manovic, V., 2018. Techno-economic evaluation of the 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) process for CO<sub>2</sub> capture from natural gas combined cycle power plant. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 70, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.01.010>
- Otgonbayar, T., Mazzotti, M., 2024. Modeling and assessing the integration of CO<sub>2</sub> capture in waste-to-energy plants delivering district heating. *Energy* 290, 130087. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130087>
- Pandey, V., Komal, Dincer, H., 2023. A review on TOPSIS method and its extensions for different applications with recent development. *Soft Comput* 27, 18011–18039. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-09011-0>
- Park, J.W., Heo, S., Yeo, J.-G., Lee, S., Kim, J.-K., Lee, J.H., 2025. Membrane-Based CO<sub>2</sub> Capture Across Industrial Sectors: Process Conditions, Case Studies, and Implementation Insights. *Membranes (Basel)* 15, 200. <https://doi.org/10.3390/membranes15070200>
- Plaza, M.G., Rubiera, F., Pevida, C., 2017. Evaluating the Feasibility of a TSA Process Based on Steam Stripping in Combination with Structured Carbon Adsorbents To

- Capture CO<sub>2</sub> from a Coal Power Plant. *Energy Fuels* 31, 9760–9775.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01508>
- Porter, R.T.J., Fairweather, M., Pourkashanian, M., Woolley, R.M., 2015. The range and level of impurities in CO<sub>2</sub> streams from different carbon capture sources. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 36, 161–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.02.016>
- Raganati, F., Miccio, F., Ammendola, P., 2021. Adsorption of Carbon Dioxide for Post-combustion Capture: A Review. *Energy Fuels* 35, 12845–12868.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01618>
- Rana, A., Andino, J.M., 2025. A Review of Materials for Carbon Dioxide Capture. *Catalysts* 15, 273. <https://doi.org/10.3390/catal15030273>
- Saaty, T.L., 1990. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications 48, 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sepahi, N., Ilinca, A., Rousse, D.R., 2025. Multi-criteria decision analysis for evaluating carbon capture technologies in power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 219, 115699. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115699>
- Shen, M., Tong, L., Yin, S., Liu, C., Wang, L., Feng, W., Ding, Y., 2022. Cryogenic technology progress for CO<sub>2</sub> capture under carbon neutrality goals: A review. *Separation and Purification Technology* 299, 121734.  
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121734>
- Siegelman, R.L., Milner, P.J., Kim, E.J., Weston, S.C., Long, J.R., 2019. Challenges and opportunities for adsorption-based CO<sub>2</sub> capture from natural gas combined cycle emissions. *Energy Environ Sci* 12, 2161–2173. <https://doi.org/10.1039/c9ee00505f>
- Soo, X.Y.D., Lee, J.J.C., Wu, W.-Y., Tao, L., Wang, C., Zhu, Q., Bu, J., 2024. Advancements in CO<sub>2</sub> capture by absorption and adsorption: A comprehensive review. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization* 81, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727>
- Umweltbundesamt, 2025. Bis 2040 Treibhausgase um mindestens 90 Prozent mindern – So kann es gehen! [WWW Document]. Umweltbundesamt. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bis-2040-treibhausgase-um-mindestens-90-prozent> (accessed 1.14.26).
- Verhaeghe, A., Dubois, L., Bricteux, L., Thomas, D., De Paepe, W., 2025. Absorption-based carbon capture energy penalty reduction for low CO<sub>2</sub> content applications: Comparison of performance using different solvents and process configurations on

- micro gas turbine application. *Energy* 322, 135505.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.135505>
- Wang, T., Hovland, J., Jens, K.J., 2015. Amine reclaiming technologies in post-combustion carbon dioxide capture. *Journal of Environmental Sciences* 27, 276–289.  
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.06.037>
- Wang, X., Song, C., 2020. Carbon Capture From Flue Gas and the Atmosphere: A Perspective. *Front. Energy Res.* 8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.560849>
- Webley, P.A., Danaci, D., 2019. CO<sub>2</sub> Capture by Adsorption Processes, in: Bui, M., Mac Dowell, N. (Eds.), *Carbon Capture and Storage*. The Royal Society of Chemistry, pp. 106–167. <https://doi.org/10.1039/9781788012744-00106>
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A.H., Olabi, A.G., 2019. Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of The Total Environment* 657, 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>
- Yagihara, K., Wu, T.-W., Ohno, H., Fukushima, Y., 2025. Evaluating the economic potential of membrane technologies for post-combustion in existing combustion systems: Comparison with MEA-based system. *Chemical Engineering Journal* 510, 161588.  
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.161588>
- Yu, C.-H., Huang, C.-H., Tan, C.-S., 2012. A Review of CO<sub>2</sub> Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol Air Qual. Res.* 12, 745–769.  
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>
- Zhai, H., 2019. Integrated Environmental Control Model - Technical Documentation. U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory.
- Zhang, W., Sun, C., Snape, C.E., Irons, R., Stebbing, S., Alderson, T., Fitzgerald, D., Liu, H., 2017. Process simulations of post-combustion CO<sub>2</sub> capture for coal and natural gas-fired power plants using a polyethyleneimine/silica adsorbent. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 58, 276–289. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.12.003>
- Zheng, Y., He, S., Liu, J., Wang, J., Zhu, M., Yang, G., Wang, W., 2025. Life cycle analysis of ammonia-driven calcium looping processes for post-combustion CO<sub>2</sub> capture in NGCC power plants. *Journal of Environmental Management* 390, 126223.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126223>

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Nutzung von KI

| Tool          | Benutzt für                                                                  | Befehle                                                                                                                            | Nutzen in der Arbeit                                                                                                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Perplexity AI | Erstellung von Textvorschlägen anhand vorgegebener Stichpunkte               | „Erstelle aus folgenden Stichpunkten einen Text: ...“                                                                              | Die Erstellung von Textvorschlägen wurden als Inspiration genutzt, um eigene Texte zu verfassen.                                                          |
|               | Erklärung von Fehlermeldung bei den MATLAB-Skripten                          | „Erkläre folgende Fehlermeldung...“                                                                                                | Die Erklärungen wurden genutzt, um die MATLAB-Skripte zu entwickeln                                                                                       |
|               | Findung von Literatur für den Rechercheeinstieg der theoretischen Grundlagen | Es wurden Befehle eingegeben, wie „Finde Publikationen die die chemische Absorption bei der CO <sub>2</sub> -Abscheidung erklären“ | Die Literatur wurde teilweise für die theoretischen Grundlagen benutzt oder als Startpunkt für vertiefte Recherche durch das Literaturverzeichnis benutzt |
| DeepL Write   | Korrektur der Rechtschreibung und Grammatik                                  | Keine Befehle nötig. Der zu korrigierende Text wird in die Textbox gegeben und der korrigierte Text kann entnommen werden.         | Die Korrekturen der Rechtschreibung und Grammatik wurden für alle Textteile verwendet                                                                     |

# Anhangsverzeichnis

|                                                                                  |        |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------|
| ANHANG 1: FRAGENKATALOG FÜR DIE EXPERTENINTERVIEWS .....                         | XVI    |
| ANHANG 2: EXPERTENINTERVIEW AURUBIS.....                                         | XVII   |
| ANHANG 3: EXPERTENINTERVIEW TRIMET .....                                         | XVIII  |
| ANHANG 4: EXPERTENINTERVIEW STADTREINIGUNG.....                                  | XIX    |
| ANHANG 5: EXPERTENINTERVIEW INDAVER.....                                         | XXI    |
| ANHANG 6: DATEN AUS DER SLR FÜR DIE TOPSIS-ANALYSE .....                         | XXIII  |
| ANHANG 7: AHP-AUSWERTUNG DES PAARWEISEN VERGLEICHS DURCH INDAVER.....            | XXV    |
| ANHANG 8: MATLAB-SKRIPT FÜR DIE AHP-AUSWERTUNG .....                             | XXVII  |
| ANHANG 9: MATLAB-SKRIPT FÜR DIE TOPSIS-AUSWERTUNG UND SENSITIVITÄTSANALYSE ..... | XXVIII |

# Anhang

## *Anhang 1: Fragenkatalog für die Experteninterviews*

1. Unternehmensangaben
  - a. Name des Unternehmens:
  - b. Branche/Sektor:
2. Wie würden Sie selber ihr Wissen über CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien einschätzen?
3. Für welche Emissionsquellen wird eine Carbon Capture Anlage in Betracht gezogen (oder bereits geplant)?
4. Welche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen treten bei diesen Quellen auf (in Vol.-%)?
5. Welche weiteren Komponenten, insbesondere Störgase wie (z. B. H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, O<sub>2</sub>) liegen im Abgas vor, und in welchen Konzentrationen?
6. Hier ist eine Liste technologischer Bewertungskriterien, um unterschiedliche Abscheidetechnologien miteinander zu vergleichen:
  - Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>]
  - Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>]
  - CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>]
  - Technologischer Reifegrad [TRL]
  - Abscheiderate [%]
  - SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Selektivität

Welche Kriterien hiervon sind für Sie relevant und um welche weiteren technologischen Kriterien würden Sie diese Liste erweitern wollen?

7. Hier ist eine Liste der verschiedenen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung:
  - Absorption (z.B. Amine, Carbonate)
  - Adsorption (z.B. Zeolithe, MOFs)
  - Membranverfahren
  - Kryogene Verfahren

Welche Verfahren haben Ihrer Meinung nach das höchste Potenzial, in Ihrem Prozess eingesetzt zu werden, und warum?

8. Welche technischen oder betrieblichen Hindernisse sehen Sie derzeit für eine Umsetzung?

## Anhang 2: Experteninterview Aurubis

1. Unternehmensangaben
  - a. Name des Unternehmens: Aurubis
  - b. Branche/Sektor: Kupfer
2. Wie würden Sie selber ihr Wissen über CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien einschätzen?
  - a. k.A.
3. Für welche Emissionsquellen wird eine Carbon Capture Anlage in Betracht gezogen (oder bereits geplant)?
  - a. Kupfer Recycling am Standort Löhnen
    - i. Plastikanteile am zu recycelnden Material setzen beim Einschmelzen CO<sub>2</sub> frei
4. Welche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen treten bei diesen Quellen auf (in Vol.-%)?
  - a. Recyclingstrom weist im Durchschnitt 1,7 Vol.-% CO<sub>2</sub> auf, mit Maxima von 3 bis 4 Vol.-%
5. Welche weiteren Komponenten, insbesondere Störgase wie (z. B. H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, O<sub>2</sub>) liegen im Abgas vor, und in welchen Konzentrationen?
  - a. NO<sub>x</sub>, Halogene, Schwefelkomponenten
6. Hier ist eine Liste technologischer Bewertungskriterien, um unterschiedliche Abscheidetechnologien miteinander zu vergleichen: Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>], Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>], CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>], Technologischer Reifegrad [TRL], Abscheiderate [%], SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Selektivität. Welche Kriterien hiervon sind für Sie relevant und um welche weiteren technologischen Kriterien würden Sie diese Liste erweitern wollen?
  - a. Wesentliche technologischen Kriterien sind abgedeckt
  - b. CO<sub>2</sub> Ziele sind noch unklar, weswegen Reinheit und Abscheiderate unklar bleiben
7. Hier ist eine Liste der verschiedenen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Absorption (z.B. Amine, Carbonate), Adsorption (z.B. Zeolithe, MOFs), Membranverfahren, Kryogene Verfahren. Welche Verfahren haben Ihrer Meinung nach das höchste Potenzial, in Ihrem Prozess eingesetzt zu werden, und warum?
  - a. Stand der Technik bei geringen Konzentrationen ist die chemische Absorption mittels Amine
8. Welche technischen oder betrieblichen Hindernisse sehen Sie derzeit für eine Umsetzung?
  - a. Störstoffe im Abgas sorgen für Degradation der Amine



- b. Geringe Konzentrationen bei geringen Volumenströmen sorgt für eine große Abscheideanlage mit hohem Platzverbrauch und CAPEX

### Anhang 3: Experteninterview Trimet

1. Unternehmensangaben
  - a. Name des Unternehmens: Trimet
  - b. Branche/Sektor: Aluminium
2. Wie würden Sie selber ihr Wissen über CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien einschätzen?
  - a. Wissen über wirtschaftliche Aspekte, aber weniger über das technische der CO<sub>2</sub>-Abscheidung
3. Für welche Emissionsquellen wird eine Carbon Capture Anlage in Betracht gezogen (oder bereits geplant)?
  - a. Schmelzflusselektrolyse (Prozess-Emissionen)
    - i. Sauerstoff aus dem Aluminiumoxid reagiert mit der Kohlenstoff-Anode und setzt somit CO<sub>2</sub> frei
  - b. Anoden Block Herstellung (Verbrennungs-Emissionen)
4. Welche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen treten bei diesen Quellen auf (in Vol.-%)?
  - a. Schmelzflusselektrolyse
    - i. 0,5 bis 0,9 % CO<sub>2</sub> Konzentrationen
    - ii. Mögliche Auf Konzentration bis 3 % wird erforscht
5. Welche weiteren Komponenten, insbesondere Störgase wie (z. B. H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, O<sub>2</sub>) liegen im Abgas vor, und in welchen Konzentrationen?
  - a. Bei der Schmelzflusselektrolyse
    - i. Staub -> Staub soll vorher ausgewaschen werden
    - ii. Sauerstoff -> Oxidations-/Degradationsgefahr für Amine
    - iii. NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub> -> keine relevanten Anteil
  - b. Bei dem Anodenbrennofen
    - i. NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>
6. Hier ist eine Liste technologischer Bewertungskriterien, um unterschiedliche Abscheidetechnologien miteinander zu vergleichen: Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>], Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>], CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>], Technologischer Reifegrad [TRL], Abscheiderate [%], SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Selektivität. Welche Kriterien hiervon sind für Sie relevant und um welche weiteren technologischen Kriterien würden Sie diese Liste erweitern wollen?
  - a. Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>]

- i. Finanzieller Punkt -> CCS Kosten muss niedriger als Zertifikat kosten werden
  - b. Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>]
    - i. Finanzieller Punkt -> CCS Kosten muss niedriger als Zertifikat kosten werden
  - c. CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>]
    - i. Ungewiss, da die Verwendung des CO<sub>2</sub> noch nicht bekannt ist
  - d. Technologischer Reifegrad [TRL]
  - e. Abscheiderate [%]
    - i. Möglichst hoch
  - f. SOx und NOx Selektivität
    - i. Nicht relevant
7. Hier ist eine Liste der verschiedenen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Absorption (z.B. Amine, Carbonate), Adsorption (z.B. Zeolithe, MOFs), Membranverfahren, Kryogene Verfahren. Welche Verfahren haben Ihrer Meinung nach das höchste Potenzial, in Ihrem Prozess eingesetzt zu werden, und warum?
- a. Chemische Absorption -> Bei Trimet in Frankreich werden verschiedene Amine bereits getestet
8. Welche technischen oder betrieblichen Hindernisse sehen Sie derzeit für eine Umsetzung?
- a. Die Wirtschaftlichkeit ist für die Zukunft der wichtigste Faktor, da die Abscheidung technisch bereits möglich ist
  - b. Wie ist eine vorherige aufkonzentration möglich?
  - c. Wie kann CO<sub>2</sub> weiter verwertet werden?
  - d. Welche zukünftigen Modell für die CO<sub>2</sub> Bepreisung gibt es? Welche Leitmärkte entstehen für CCS?

#### *Anhang 4: Experteninterview Stadtreinigung*

1. Unternehmensangaben
  - a. Name des Unternehmens: Stadtreinigung
  - b. Branche/Sektor: Müllverwertung
2. Wie würden Sie selber ihr Wissen über CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien einschätzen?
  - a. Expertise im Bereich Klimaneutralitätsplanung mit Fokus auf CO<sub>2</sub>-Abscheidung
3. Für welche Emissionsquellen wird eine Carbon Capture Anlage in Betracht gezogen (oder bereits geplant)?

- a. Müllverbrennung: Erste Machbarkeitsstudie war erfolgreich. Zweite Studie ist momentan am Laufen und es soll bald eine Pilotanlage gebaut werden.
4. Welche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen treten bei diesen Quellen auf (in Vol.-%)?
  - a. 12 bis 14 Vol.-%
5. Welche weiteren Komponenten, insbesondere Störgase wie (z. B. H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, O<sub>2</sub>) liegen im Abgas vor, und in welchen Konzentrationen?
  - a. NO<sub>x</sub> und SO<sub>x</sub>
6. Hier ist eine Liste technologischer Bewertungskriterien, um unterschiedliche Abscheidetechnologien miteinander zu vergleichen: Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>], Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>], CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>], Technologischer Reifegrad [TRL], Abscheiderate [%], SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Selektivität. Welche Kriterien hiervon sind für Sie relevant und um welche weiteren technologischen Kriterien würden Sie diese Liste erweitern wollen?
  - a. Alle Kriterien haben Relevanz
  - b. Liste kann noch durch Flächenbedarf und Modularität erweitert werden
  - c. Reinheit muss den Spezifikationen der Transportmedien erfüllen
    - i. Reinheitsziele werden momentan bspw. durch die Lebensmittelindustrie vorgegeben
    - ii. Wasser und Schwefel Konzentrationen müssen auf ein Minimum gehalten werden, um starke Korrosionen an Pipelines zu verhindern
  - d. SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub>-Selektivität:
    - i. Allgemeinere Formulierung gewünscht: Anfälligkeit für Degradation. Jedes Abscheideverfahren hat andere spezifische Trigger, die zur Degradation des Waschmittels führen. Es geht beim Bewertungskriterium eher um die Notwendigkeit an kontinuierlichem Feed an Waschmittel zu minimieren (Kosten und Abfallmanagement).
7. Hier ist eine Liste der verschiedenen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Absorption (z.B. Amine, Carbonate), Adsorption (z.B. Zeolithe, MOFs), Membranverfahren, Kryogene Verfahren. Welche Verfahren haben Ihrer Meinung nach das höchste Potenzial, in Ihrem Prozess eingesetzt zu werden, und warum?
  - a. Chemische Absorption mittels Aminwäsche hat das höchste Potential aufgrund der technischen Reife
  - b. Alternative Verfahren in Beobachtung
    - i. Hot Potassium Carbonate (wird neben der Aminwäsche am intensivsten Betrachtet)
    - ii. MOFs

iii. CaL-Looping

8. Welche technischen oder betrieblichen Hindernisse sehen Sie derzeit für eine Umsetzung?
- a. Abscheidetechnologie muss mit inhomogenen schwankenden Abgasen klarkommen
  - b. Platzbedarf
  - c. Einbindung des Dampfes/Wärme aus dem Verbrennungsprozess
  - d. Abscheidung muss im Dauerbetrieb laufen können
  - e. Störgase verursachen Degradation der Amine und Abfallprodukte mit teilweise toxischen Eigenschaften

*Anhang 5: Experteninterview Indaver*

1. Unternehmensangaben
  - a. Name des Unternehmens: Indaver
  - b. Branche/Sektor: Sondermüllverbrennung
2. Wie würden Sie selber ihr Wissen über CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien einschätzen?
  - a. K.A.
3. Für welche Emissionsquellen wird eine Carbon Capture Anlage in Betracht gezogen (oder bereits geplant)?
  - a. Sondermüllverbrennungsanlage
4. Welche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen treten bei diesen Quellen auf (in Vol.-%)?
  - a. 8 bis 12 Vol.-% CO<sub>2</sub>
5. Welche weiteren Komponenten, insbesondere Störgase wie (z. B. H<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Staub, O<sub>2</sub>) liegen im Abgas vor, und in welchen Konzentrationen?
  - a. Quecksilber, Dioxine, SO<sub>2</sub>
  - b. Störgase und -komponenten unterliegen starken Schwankungen aufgrund der Vielseitigkeit des hereingegebenen Abfall
6. Hier ist eine Liste technologischer Bewertungskriterien, um unterschiedliche Abscheidetechnologien miteinander zu vergleichen: Spezifischer elektrischer Energiebedarf [kWh/t CO<sub>2</sub>], Spezifischer thermischer Energiebedarf [GJ/t CO<sub>2</sub>], CO<sub>2</sub>-Reinheit bzw. Produktreinheit [% CO<sub>2</sub>], Technologischer Reifegrad [TRL], Abscheiderate [%], SO<sub>x</sub> und NO<sub>x</sub> Selektivität. Welche Kriterien hiervon sind für Sie relevant und um welche weiteren technologischen Kriterien würden Sie diese Liste erweitern wollen?
  - a. Relevanz aller Kriterien ist vorhanden
  - b. CO<sub>2</sub>-Reinheit ist schwierig einzuschätzen, da das Ziel des abgeschiedenem CO<sub>2</sub> ungewiss ist

- c. Dampfverbrauch (bzw. thermische Energiebedarf) ist ein entscheidender Faktor da dies im Gegensatz der Fernwärme Lieferung liegt
  - d. Weiteres Kriterium am Beispiel das Calcium-Looping ist der hohe Verbrauch an Eingangsmaterialien für den Abscheideprozess
7. Hier ist eine Liste der verschiedenen Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Absorption (z.B. Amine, Carbonate), Adsorption (z.B. Zeolithe, MOFs), Membranverfahren, Kryogene Verfahren. Welche Verfahren haben Ihrer Meinung nach das höchste Potenzial, in Ihrem Prozess eingesetzt zu werden, und warum?
- a. Aminwäsche hat aufgrund des höchstem TRLs auch das momentan höchste Potential
    - i. Aus Betriebswirtschaftlicher Sicht macht eine große Investition in eine Abscheideanlage nur Sinn, wenn die Technologie bereits ausgiebig getestet wurde
  - b. Membranverfahren: Haben nicht die nötige Resistenz gegenüber den anfallenden Störkomponenten im Abgas; Umgang mit niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auch ungewiss fallen wegen Schadstofffrachten und Konzentrationen raus
  - c. Rotationsabscheider sehr Platzintensiv
  - d. Kryogene-Verfahren zu energieintensiv
8. *Welche technischen oder betrieblichen Hindernisse sehen Sie derzeit für eine Umsetzung?*
- a. Sonderbepreisung von CO<sub>2</sub>-Emissionen für SAV soll momentan nicht wegfallen, wenn eine Abscheideanlage betrieben wird -> dies macht Investitionsentscheidungen noch schwieriger
  - b. Keine Planungssicherheit und Rahmenbedingungen aus der Politik
  - c. Schwankungen der Abgaszusammensetzung &-konzentrationen
  - d. Platzbedarf
  - e. Transport ist noch unklar. Bei 18 t CO<sub>2</sub> pro Stunde wäre der Abtransport mittels LKWs sehr aufwendig
  - f. Hoher Energieverbrauch der Abscheideverfahren

Anhang 6: Daten aus der SLR für die TOPSIS-Analyse

| Medium                                | CO2 Konzentration [Vol.-%] | elektr. Energiebedarf [kWh/t CO2] | therm. Energiebedarf [GJ/t CO2] | CO2 Reinheit [%] | SOx-/NOx-Selektivität | Abscheiderate [%] | TRL-Score [Bewertung zw. 0 - 3] | SLR-Quelle                                 | TOPSIS-Score (Prozess) | TOPSIS-Score (Verbrennung) |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|-----------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Membran: Solvent-supported (2 Stufen) | 4                          | 555                               | 0,00                            | 95,0             | 0                     | 90                | 1                               | (Fu et al., 2024)                          | 0,42                   | 0,307                      |
| Membran: Graphen                      | 4                          | 381                               | 0,00                            | 95,0             | 0                     | 90                | 1                               | (Fu et al., 2024)                          | 0,442                  | 0,312                      |
| Membran: CO2/N2 Selektivität = 50     | 3,9                        | 833                               | 0,00                            | 95,0             | 0                     | 90                | 0                               | (Yagihara et al., 2025)                    | 0,26                   | 0,196                      |
| Adsorption: TSA mit PEI/Silikat       | 4                          | 121                               | 2,60                            | 95,0             | 0                     | 90                | 2                               | (Jiang et al., 2019); (Zhang et al., 2017) | 0,666                  | 0,448                      |
| Adsorption: TSA mit MEA               | 4                          | 121                               | 3,70                            | 95,0             | 0                     | 90                | 1                               | (Jiang et al., 2019)                       | 0,413                  | 0,271                      |
| Adsorption: TSA mit Aktivkohle        | 4                          | 121                               | 4,90                            | 95,0             | 0                     | 90                | 1                               | (Jiang et al., 2019)                       | 0,396                  | 0,262                      |
| Absorption: MEA 30 wt%                | 1,7                        | 40                                | 5,04                            | 95,0             | 0                     | 98                | 3                               | (Abdelsamie and Hassan Ali, 2025)          | 0,754                  | 0,5472                     |
| Absorption: MEA 30 wt%                | 1,7                        | 40                                | 5,00                            | 95,0             | 0                     | 90                | 3                               | (Abdelsamie and Hassan Ali, 2025)          | 0,755                  | 0,5475                     |
| Absorption: MEA 30 wt%                | 1,7                        | 40                                | 5,01                            | 95,0             | 0                     | 95                | 3                               | (Abdelsamie and Hassan Ali, 2025)          | 0,7558                 | 0,5474                     |
| Absorption: MEA 30 wt%                | 4                          | 40                                | 3,80                            | 98,0             | 0                     | 90                | 3                               | (Verhaeghe et al., 2025)                   | 0,797                  | 0,554                      |
| Absorption: MEA 30 wt%                | 4                          | 40                                | 3,56                            | 95,0             | 0                     | 95                | 3                               | (Nakao et al., 2025)                       | 0,806                  | 0,556                      |

|                                     |      |     |      |      |   |    |   |                          |       |       |
|-------------------------------------|------|-----|------|------|---|----|---|--------------------------|-------|-------|
| Absorption: MEA 27 wt% + PZ 3 wt%   | 4,04 | 40  | 4,05 | 96,0 | 0 | 90 | 3 | (Nakao et al., 2025)     | 0,788 | 0,553 |
| Absorption: MDEA/PZ                 | 4    | 250 | 3,20 | 98,0 | 0 | 90 | 2 | (Verhaeghe et al., 2025) | 0,638 | 0,441 |
| Absorption: MDEA 17 wt% + PZ 13 wt% | 4,04 | 40  | 3,75 | 97,0 | 0 | 90 | 2 | (Adu et al., 2022)       | 0,647 | 0,442 |
| Absorption: MDEA 15 wt% + PZ 15 wt% | 4,04 | 40  | 3,40 | 97,0 | 0 | 90 | 2 | (Adu et al., 2022)       | 0,655 | 0,444 |
| Absorption: Calcium-Looping         | 2    | 120 | 5,74 | 95,0 | 1 | 98 | 2 | (Cormos, 2015)           | 0,602 | 0,696 |
| Absorption: AMP 35 wt%              | 4    | 40  | 2,90 | 99,8 | 0 | 90 | 2 | (Osagie et al., 2018)    | 0,666 | 0,448 |

**Hervorgehobene Felder:** Für diese konnten die Daten nicht aus der Publikation der systematischen Literaturrecherche (SLR-Quelle) entnommen werden. Die getroffenen Annahmen werden in Kapitel 3.1. erläutert

Anhang 7: AHP-Auswertung des paarweisen Vergleichs durch Indaver

| Kriterium                      | extrem<br>bevorzugt |   |   | sehr<br>stark<br>bevorzugt |   |   | leicht<br>bevorzugt |   | Gleich |   | leicht<br>bevorzugt |   |   | sehr<br>stark<br>bevorzugt |   |   | extrem<br>bevorzugt | Kriterium                     |
|--------------------------------|---------------------|---|---|----------------------------|---|---|---------------------|---|--------|---|---------------------|---|---|----------------------------|---|---|---------------------|-------------------------------|
|                                | 9                   | 8 | 7 | 6                          | 5 | 4 | 3                   | 2 | 1      | 2 | 3                   | 4 | 5 | 6                          | 7 | 8 | 9                   |                               |
| spez. Elektr.<br>Energiebedarf |                     |   |   |                            |   |   |                     |   |        |   |                     |   | x | x                          |   |   |                     | spez. Therm.<br>Energiebedarf |
| spez. Elektr.<br>Energiebedarf |                     |   |   |                            |   |   |                     |   | x      |   |                     |   |   |                            |   |   |                     | CO2 Reinheit                  |
| spez. Elektr.<br>Energiebedarf |                     |   |   |                            |   |   |                     |   |        |   |                     | x | x |                            |   |   |                     | CO2<br>Selektivität           |
| spez. Elektr.<br>Energiebedarf |                     |   |   |                            |   |   |                     |   |        |   |                     |   |   | x                          |   |   |                     | TRL                           |
| spez. Elektr.<br>Energiebedarf |                     | x | x |                            |   |   |                     |   |        |   |                     |   |   |                            |   |   |                     | Abscheiderate                 |
| spez. Therm.<br>Energiebedarf  |                     |   |   |                            |   |   |                     |   | x      |   |                     |   |   |                            |   |   |                     | CO2 Reinheit                  |
| spez. Therm.<br>Energiebedarf  |                     |   |   |                            |   |   |                     |   | x      |   |                     |   |   |                            |   |   |                     | NOx & SOx<br>Selektivität     |
| spez. Therm.<br>Energiebedarf  |                     |   |   |                            |   |   |                     |   |        |   |                     |   |   | x                          |   |   |                     | TRL                           |



|                               |  |   |   |   |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |  |                           |
|-------------------------------|--|---|---|---|--|--|--|---|--|--|--|---|---|---|--|--|---------------------------|
| spez. Therm.<br>Energiebedarf |  | x | x |   |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |  | Abscheiderate             |
| CO2 Reinheit                  |  |   |   |   |  |  |  | x |  |  |  |   |   |   |  |  | NOx & SOx<br>Selektivität |
| CO2 Reinheit                  |  |   |   |   |  |  |  |   |  |  |  | x | x |   |  |  | TRL                       |
| CO2 Reinheit                  |  |   |   |   |  |  |  | x |  |  |  |   |   |   |  |  | Abscheiderate             |
| NOx & SOx<br>Selektivität     |  |   |   |   |  |  |  |   |  |  |  |   |   | x |  |  | TRL                       |
| NOx & SOx<br>Selektivität     |  |   |   | x |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |  | Abscheiderate             |
| TRL                           |  | x | x |   |  |  |  |   |  |  |  |   |   |   |  |  | Abscheiderate             |

## Anhang 8: MATLAB-Skript für die AHP-Auswertung

```
clc;          % Kommandozeilenfenster leeren
clear;        % Alle Variablen löschen

W_Verbrennung = nan(6,6);
W_Verbrennung(1,6) = 2;
W_Verbrennung(2,1) = 5.5;
W_Verbrennung(2,3) = 1;
W_Verbrennung(2,4) = 1;
W_Verbrennung(2,6) = 7.5;
W_Verbrennung(3,1) = 1;
W_Verbrennung(3,4) = 1;
W_Verbrennung(3,6) = 1;
W_Verbrennung(4,1) = 4.5;
W_Verbrennung(4,6) = 6;
W_Verbrennung(5,1) = 6;
W_Verbrennung(5,2) = 6;
W_Verbrennung(5,3) = 6.5;
W_Verbrennung(5,4) = 7;
W_Verbrennung(5,6) = 7.5;

W_Prozess = nan(6,6);
W_Prozess(1,4) = 6;
W_Prozess(1,6) = 2;
W_Prozess(2,1) = 3;
W_Prozess(2,3) = 1;
W_Prozess(2,4) = 6;
W_Prozess(2,6) = 7.5;
W_Prozess(3,1) = 1;
W_Prozess(3,4) = 6;
W_Prozess(3,6) = 1;
W_Prozess(5,1) = 6;
W_Prozess(5,2) = 6;
W_Prozess(5,3) = 6.5;
W_Prozess(5,4) = 8;
W_Prozess(5,6) = 7.5;
W_Prozess(6,4) = 6;

function [out_ahp_gewichtung, out_cr] = ahp_gewichtung(W)

    n = size(W,1);
    % Ausfüllen der Reziproken
    for i = 1:size(W,1)
        for j = 1:size(W,2)
            if i == j
                W(i,j) = 1;
            elseif isnan(W(i,j))
                W(i,j) = 1/W(j,i); % Beispiel: Setze Platzhalter auf 1
            end
        end
    end

    % Geometrischer Mittelwert
    G = geomean(W, 2);

    % normierte Gewichtungsvektor (Prioritätsvektor)
    A = G/sum(G);

    % Konsistenz Überprüfung
    Summenvektor = W * A;
    Konsistenzvektor = Summenvektor ./A;
    Lambda = geomean(Konsistenzvektor, 1);
    CI = (Lambda - n)/(n-1);
    CR = CI/1.24;

    out_ahp_gewichtung = A;
    out_cr = CR;
end

[ahp_verbrennung, cr_verbrennung] = ahp_gewichtung(W_Verbrennung);

[ahp_prozess, cr_prozess] = ahp_gewichtung(W_Prozess);

disp("AHP Ergebnisse für Verbrennung");
disp(ahp_verbrennung);
```

```

disp("CR = ");
disp(cr_verbrennung);

disp("AHP Ergebnisse für Prozess");
disp(ahp_prozess);
disp("CR = ");
disp(cr_prozess);

```

## Anhang 9: MATLAB-Skript für die TOPSIS-Auswertung und Sensitivitätsanalyse

```

% TOPSIS – Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

clc;          % Kommandozeilenfenster leeren
clear;        % Alle Variablen löschen

w_Verbrennung = [0.05 0.15 0.08 0.14 0.04 0.53]; % AHP-Gewichtung für Verbrennung
w_Prozess = [0.10 0.18 0.11 0.02 0.07 0.53]; % AHP-Gewichtung für Prozesse

% --- Schritte der TOPSIS Methode --- %
function [out_topsis] = topsis_calculator(w)

    % 1. D: Datenmatrix (Alternativen x Kriterien)
    % Jede Zeile = Alternative, jede Spalte = Kriterium
    D = [40 3.56 95 0 95 3;
        40 2.90 99.8 0 90 2;
        555 0 95 0 90 1;
        381 0 95 0 90 1;
        40 4.05 96 0 90 3;
        40 3.75 97 0 90 2;
        40 3.40 97 0 90 2;
        833 0 95 0 90 0;
        121 4.9 95 0 90 1;
        121 3.7 95 0 90 1;
        121 2.6 95 0 90 2;
        40 3.8 98 0 90 3;
        40 5 95 0 90 3;
        40 5.01 95 0 95 3;
        40 5.04 95 0 98 3;
        250 3.2 98 0 90 2;
        120 5.74 95 1 98 2;
        ];

    % 2. w: Gewichtung der Kriterien

    % 3. criteriaType: Angabe, ob jedes Kriterium zu maximieren (1) oder zu minimieren (0) ist
    criteriaType = [0 0 1 1 1 1];

    % 4. Normierung der Entscheidungs-Matrix
    normD = D ./ sqrt(sum(D.^2));

    % 5. Gewichtete normierte Matrix
    weightedD = normD .* w;

    % 6. Bestimmung der idealen und negativen idealen Lösungen
    idealBest = zeros(1, size(D,2));
    idealWorst = zeros(1, size(D,2));

    for j = 1:size(D,2)
        if criteriaType(j) == 1
            idealBest(j) = max(weightedD(:,j));
            idealWorst(j) = min(weightedD(:,j));
        else
            idealBest(j) = min(weightedD(:,j));
            idealWorst(j) = max(weightedD(:,j));
        end
    end

    % 7. Abstand der Alternativen zu idealen und negativen idealen Lösungen
    distBest = sqrt(sum((weightedD - idealBest).^2, 2));
    distWorst = sqrt(sum((weightedD - idealWorst).^2, 2));

    % 8. Berechnung der TOPSIS-Prioritätswerte
    closeness = distWorst ./ (distBest + distWorst);

    % 9. Aufstellen einer Tabelle mit Index, Nähewert und Rang

```

```

T = table((1:length(closeness))', closeness);
T.Properties.VariableNames = {'Alternative', 'Score'};
T_sorted = sortrows(T, 'Score', 'descend');
T_sorted.Rang = (1:length(closeness))';
T_sorted = sortrows(T_sorted, 'Alternative', 'ascend');

% Ausgabe der Ergebnisse
out_topsis = T_sorted;
end

% Ausführung der TOPSIS-Bewertung
disp("TOPSIS-Bewertungen:")
topsis_Verbrennung = topsis_calculator(w_Verbrennung);
disp("Bewertungsergebnisse für Verbrennung")
disp(topsis_Verbrennung)
topsis_Prozess = topsis_calculator(w_Prozess);
disp("Bewertungsergebnisse für Prozesse")
disp(topsis_Prozess)

% --- Sensitivitätsanalyse --- %
function [out_t_new, out_r_change, out_pc] = s_analyse(w, c_m, pc_start, pc_rate, pc_end)

% --- Input --- %
% w: Gewichtung der Kriterien
% c_m: Index des zu untersuchenden Kriterium
% pc: Percent Change
% pc_start: Startwert der prozentualen Veränderung der Gewichtung
% pc_rate: Änderungsrate der prozentualen Veränderung der Gewichtung
% pc_end: Endwert der prozentualen Veränderung der Gewichtung
% --- Output --- %
% out_t_new: Neue TOPSIS-Tabelle nach prozentualer Veränderung
% out_r_change: Ausschnitt aus out_t_new mit Rangänderung
% out_pc: benötigte prozentuale Änderung bis Rangänderung

t_initial = topsis_calculator(w);
w_initial = w;

% Iteration der prozentualen Veränderung bis eine Rangänderung erfolgt
for pc_iter = pc_start:pc_rate:pc_end
    w_new = w_initial;

    % Kriterium c_m ändern
    w_new(c_m) = w_initial(c_m) * (1 + pc_iter/100);

    % Andere Kriterien normalisieren
    for j = 1:length(w_initial)
        if j ~= c_m
            w(j) = (1 - w_new(c_m)) * w_initial(j)/(1 - w_initial(c_m));
        end
    end

    t_new = topsis_calculator(w_new);
    t_new.Rangaenderung = t_new.Rang - t_initial.Rang;

    % Beendet bei erster Rangänderung
    if any(t_new.Rangaenderung ~= 0)
        break;
    end
end

r_change = t_new;
r_change(r_change.Rangaenderung == 0, :) = [];

% Ausgabe
out_t_new = t_new;
out_pc = pc_iter;
out_r_change = r_change;

end

disp("SA für Verbrennung")
disp("1. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 1, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 1, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("2. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 2, 1, 1, 20);
disp(pc);

```

```

[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 2, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("3. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 3, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 3, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("4. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 4, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 4, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("5. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 5, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 5, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("6. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 6, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Verbrennung, 6, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("-----")
disp("SA für Prozess")
disp("1. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 1, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 1, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("2. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 2, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 2, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("3. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 3, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 3, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("4. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 4, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 4, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("5. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 5, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 5, -1, -1, -20);
disp(pc);

disp("6. Kriterium")
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 6, 1, 1, 20);
disp(pc);
[~, ~, pc] = s_analyse(w_Prozess, 6, -1, -1, -20);
disp(pc);

```