



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



ICEBE
IMAGINEERING
NATURE

Diplomarbeit

Direct Air Capture - Experimentelle Versuche zur Integration in raumluftechnische Anlagen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ.Prof.i.R. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hermann Hofbauer
(Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften)

unter der Betreuung von

Projekttass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Josef Fuchs
(Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Technische Chemie

von

Michael Fahrngruber

11702376

(066 445)

14. September 2022

Michael Fahrngruber

Ich nehme zur Kenntnis, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

14. September 2022



Michael Fahrngruber

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit in jeglicher Form unterstützt und motiviert haben.

Ich bedanke mich bei Dr. Josef Fuchs, Prof. Hermann Hofbauer, und Dr. Johannes Fuchs für die hervorragende Zusammenarbeit und ihre Expertise, durch die ich diese Arbeit erst durchführen und mein Wissen erweitern konnte. Insbesondere gilt mein Dank Dr. Josef Fuchs für die Betreuung meiner Arbeit.

Weiters bedanke ich mich bei Peter Relan für die Finanzierung des gesamten Forschungsprojektes und seine Motivation, Technologien gegen den Klimawandel zu fördern.

Außerdem möchte ich meiner Familie danken, ohne deren Unterstützung mein Studium in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Mein Dank gilt ebenfalls meinen Studienkollegen, allen voran Andreas Wallmüller, mit dem ich zudem den gesamten Versuchsbetrieb abgewickelt habe sowie Jonathan Reisinger und Thomas Riedler für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung während des gesamten Studiums.

Kurzfassung

Als **Direct Air Capture (DAC)** bezeichnet man eine Technologie zur Abscheidung von CO_2 aus der Umgebungsluft als Maßnahme gegen den Klimawandel [1, 2]. Im aktuellen Stadium der Forschungen ist eine ökonomische Rentabilität, und damit ein kommerzieller Einsatz im großen Stil jedoch noch nicht gegeben [3–6].

Im übergeordneten Forschungsprojekt dieser Arbeit soll eine Kommerzialisierung der **DAC**-Technologie über zwei zentrale Ansätze erreicht werden. Der erste Ansatz, auf den sich die vorliegende Arbeit fokussiert, umfasst die Integration in **Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)** Systeme. Der zweite Ansatz befasst sich mit der weiteren Nutzung des abgeschiedenen Kohlendioxides.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die verglichen mit der Umgebungsluft günstigere Abscheidung von CO_2 in **HVAC**-Systemen mittels der Durchführung und Auswertung von Adsorptionsversuchen an der Versuchsanlage im Technikum der TU Wien und einer Literaturrecherche in dem Technologiefeld näher zu betrachten.

Bei den **HVAC**-spezifischen Adsorptionsversuchen wurden übliche, in der Praxis auftretende Prozessbedingungen in Form von Temperatur, CO_2 -Konzentration und relativer Luftfeuchtigkeit simuliert und daraus Versuchsdaten gewonnen. Die Ergebnisse umfassen dabei im Wesentlichen CO_2 -Bilanzen, die Aufschluss über die Kohlendioxidkapazität bei verschiedenen Bedingungen und deren Veränderung geben und Wasserbilanzen, welche für die **HVAC**-Integration von zentraler Bedeutung sind. Die gewonnenen Performancedaten der Versuchsanlage wurden dann in einem Scale-Up auf einen möglichen praktischen Anwendungsfall skaliert.

Es konnte gezeigt werden, dass eine steigende CO_2 -Konzentration in der Zuluft bei der Adsorption, zu einem schnelleren Durchbruch des Adsorbens führt. Weiters steigt die Adsorptionskapazität mit zunehmender CO_2 -Konzentration und fallender Temperatur in der Zuluft an. Niedrigere Temperaturen und höhere relative Luftfeuchtigkeiten begünstigen zudem das auf den Luftstrom bezogene Entfeuchtungsverhalten des Adsorbens während der Adsorption. Bei sehr trockener Zuluft mit nur 20 %rH bis hin zu 35 %rH kehrt sich das erwünschte Entfeuchtungsverhalten in eine Befeuchtung um. Ein geringerer Desorptionsdruck bei gleichbleibender Temperatur der Wärmetauscher im und um das Festbett führt trotz Wasserzufuhr in Form von Spüldampf zu einer Trocknung des Adsorbens während der Desorption.

Abstract

Direct Air Capture (DAC) is the term used to describe a technology for capturing CO₂ from ambient air as a measure against climate change [1, 2]. At the current stage of research, however, it is not yet commercially viable and therefore a commercial application on a large scale is not yet given [3–6].

In the overarching research project of this thesis, the aim is to commercialize **DAC** technology via two central approaches. The first approach, which is the focus of this work, involves the integration into **Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)** systems. The second approach is concerned with the further utilization of the captured carbon dioxide.

The goal of this work is to demonstrate the more favorable CO₂ capture conditions in **HVAC** systems compared to ambient air by conducting and evaluating adsorption experiments at the test facility in the Technical Center of the TU Wien. Furthermore a supplementary literature research should be conducted in the present technology field.

The **HVAC** specific adsorption tests were carried out under the usual process conditions that occur in practical applications. Therefore, specific temperatures, CO₂ concentrations and conditions of relative humidity were simulated for the collection of data. The results essentially comprise CO₂ balances, which provide information on the carbon dioxide capacity under different conditions and how they change, and water balances, which are of key importance for **HVAC** integration. The performance data obtained from the experimental plant have then been scaled up to a possible practical application.

It could be shown that an increasing CO₂ concentration on the supply air during adsorption leads to a faster breakthrough of the adsorbent. Furthermore, the adsorption capacity enlarges with increasing CO₂ concentration and decreasing temperature in the supply air. Lower temperatures and higher relative humidities also favor the dehumidification behavior of the adsorbent during adsorption, which is related to the air flow. In the case of very dry supply air with only 20 %rH up to 35 %rH, the desired dehumidification behavior is reversed to a humidification. A lower desorption pressure with a constant temperature of the heat exchangers in and around the fixed bed leads to a drying of the adsorbent during desorption despite supplying water in form of steam.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Direct Air Capture (DAC)	3
2.2	Stand der Technik zu Adsorptionsverfahren	5
2.2.1	Adsorption	5
2.2.2	Desorption	9
2.2.3	Charakterisierung von Adsorbentien	12
2.2.4	Technische Adsorbentien	13
2.3	Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)	18
2.3.1	Raumklima	18
2.3.2	Einteilung von HVAC-Systemen	20
2.3.3	Besonderheiten bei spezifischer Gebäudenutzung	24
2.3.4	Optimierung von HVAC-Systemen	26
2.3.5	Unternehmensumfeld in Österreich	26
2.4	DAC im Gebäudebereich	29
3	Experimenteller Aufbau	32
3.1	Versuchsanlage zur CO ₂ -Abscheidung	32
3.1.1	Adsorptionsaufbau	38
3.1.2	Desorptionsaufbau	39
3.2	Festlegen der Versuchsmatrix	40
3.3	Versuchsablauf Desorption	41
3.4	Versuchsablauf Adsorption	43
4	Versuchsergebnisse und Diskussion	45
4.1	CO ₂ -Bilanzen der Adsorptionen	45
4.2	Validierungsversuche der CO ₂ -Bilanzen	49
4.3	Wasserbilanzen der Adsorptionen	52
4.4	Weitere Erkenntnisse	56
4.5	Diskussion	58
5	HVAC-DAC-Scale-Up	60
6	Zusammenfassung und Ausblick	62

Abkürzungsverzeichnis	64
Abbildungsverzeichnis	65
Tabellenverzeichnis	67
Literaturverzeichnis	69
A Anhang	77
A.1 Verwendete Geräte und Sensorik	77
A.2 Produktinformationen Lewatit VP OC 1065	77

1. Einleitung

Treibhausgase sind überlebensnotwendig, denn ohne sie würde die durchschnittliche Temperatur auf der Erdoberfläche nur etwa -18 °C , anstatt der aktuellen 15 °C betragen. Diese Temperatur liegt weit unter den ungefähr 9 °C , die während der letzten Eiszeit auf der Erde vorherrschten [7]. Am Treibhauseffekt sind hauptsächlich Wasserdampf, Kohlendioxid (CO_2), Methan, Stickoxide und Ozon beteiligt. Sie absorbieren die von der Erdoberfläche emittierte Infrarotstrahlung teilweise und tragen so zu einer Erwärmung der Atmosphäre bei. Durch die exzessive Verbrennung von fossilen Treibstoffen im 20. Jahrhundert ist jedoch der CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre unseres Planeten ausgehend von vorindustriellen 280ppm auf aktuell ungefähr 420ppm angestiegen, was zahlreiche Herausforderungen unserer Zeit mit sich bringt. Der schwedische Physiker und Chemiker Svante Arrhenius war 1896 der Erste, der einen damit einhergehenden globalen Temperaturanstieg von bis zu mehreren °C prognostizierte [8]. Bis jetzt konnte eine Erwärmung des globalen Klimas von etwa 1°C beobachtet werden. [9]

Um die globale Erderwärmung auf unter $1,5\text{ °C}$ zu begrenzen ist nach dem [Intergovernmental Panel on Climate Change \(IPCC\)](#) [10] neben der Umstellung auf erneuerbare Energiequellen auch der Einsatz von Technologien zur Kohlendioxidentfernung aus der Atmosphäre in der Größenordnung von 100 bis 1000 GtCO_2 im Laufe des 21. Jahrhunderts nötig. Darunter fallen Aufforstung und Wiederaufforstung, Bodensanierung und die Kohlenstoffbindung im Boden, [Bioenergy with Carbon Capture and Storage \(BECCS\)](#), [DAC](#) mit anschließender Speicherung, beschleunigte Gesteinsverwitterung (engl. Enhanced Weathering) sowie eine Alkalisierung der Ozeane (engl. Ocean Alkalinity Enhancement). Abhängig vom jeweiligen CO_2 -Reduktionspfad finden diese Technologien in unterschiedlichem Ausmaß Anwendung.

Die unter [Direct Air Capture \(DAC\)](#) bekannte Abscheidung von CO_2 aus der Umgebungsluft wurde in den letzten Jahren zum Trendthema in der Forschung und verzeichnete einen starken Anstieg bei der Anzahl an veröffentlichten Publikationen sowie Patenten [11]. Die große Menge der sogenannten diffusen Emissionen, die durch dezentrale Emittenten wie beispielsweise im Verkehrssektor oder bei privaten Haushalten entstehen, machen ungefähr die Hälfte des jährlichen globalen CO_2 -Ausstoßes aus. Die [DAC](#)-Technologie richtet sich genau an diese Quellen und ermöglicht es, durch sogenannte Negativemissionen langfristig wieder eine CO_2 -Konzentration auf vorindustriellem Niveau in der Atmosphäre herzustellen. [1]

Ein aktuelles Forschungsprojekt an der Technischen Universität Wien mit externem Auftraggeber widmet sich genau dieser Technologie. Eine Kommerzialisierung im großen Stil wird derzeit noch durch die zu hohen CO_2 -Abscheidungskosten verhindert. Die langfristigen Kosteneinschätzungen von Unternehmen aus der Branche

belaufen sich auf 50 bis 232 $\$/\text{tCO}_2$ [3] und sind aktuell noch um einiges höher. Die Kosten sind insbesondere in Relation zum Preis von CO_2 -Zertifikaten im EU-Emissionshandel zu sehen, der sich aktuell auf etwa 70 $\$/\text{tCO}_2$ beläuft [6]. Das langfristige Projektziel einer Kommerzialisierung der DAC-Technologie soll somit über zwei zentrale Ansätze erfolgen. Der erste Ansatz, auf den sich die vorliegende Arbeit fokussiert, umfasst die Integration in Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Systeme. Dadurch kann neben der um bis zu 4-fach höheren CO_2 -Konzentration verglichen mit der Umgebungsluft (Kategorie IV nach DIN EN 16798-1 [12]) auch ein geringerer Außenluftbedarf zu erheblichen Kosteneinsparungen führen [13]. Der zweite Ansatz befasst sich mit der weiteren Nutzung des abgeschiedenen Kohlendioxids und zielt prinzipiell auf die Umwandlung von CO_2 in ein höherwertiges Produkt jeglicher Art ab.

Um das langfristige Bestreben einer HVAC-Integration zu erreichen, ist das Ziel dieser Arbeit die Durchführung und Auswertung von Adsorptionsversuchen mittels einer DAC-Laborapparatur betreffend des vorliegenden Anwendungsfalls. Weiters soll im Literaturteil ein Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Adsorption sowie raumlufttechnischer Anlagen mit Fokus auf DAC-Schnittstellen gegeben werden. Dies umfasst auch einen Überblick über das in Österreich ansässige Unternehmensumfeld im HVAC-Bereich. Abschließend ist ein Scale-Up der Laborversuche für einen HVAC-DAC-Anwendungsfall durchzuführen.

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Einführung in den Stand der Technik im Bereich Direct Air Capture und gibt dann eine Übersicht über die Adsorption. Nach einer kurzen Begriffsdefinition werden die verschiedenen Arten der Adsorption erläutert und ein Blick auf die dahinterliegende Thermodynamik geworfen. Bevor näher auf die technischen Adsorbentien eingegangen wird, folgen noch die möglichen Desorptionsverfahren. Nach den Möglichkeiten deren Charakterisierung werden typische Adsorbentien kurz erläutert. Anschließend wird näher auf aminbasierte Adsorbentien eingegangen. Das zweite große Kapitel der raumlufttechnischen Anlagen führt über allgemeine Aspekte zum Raumklima mit normativem Hintergrund zu einer HVAC-Anlageneinteilung und den Besonderheiten bei einer Nutzung in spezifischen Gebäuden und Raumarten, wie unter anderem Hotels, Büroräume und Hörsäle. Nach dem Überblick über das HVAC-Unternehmensumfeld in Österreich folgt der Forschungsstand zu DAC-Anwendungen im Gebäudebereich. Der praktische Teil der Arbeit startet mit dem Festlegen der Versuchsmatrix und geht nach einem Einblick in die DAC-Versuchsanlage auf die ausgewerteten Ergebnisse ein. Zu guter Letzt endet die Arbeit mit einem HVAC-DAC-Scale-Up der Versuchsanlage für einen möglichen Anwendungsfall in einem Bürogebäude.

2. Stand der Technik

Dieses Kapitel soll einen Überblick über den Stand der Technik der an den später folgenden praktischen Versuchen beteiligten Felder geben. Beginnend wird die Technologie [Direct Air Capture \(DAC\)](#) kurz erläutert, um dann auf die Adsorptionsverfahren und die zugrundeliegenden physikalischen und chemischen Effekte sowie auch die verwendeten Adsorbentien näher einzugehen. Der Fokus liegt projektbedingt dabei vor allem auf der Gasphasenadsorption. Es folgt der weitere große Kontaktpunkt der [Heating, Ventilation and Air Conditioning \(HVAC\)](#) Systeme und die zugrundeliegenden raumklimatischen Grundlagen. Zu guter Letzt wird die Kombination dieser beiden Felder, also die Integration des [DAC-Verfahrens](#) in [HVAC-Systeme](#), näher betrachtet.

2.1 Direct Air Capture (DAC)

Lackner et al. [2] erwähnte 1999 erstmals die Möglichkeit der CO_2 Rückgewinnung aus der Atmosphäre im großen Stil als Maßnahme gegen den Klimawandel, die jetzt gemeinhin als [DAC](#) bezeichnet wird. Er erkannte bereits damals, dass die hohen Mengen an diffusen Emissionen nicht ohne eine solche direkte Abscheidung aus der Umgebungsluft kompensiert werden können. Als wesentlichen Vorteil nennt er vor allem die Möglichkeit einer Klimaneutralität ohne ein gänzlich Ersetzen der bestehenden Infrastruktur.

Auch die [IPCC](#) [10] kommt zu dem Schluss, dass eine Begrenzung der globalen Erderwärmung auf unter $1,5\text{ °C}$ nur durch den Einsatz von Technologien zur Kohlendioxidentfernung aus der Atmosphäre in der Größenordnung von 100 bis 1000 GtCO_2 im Laufe des 21. Jahrhunderts möglich ist.

Die [DAC-Forschung](#) bedient sich weitgehend der Adsorptionstechnik, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Es sei jedoch erwähnt, dass es auch alternative Ansätze wie CO_2 -Mineralisierung, photokatalytische CO_2 -Umwandlung, elektrochemische Verfahren sowie die Membranabscheidung gibt, die sich aber noch in frühen Entwicklungsphasen befinden. [1]

Der Energiebedarf zur Abscheidung von CO_2 aus der Umgebungsluft wurde von Viebahn et al. [3] für einige in dem Gebiet tätige Unternehmen verglichen. Der Bedarf befindet sich im Bereich von 1,89 bis $3,5\text{ MWh/tCO}_2$ und teilt sich je nach Unternehmen und Verfahren zu verschiedenen Anteilen in Wärmeenergiebedarf und elektrischen Energiebedarf auf. Die Kosten belaufen sich aktuell auf ungefähr $600\text{ \$/tCO}_2$ und werden von Unternehmen für die Zukunft auf 50 bis $232\text{ \$/tCO}_2$ prognostiziert. Eine weitere Kostenanalyse wurde von Fasihi et al. [4] durchgeführt. Für High Temperature/Low Temperature [DAC](#) werden Kosten von 268/222, 133/105,

91/69, 71/54 $\$/\text{tCO}_2$ für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 in einem konservativen Szenario mit 8000 Vollaststunden im Jahr ($\approx 91\%$ Auslastung) prognostiziert.

Auch die National Academics of Sciences [5] publizierte eine Kostenanalyse von DAC-Anlagen für CAPEX (Capital Expenditures) und OPEX (Operational Expenditures). Die in Abbildung 2.1 ersichtlichen Daten stammen von den National Academics of Sciences [5] und wurden von Ozkan et al. [6] grafisch aufbereitet. Die Kostenberechnung beruht auf der Annahme einer Anlage mit einer Abscheidungs-kapazität von 1 $\text{MtCO}_2/\text{Jahr}$ (detailliertere Informationen siehe [5, Appendix D]). Es ist sofort ersichtlich, dass insbesondere das Adsorbens den größten Teil der Investitionskosten (= Capital Cost) darstellt. Im realistischen Fall (Mid) wurde von Adsorbenskosten von 50 $\$/\text{kg}$ mit einer Lebensdauer von 0,5 Jahren und einer Betriebskapazität von 1,0 mol CO_2/kg ausgegangen. Die Autoren [5] merken auch an, dass dieser Fall als realistisch zu betrachten ist und die Low- und High-Szenarios nur bedingt die Realität widerspiegeln werden. Bei den Betriebskosten (= Operating Cost) stellt die Adsorption den größten Kostenpunkt dar. Dieser beinhaltet im Wesentlichen die Stromkosten für das notwendige Gebläse und wird besonders durch den Druckverlust durch die Adsorbensschüttung beeinflusst. Nach der National Academy of Sciences belaufen sich die voraussichtlichen CO_2 -Abscheidungskosten auf 88 bis 228 $\$/\text{tCO}_2$. [5]

Nach Ozkan et al. [6] stellen Abscheidungskosten von $< 100\ \$/\text{tCO}_2$ die Schranke einer wirtschaftlichen Realisierbarkeit im großen Stil dar. Dies ist vor allem auch mit dem Hintergrund des aktuellen Preises von CO_2 -Zertifikaten im EU-Emissionshandel zu betrachten, der sich auf rund $70\ \$/\text{tCO}_2$ beläuft und von dem in naher Zukunft ein Anstieg auf $100\ \$/\text{tCO}_2$ erwartet wird.



Abbildung 2.1: Aufschlüsselung der Kosten von Solid-Sorbent DAC Anlagen [6]

2.2 Stand der Technik zu Adsorptionsverfahren

2.2.1 Adsorption

Die Adsorption ist ein Effekt, der häufig zur Trennung oder Reinigung von Stoffen angewendet wird. Er umfasst die Anreicherung eines vorzugsweise flüssigen oder gasförmigen Stoffes aus einer Lösung auf der äußeren und inneren Oberfläche eines Feststoffes, der als Adsorbens bezeichnet wird. Die Adsorption findet so lange statt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. [14, Ch.1]

Die technischen Anwendungsgebiete dieses Effektes sind vielfältig und umfassen in der Gasphase unter anderem die Rückgewinnung von Dämpfen organischer Lösungsmittel, die Dehydrierung von Gasen, die Entfernung von toxischen Stoffen und Gerüchen zum Personenschutz sowie auch die in dieser Arbeit im Fokus liegende CO₂-Abscheidung aus der Umgebungsluft. Die Adsorption aus der Flüssigphase kommt beispielsweise bei der Trinkwasseraufbereitung (Entfernung von Geruch, Geschmack, Farbe, gelösten organischen Stoffen, ...), der Abwasserbehandlung (industriell und häuslich) sowie der Entfärbung in der Lebensmittelindustrie (Rohrzucker-sirup und Pflanzenöle) und in der Erdölindustrie zum Einsatz. [14, Ch.1.4]

Begriffsdefinition

Es gibt in der Adsorptionstechnik zahlreiche Begriffe für die einzelnen am Prozess beteiligten Stoffe und Vorgänge, die zuerst definiert werden müssen, bevor die weiteren Prozessdetails erläutert werden können. Wie in Abbildung 2.2 ersichtlich und zuvor schon erwähnt, bezeichnet man den Grundstoff, der das zu adsorbierende Molekül (Adsorptiv) während der Adsorption an seiner Oberfläche anreichert, als Adsorbens. Nach der Verbindung des Adsorptivs mit dem Adsorbens wird dieses als Adsorpt bezeichnet und bildet gemeinsam mit dem Adsorbens das sogenannte Adsorbat. Der Umkehrvorgang der Adsorption, also die Rückführung des adsorbierten Moleküls in die freie fluide Phase, wird Desorption genannt. [15, Ch.1.2]

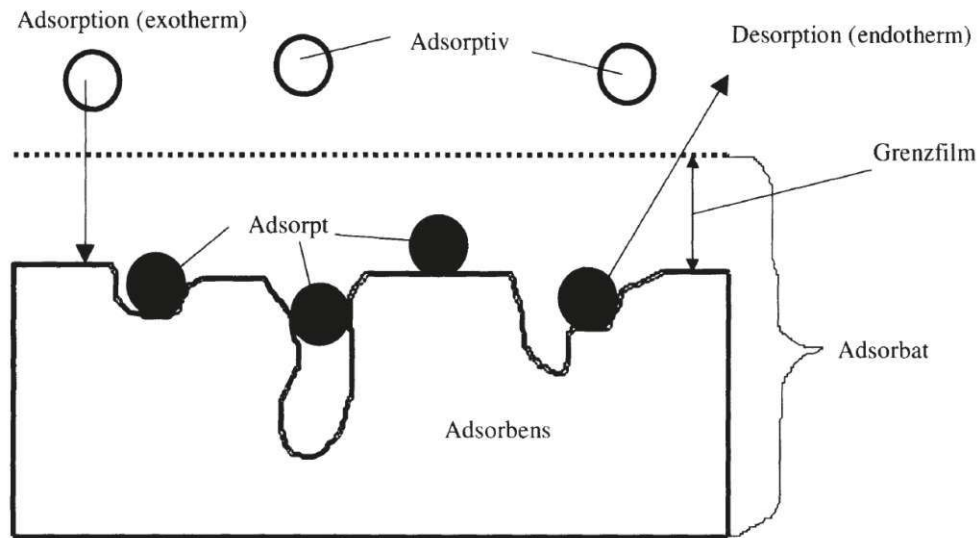


Abbildung 2.2: Begriffsdefinition in der Adsorptionstechnik [15, Abb.1.1]

Arten der Adsorption

Bei der Adsorption kann man die zwei Grundformen, Physisorption und Chemisorption, differenzieren. Sie unterscheiden sich in ihrem grundlegenden Mechanismus, können jedoch auch gleichzeitig auftreten.

Bei der **Physisorption** basiert die Akkumulation des Adsorptivs an der Oberfläche durch verhältnismäßig schwache Van der Waals Kräfte und elektrostatische Anziehung. Während Van der Waals Wechselwirkungen immer auftreten, wirken elektrostatische Kräfte nur bei ionischen Adsorbentien wie Zeolithen oder [Metal Organic Frameworks \(MOFs\)](#). Da die Bindungskräfte bei der Physisorption schwach sind, handelt es sich im Allgemeinen um einen reversiblen Prozess mit Adsorptionseenthalpien im Bereich von 10 bis 40 kJ/mol.

Anders ist dies bei der sogenannten **Chemisorption**, der zweiten Grundform, mit Adsorptionseenthalpien von 40 bis 400 kJ/mol. Die Desorption ist hier schwieriger, erfordert einen höheren Energieaufwand und kann unter Umständen auch garnicht möglich sein. Das Adsorpt wird in diesem Fall über chemische Bindungen (kovalent, ionisch, Wasserstoffbrücken) an das Adsorbens gebunden.

[16, Ch.1.2]

Thermodynamik der Adsorption

Die Triebkraft der Adsorption ist wie bei vielen natürlichen Systemen ein von außen aufgebracht Ungleichgewicht. Die Adsorption findet somit so lange statt, bis dieses Ungleichgewicht abgebaut wurde und sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Für den Fall einer reinen Gasadsorption lässt sich die folgende Gleichgewichtsbeziehung

für ein spezifisches Adsorbens-Adsorptiv-System angeben: [14, Ch.2.2]

$$q = f(p, T) \quad (2.1)$$

Die Adsorbensbeladung q , ist demnach eine Funktion des Partialdruckes p des Adsorptivs und der Temperatur T im System. Ähnlich ist dies auch bei der Adsorption aus einer flüssigen Phase. Hier ist jedoch statt des Partialdruckes p die Konzentration c des in der flüssigen Lösung befindlichen Adsorptivs maßgeblich für den Gleichgewichtszustand. Die Adsorbensbeladung q wird meist in Mol oder Gramm Adsorpt pro Mol oder Gramm Adsorbens angegeben. [14, Ch.2.2, Ch.3]

Der Gleichgewichtszustand wird häufig über sogenannte Adsorptionsisothermen, seltener auch über Adsorptionsisostere oder Adsorptionsisobare, beschrieben. Diese Isothermen werden bei konstanter Temperatur aufgenommen und liefern einen Zusammenhang zwischen der Adsorbensbeladung q und dem Partialdruck p bzw. der Konzentration c des Adsorptivs in der Gasphase/Flüssigphase. [15, Ch.3.1]

Adsorptionsisotherme können phänomenologisch in sechs Grundformen eingeteilt werden, von denen fünf bereits von Brunauer, Emmet und Teller erkannt wurden. Die als BET-Klassifizierung bekannte Einteilung wurde später von der [International Union of Pure and Applied Chemistry \(IUPAC\)](#) um eine weitere Isothermenform ergänzt. Die unterschiedlichen Grundformen sind in [Abbildung 2.3](#) ersichtlich. [15, Ch.3.1]

Je nach Typ gibt es bestimmte Modelle und Gleichungen, die eine mathematische Beschreibung der Isothermen ermöglichen. Isothermen des Typs I sind dadurch charakterisiert, nach einem steilen, annähernd linearen Anstieg ein Plateau zu bilden. Zur mathematischen Beschreibung eignet sich die Langmuir-Gleichung. Beim Typ II tritt zuerst ebenfalls ein Zwischenplateau auf, bis ab einem gewissen Partialdruck eine mehrschichtige Adsorption einsetzt, die zu einem weiteren Anstieg führt. Beschrieben werden kann dieser Typ unter anderem durch die BET-Gleichung. Typ III Isotherme folgen einem potential-funktionalen Zusammenhang, der über die Freundlich-Gleichung beschrieben werden kann. Typ IV weist einen wellenförmigen Verlauf mit Zwischenplateau auf, der ebenfalls unter anderem über die BET-Gleichung beschrieben werden kann. Beim Typ V handelt es sich um eine Kombination von Typ I (Langmuir) und Typ III (Freundlich), der z.B. bei der Wasserdampfadsorption auf Aktivkohle auftritt. [15, Ch.3]

Einen Adsorptionsprozess kann man je nach Anzahl der gleichzeitig adsorbierten Stoffe in Ein- und Mehrkomponentenprozesse einteilen. Häufig kann aber auf die einfachste Beschreibung über Einkomponenten-Isothermen zurückgegriffen werden, da sich weitere Stoffkomponenten inert gegenüber dem Adsorbens verhalten können, also nicht adsorbiert werden. Zur Beschreibung von Einkomponenten-Adsorptions-

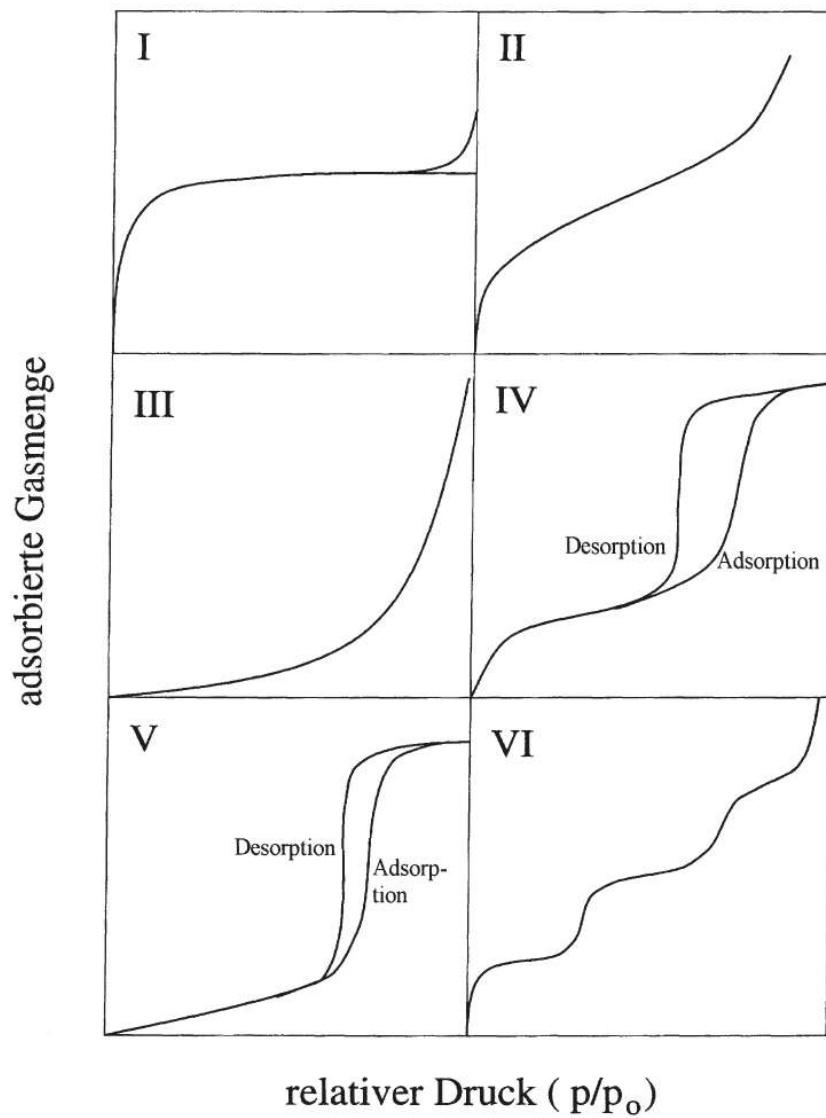


Abbildung 2.3: IUPAC-Klassifizierung der Isothermentypen für Gasphasenadsorption [15, Abb.3.2]

prozessen sind unter anderem die Henry-Gleichung, Langmuir-Gleichung, Freundlich-Isotherme, BET-Gleichung und Toth-Isotherme geeignet. Bei der Henry-Gleichung, der einfachst möglichen Beschreibung, handelt es sich um eine lineare Gleichung, bei der angenommen wird, dass alle Adsorptionsplätze energetisch gleichwertig sind, alle Adsorptionsplätze besetzt werden können und dass keine Wechselwirkungen zwischen den Adsorpt-Molekülen auftreten. Andere Gleichungen wie beispielsweise Langmuir oder Freundlich, sind nichtlineare Beschreibungen mit mehreren Parametern. Für genauere Informationen über die einzelnen Gleichungen sei auf Bathen und Breitbach [15, Ch.3.1.3] verwiesen. [15, Ch.3.1.3]

Toth-Isotherme

Mit der Toth-Isotherme wird häufig auch der CO₂-Adsorptionsvorgang aus der Umgebungsluft an dem aminbasierten Adsorbens Lewatit VP OC 1065, das auch im vorliegenden Projekt verwendet wurde, beschrieben. [17–21]

Bei dieser Isothermen handelt es sich um eine Kombination der Gleichungen von Freundlich und Langmuir die durch eine Multiplikation von deren differentiellen Formen entstanden ist. Die Gleichung für die Gasphase lautet: [15, Ch. 3.1.3]

$$q(T) = \frac{p^{A(T)}}{\left(\frac{1}{K(T)} + p^{B(T)}\right)^{\frac{A(T)}{B(T)}}} \quad (2.2)$$

Die Gleichung beschreibt die Adsorbensbeladung q in Abhängigkeit des Partialdruckes p und der drei Parameter A , B und K . Für $A = B = 1$ geht sie in die Langmuir-Gleichung über und für $B = 1$ sowie $p \ll 1/K$ erhält man die Freundlich-Isotherme. [15, Ch.3.1.3]

2.2.2 Desorption

Der Umkehrvorgang der Adsorption, also die Rückführung des Adsorpts in die fluide Phase, wird als Desorption bezeichnet. Dies kann durch eine Verschiebung des Gleichgewichtszustandes in die gewünschte Richtung erreicht werden (vgl. Kapitel 2.2). Die Desorption ist durch den notwendigen Energieaufwand in vielen Anwendungsfällen kostenbestimmend und stellt dadurch einen wichtigen Forschungsbereich dar. Die grundsätzliche Einteilung der Desorptionsverfahren erfolgt in die folgenden drei Kategorien, wobei häufig auch Kombinationen zum Einsatz kommen: [15, Ch.5]

Druckwechsel-Desorption

Bei der **Pressure Swing Adsorption (PSA)** wird der Gleichgewichtszustand durch Druckänderung verlagert. Ein Absenken des Druckes bewirkt dabei eine Verschie-

bung hin zur Desorption und umgekehrt. Bei üblichen Druckwechselverfahren liegt der Druck bei der Adsorption im Bereich von 3 bis 5 bar(a) und bei der Desorption mit ca. 1 bar(a) auf Umgebungsdruckniveau. Eine weitere Variante davon, die sogenannte **Vacuum Swing Adsorption (VSA)**, arbeitet bei der Adsorption nur mit leichtem Überdruck von 1,2 bis 1,6 bar(a) und bei der Desorption wird ein Vakuum (0,2 – 0,5 bar(a)) angelegt. Es sind natürlich auch Kombinationen der beiden Verfahren (Desorption unter Umgebungsdruck und Adsorption unter erhöhtem Druck) möglich. Eine bei der Prozessführung zu beachtende Tatsache ist die Temperaturabnahme, die durch Druckabsenkung entsteht und sich ungünstig auf den endothermen Desorptionsprozess auswirkt. Aus diesem Grund kommen häufig sehr kurze Zykluszeiten (30 Sekunden bis einige Minuten) zum Einsatz um möglichst isotherme Verhältnisse in der Adsorbenschüttung zu erhalten. [15, Ch.5]

Temperaturwechsel-Desorption

Bei der Temperaturwechseldesorption (engl. **TSA**) wird das Gleichgewicht durch Temperaturänderung verlagert. Hohe Temperaturen begünstigen dabei die Desorption (endotherm), geringe Temperaturen die Adsorption (exotherm). Das Verfahren kommt besonders bei hohen Adsorptionsenthalpien (starke Wechselwirkungen zwischen Adsorbens und Adsorptiv) zum Einsatz. Das Zuführen der benötigten Energie in die Adsorbenschüttung kann dabei auf viele Wege erfolgen. Übliche Methoden bei der **TSA** umfassen die Spülung mit heißem Inertgas, das Spülen mit Wasserdampf, der Einsatz von Heizelementen jeglicher Art, die Einleitung von elektrischem Strom, die Bestrahlung mit Mikrowellen sowie die Bestrahlung mit Infrarot-Strahlen. [15, Ch.5]

Bei der **Spülung mit heißem Inertgas** sind vor allem Luft, Stickstoff und Helium als Spülmedien von industrieller Relevanz. Während Luft vor allem in Trocknungsprozessen zum Einsatz kommt, wird Stickstoff bei brennbaren Adsorptiven wie organischen Lösungsmitteln aus Gründen des Explosionsschutzes eingesetzt. Unter Umständen wird in Spezialfällen auch Helium statt Stickstoff verwendet. Es kann abhängig von den Rahmenbedingungen auch möglich sein, einen Teil des erzeugten (desorbierten) Reingases zu erwärmen und als Spülgas rückzuführen. Die benötigte Energiemenge beim Spülen kann über die Spülgasmenge und die Temperatur eingestellt werden. Da die Wärmekapazität dieser Gase jedoch meist gering ist und die Desorbatverdünnung minimiert werden sollte, wird die Temperatur in der Praxis möglichst hoch, also knapp zur thermischen Stabilität des Adsorptivs, gelegt. [15, Ch.5]

Die wirtschaftlich sehr interessante Minimierung der Spülgasmenge kann auch durch den Einsatz von **Heizelementen** an den Wänden oder im Inneren der Schüttung unterstützt werden. Die Wärmeleitungseigenschaften der meisten Adsorbentien sind

jedoch sehr schlecht, befinden sich im Bereich von Dämmstoffen und begrenzen somit die Anwendbarkeit dieser Methode zur Energieeinbringung. Auch lokale Überhitzungen an den Heizelementen sind zu vermeiden. Bei der Wärmeeinbringung in das Innere der Adsorbenschüttung, wie mit **Mikrowellenbestrahlung** möglich, kann dies verhindert werden. Dadurch kann die Desorption simultan im gesamten Schüttungsvolumen erfolgen und somit die Ausbildung von Temperaturfronten in Durchströmungsrichtung, wie bei der Heißgasdesorption üblich, unterbunden werden. Die limitierte Eindringtiefe von Mikrowellen beträgt im Regelfall unter 1 m und die Auslegung solcher Anlagen ist problematisch. Die Wärmeeinbringung über die **Einleitung eines elektrischen Stromes** stellt ebenfalls eine Möglichkeit dar. Dafür muss das Adsorbens jedoch elektrisch leitfähig sein (z.B. modifizierte Aktivkohlen) und es ist auf lokale Überhitzungen an den Strom-Einspeisungsstellen zu achten. [15, Ch.5]

Verdrängungs-Desorption

Bei der auch als **Composition Swing Adsorption (CSA)** bezeichneten Verdrängungs-Desorption erfolgt die Verlagerung des Gleichgewichtszustandes durch eine Änderung der Zusammensetzung der fluiden Phase. Eine Reduktion der Adsorptiv-Konzentration verlagert das Gleichgewicht in Richtung der Desorption und umgekehrt. Insbesondere der Einsatz von Wasserdampf als Spülgas ist hier zu erwähnen und bildet eine Kombination aus Verdrängungs- und Temperaturwechsel-Desorption. Mit steigender Polarität des Adsorptivs ist der Verdrängungseffekt dabei stärker ausgeprägt. Die weitaus höhere Energiedichte im Bereich von 2200 kJ/kg (latente Wärme) ermöglicht im Vergleich zu Stickstoff (≈ 100 kJ/kg sensible Wärme bei Abkühlung von 140 °C auf 40 °C) eine weitaus effizientere Energieeinbringung. Um eine frühzeitige Kondensation in der Adsorbenschüttung zu verhindern, bietet sich der Einsatz von überhitztem Dampf an. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch die Tatsache, dass sich ein weiterer nicht inerter Stoff im System befindet, der die Adsorptionsleistung positiv und negativ beeinflussen kann. Bei Aktivkohle konkurrieren Wasser und Adsorptiv um dieselben Adsorptionsplätze und es kann zu einer Kapazitätsreduktion in der Größenordnung von 30 % bis 60 % kommen. Eine Trocknung vor der Adsorption kann also notwendig sein. Bei aminbasierten Adsorbentien kommt es jedoch durch die zusätzliche Wasserbeladung zu einer signifikanten Steigerung der CO₂-Kapazität, das sich als günstig erweisen kann [18]. Das Wasser im Desorbat muss jedoch anschließend auskondensiert werden um den Reinstoff zu erhalten. Ein weiterer interessanter Effekt, der bei der Wasserdampf-Desorption insbesondere in Kolonnen beobachtet werden kann, ist die Ausbildung einer „Wasserfront“ gegen die Strömungsrichtung. Dabei handelt es sich um die Kondensation von Dampf, beginnend von den (kälteren) oberen Adsorbenschichten. Bei zunehmender Prozessdauer kann dieses Wasser durch die weitere Energiezufuhr in Form des überhitzten

Dampfes wieder verdampfen und es kommt zu einer partiellen Trocknung im oberen Bereich. Bei der Wasserdampf-Desorption kann generell eine externe Trocknung vor der Adsorption nötig sein. [15, Ch.5]

2.2.3 Charakterisierung von Adsorbentien

Adsorbentien sind über verschiedenste Kennwerte charakterisierbar, die zu einem gewissen Grad eigenschaftsbestimmend sind. So beeinflusst die **Partikelgröße** des granulatförmigen Adsorbens die Menge des Stoffaustausches und den Druckverlust, der bei Durchströmung entsteht. Während kleinere Partikel den Stoffaustausch durch kürzere Diffusionswege begünstigen, erhöhen sie auch den Druckverlust über die Adsorbens-Schüttung. Durch diese gegenläufigen Effekte ergibt sich ein Optimierungsproblem, bei dem in der Gasphase Korndurchmesser von einem bis mehreren Millimetern ein Optimum bilden. Bei der Flüssigphasenadsorption sollten die Partikeldurchmesser geringer sein, da dort auch die Diffusionsgeschwindigkeiten wesentlich geringer sind. Da die Partikel herstellungsbedingt nicht alle genau gleich groß sind, ergibt sich eine Partikelgrößenverteilung über die Schüttung. Die Bestimmung dieser Verteilung kann über Siebanalyse, Laserstreulichtverfahren (für pulverförmige Materialien), mikroskopische Zählverfahren oder Sinkversuche erfolgen. [15, Ch.2.2]

Bei Adsorbentien gibt es weiters zahlreiche Dichten die bestimmt werden können. Da es sich um hochporöse Stoffe handelt, ist zur Bestimmung der eigentlichen **Dichte** des Feststoffes (= wahre Dichte, Materialdichte bzw. Feststoffdichte) neben dem Wiegen der Adsorbensmasse auch die Messung des Feststoffvolumens nötig, wozu pyknometische Verfahren mit porengängigen Gasen oder Flüssigkeiten zum Einsatz kommen. Die scheinbare Dichte, auch Partikeldichte bzw. Kornrohddichte genannt, wird demgegenüber über das Gesamtvolumen mittels nicht porengängigen Flüssigkeiten ebenfalls pyknometrisch bestimmt. Da sich im Porenvolumen auch Feuchtigkeit sammeln kann, gibt es darüber hinaus die feuchte Dichte bzw. Kornnassdichte welche sich im feuchten Zustand des Adsorbens gleich wie die scheinbare Dichte bestimmen lässt. Auch die gesamte Adsorbensschüttung kann mit der Schüttdichte über die Masse und das eingeschüttete Volumen charakterisiert werden. Weiters wird in die Filterschüttdichte (Volumenmessung nach einmaligem Rückspülen) und die Rütteldichte (Rütteln des Adsorbens während der Einschüttung) unterschieden. Auch bei der Porosität kann in die innere Porosität, die den Anteil des Porenvolumens an dem Gesamtvolumen eines Partikels angibt, und den makroskopischen Lückengrad der Schüttung unterschieden werden. [15, Ch.2.2]

Ein wichtiges Charakteristikum für die Adsorptionsleistung ist die **innere Oberfläche** eines Adsorbenskornes. Diese ist im Allgemeinen um ein Vielfaches größer als die äußere Oberfläche. Einige Gramm Aktivkohle haben beispielsweise eine innere Oberfläche von ungefähr 1500 m². Die innere Oberfläche ist umgekehrt proportional

zum Durchmesser der Poren im Adsorbenskorn. Eine untere Grenze für den Porendurchmesser bildet somit die Molekülgröße des Adsorptivs, da sonst keine Diffusion in die Poren möglich ist. Als Messmethoden sind hier die Methode nach Brunauer, Emmett und Teller (BET-Methode), der Iodtest und der Kohlenstofftetrachlorid-Test bekannt, auf die hier nicht näher eingegangen wird. [15, Ch.2.2]

Auch die **Porendurchmesserverteilung** ist ein weiteres Charakteristikum, das nach IUPAC in die vier verschiedenen Größenbereiche Submikroporen ($< 0,4$ nm), Mikroporen ($0,1 - 2$ nm), Mesoporen ($2 - 50$ nm) und Makroporen (> 50 nm) eingeteilt wird. Die eigentliche Adsorption passiert hauptsächlich in den Mikroporen. In Makro- und Mesoporen finden weitgehend Transportvorgänge statt. [15, Ch.2.2]

2.2.4 Technische Adsorbentien

Im vorliegenden Kapitel werden übliche Gruppen von Adsorbentien erläutert und auf ihre individuellen Vor- und Nachteile kurz eingegangen. Der Fokus liegt dabei auf aminbasierten Adsorbentien, zu dessen Gruppe auch das bei den praktischen Versuchen verwendete Adsorbens Lewatit VP OC 1065 gehört.

Aktivkohlen

Aktivkohle ist eine Adsorbensart, die aus Kohlenstoff besteht und unter anderem zum Filtern von Verunreinigungen aus Luft und Wasser verwendet wird. Die eigentliche Herstellung der Kohle durch Hochtemperaturbehandlung in Inertatmosphäre (= Verkohlung) kann aus nahezu allen kohlenstoffhaltigen Stoffen wie beispielsweise Bambus, Holz, Braun- und Steinkohle, Erdölkoks sowie Polymeren erfolgen. Klassische Kohle ist bereits seit 3750 vor Christus in Verwendung und wurde bereits von den Ägyptern und Sumerern unter anderem zur Erzreduktion bei der Bronzeherstellung und zu medizinischen Zwecken verwendet. Die sogenannte Aktivierung von Kohle wurde im industriellen Maßstab hingegen erst im 20. Jahrhundert durchgeführt und bezeichnet einen Weiterbehandlungsschritt, der das Ziel verfolgt, die Porosität (insbesondere Mikroporosität) der Kohle zu erhöhen. Dadurch erhöht sich auch die innere Oberfläche um ein Vielfaches, die bei Aktivkohlen typischerweise über $1000 \text{ m}^2/\text{g}$ liegt. Die zwei möglichen Herstellungswege sind die physikalische und die chemische Aktivierung. Bei dem physikalischen Verfahren wird nach vorhergehender Verkohlung mit Kohlendioxid oder Wasserdampf aktiviert. Die chemische Aktivierung geschieht in einem Schritt durch eine Behandlung des Ausgangsstoffes mit Dehydratisierungsmitteln (Dehydratisierung = Abspaltung von Wasser), welche die pyrolytische Zersetzung durch eine Erhöhung der Kohlenstoffausbeute sowie durch eine Reduktion der Teerbildung beeinflussen. Die Vorzüge von Aktivkohlen beinhalten geringe Kosten, eine schnelle Kinetik (Adsorptionsgleichgewicht < 10 min), hohe Stabilität, einfache Regeneration, hydrophobe Eigenschaften sowie

die hohe Adsorptionskapazität, die jedoch nur bei hohen (Partial-)Drücken besteht. Kohlenstoffbasierte Adsorbentien können des Weiteren über verschiedenste Wege aminfunktionalisiert werden. [22–25]

Zeolithe

Bei Zeolithen handelt es sich um poröse kristalline Aluminosilikate, die aus tetraedischem SiO_4 und AlO_4 aufgebaut sind. Aluminium und Silizium sind dabei über ein Sauerstoffatom verbunden. Die CO_2 -Adsorption erfolgt hauptsächlich durch Physisorption. Ein geringer Beitrag durch Chemisorption kann jedoch beispielsweise über Carbonatbildung erfolgen. Die optimalen Bedingungen für den Einsatz von Zeolithen für die CO_2 -Abscheidung sind geringe Temperaturen unter 30 °C und hohe CO_2 -Partialdrücke von über 2 bar(a) unter trockenen Bedingungen. Höhere Temperaturen sind mit einer Abnahme der Kapazität verbunden. Die Regeneration erfolgt meist über [Pressure Swing Adsorption \(PSA\)](#) oder [Vacuum Swing Adsorption \(VSA\)](#). Bei der Verwendung von Zeolithen zur CO_2 -Abscheidung sind feuchte Bedingungen besonders kritisch. Diese wirken sich negativ auf die CO_2 -Kapazität aus. Weiters ist die generelle Selektivität dieser Adsorbenskategorie gegenüber CO_2 gering. Um dies zu verbessern, wurden Zeolithe auch bereits als Grundstoff zur Aminfunktionalisierung verwendet [26–32]. [25]

Metal Organic Frameworks (MOFs)

Bei diesen im deutschsprachigen Raum auch als metallorganische Gerüstverbindungen bekannten Materialien handelt es sich um ein-, zwei- oder dreidimensionale Netzwerke. Sie bestehen aus metallbasierten Knoten, die mit organischen Verbindungselementen (engl. linkers) überbrückt werden. Die schematische kristalline Grundstruktur ist in [Abbildung 2.4](#) ersichtlich. Für [Direct Air Capture](#) werden vor allem aminfunktionalisierte [MOFs](#) eingesetzt. [25, 33]

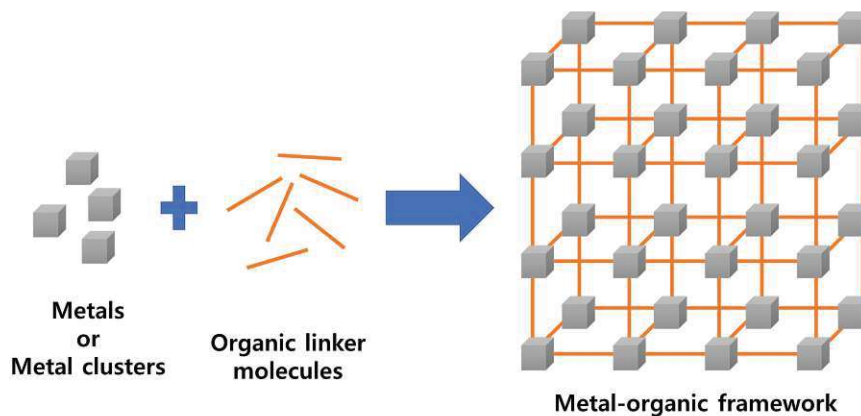


Abbildung 2.4: Schematische Struktur von metallorganischen Verbindungen [34]

Aminbasierte Adsorbentien

Bei CO₂-Capture Verfahren im Allgemeinen zählen Amine als die am häufigsten verwendete Adsorbensart. Als günstig erweist sich vor allem die reversible Reaktion zwischen dem Amin und CO₂, die eine Aufnahme mit anschließend einfacher Abgabe des Kohlendioxides ermöglicht. Bei Aminen handelt es sich um Derivate von Ammoniak NH₃, die je nach der Anzahl der substituierten Wasserstoffatome, wie in Abbildung 2.5 ersichtlich, in primäre, sekundäre und tertiäre Amine eingeteilt werden. [35, Ch.2]

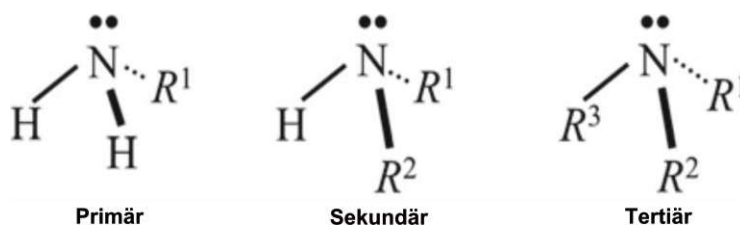
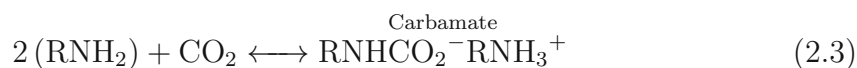


Abbildung 2.5: Klassifikation von Aminen [35]

Der zugrundeliegende Mechanismus von aminbasierten Feststoffadsorbentien bei der Speicherung von CO₂ unter trockenen Bedingungen beruht auf dem Ersetzen von H⁺ Ionen durch CO₂ und der daraus folgenden Bildung von Carbamaten. Die in Gleichung 2.3 ersichtliche Reaktion weist ohne Feuchtigkeit eine theoretische Speicherkapazität von 0,5 mol CO₂/mol N auf. Die Präsenz von Wasser führt bei aminbasierten Feststoffadsorbentien zu einer Kapazitätssteigerung. Die zugehörige Reaktion in Gleichung 2.4 beinhaltet eine Bicarbonat- sowie Carbonatbildung und führt zu einer theoretischen Kapazität von 1 mol CO₂/mol N. Die langsame Reaktionskinetik der Bicarbonatbildung führt jedoch dazu, dass die praktisch erreichbaren Kapazitäten unter dem theoretischen Maximum im Bereich von 0,5 bis 1 mol CO₂/mol N liegen werden. Die Präsenz von Feuchtigkeit führt dabei jedoch zu keiner Degradation des Adsorbens. [36]



Die traditionelle Methode der Aminwäsche zur CO₂-Abscheidung basiert auf der Absorption mit flüssigen Aminlösungen. Dabei treten jedoch unter anderem Herausforderungen durch Korrosion, Toxizität sowie eine energieintensive Sorbent-Regeneration durch den typischerweise hohen Wassergehalt von Aminlösungen auf. Der Einsatz von festen Adsorbentien kann den Energiebedarf für die Regeneration deutlich senken. Die Herstellung dieser aminbasierten Adsorbentien erfolgt auf der Basis eines

porösen Substrates. Die Aufbringung und Immobilisierung der Aminmoleküle erfolgt dann durch Nassimprägnierung [37] oder über kovalente Bindung entweder durch Post-Grafting [38] oder durch Kondensation von Aminosilanen und Tetraalkoxysilanen. Als Substrat können unter anderem Polymere, mesoporöses Siliziumdioxid (SiO_2), Zeolithe oder **Metal Organic Frameworks (MOFs)** verwendet werden. Diese Adsorbentien besitzen eine ausgezeichnete Adsorptionskinetik, ein geringes Einsatztemperaturniveau sowie eine hohe CO_2 -Kapazität. Die Adsorptionskapazität übersteigt klassische, im Trockenem betriebene, physikalische Adsorbentien wie Zeolithe, Aktivkohlen und **MOFs** sogar unter feuchten Bedingungen. [33, 39]

Die in Abbildung 2.6 ersichtliche Form der Adsorptionsisotherme von aminfunktionalisierten Adsorbentien zeigt einen schnellen Anstieg der Kapazität bereits bei geringen CO_2 Partialdrücken. Dies wird durch die Chemisorption der Amine begründet und führt zu der guten Eignung für **DAC**-Anwendungen. Der Anteil der Physisorption ist abhängig vom jeweiligen Grundstoff des Adsorbens und wirkt sich vor allem bei höheren Partialdrücken positiv aus. [36]

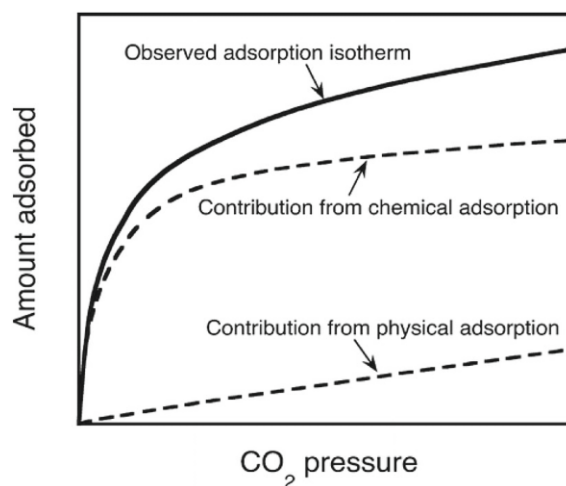


Abbildung 2.6: Anteil von Physisorption und Chemisorption bei der CO_2 -Aufnahme von aminfunktionalisierten Adsorbentien [36]

Nach Bollini et al. [40] können diese aminbasierten Feststoff-Adsorbentien in drei Klassen eingeteilt werden. Diese in Abbildung 2.7 ersichtliche Klassifikation hat sich in dem Fachbereich etabliert und wird auch von anderen Autoren [22, 33, 41] verwendet.

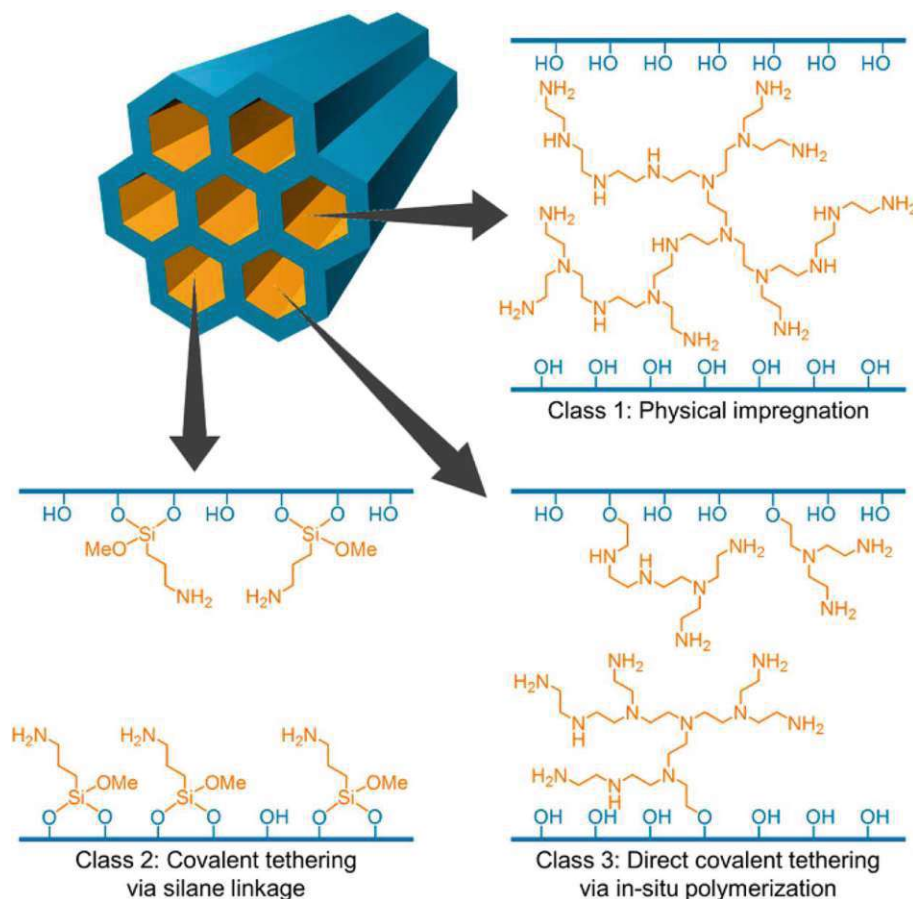


Abbildung 2.7: Klassifikation von aminbasierten Adsorbentien [42]

Bei Adsorbentien der **Klasse 1** geschieht die Einbringung der Amine auf die Oberfläche des porösen Grundstoffes durch Imprägnierung. Bei der Imprägnierung wird das Amin mit einem Lösungsmittel vermischt, der Grundstoff darin getränkt und anschließend das Lösungsmittel wieder verdunstet beziehungsweise ausgetrocknet [43]. Das Amin verbleibt dann fixiert auf dem porösen Grundstoff. Die Herstellung von Klasse 1 Adsorbentien ist verglichen mit der Klasse 2 und 3 konzeptionell am einfachsten. Dies begünstigt vor allem die Anwendbarkeit in großen Anlagen. [40]

Bei **Klasse 2** Adsorbentien liegen kovalente Bindungen zwischen dem Silizium im Amin und dem Sauerstoff des SiO_2 Grundstoffes vor. Genauer handelt es sich bei dem Amin beispielsweise um aminhaltige Moleküle wie Organosilane. Als Silane werden Stoffe bezeichnet, die aus einem Silizium-Grundgerüst und Wasserstoff bestehen. Ersetzt man den Wasserstoff durch organische Reste, erhält man sogenannte Organosilane. Ein viel erforschter Vertreter ist **3-Aminopropyltrimethoxysilan**, das als **APS** bekannt ist. Der häufigste Herstellungsprozess von Klasse 2 Adsorbentien wird als „Pfropfen“ (engl. grafting) bezeichnet. Eine weitere Möglichkeit stellt die Synthese durch Co-Kondensation dar. [40]

Bei **Klasse 3** Adsorbentien werden durch in situ Polymerisation direkte kovalen-

te Bindungen zwischen dem Amin und dem Grundstoff erzeugt. Während Stoffe der Klasse 1 die höchste CO₂-Kapazität aufweisen, so ermöglichen die kovalenten Bindungen der Klasse 2 die beste Regenerationsstabilität. Klasse 3 Adsorbentien schaffen hier den Mittelweg und weisen gute Eigenschaften in beiden Kriterien auf. [40]

Didas et al. [42] untersuchten die CO₂-Adsorption aus der Umgebungsluft erstmals anhand eines sogenannten **Hyperbranched Aminosilica (HAS)** Class 3 Adsorbens. Für die Herstellung wurden **Polyethylenimine (PEI)** auf mesoporöses Siliziumdioxid polymerisiert. Es wurden verschiedene Chargen mit Aminbeladungen von 0 bis 42 wt% Aminopolymer vorbereitet. Anschließende Adsorptionsversuche für einen simulierten Abgasstrom (10 % CO₂) sowie für Umgebungsluft (400 ppm CO₂) jeweils im feuchten und trockenen Zustand zeigten, dass die CO₂-Variation um den Faktor 250 nur zu einem Kapazitätsverlust um das 2,2 bis 8,5-fache führte. Dies indiziert eine gute Eignung von aminbasierten Niedrigtemperatur-Chemisorbentien für die Gewinnung von CO₂ aus extrem niedrig konzentrierten Quellen wie der Umgebungsluft. Die höchste Aminbeladung erreichte zwar auch die höchste Gleichgewichtskapazität ($\approx 1,7$ mol CO₂/kg), jedoch bei deutlich langsamerer Adsorptionskinetik. Begründet werden kann das durch eine stärkere Porenbelegung im mesoporösen Grundstoff, der dort auftretende Diffusionsvorgänge limitiert. Die Aminbeladung stellt somit ein wichtiges Auslegungskriterium für die Adsorbensherstellung dar und muss auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

Einen Kapazitätsvergleichswert liefert ein mit Dimethylethyldiaminen funktionalisiertes **MOF**, das im **DAC**-Einsatz mit etwa 3 mol CO₂/kg laut Darunte et al. [33] (Stand 2016) zu den kapazitätsstärksten Adsorbentien in seiner Kategorie gehört. Das Adsorbens Lewatit VP OC 1065 weist nach Buijs und de Flart [44] bei 400 ppm CO₂ und 20 °C eine Kapazität von rund 1,1 mol CO₂/kg auf. Es besteht auch die Möglichkeit der Verwendung von natürlichen Stoffen für die Grundstruktur zur Aminfunktionalisierung. In diversen Arbeiten sind dazu beispielsweise Weizenschalen [45], Sisal-Fasern [46], Bimsstein [47] sowie Zellulose [48] untersucht worden.

2.3 Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

2.3.1 Raumklima

Die im Allgemeinen als **Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)** bezeichnete Ingenieursdisziplin umfasst, wie der Name bereits preisgibt, das Heizen, Lüften und Klimatisieren von Räumen und dient damit der Aufrechterhaltung einer behaglichen Raumluft. Richtwerte für ein behagliches Raumklima stellt dabei die DIN EN 16798-1 [12] zur Verfügung. Diese Norm beinhaltet Berechnungsverfahren zur Auslegung von raumluftechnischen Anlagen sowie Anhaltswerte für ein behagliches

Innenraumklima. Die Angaben bezüglich des Innenraumklimas setzen eine geringe Aktivität der Raumnutzer voraus. Da die Sauerstoffaufnahme des Menschen sehr stark von der körperlichen Aktivität abhängt und dabei auf das 12-fache des Ruhewertes ansteigen kann [49], sind Sportstätten unter anderem von der DIN EN 16798-1 ausgeschlossen. Auch die thermische Behaglichkeit wird von der körperlichen Aktivität wesentlich beeinflusst [50]. Für Informationen über weitere Schnittstellen mit anderen Normen sei auf die DIN EN 16798-1 [12] selbst verwiesen. [12]

In Verbindung mit Direct Air Capture Systemen sind vor allem die zulässigen CO₂-Konzentrationen sowie die erforderlichen Außenluftvolumenströme in den jeweiligen Behaglichkeitskategorien von Relevanz. Diese Kategorien sind über den vorausgesagten Prozentsatz von unzufriedenen Personen im Raum definiert. Der Anteil liegt in Kategorie I bei unter 6 % und steigt bis zu einem Wert von 25 % in Kategorie IV an. Bei den in Tabelle 2.3 ersichtlichen Werten handelt es sich um relative Konzentrationen. Die Absolutwerte erhält man durch Addition der Werte mit den ungefähr 400 ppm CO₂, die in der Außenluft enthalten sind. Demnach liegen übliche CO₂-Konzentrationen in der Raumluft ungefähr zwischen 750 und 1750 ppm. [12]

Der notwendige Außenluftvolumenstrom für die jeweiligen Behaglichkeitskategorien ergibt sich als Summe aus dem nötigen Volumenstrom zur Kompensation von menschlichen Emissionen und den Gebäudeemissionen. Für die Emissionen von unangepassten Personen sind dabei, wie in Tabelle 2.4 ersichtlich, Außenluftvolumenströme von 10 L/s für Kategorie I, 7 L/s für Kategorie II bis hin zu 2,5 L/s (pro Person) für Kategorie IV vorzusehen. Als unangepasste Personen werden solche bezeichnet, die sich noch nicht länger im Raum befinden und sich somit noch nicht an die dort vorherrschenden, unter Umständen schlechten Bedingungen gewöhnt haben. Diese möglichen Veränderungen der wahrgenommenen Behaglichkeit werden als Anpassungseffekte bezeichnet. Die Außenluftvolumenströme zur Verdünnung von Gebäudeemissionen befinden sich für schadstoffarme Gebäude bei unter 1 L/s pro m² Raumfläche. [12]

Die Raumlufttemperaturen in Wohnräumen, Büros oder ähnlich genutzten Räumen sollen dabei in Kategorie II ganzjährig zwischen 20°C (Winterperiode bei 40 % relativer Luftfeuchte) und 26°C (Sommerperiode bei 60 % relativer Luftfeuchte) liegen. Es ist dabei anzumerken, dass die DIN EN 16798-1 [12] prinzipiell die Kategorie II als Basis für die Auslegung von Räumen in Neubau oder sanierten Bestandsgebäuden empfiehlt. [12]

Wird ein Raum in dem sich mehrere Personen befinden, über längere Zeit nicht gelüftet, so können durch die abnehmende Raumluftqualität schnell Symptome wie Müdigkeit, Kopfschmerzen, Aufmerksamkeitsstörungen sowie Schwindel auftreten. Der Grund dafür ist nicht die sich verringernde Sauerstoffkonzentration im Raum, sondern vor allem das zunehmende CO₂ in der Raumluft. Einer Person ist es nicht

möglich, eine Senkung des O₂-Gehaltes von 21 % auf 20 % wahrzunehmen, während eine CO₂ Erhöhung um weniger als 0,5 % (5000 ppm) bereits zu den oben genannten Symptomen führt. Eine sitzende Person emittiert nach Medved [51, p.151] ungefähr 25 g CO₂ pro Stunde. Gall und Nazaroff [52] nehmen 34 g CO₂ pro Person und Stunde an. [13]

Neben den CO₂-Emissionen sind im Zusammenhang mit DAC-Systemen besonders auch die verschiedenen Feuchtigkeitsquellen in Gebäuden, die in Tabelle 2.1 ersichtlich sind, relevant. Hier erkennt man, dass die Wasserdampfemission eines Menschen sehr stark von der körperlichen Betätigung abhängt. Auch Duschen sticht als starke Feuchtigkeitsquelle heraus, das jedoch durch die verhältnismäßig kurze Zeitdauer meist weniger emittiert als trocknende Wäsche. Übermäßige Feuchtigkeit führt jedoch nicht nur zu unbehaglichem Raumklima, sondern kann auch durch die Gebäudestruktur aufgenommen werden. Dies kann nicht nur zu Schimmelbildung oder zu anderwertigem mikrobiellen Wachstum führen, sondern auch die Wärmeleitfähigkeit der Bausubstanz signifikant erhöhen und somit deren Isolationseigenschaften negativ beeinflussen. [51, Ch. 3]

Des Weiteren gibt auch die VDI 2078 [53] Formeln zur Berechnung der Wasserdampfabgabe von Personen in Abhängigkeit ihres Aktivitätsgrades an. Die Aktivität wird in Stufen von I-IV in entspannt sitzend, sitzende Tätigkeit, leichte stehende Tätigkeit und mittelschwere stehende Tätigkeit eingeteilt. Jeder dieser Kategorien ist eine Formel zugeordnet, aus der sich dann die Wasserdampfabgabe einer Person in g/h bestimmen lässt.

Zur Verhinderung von Schimmelbildung an der Gebäudestruktur stellt die DIN EN ISO 13788 [54] Berechnungsverfahren zur Verfügung. Der Norm zufolge sollen die monatlichen Mittelwerte der relativen Luftfeuchte an der inneren Gebäudeoberfläche eine kritische relative Feuchte von 80 % nicht überschreiten. Daraus lässt sich dann über den vorhandenen Partialdruck von Wasser und den Sättigungsdampfdruck die kritische Oberflächentemperatur bestimmen, die nicht unterschritten werden darf. Die Einflussgrößen bei dieser Berechnung sind neben dem Außenklima (Temperatur und Luftfeuchte) auch die Isolationsgüte des Gebäudes, die raumseitige Feuchtezufuhr bzw. Luftfeuchtigkeit sowie die Raumtemperatur. [54]

2.3.2 Einteilung von HVAC-Systemen

Einteilung nach Anlagenfunktion

Eine Einteilung von HVAC-Systemen kann, wie in Abbildung 2.8 ersichtlich, unter anderem nach dem Funktionsumfang erfolgen. Man unterscheidet dabei Anlagen, die über eine Lüftungsfunktion verfügen (Außen- und Mischluftanlagen) sowie reine Umluftanlagen, die keinen Außenluftanteil nutzen und somit die verbrauchte Raum-

Wasserdampfquellen in Gebäuden	Wasserdampfemission [g/h]
körperlich inaktive Person	30-60
Person bei sitzender Büroarbeit	100
hart arbeitende Person	300
kochen	100
trocknende Wäsche	500
baden	70
duschen	2600
Zimmerpflanze	15
ruhende Wasseroberfläche	40

Tabelle 2.1: An die Umgebungsluft abgegebene Wasserdampfmengen nach Quelle [51, Table 3.1 & p.151]

Kategorie	Auslegungswert relative Luftfeuchte für Entfeuchtung [%]	Auslegungswert relative Luftfeuchte für Befeuchtung [%]
I	50	30
II	60	25
III	70	20

Tabelle 2.2: Auslegungskriterien der Be- und Entfeuchtungsanlagen für Räume, deren Feuchtekriterien durch menschliche Nutzung bestimmt werden [12]

Kategorie	Zulässige CO ₂ -Konzentration in ppm nach DIN EN 16798-1 [12] (über Außenluftkonzentration)
I	350
II	550
III	900
IV	1350

Tabelle 2.3: Zulässige CO₂-Konzentration in der Raumluft nach Behaglichkeitskategorie

Kategorie	Außenluftvolumenstrom nach DIN EN 16798-1 [12]	
	Personenemissionen in L/s pro Person	Gebäudeemissionen (schadstoffarmes Gebäude) in L/(s m ²)
I	10	1
II	7	0,7
III	4	0,4
IV	2,5	0,3

Tabelle 2.4: Empfohlener Auslegungs-Außenluftvolumenstrom nach Behaglichkeitskategorie

luft nicht austauschen.

Neben dem Lüften können auch weitere thermodynamische Aufgaben wie Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten den Funktionsumfang einer raumlufttechnischen Anlage ergänzen. Werden dabei zwei oder drei thermodynamische Behandlungsfunktionen gleichzeitig erfüllt, so spricht man von einer Teilklimaanlage. Erst wenn ein HVAC-System gleichzeitig Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten kann, handelt es sich um eine Vollklimaanlage. Die Möglichkeit einer Lüftung ist bei dieser Bezeichnung nicht von Belang. [55, Ch.5.5.5]

Einteilung nach Anlagenfunktionen

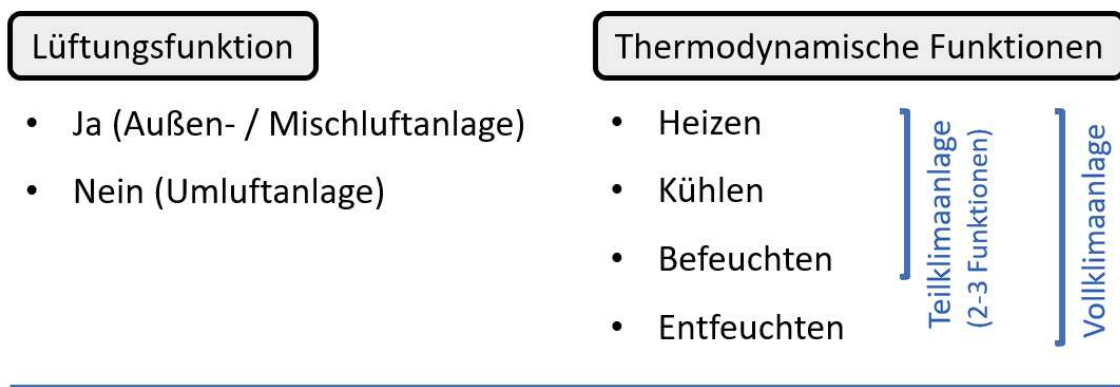


Abbildung 2.8: Einteilung von HVAC Systemen nach Anlagenfunktion [55, Ch. 5.5.5]

Für die Diskussion sowie die Kennzeichnung und Darstellung von raumlufttechnischen Anlagen unterscheidet man zahlreiche verschiedene Luftarten, von denen die wichtigsten in Tabelle 2.5 definiert sind. Ein möglicher Weg der Luft durch ein zentrales HVAC-System wäre beispielsweise folgender: (1) Ansaugen der Außenluft, (2) Behandlung der Luft im HVAC-System (thermodynamische Behandlungsfunktionen, Filtern, Schall dämpfen, ...), (3) behandelte Luft wird dem Raum als Zuluft zugeführt, (4) Abführen der Luft im Raum als Abluft, (5) Nachbehandlung der Luft im HVAC-System (Wärmerückgewinnung, Filtern, Schall dämpfen, ...), (6) Abgabe der Luft an die Umgebung als Fortluft. [55, Abb.5.37]

Weitere Einteilungsmöglichkeiten

Zentrale raumlufttechnische Anlagen kann man weiters in Nur-Luft-Anlagen, Luft-Wasser-Anlagen und Luft-Kältemittel-Anlagen einteilen. Bei Nur-Luft-Anlagen unterteilt man grundsätzlich auch in Systeme mit variablem Volumenstrom und solche mit konstantem Volumenstrom. Bei konstantem Volumenstrom werden die thermischen Anforderungen im Raum durch eine Variation der Temperatur erreicht,

Bezeichnung	Abkürzung		Definition
	deutsch	englisch	
Außenluft	AUL	ODA	Unbehandelte Luft, die von außen in die Anlage oder in eine Öffnung einströmt
Zuluft	ZUL	SUP	Luftstrom, der in den behandelten Raum eintritt, oder Luft, die in die Anlage eintritt, nachdem sie behandelt wurde
Raumluft	RAU	IDA	Luft im behandelten Raum oder Bereich
Überströmluft	ÜBS	TRA	Raumluft, die vom behandelten Raum in einen anderen behandelten Bereich strömt
Abluft	ABL	ETA	Luftstrom, der den behandelten Raum verlässt
Umluft	UML	RCA	Abluft, die der Luftbehandlungsanlage wieder zugeführt wird und als Zuluft wieder verwendet wird
Fortluft	FOL	EHA	Luftstrom, der ins Freie strömt
Sekundärluft	SEK	SEC	Luftstrom, der einem Raum entnommen und nach Behandlung demselben Raum wieder zugeführt wird

Tabelle 2.5: Luftarten für die Kennzeichnung und Darstellung von raumlufttechnischen Anlagen [55, Tab.5.6]

während diese bei Anlagen mit variablem Volumenstrom konstant bleibt. Ein variabler Volumenstrom erlaubt dabei auch eine Optimierung des Energieverbrauchs durch Einsatz von bedarfsgesteuerter Lüftung (siehe Kapitel 2.3.4). Der schematische Aufbau eines solchen Systems ist in Abbildung 2.9 ersichtlich. Die Einstellung des benötigten Luftstromes erfolgt über die variablen Volumenstromregler für Zuluft (ZUL) und Abluft (ABL) in Kombination mit drehzahlregulierten Ventilatoren. [55, Ch.5]

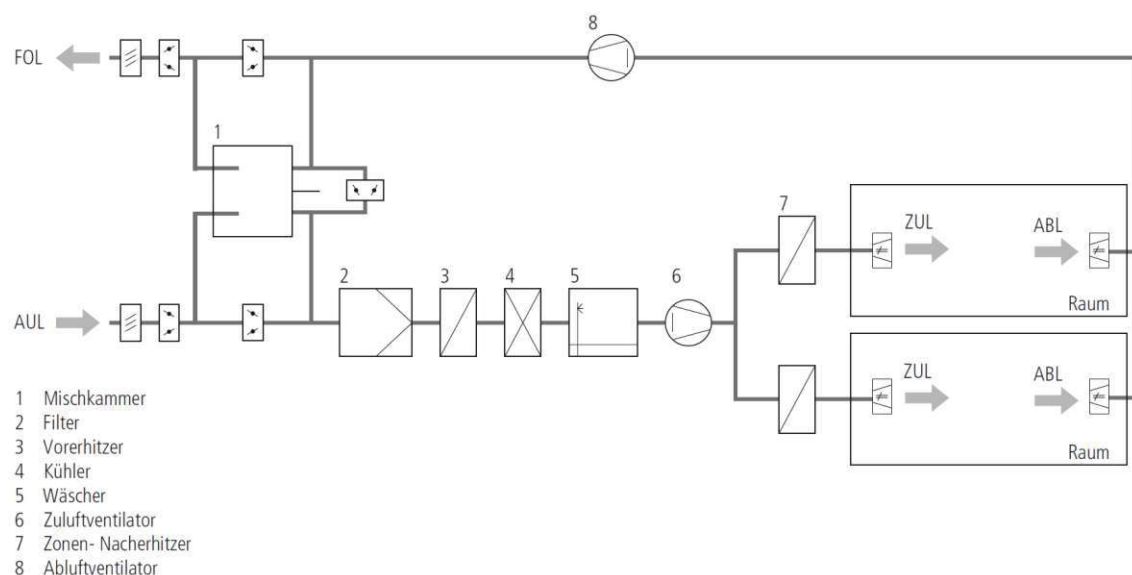


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau eines HVAC-Systems mit variablem Volumenstrom [55, Abb.5.48]

Luft-Wasser-Anlagen kombinieren luftbasierte Systeme mit wasserführenden Flächen-Heiz- und -Kühlsystemen. Dies ermöglicht beispielsweise die Kompensation von ther-

mischen Grundlasten über Deckenkühlung, Kühlkonvektoren oder thermisch aktivierte Bauteilsysteme und führt zu einem zugluftarmen, behaglichen Raumklima mit geringer Temperaturasymmetrie. Aus diesen Gründen haben sich Luft-Wasser-Anlagen für Anwendungen in Nicht-Wohngebäuden gegenüber rein luftbasierten Systemen durchgesetzt. [55, Ch.5.5.7]

Luft-Kältemittel-Anlagen kommen häufig als günstige, dezentrale Alternative zum Einsatz. Die Luftbehandlung erfolgt dabei vollständig im zu temperierenden Raum in der Verdampfeinheit. Eine im Freien liegende, über Kältemittelleitungen verbundene Kondensationseinheit tauscht Wärme mit der Umgebung aus. Werden mehrere Innengeräte über eine zentrale Außeneinheit gespeist, spricht man auch von **Variable Refrigerant Flow (VRF)**-Systemen. Über solche Zentraleinheiten können Leistungen im Bereich von bis zu 150 kW bereitgestellt werden. Grundsätzlich haben Luft-Kältemittel-Anlagen die Nachteile von häufig auftretenden Zugerscheinungen sowie einer hohen Geräuschkentwicklung. [55, Ch.5.6]

2.3.3 Besonderheiten bei spezifischer Gebäudenutzung

Raumlufttechnische Anlagen werden in Gebäuden mit verschiedenster Nutzung eingesetzt. Dies bringt Besonderheiten in den Anforderungen mit sich, welche die jeweilige Ausführung beeinflussen. Auf diese Charakteristika soll im Folgenden kurz eingegangen werden.

Je nach Qualitätsanforderungen an das Raumklima oder der im Raum befindlichen Personendichte ergeben sich typische Luftwechselzahlen für unterschiedliche Raumarten, von denen einige ausgewählte Werte in Tabelle 2.6 ersichtlich sind. Diese geben an, wie oft pro Stunde das Luftvolumen im Raum erneuert werden sollte. Während die Luftwechselzahl in normalen Wohngebäuden nur im Bereich von 0,5 bis 1 liegt, so fallen diese in Büroräumen, Gasträumen und Kaufhäusern deutlich höher aus. Die größten Luftwechselzahlen sind durch die hohen Belegungsdichten in Hörsälen notwendig. [55, Ch.5.5.4]

Die im Zuge des übergeordneten Projektes entstehende **DAC**-Anlage soll für den Einsatz in raumlufttechnischen Anlagen von Hotels geeignet sein, weshalb hier ein Fokus auf diesem Anwendungsfall liegt. Hotels besitzen im Wesentlichen drei unterschiedliche Bereiche, die ein **HVAC**-System benötigen. Küchen erfordern Abluft- und Zuluftsysteme, die abhängig von den thermischen Lasten und ihrer Größe einen bis zu 40-fachen Luftwechsel pro Stunde erreichen können. Fetthaltige Abluft muss dabei separat erfasst werden und über Fetlluftabscheider abgeführt werden. Der zweite Bereich beinhaltet allgemeine Aufenthaltsbereiche wie Restaurantbereiche, Lobby, Bar, Konferenzräume und ähnliche. Diese sind meist über zentrale raumlufttechnische Anlagen klimatisiert. Versuche von Xie et al. [56] zeigen die naheliegende

Raumart	Stündlicher Luftwechsel
Büroräume	3-6 fach
Gasträume	5-10 fach
Hörsäle	8-10 fach
Kaufhäuser	4-6 fach
Wohngebäude	0,5-1 fach

Tabelle 2.6: Ungefähre Luftwechselzahlen verschiedener Raumarten [55, Tab.5.26 & Ch.5.5.4]

Tatsache auf, dass Hotelzimmer größtenteils nur zu bestimmten Zeiten genutzt werden. Ein typischer Zeitverlauf der Belegungsrate ist in Abbildung 2.10 ersichtlich. Die Zimmertemperatur muss somit in kurzer Zeit auf ein behagliches Niveau temperierbar sein. Hierfür sind dezentrale Splitgeräte am besten geeignet. Ein Anschluss an ein zentrales HVAC-System ist jedoch ebenfalls möglich und kann durch den Einsatz von Umweltenergie energetisch günstiger sein. [55, Ch.5.10.3]

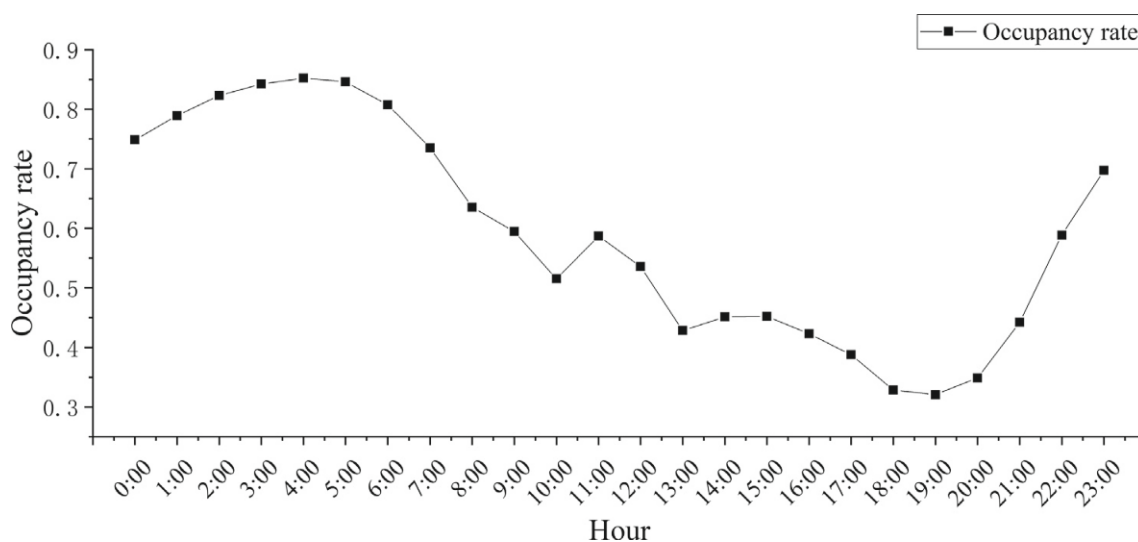


Abbildung 2.10: Belegungsrate von Hotelzimmern im Zeitverlauf [56]

Die zuvor in Tabelle 2.1 angegebene Wasserdampfemission beim Kochen, ist für eine Küche in einem Einfamilienhaus oder einer Wohnung zu verstehen. In der gewerblichen Gastronomie fallen die Wasserdampfemissionen um ein Vielfaches höher aus. Die Angabe konkreter Werte gestaltet sich jedoch als herausfordernd, da diese je nach betrachtetem Anwendungsfall stark variieren können. TenWolde und Pilon [57] kamen basierend auf weiterer Literatur, zum Schluss, dass die Zubereitung einer Portion eines typischen Gerichtes ungefähr 240 g Wasser an die Luft abgibt. Die durch Verbrennung entstehende Wasserdampfemission eines Gaskochfeldes mit

3 kW Leistung beträgt ungefähr 0,45 kg/h und ist bei diesem Wert noch nicht berücksichtigt. [57]

Der DIN EN 16798-1 [12] zufolge ist bei Gebäuden, die nur der menschlichen Nutzung unterliegen (z.B. Büros, Wohngebäude, Schulen), gemeinhin keine Ent- oder Befeuchtung notwendig. In speziellen Gebäuden, wie unter anderem Museen oder Gesundheitseinrichtungen, kann diese jedoch erforderlich sein. Auch einige Industriezweige wie beispielsweise die Textil-, Tabak-, oder Papierindustrie benötigen hohe bzw. konstante Luftfeuchtigkeiten, was eine Befeuchtung im Winter notwendig macht [55, p.366]. Wie in Tabelle 2.2 ersichtlich, gibt die Norm Auslegungskriterien für Be- und Entfeuchtungsanlagen in Gebäuden mit menschlicher Nutzung vor. Des Weiteren werden 12 g/kg als Grenze für die absolute Luftfeuchte empfohlen. Dies stimmt auch weitgehend mit den Angaben von Fitzner [58, p.21] überein, der in diesem Zusammenhang 11,5 g/kg nennt und ein allgemeines Toleranzband der relativen Luftfeuchtigkeit von 30 % bis 65 % angibt.

2.3.4 Optimierung von HVAC-Systemen

Eine Möglichkeit der energetischen Optimierung von HVAC-Systemen ist die Implementierung einer bedarfsgeregelten Lüftung. Dabei werden die nötigen Außenluftstraten in Abhängigkeit von aktuellen CO₂-Konzentrationen im Raum ermittelt. Zu der im Englischen unter **Demand Controlled Ventilation (DCV)** bekannten Technologie gibt es zahlreiche Publikationen [59–67]. Die bereits in Tabelle 2.3 erwähnten CO₂-Grenzwerte, die von der DIN EN 16798-1 [12] vorgegeben werden, sind auch für den Fall von bedarfsgeregelter Lüftung anzuwenden. [12]

Der Fokus bei der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf der Systemoptimierung mittels der DAC-Technologie. Darauf wird im Kapitel 2.4 näher eingegangen.

2.3.5 Unternehmensumfeld in Österreich

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die in Österreich tätigen Unternehmen im Bereich raumlufttechnischer Anlagen geben. Der Sinn und Zweck davon ist es, potentielle Kooperationspartner für mögliche DAC-Anwendungen zu identifizieren und somit einen Teil der Entscheidungsgrundlage für die weitere projektinterne Vorgehensweise bereitzustellen.

Die Unternehmensrecherche erfordert zunächst eine klare Abgrenzung im Bereich der Klima- und Lüftungstechnik, um eine bestmögliche Überschneidung mit potentiellen DAC-Anwendungen sicherzustellen. Aus diesem Grund lag der Fokus auf Unternehmen die mit ihren Produkten zu einem wesentlichen Anteil den kommerziellen Bereich bedienen. Darunter fallen unter anderem Kaufhäuser, Hotels, Gastronomie,

Bürogebäude sowie jegliche öffentliche Gebäude. Alle diese weisen hohe Personendichten und somit hohe Luftwechselzahlen (siehe Tabelle 2.6) auf und unterscheiden sich dadurch deutlich von normalen Wohngebäuden bzw. Einfamilienhäusern. Ein weiteres Abgrenzungskriterium stellt der Tätigkeitsbereich des Unternehmens dar. Es wurden Unternehmen entweder mit Sitz in Österreich oder international agierende Konzerne mit zumindest einer Niederlassung im Inland betrachtet.

Um die Abgrenzung abzuschließen, sind im Folgenden noch Unternehmen angeführt, die **nicht** miteinbezogen wurden:

- Händler von lufttechnischen Anlagen, die über keine Entwicklungs- und Produktionskompetenzen verfügen
- ausschließlich auf Zuluftsysteme spezialisierte Unternehmen
- Hersteller von industriellen Absauganlagen (z.B. Schweißplatzabsaugungen)
- ausschließlich im Rohrleitungsbau tätige Unternehmen
- auf HVAC-Systeme für Industriehallen spezialisierte Unternehmen
- auf Brandlüftungssysteme spezialisierte Unternehmen
- reine Ventilatorenhersteller

Der aus diesen Recherchegrundlagen entstandene Unternehmensüberblick ist in Tabelle 2.7 ersichtlich. Die dafür notwendigen Daten wurden von den jeweiligen Webseiten entnommen oder durch Rückfrage beim Unternehmen gewonnen. Informationen, die nicht verschafft werden konnten, sind mit einem Fragezeichen gekennzeichnet.

Unternehmen	Produktportfolio	Kompetenzen	Mitarbeiter	Bereich	Standort AT	Sitz	Standorte
AAF Flanders (AAF-Austria)	F		?		Guntramsdorf (A-2353)	USA	?
Aumayr Lüftungstechnik	H, V, AC, P, F		230		Steyregg (A-4221)	AUT	1
BerlinerLuft	H, V, AC, P, F		800		Schwarz (A-6130)	DEU	14
Bösch	H, V, AC, P, F		600		Lustenau (A-6890)	AUT	1 13
Euroclima	H, V, AC, P, F		450		Sillian (A-9920)	ITA	5 ?
Gruber Lüftungstechnik	V, P, F	?	?		Steyr (A-4400)	AUT	1
Helios Ventilatoren	V, P, F		>300		Innsbruck (A-6063)	DEU	10
Pichler	V, P, F		250		Klagenfurt (A-9021)	AUT	5
Johnson Controls	H, V, AC, P, F		100 000		Wien (A-1230)	IRL	2000
Kappa Filter Systems	H, V, AC, P, F		?		Steyr-Gleink (A-4407)	AUT	2
KGT Gebäudetechnik	H, V, AC, P, F		190		Feldbach (A-8330)	AUT	3
Munters	H, V, AC, P, F		3 350		Wien (A-1230)	DEU	17 >30
Nilan	H, V, AC, P, F		453		Münchendorf (A-2482)	DNK	2 24
Rosenberg	H, V, AC, P, F		1 400		Wels (A-4600)	DEU	14 55
Stulz	H, V, AC, P, F		7 200		Wr. Neudorf (A-2355)	DEU	11 21
Systemair	H, V, AC, P, F		6 500		Wien (A-1230)	SWE	29 ?
Trox	H, V, AC, P, F		4 600		Wien (A-1220)	VAE	20 70
Wernig	V, P, F		?		Ferlach (A-9163)	AUT	1 7
Wolf	H, V, AC, P, F		2100		Linz (A-4030)	DEU	? 64

Tabelle 2.7: HVAC-Unternehmen in Österreich



Abbildung 2.11: Legende zum Unternehmensüberblick

2.4 DAC im Gebäudebereich

Es bietet sich an, die gegenüber der Umgebungsluft in Gebäuden vorherrschenden, erhöhten CO₂-Konzentrationen, für eine energieeffizientere Abscheidung zu nutzen. Neben der simplen Nutzung der Gebäudeabluft für DAC sind hierbei auch intelligenterere Systeme denkbar. Die notwendige Außenluftzufuhr ergibt sich im wesentlichen aus den CO₂-Emissionen der im Gebäude befindlichen Personen [12]. Durch eine HVAC-DAC-Kopplung mit variablen Umluflraten kann also bei gleichzeitigem Energiesparpotential durch die geringeren notwendigen Außenluflraten auch die Raumluftqualität verbessert werden. Die generelle Vorgehensweise für das teilweise Ersetzen von Außenluftzufuhr durch Luftreinigung wird normativ auch in der CEN/TR 16798-2 beschrieben [12]. Diese Energiekosteneinsparung eröffnet neues Potential hinsichtlich einer ökonomisch rentablen CO₂-Abscheidung aus erneuerbaren Quellen für eine anschließende stoffliche Nutzung oder langfristige Speicherung. [13]

Baus und Nehr [13] führten hierzu eine Studie zum Energieeinsparungspotential von HVAC-Systemen mittels DAC-Integration durch. Simuliert wurde ein Gebäude in vier unterschiedlichen Szenarien, basierend auf meteorologischen Daten die nahe des Flughafens Köln Bonn aufgezeichnet wurden. Die Modellparameter sind in Tabelle 2.8 ersichtlich. Szenario 1 bildet dabei den Basisfall ab, Szenario 2 weißt demgegenüber die doppelte Lüftungsrate auf. Das Szenario 3 soll eine höhere Belegungsrate abbilden. Szenario 4 repräsentiert ein Gebäude mit einem älteren HVAC-System ohne Wärmerückgewinnung und mit geringerer Energieeffizienz. Die Energieersparnis, die nun für die CO₂-Abscheidung zur Verfügung steht, belief sich auf 0,38 MW h/t in Szenario 1 (MWh pro Tonne CO₂, die durch das DAC-System strömt) bis hin zu 2,57 MW h/t in Szenario 4. In Szenario 2 konnten 0,87 MW h/t gewonnen werden und in Szenario 3 wurde mehr Energie benötigt als ohne DAC-Integration. Der Grund dafür ist die energieintensive Luftentfeuchtung, welche durch die höhere Personenanzahl erforderlich wird. Hierbei kann sich jedoch die Verwendung von aminbasierten

Parameter	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Gebäudevolumen [m ³]	3500	3500	3500	3500
Lüftungsrate [m ³ /h]	9450	18900	9450	9450
Personenanzahl	100	100	200	100
AC Energieeffizienzfaktor [kWh/(kWh)]	3	3	3	2
Wärmerückgewinnungsgrad [%]	80	80	80	0
CO ₂ -Konzentration HVAC [ppm]	398	258	678	398
Umluftrate [%]	80	80	80	80

Tabelle 2.8: Modellparameter für Szenarien 1-4 [13]

Adsorbentien wie Lewatit VP OC 1065 als günstig erweisen, da diese neben CO₂ auch Wasser aus der Luft aufnehmen und somit aktiv zur Entfeuchtung beitragen können. Eine energetische Bewertung dessen ist jedoch in jedem Fall vonnöten. Der Entfeuchtungsaufwand steigt generell mit hohen Belegungsraten und schlechter Gebäudebelüftung stark an. Befeuchtet wurde über das gesamte Jahr sehr wenig. Mit DAC-System machte die Wassermenge, die der Luft zugeführt werden musste, nur zwischen 0,5 % und 2,5 % von der durch Entfeuchtung abgeschiedenen Masse aus. Bei einem konventionellen HVAC-System belief sich dieser Wert im modellierten Jahr 2016 auf 5,9 %. [13]

Weitere Forschungen bezüglich der Integration von DAC- in HVAC-Systemen wurden von Kim et al. [68–70] durchgeführt. Die erste Studie [68] kam zum Schluss, dass im tropischen Sommerklima 30 % Energiekosten eingespart werden können. Im zentraleuropäischen Winterklima sind sogar 60 % möglich. Die neuere Publikation von Kim et al. [70] fokussierte sich vor allem auf das Thema Luftfeuchtigkeit. Simulationen auf Basis von experimenteller Grundlage zeigten, dass sogar im tropischen Sommer bei Umluftraten von 50 bis 70 % ohne weitere Entfeuchtungsanlagen ein behagliches Raumklima erreicht werden konnte. Will man jedoch Umluftraten von 90 % erreichen, so ist ein zusätzliches Entfeuchtungssystem notwendig. Im trockenen zentraleuropäischen Winterklima ist ein vollständiger Umluftbetrieb möglich, ohne den unter anderem in der DIN EN 16798-1 [12] angegebenen Grenzwert für die absolute Luftfeuchtigkeit von 12 g/kg zu überschreiten. Eine mögliche Kondensation an Fenstern oder der Gebäudestruktur ist hier jedoch unbedingt zu beachten. Die experimentellen Daten wurden größtenteils im Forschungslabor der Climeworks AG gewonnen. Nähere Informationen zum verwendeten Adsorbens wurden nicht publiziert. [68, 70]

Ji et al. [71] untersuchten die Integration eines Temperature Swing Adsorption (TSA) DAC-Systems in den Wärmepumpenkreislauf eines HVAC-Systems mittels einer thermodynamischen Analyse. Verglichen wurden dabei die drei Adsorbentien Zeolite 5A, Zeolite 13X und Mg-MOF-74 sowie drei verschiedene Kältemittel. Ein geringes Temperaturniveau bei der Desorption erweist sich in diesem Anwen-

dungsfall als besonders günstig, da die Leistungszahl der Wärmepumpe mit sinkender Kondensatortemperatur stark ansteigt und sich das positiv auf den Energieverbrauch auswirkt. Experimentelle Versuche wurden im Zuge dieser Arbeit keine durchgeführt.

Die Integration von DAC-Systemen in bestehende HVAC-Anlagen wird von dem finnischen Unternehmen Soletairpower bereits gewerblich umgesetzt. Für einen Luftdurchfluss von $3,3 \text{ m}^3/\text{s}$ weist das in Abbildung 2.12 links ersichtliche System eine Größe von $3 \times 2 \times 2 \text{ m}$ auf und kann maximal 47 kg CO_2 pro Tag abscheiden. Ein weiteres, in der Abbildung 2.12 rechts ersichtliches System wurde für den direkten Einsatz als Standgerät in Innenräumen wie beispielsweise Büros konzipiert und soll die Konzentration an CO_2 in der Raumluft für die Dauer eines Arbeitstages durch Abscheidung reduzieren. Nach Ende der Arbeitszeit wird das Kohlendioxid wieder an die Umgebung freigegeben. Ein Demonstrationsgerät ist bereits vorhanden und das System kann vorbestellt werden. [72]



Abbildung 2.12: HVAC-DAC-System (links) und Indoor-DAC-System (rechts) von Soletair Power

Die Beurteilung der Raumluftqualität erfolgt im Allgemeinen häufig über die CO_2 -Konzentration. Befindet sich diese im gewünschten Bereich, so kann bei konventionellen HVAC-Systemen davon ausgegangen werden, dass die Luft in ihrer Gesamtheit eine gute Qualität aufweist. Bei zunehmender Umluftrate sind natürlich auch andere Luftqualitätsparameter wie die Konzentration von mikrobiellen Bestandteilen (Schimmel, Bakterien, Viren), die Feinstaubkonzentration, die Konzentration der gesamt vorhandenen flüchtigen organischen Verbindungen sowie die Konzentration von Geruchsstoffen zu beachten und der CO_2 -Gehalt eignet sich nicht mehr für die Qualitätsbeurteilung. Dieser Umstand ist insbesondere für die Integration von DAC-Systemen in HVAC-Anlagen zu beachten. [13]

3. Experimenteller Aufbau

3.1 Versuchsanlage zur CO₂-Abscheidung

Die für die experimentellen [Direct Air Capture \(DAC\)](#) Messungen herangezogene Versuchsanlage befindet sich im Technikum-Labor der TU Wien und wurde zum Zwecke der Datengewinnung hinsichtlich einer zukünftigen Kommerzialisierung im [HVAC](#)-Bereich gebaut. Die in [Abbildung 3.1](#) ersichtliche Anlage kann für Adsorptions- sowie Desorptionsversuche von Adsorbentien im Festbett genutzt werden. Es handelt sich um eine Versuchsanlage im Labormaßstab mit einem Festbettvolumen von ungefähr 900 cm³. Die Mengen an CO₂, die bei den Versuchen mit dem Adsorbens Lewatit VP OC 1065 gespeichert und wieder an die Umgebung abgegeben wurden, befinden sich in der Größenordnung von 10 bis 30 g. Die eigentliche Anlage besteht dabei grundsätzlich aus den zwei vertikal angeordneten Hauptteilen für die Regeneration (links) und für die Adsorption sowie die Gasanalyse bei der Regeneration (rechts). Bei dem rechten Teil handelt es sich um das in [Abbildung 3.2](#) ersichtliche Konusrohr. Im Adsorptionsbetrieb strömt die Luft von links (unten in [Abbildung 3.1](#)) ein und kann über einen Wärmetauscher in Kombination mit einem Kryostaten auf ein gewünschtes Niveau temperiert werden. Der Luftstrom wird anschließend durch eine Querschnittserweiterung verlangsamt und strömt durch das Adsorbensbett. Die Einbindung und Abdichtung des Festbettes erfolgt dabei über ein TRI-Clamp System in Kombination mit axial, in den konischen Rohren angebrachten O-Ringen. Dadurch ist ein einfacher und schneller Aus- und Einbau des Festbettes unter der Garantie von ausreichender Dichtigkeit möglich. Die Gasanalyse zur Massenbilanzierung erfolgt durch radial in den Konussen verbaute CO₂- und Feuchtigkeitssensoren jeweils vor und nach dem Adsorbensbett. Danach strömt die Luft in die Umgebung aus.

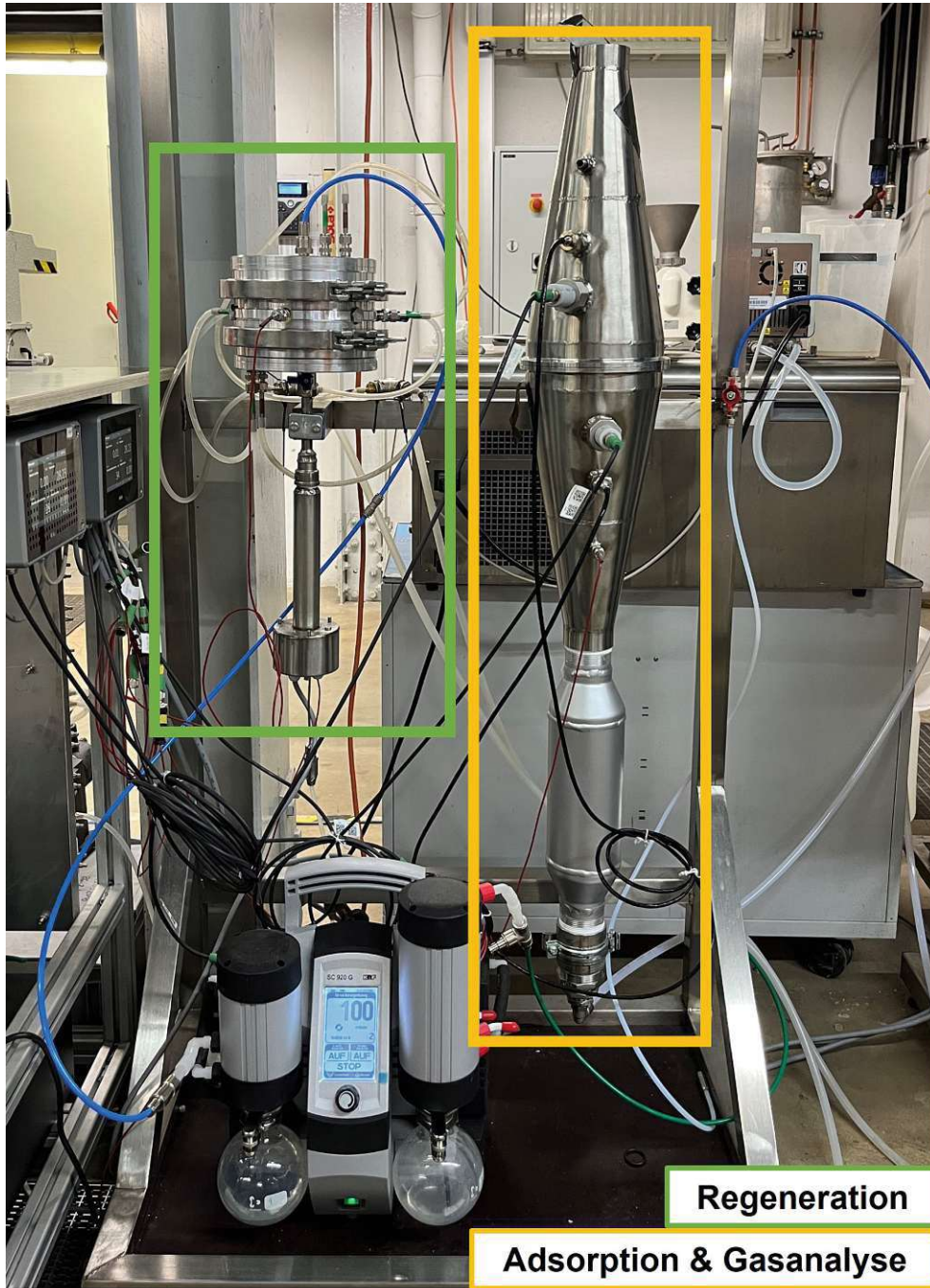


Abbildung 3.1: DAC-Versuchsanlage im Desorptionsbetrieb

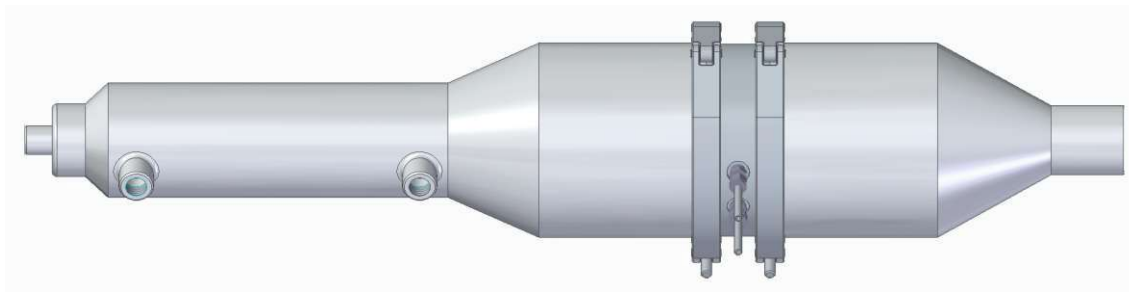


Abbildung 3.2: Konisches Rohr mit Wärmetauscher für Adsorption und Gasanalyse

Das in [Abbildung 3.3](#) ersichtliche Festbett besteht aus einer ringförmigen Struktur aus rostfreiem Stahl, die das Adsorbens in Position hält. Axial sichert ein grobes Gitter in Kombination mit einem feinen Siebgewebe das granulatformige Adsorbens vom austreten und ermöglicht gleichzeitig die Durchströmung der Schüttung mit einem Gasstrom. Durch die schlechten Wärmeleitungseigenschaften des porösen Adsorbens wurden zusätzlich zu den in [Abbildung 3.4](#) ersichtlichen Heizplatten auch beheizbare Rohrleitungen im Inneren des Festbettes verbaut. Diese verkürzen die Strecke der Wärmeleitung und sorgen für zusätzliche Energieeinbringung. Wie die stirnseitig montierbaren Heizplatten, ist auch der ins Festbett integrierte Wärmetauscher für den Betrieb mittels eines Kryostaten vorgesehen. Für die Herstellung einer dichten und schnell lösbaren Verbindung der Heizplatten mit dem Adsorbensbett dienen wiederum die gleichen TRI-Clamp Verbindungselemente sowie je eine axiale Nut, die mit einem O-Ring versehen werden kann. Neben der Wärmeerbringung über die Kontaktflächen ermöglichen die beiden Platten zusätzlich eine Einbringung von Spüldampf in das Festbett durch gleichmäßig verteilte Dampfauslassbohrungen, die über den darunter verbauten Verdampfer gespeist werden. Auch für die Beaufschlagung des Adsorbens mit Vakuum ist ein Schlauchanschluss in der oberen Platte vorgesehen.



Abbildung 3.3: Festbett mit integriertem Wärmetauscher



Abbildung 3.4: Stirnseitige Heizplatten für Festbett mit Dampfauslässen

Die Einbringung von Spüldampf bei der Desorption wird durch den unter dem Festbett befindlichen und in Abbildung 3.5 ersichtlichen Verdampfer ermöglicht. Dieser wird intern auf 180 °C temperiert und über eine Membranpumpe mit Wasser beschickt. Der interne Aufbau besteht im Wesentlichen aus einer Heizpatrone, deren Temperatur über einen Sensor geregelt wird. Um die Heizpatrone wurde ein Edelstahlrohr mit einem Außendurchmesser von 3 mm und einem Innendurchmesser von 1 mm gewickelt. Der kleine Innendurchmesser soll dabei eine möglichst gleichmäßige Dampferzeugung sicherstellen. Das Wasser durchströmt dieses Rohr und verdampft währenddessen vollständig. Bei der Erwärmung und Verdampfung des Wassers entsteht Druck in der Kammer, der durch ein einstellbares Ventil am oberen Ende begrenzt wird. Beim Erreichen des Öffnungsdruckes strömt der Dampf dann in das Festbett ein.



Abbildung 3.5: Unter dem Festbett liegender Verdampfer



Abbildung 3.6: Mit Adsorbens befülltes Festbett

Die Abbildung 3.6 zeigt das mit Lewatit VP OC 1065 befüllte Festbett. Bei Lewatit handelt es sich um ein kugelförmiges, makroporöses Divinylbenzol-vernetztes Polymer, das mit primären Aminogruppen versehen wurde. Bei dem Grundstoff handelt es sich also um ein vernetztes Polystyrol. Neben der Eignung zur Adsorption von CO_2 in atmosphärischen Konzentrationen, kann es auch zur selektiven Entfernung von Säuren aus Prozessströmen, zur Entfärbung von Stärke- und Proteinlösungen und zur Adsorption von Aldehyden verwendet werden. Für genauere Produktinformationen und sicherheitsrelevante Informationen sei auf den Anhang A.2 verwiesen.

Um die Vergleichbarkeit innerhalb der Versuche zu gewährleisten, wurden alle nachfolgend besprochenen Versuche mit dem selben Adsorbens durchgeführt. Dies ist insbesondere deshalb wichtig, da einerseits in der Vergangenheit Schwankungen der Adsorbenskapazität innerhalb einer Charge beobachtet wurden und andererseits auch das Adsorbensvolumen nicht vernachlässigbar von der Feuchtigkeits-/ CO_2 -Beladung abhängt. Dies ist in Abbildung 3.7 ersichtlich, wo eine deutliche Volumenabnahme einer neuen Adsorbensfüllung nach erstmaliger Desorption erkennbar ist. Die Messungen bei der Desorption zeigten vor allem einen erheblichen Feuchtigkeitsgehalt des Adsorbens im gelagerten Zustand.



Abbildung 3.7: Volumenreduktion des Adsorbens bei erstmaliger Desorption nach dem Lagerungszustand

3.1.1 Adsorptionsaufbau

Das in [Abbildung 3.8](#) ersichtliche Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema zeigt den Adsorptionsaufbau der DAC-Versuchsanlage. Für die genaue Bezeichnung der verwendeten Geräte und Sensorik wird auf [Anhang A.1](#) verwiesen. Die Herstellung von geeigneten Prozessbedingungen erfordert dabei einige Schnittstellen nach außen wie beispielsweise die Zufuhr von Prozessgasen oder Wärme. Bei der Adsorption soll ein Abluftstrom eines HVAC-Systems simuliert werden. Ein solcher Luftstrom kann durch die hausinterne Druckluftversorgung in Kombination mit optionaler CO₂-Zudosierung sowie eines Fluidisierungsluftbefeuchters (= Bubbler) auf einen definierten CO₂- sowie Feuchtigkeitsgehalt eingestellt werden. Die Einstellung des Luftvolumenstroms aus dem Druckluftnetz erfolgt über einen auf 6 bar(g) eingestellten Druckminderer in Kombination mit einem Rotameter der Firma Krohne. Ein zweites, parallel angeordnetes Rotameter ermöglicht dabei die Einstellung des Volumenstromes, der zur Befeuchtung durch den Bubbler geleitet werden soll. Die Heizung im Bubbler mit integriertem Regler stellt dabei eine konstante relative Feuchtigkeit der entstehenden Gasmischung sicher, indem sie die entzogene Verdampfungsenthalpie kompensiert. Die ebenfalls ersichtliche Stickstoffversorgung

dient zur CO₂-Bilanzierung und findet bei der Adsorption keine Anwendung. Mittels eines ThermoFisher Scientific Kryostaten und eines Luftwärmetauschers kann diese Gasmischung nun auf ein gewünschtes Temperaturniveau gebracht werden. Der anschließende Konus verlangsamt die Gasströmung bevor sie durch das Festbett geleitet wird. Hierbei werden die CO₂-Konzentration in ppm, die relative Feuchte und die Temperatur gemessen. Die gleichen Messungen erfolgen auch direkt nach dem Adsorbensbett woraus sich mit dem Wissen des Gasvolumenstroms eine Massenbilanz bilden lässt. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um die CO₂-Sonde GMP 252 von Vaisala und den Feuchtigkeitssensor HMP 7 von Vaisala. Nach der zweiten Messstelle wird der Luftstrom schließlich in die Umgebung geleitet.

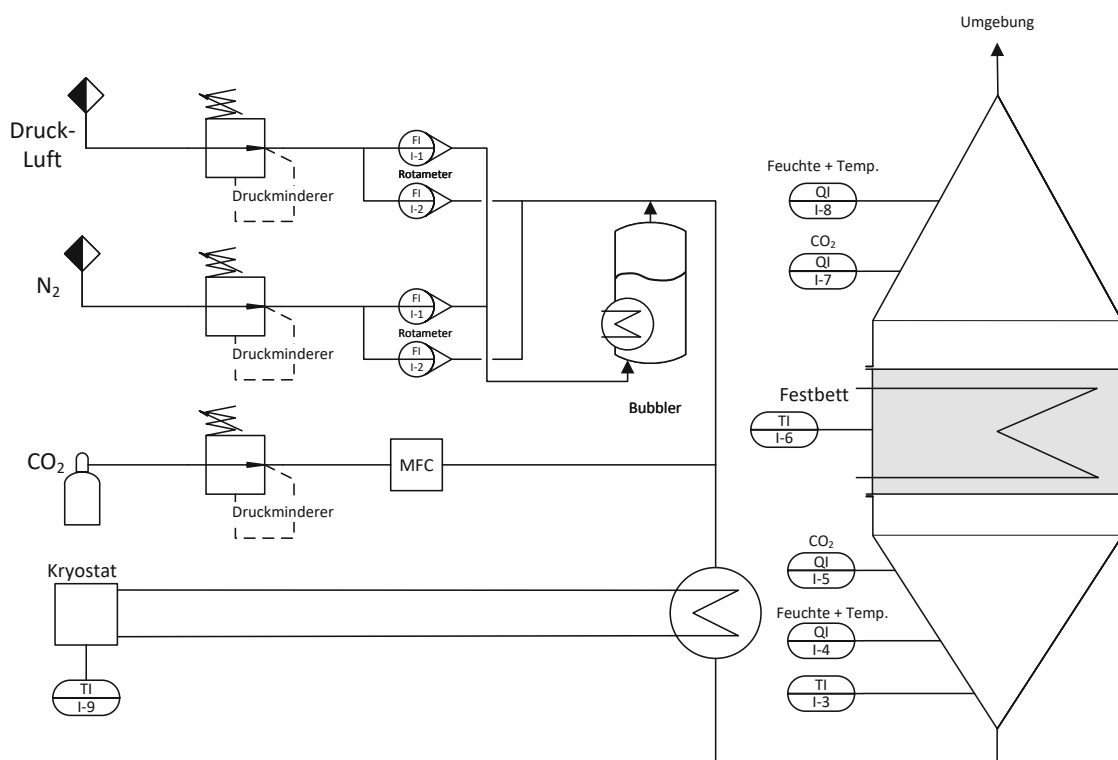


Abbildung 3.8: R&I-Fließschema Adsorptionsaufbau

3.1.2 Desorptionsaufbau

Bei dem in Abbildung 3.9 ersichtlichen Fließschema der Desorption werden einige zusätzliche Komponenten benötigt. Das zentrale Adsorberfestbett kann dabei von unten über einen Verdampfer mit Wasserdampf gespült werden. Die Einstellung der Wassermenge erfolgt über die vorgeschaltene Membranpumpe, deren Pumpenleistung über ein Potentiometer eingestellt werden kann. Nach dem Dampferzeuger befindet sich ein Absperrventil, um die Beaufschlagung des Festbettes mit einem konstanten Vakuum zu ermöglichen. Das zylindrische Adsorbensbett ist an seinen Stirnflächen jeweils von einer Heizplatte umgeben. Diese und zwei im Inneren ver-

setzt angeordnete Rohrwärmetauscher sind über einen Kryostaten temperierbar, um eine ausreichende Wärmeeinbringung in das Adsorbens sicherzustellen. Das Festbett kann über eine Vakuumpumpe mit integrierter Druckregelung auf einem definierten Druck gehalten werden. Um eine Messung des desorbierten CO₂-Gasstroms über die in ihrem Messbereich begrenzten CO₂-Sonden zu ermöglichen, wird nach der Pumpe ein definierter Volumenstrom an Stickstoff zudosiert. Die Gasmischung wird dann durch die gleiche konische Rohrleitung geleitet wie bei der Adsorption, wo sie schließlich in die Umgebung geleitet wird. Die Vakuumpumpe verfügt über eine integrierte Wasserabscheidung, deren Auffangbehälter zur Massenbilanzierung herangezogen werden können.

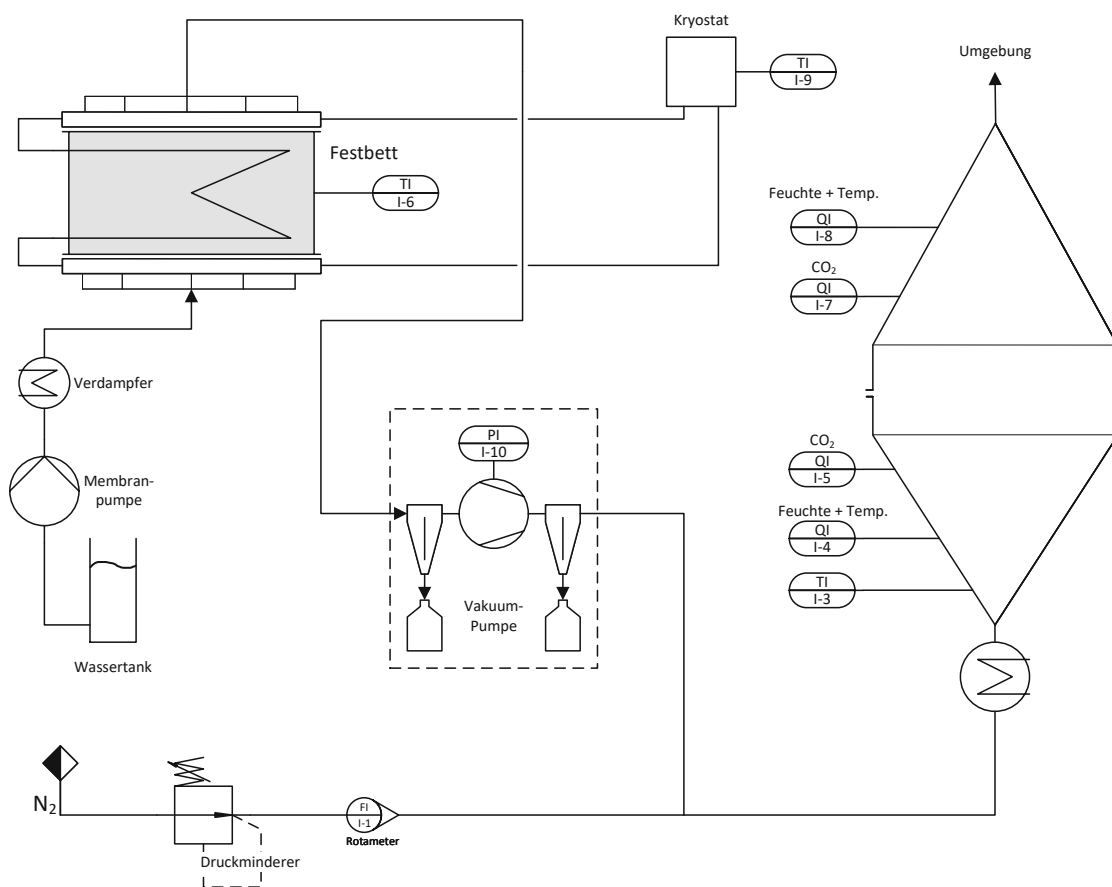


Abbildung 3.9: R&I-Fließschema Desorptionsaufbau

3.2 Festlegen der Versuchsmatrix

Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit sollen praxisrelevante Betriebspunkte für die DAC-Integration in HVAC-Systeme anhand von Adsorptionsmessungen untersucht werden. Dazu wurde die in Tabelle 3.1 ersichtliche Versuchsmatrix definiert, in der die Zulufttemperatur, die CO₂-Konzentration sowie die relative Feuchte im Zuluftstrom variiert wurden. Die Temperaturvariation zwischen 15 °C und 30 °C stellt

dabei übliche Temperaturen der Abluft von HVAC-Systemen im Sommer- und Winterbetrieb dar. Auch die CO₂-Konzentrationen zwischen 400 und 1300 ppm bilden in Anlehnung an die DIN EN 16798-1 [12] übliche Raumluftqualitäten ab. Dabei handelt es sich insgesamt um 24 Adsorptionsversuche mit anschließender, gleichbleibend 1,5-stündiger Regeneration des Adsorbensbettes mit 300 mbar(a) Vakuumpumpensolldruck, 75 mL/h Membranpumpendurchfluss (fördert Wasser in den Verdampfer) sowie 90 °C Kryostattemperatur.

Temperatur [°C]	CO ₂ -Konzentration [ppm]	relative Feuchte [%]
15	400/700/1000/1300	35
20	400/700/1000/1300	20/35/65
25	400/700/1000/1300	35
30	400/700/1000/1300	35

Tabelle 3.1: Adsorptionsmatrix: Prozessbedingungen im Zuluftstrom

3.3 Versuchsablauf Desorption

Zur Regeneration des Adsorbens wurde die Desorption stets unter gleichbleibenden Bedingungen durchgeführt, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Versuchen gewährleisten zu können. Eine exemplarische Desorptionsaufzeichnung ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die aus den vorhergehenden systematischen Desorptionsversuchen gewonnenen optimalen Prozessparameter sind in Tabelle 3.2 ersichtlich und wurden hierfür herangezogen. Nach Ablauf der 90 Minuten Desorptionszeit wurde der Kryostat vom Festbett getrennt, der Verdampfer abgedreht, danach das Absperrventil zum Verdampfer verschlossen und mit der Vakuumpumpe unter maximaler Förderleistung so lange abgesaugt, bis die Adsorbensbetttemperatur unter 55 °C fiel (2 bis Kurvenende - Abbildung 3.10). Damit konnte eine möglichst rasche Abkühlung, ausgehend von den ungefähr 78 °C Betttemperatur, erzielt und eine Beschädigung des Adsorbens durch nachfolgenden Sauerstoffkontakt verhindert werden.

Desorptionsparameter	
Kryostattemperatur [°C]	90
Solldruck Vakuumpumpe [mbar(a)]	300
Fördermenge Wasserpumpe [mL/h] (% der Nennleistung)	75 (1,25 %)
Desorptionsdauer [min]	90

Tabelle 3.2: Gleichbleibende Desorptionsparameter

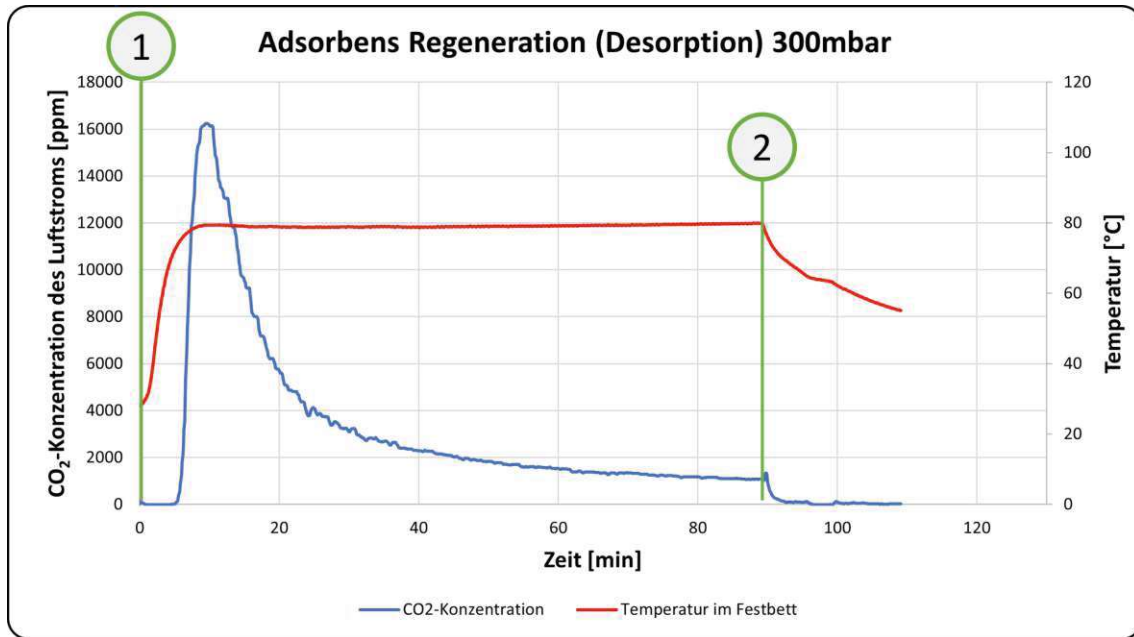


Abbildung 3.10: Beispielhafte Desorption

Zur Regeneration des Adsorbens wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Aufheizen des Kryostaten auf 90 °C
- Aktivieren des Verdampfers und der Wasserpumpe mit 1,25 % Nennleistung bis zu erstmaligem Wasseraustritt an der Dampföffnung der unteren Heizplatte
- Abschalten der Wasserpumpe und Abwiegen des Wasserbehälters für die Massenbilanzierung
- Einbau des Festbettes in den Versuchsaufbau und Anschluss des Temperatursensors sowie des Kryostaten
- Überprüfung der Systemdichtheit durch Vakuumieren auf 500 mbar(a) Absolutdruck mit anschließendem Abschalten der Vakuumpumpe
- Einstellung des benötigten Stickstoffvolumenstroms ($4 \text{ N m}^3/\text{h}$) für die CO_2 -Messung
- Beginn der Desorption durch gleichzeitige Aktivierung des Kryostaten, der Wasserpumpe sowie der Vakuumpumpe (1 - Abbildung 3.10)
- Deaktivieren des Kryostaten, der Wasserpumpe und des Verdampfers nach Ablauf von 90 min mit anschließender Adsorbensabkühlung durch Vakuumieren mit maximaler Pumpenleistung bis 55 °C Betttemperatur (2 - Abbildung 3.10)

- Abwiegen von Festbett, beiden Kondensationsbehältern, der Vakuumpumpe sowie dem Behälter der Wasserpumpe für die Massenbilanzierung

3.4 Versuchsablauf Adsorption

Die Zeitdauer bis sich bei der Adsorption unter den gewählten Prozessparametern ein Gleichgewicht einstellte und vom Adsorbens kein CO_2 mehr aufgenommen wurde, war bei diesen Versuchen vergleichsweise lange. Durch die langen Versuchsdauern von bis zu 10 Stunden wurden die Adsorptionen über Nacht durchgeführt, und dann am nächsten Tag wieder desorbiert.

Die Adsorptionsversuche wurden nach folgendem Ablauf durchgeführt:

- Temperierung des Kryostaten um die geforderte Zulufttemperatur zu erreichen
- Einstellung der Prozessparameter CO_2 -Konzentration der Zuluft, Temperatur der Zuluft sowie deren relative Feuchte auf die gewünschten Werte ohne Festbett im Versuchsaufbau
- Abdrehen von **MFC** (CO_2 -Zudosierung) sowie der Druckluft-/Stickstoffversorgung zum Einbau des Festbettes
- Start der Adsorption durch Aktivierung von **MFC** und der Druckluft-/ Stickstoffversorgung mit den vorher kalibrierten Einstellungen
- Abwiegen des Festbettes nach beendeter Adsorption zur Massenbilanzierung

Insbesondere die Einstellung der CO_2 -Konzentration in der Zuluft bei Konzentrationen über dem Umgebungsluftniveau bereitete anfänglich Probleme. Das Kohlendioxid der Firma Messer wurde aus einer handelsüblichen Gasflasche über einen von 0 bis 10 bar(g) installbaren Druckminderer entnommen und folgend durch ein Rotameter, welches ausschließlich als Drossel fungierte, geleitet. Dieser CO_2 -Volumenstrom in der Größenordnung von wenigen Litern pro Stunde wurde dann über einen Pneumatikschlauch mit einem T-Stück in den $6 \text{ N m}^3/\text{h}$ Luft-/Stickstoffstrom durch das Adsorbensbett eingeleitet. Bereits die kleinste Veränderung am Druckminderer führte teilweise zu mehreren 100 ppm Konzentrationsschwankungen im Zuluftstrom. Nach einigen Versuchen konnte die CO_2 -Konzentration zwar ausreichend genau eingestellt werden, jedoch blieb diese über die Messdauer nicht konstant. In Abbildung 3.11 sieht man den kontinuierlichen Abfall der CO_2 -Konzentration in der Zuluft um über 300 ppm anhand der blauen Kurve. Es handelt sich hierbei augenscheinlich um ein Phänomen, bei dem sich erst nach vielen Stunden ein Gleichgewicht einstellt. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass thermische Effekte

im Druckminderer bzw. im Rotameter zu einer kontinuierlichen Abkühlung der mechanischen Komponenten führen, die eine Änderung des Öffnungsgrades zur Folge haben. In jedem Fall ist eine Versuchsdurchführung mit den geforderten Prozessparametern jedoch so nicht möglich. Aus diesem Grund wurde, wie auch bereits im R&I-Fließbild (Abbildung 3.8) ersichtlich, auf einen **Mass Flow Controller (MFC)** zurückgegriffen, mit dem die CO_2 -Konzentration in der Zuluft nun auf wenige ppm genau, konstant eingestellt werden konnte. Die minimale Einstellung des **MFC** führte in $6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Umgebungsluft jedoch nur zu einer CO_2 -Konzentration von 1000 ppm. Aus diesem Grund wurde bei den Versuchen mit 700 ppm, statt Umgebungsluft aus dem Druckluftnetz im Technikum, auf Stickstoff zurückgegriffen und dieser mit Kohlendioxid auf das gewünschte Niveau angereichert.

Auch die Herstellung einer konstanten relativen Feuchtigkeit in der Zuluft bereitete anfänglich Schwierigkeiten. Wie auch bei der CO_2 -Konzentration fand insbesondere bei einem hohen Volumenstrom durch den Fluidisierungsluftbefeuchter ein Abfall in der relativen Feuchtigkeit über mehrere Stunden hinweg statt. Dies ist auf die Abkühlung des Wassers im Befeuchter durch den Entzug der Verdampfungsenthalpie während des Betriebes zurückzuführen. Bei geringen Volumenströmen konnte dies noch durch die Umgebung kompensiert werden. Später war jedoch eine Beheizung des Wassers im Befeuchter mit dem integrierten Thermostatregler notwendig, die das Problem dann auch löste. Um eine Kondensation der befeuchteten Luft in der Zuleitung zum Adsorbensfestbett zu verhindern, wurde das Wasser im Befeuchter auf ein Niveau über der Umgebung temperiert.

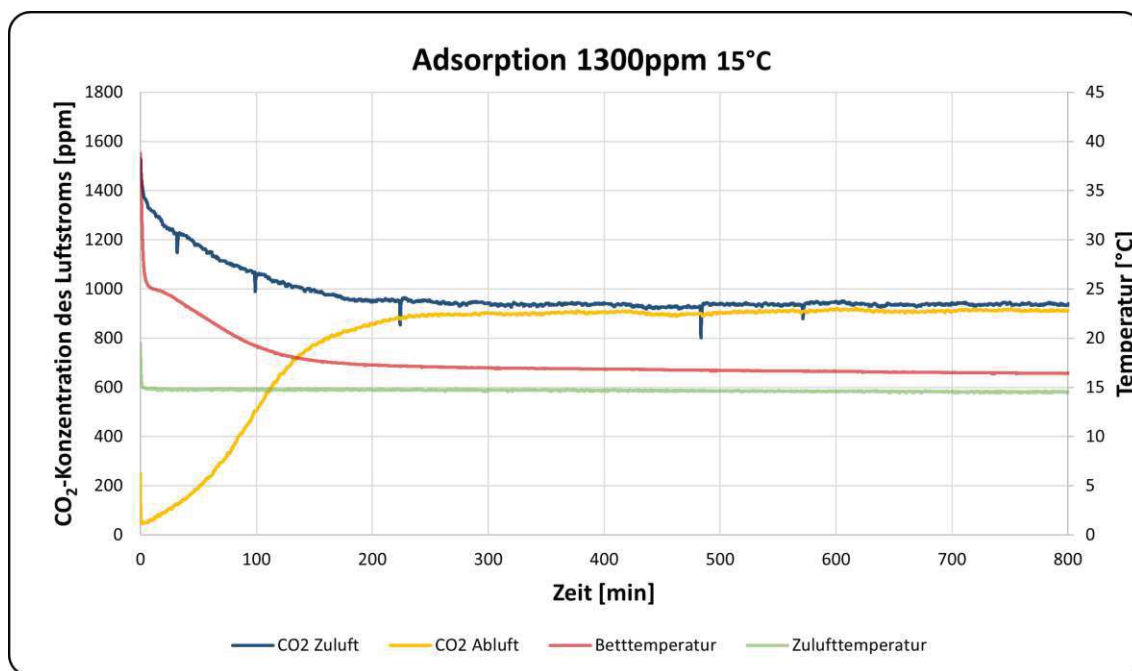


Abbildung 3.11: Selbstständiger Abfall der CO_2 -Konzentration ohne Eingriff in das System

4. Versuchsergebnisse und Diskussion

4.1 CO₂-Bilanzen der Adsorptionen

Die aus den zahlreichen Versuchen gewonnenen Daten wurden vom LabVIEW Messprogramm als Excel-File exportiert und anschließend graphisch aufbereitet. Die nachfolgenden Diagramme zeigen jeweils die Variation der Zulufttemperatur bei verschiedenen Adsorptionsversuchen unter konstanter CO₂-Konzentration der Zuluft.

Bei den ersten Versuchen mit 400 ppm CO₂-Konzentration in der Zuluft, die in Abbildung 4.1 ersichtlich sind, dauerte eine vollständige Adsorption bedingt durch die geringste Konzentration, auch am längsten. Bei 15 °C stellte sich erst nach ungefähr 10 Stunden ein Gleichgewicht ein. Wie zu erwarten war, wirken sich geringere Zulufttemperaturen positiv auf die aufgenommene Kohlendioxidmenge aus und das Maximum von 37,66 g wurde bei 15 °C erreicht. In den ersten 200 Minuten Versuchszeit ist sehr schön ersichtlich, dass praktisch kein CO₂ hinter dem Adsorbensbett messbar ist und somit eine ausgezeichnete Selektivität von nahezu 100 % besteht. Bis hin zur Sättigung des Adsorbens, bei der keine Differenz in der CO₂-Konzentration vor und nach dem Festbett mehr gemessen werden konnte, kommt es zum sogenannten Durchbruch. Es wurde eine Reihenfolge des Durchbruches, beginnend mit 30 °C mit fallender Temperatur bis hin zu 15 °C Zulufttemperatur, erwartet, der sich jedoch in den Versuchen nicht bestätigt hat. Die Adsorption bei 30 °C scheint hier aus unbekanntem Gründen ein Ausreißer zu sein. Trotz plausiblen Kurvenverlauf bricht das Adsorbens später durch als erwartet. Es nimmt also auch mehr CO₂ auf als erwartet. Die gemessenen Kohlendioxidmassen bei der nachfolgenden Desorption passen gut mit den Temperaturen zusammen. Wie erwartet sinkt die desorbierte CO₂-Masse mit steigender Zulufttemperatur im Vergleich zu der vorhergehenden Adsorption.

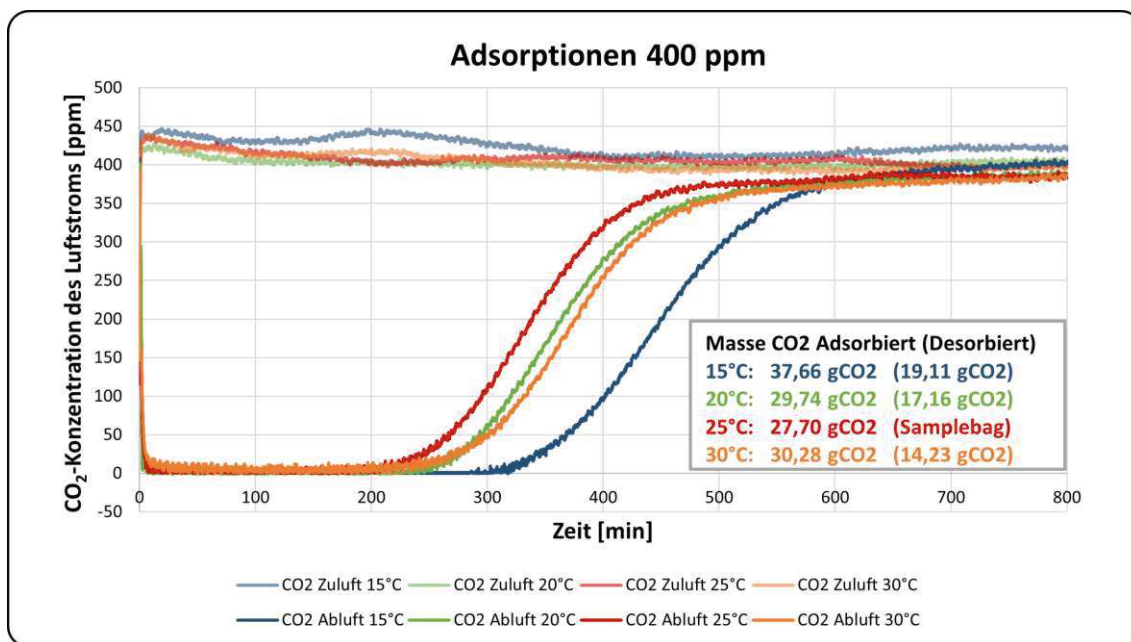


Abbildung 4.1: Adsorptionsversuche mit 400 ppm CO₂ Zuluftkonzentration

Die Abbildung 4.2 zeigt die Versuche bei 700 ppm Kohlendioxidkonzentration. Wie erwartet, bricht das Adsorbens durch die fast doppelt so hohe CO₂-Konzentration auch ungefähr doppelt so schnell durch, nämlich nach ungefähr 100 Minuten. Auch hier wurde die Durchbruchreihenfolge von steigender zu fallender Zulufttemperatur erwartet und in den Messungen auch so beobachtet. Die höchste Adsorptionsmasse sollte nun jedoch auch die höchste Masse bei der nachfolgenden Desorption herbeiführen. Dies spiegeln die Versuchsergebnisse jedoch nicht wieder.

Bei dem Versuch mit 25°C Zulufttemperatur ist ein Anstieg der CO₂-Konzentration nach ungefähr 600 Minuten zu beobachten. Dies ist dadurch zu begründen, dass der Stickstofftank im Technikum während der Versuche allmählich leer wurde. Die vom MFCs konstant gelieferte CO₂-Menge wurde somit einem immer geringer werdenden Stickstoffvolumenstrom beigemischt, was einen Anstieg der Konzentration zufolge hatte.

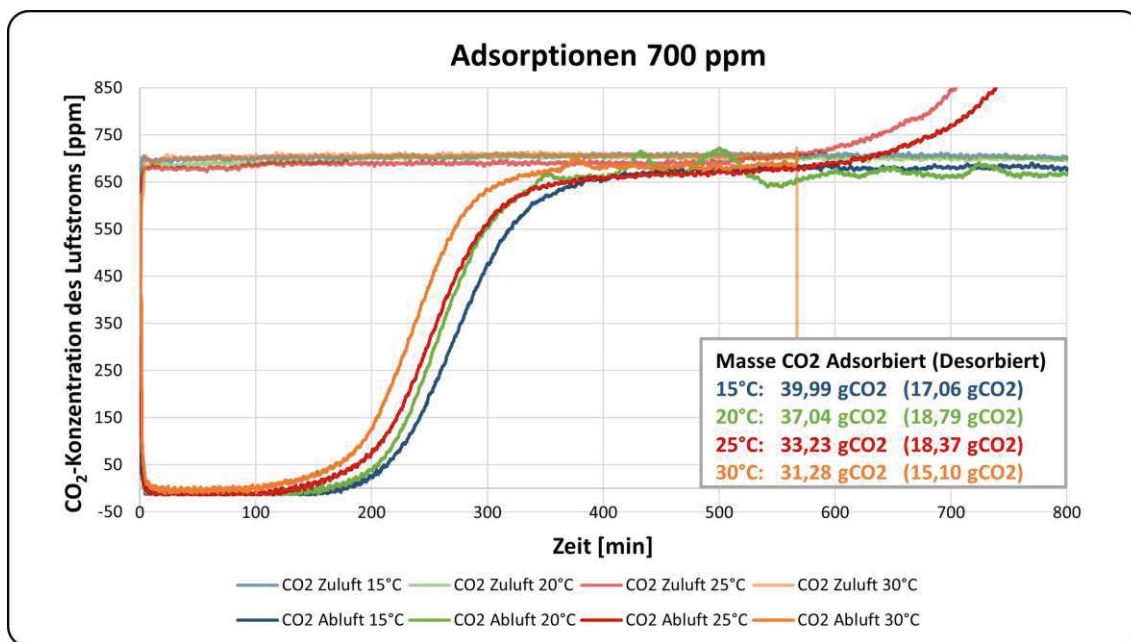


Abbildung 4.2: Adsorptionsversuche mit 700 ppm CO₂ Zuluftkonzentration

Ein noch schnelleres Durchbrechen des Adsorbens konnte bei den in Abbildung 4.3 ersichtlichen Versuchen beobachtet werden. Die Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Zuluft führt im Allgemeinen zusätzlich auch zu einer höheren Kohlendioxid-aufnahme bis zum Gleichgewichtszustand. Die Versuchsergebnisse stimmen unter Beachtung einer gewissen Messungenaugigkeit gut mit den Erwartungen überein. Es ist hier erneut sehr gut ersichtlich, wie genau der CO₂-Gehalt in der Zuluft über den MFC eingestellt werden konnte. Die Schwankungen befinden sich nur im zweistelligen ppm-Bereich.

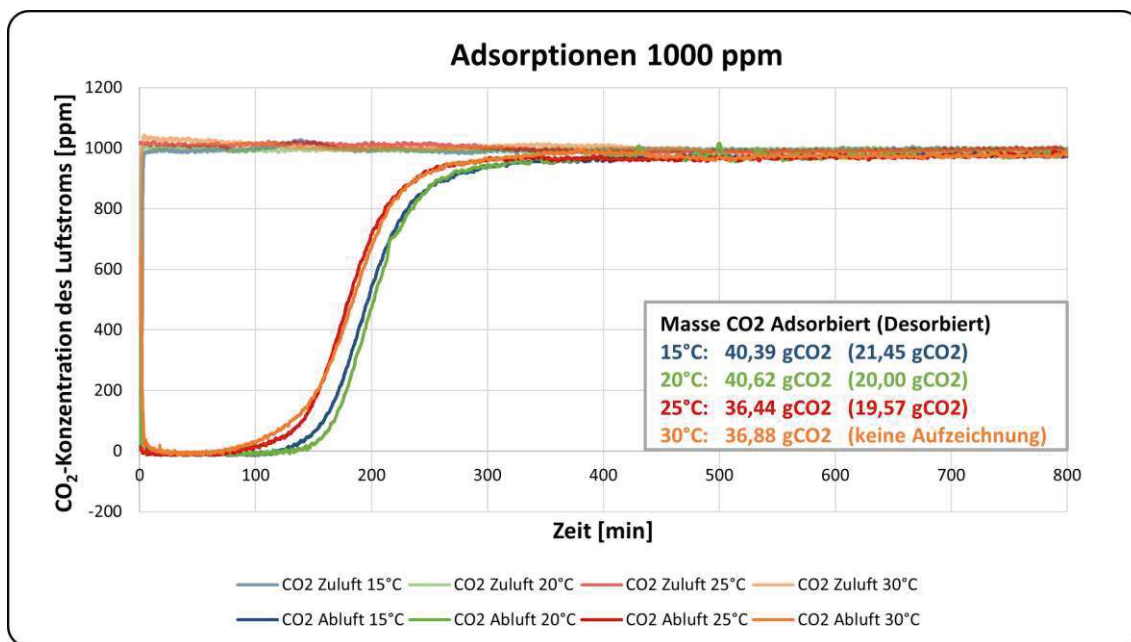


Abbildung 4.3: Adsorptionsversuche mit 1000 ppm CO₂ Zuluftkonzentration

In der Abbildung 4.4 sind die Adsorptionsversuche bei 1300 ppm Zuluftkonzentration dargestellt. Die Messung bei 30 °C stellt auch hier wieder einen Ausreißer dar und es wurde ein früherer Durchbruch erwartet. Die direkt nach den Adsorptionen aufgenommenen Regenerationsversuche verhielten sich wie erwartet. Mit aufsteigender Zulufttemperatur bei der Adsorption wurde eine abfallende Menge an Kohlendioxid desorbiert.

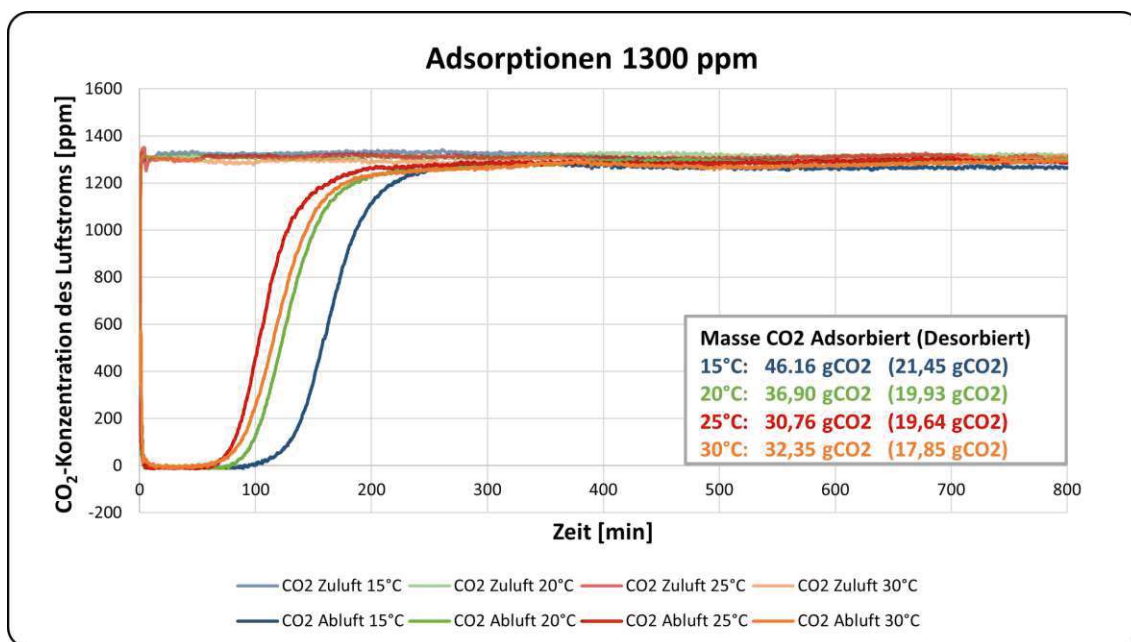


Abbildung 4.4: Adsorptionsversuche mit 1300 ppm CO₂ Zuluftkonzentration

4.2 Validierungsversuche der CO₂-Bilanzen

Wie zuvor beschrieben, ergaben die aus den Messungen gewonnenen Massenbilanzen bei den Versuchen häufig Unstimmigkeiten im Vergleich zu den Erwartungen. Aus diesem Grund wurde ein Validierungsversuch für die im Versuchsaufbau mittels der CO₂-Sonden gemessenen und in der Auswertung bilanzierten Ergebnisse durchgeführt. Dazu wurde bei einer Regeneration das abgegebene Kohlendioxid direkt und ohne Vermischung mit Stickstoff wie bei der üblichen Messung in Gas Sampling Bags geleitet. Das Volumen des dort enthaltenen CO₂ wurde anschließend über eine Gasuhr bestimmt und unter Kenntnis der Dichte auf die Masse umgerechnet, um einen Vergleichswert zu erhalten. Wie in Abbildung 4.5 ersichtlich, wurde der Samplebag mit der Gasuhr verbunden und über die blaue Pneumatikleitung anschließend mittels der Vakuumpumpe ausgesaugt. Um eine weitere Validierung zu ermöglichen wurde die Vakuumpumpe in den konventionellen Messaufbau der Desorption (siehe R&I Abbildung 3.9) eingebunden und ein weiterer Messwert daraus gewonnen.



Abbildung 4.5: Validierungsversuche mit Samplebag und Gasuhr

Die Ergebnisse der Versuche zur Validierung der Massenbilanzen sind in Tabelle 4.6 ersichtlich. Insgesamt konnte die desorbierte CO₂-Masse über drei verschiedene Varianten bestimmt werden, wobei jede für sich einen gewissen Fehler enthält.

In **Variante 1** wurde das über die Gasuhr gemessene Gesamtvolumen der beiden Sampling Bags mit der Dichte von CO₂ auf eine Masse umgerechnet. Es ist hierbei jedoch anzumerken, dass bei dieser Methode zur Massenbestimmung von einer 100 %igen CO₂-Konzentration im Sampling Bag ausgegangen wird. Durch die Tatsache, dass vor der Desorption im Festbett sowie in den Rohrleitungen des Messaufbaus Umgebungsbedingungen herrschen und erst nach Start der Desorption ein Vakuum mit 300 mbar(a) Absolutdruck hergestellt wird, ist von einer erheblichen Menge an Umgebungsluft in dem Gas auszugehen. Bei den Messungen konnte dies auch beobachtet werden, indem eine deutliche und sehr rasche Füllung des Sampling Bags auf ein geschätztes Drittel des Gesamtvolumens unmittelbar nach dem Start der Vakuumpumpe zu sehen war. Durch die geringere Dichte von Umgebungsluft wurde die Dichte der Gasmischung also mit großer Wahrscheinlichkeit als zu hoch angenommen. Diese Methode ergab eine CO₂-Masse von 32,5 g.

Bei der **Variante 2** wurden die beiden Sampling-Bags einmal im leeren und einmal im vollen Zustand abgewogen. Daraus ergab sich eine gemessene Gasmasse von 5,8 g. Durch die Veränderung des Volumens der Probenbeutel in Kombination mit den geringen Massen stellt der Auftrieb hier eine erhebliche Fehlerquelle dar. Mit dem aus den Gasuhrmessungen gewonnenen Volumen der Beutel und der Dichte der Umgebungsluft konnte ein Korrekturwert für den Auftrieb bestimmt werden. In diesem Fall birgt die Annahme, dass der Samplebag im leeren Zustand kein Volumen einnimmt und somit auch kein Auftrieb wirkt, ein mögliches Fehlerpotential. In Summe ergeben sich somit 25,6 gCO₂ als reale desorbierte Gasmasse, wobei davon ausgegangen werden kann, dass der wirkliche Wert höher liegt.

Bei der **Variante 3** wurde die Kohlendioxidmenge über den konventionellen Messaufbau ermittelt. Dabei wird die von den CO₂-Sonden gemessene Konzentration unter der Kenntnis des bei den Rotametern eingestellten Volumenstromes über die Messzeit aufintegriert und somit eine Masse berechnet. Diese Messung ergab nur 10,73 gCO₂, was verglichen mit den anderen Varianten, aber auch mit vergangenen Messungen, unplausibel erscheint. Es konnten keine möglichen Fehlerquellen identifiziert werden, die erheblich genug wären.

Betrachtet man nun diese Messwerte mit Vergleichswerten der CO₂-Aufnahme der vorhergehenden Adsorption, so würden die dort gemessenen 27,7 gCO₂ gut dem erwarteten Wert entsprechen, wenn man die Variante 1 als oberen Grenzwert (Fehlerpotential nach unten) und die Variante 2 als unteren Grenzwert (Fehlerpotential nach oben) betrachtet. Nichtsdestotrotz passen diese Werte weder mit einer vergleichbaren Desorption, noch mit der konventionellen Variante 3 zusammen. Aus

den durchgeführten Validierungsversuchen konnte somit keine stichhaltige Aussage abgeleitet werden. Alle quantitativen Messergebnisse im Bezug auf die Kohlendioxidmassen sind somit bis auf weiteres in Frage zu stellen. Folglich liegt der Fokus auf die qualitativen Ergebnisse und Erkenntnisse, die aus den Versuchen abgeleitet werden konnten.

Variante 1	Variante 2		Variante 3	
V _{ges} Sample Bag 16,5 L	Abwiegen der Samplebags			
	SB1	voll	46,8 g	
		leer	43,5 g	
Dichte CO ₂ 1,81 kg/m ³	SB2	voll	46 g	
		leer	43,5 g	
	Gasmasse gemessen		5,8 g	
Masse	korr. Auftrieb		19,47 g	Vaisala ppm Integration
29,87 g	Gasmasse real		25,27 g	CO₂-Masse 10,73 g

Vergleichswerte	Bezugswert	
CO ₂ -Aufnahme vorhergehende Adsorption 16.05.	Mittelwert V1&V2	27,57 g
CO ₂ -Masse 27,7 g	Vaisala Referenzwert	17,2 g
CO ₂ -Abgabe einer vergleichbaren Desorption 16.05.	Skalierungsfaktor	1,6
CO ₂ -Masse 17,2 g		

Abbildung 4.6: Ergebnisse der Validierungsversuche

Betrachtet man jedoch, wie in Abbildung 4.7 dargestellt, alle CO₂-Bilanzen der Adsorptionen in ihrer Gesamtheit, so entspricht dies doch sehr klar den Erwartungen. So steigt die Masse des adsorbierten Kohlendioxides mit steigender CO₂-Konzentration in der Zuluft und mit fallender Zulufttemperatur an.

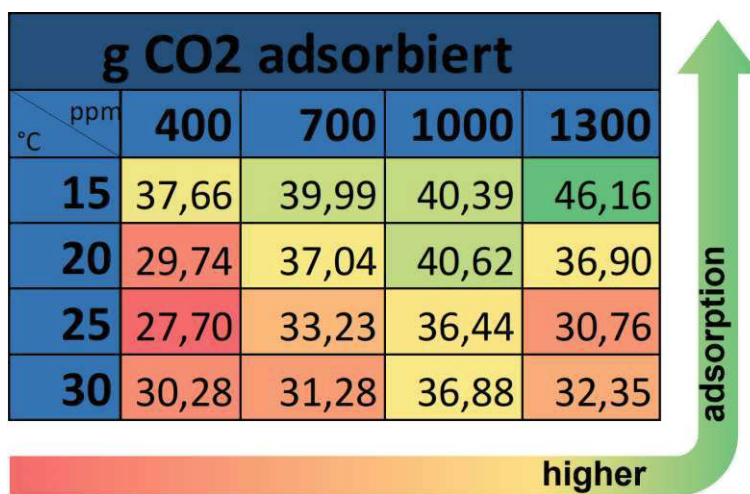


Abbildung 4.7: Heatmap zur Darstellung des CO₂-Adsorptionsverhaltens

Masse CO ₂ adsorbiert / desorbiert (skaliert) in g				
	400 ppm	700 ppm	1000 ppm	1300 ppm
15 °C	37,66 / 19,11 (30,58)	39,99 / 17,06 (27,30)	40,39 / 21,45 (34,32)	46,16 / 21,45 (34,32)
20 °C	29,74 / 17,16 (27,46)	37,04 / 18,79 (30,06)	40,62 / 20,00 (32,00)	36,90 / 19,93 (31,89)
25 °C	27,70 / n.v. (n.v.)	33,23 / 18,37 (29,39)	36,44 / 19,57 (31,31)	30,76 / 19,64 (31,42)
30 °C	30,28 / 14,23 (22,77)	31,28 / 15,10 (24,16)	36,88 / n.v. (n.v.)	32,35 / 17,85 (28,56)

Tabelle 4.1: CO₂-Bilanzen aus Adsorption und Desorption mit Skalierung

Eine Variante, die Messdaten mit den durchgeführten Validierungsversuchen quantitativ zu korrigieren, wurde im Folgenden durchgeführt. Dazu wurde ein Mittelwert aus den beiden Varianten 1 und 2 gebildet, da diese die übliche Sensorik nicht benötigen. Dieser Wert wurde somit als Bezugswert herangezogen. Eine vergleichbare Desorption mit der üblichen Messung über Vaisala CO₂-Sonden ergab eine desorbierte Masse von 17,2 g. Die Division der beiden Werte führt zu dem Faktor, mit dem die gesamten Messdaten der Desorptionen anschließend skaliert wurden. Eine Gesamtübersicht der gemessenen CO₂-Bilanzen mit dem für die Desorptionen angewendeten Skalierungsfaktor ist in Tabelle 4.1 ersichtlich. Es ist erkennbar, dass die skalierten Werte für die Desorption nun deutlich besser mit jenen der vorhergehenden Adsorption übereinstimmen. Es ist hierbei jedoch unbedingt hervorzuheben, dass es sich lediglich um einen Versuch handelt, die Messdaten quantitativ zu berichtigen. Ob und in welchem Umfang dies der Realität entspricht, ist durch weitere Messungen mittels genauerer Gasanalytik zu klären, die auch bereits angeschafft wurde.

4.3 Wasserbilanzen der Adsorptionen

In Abbildung 4.8 sind die aus der Abwage des Adsorbensfestbettes sowie der Wasserbehälter und Abscheidegefäße ermittelten Wasserbilanzen ersichtlich. Ein negativer Wert deutet dabei auf eine Wasserabgabe des Adsorbens während der Adsorption hin, was im HVAC-Einsatz einer Luftbefeuchtung gleicht. Sind die Werte positiv, so wurde die Luft beim Durchströmen des Festbettes entfeuchtet. Die gesamten Messdaten sind bei einer praktisch relativ niedrigen Luftfeuchtigkeit von 35 %rH aufgenommen. Hier tritt das gewünschte Entfeuchtungsverhalten lediglich bei einem Zulufttemperaturniveau von 15 °C zuverlässig auf. Da aber insbesondere bei höheren Temperaturen im Sommer auch mit höheren Luftfeuchtigkeiten gerechnet werden kann (60 % nach DIN EN 16798-1 [12]), ist auch hier voraussichtlich eine Entfeuchtung möglich. Diese Aussage wird auch durch die in Kapitel 4.3 erläuterten Versuchsergebnisse gestützt.

Insbesondere im Sommerbetrieb eines HVAC-Systems (Kühlen) ist ein Entfeuchtungs-

Verhalten des Adsorbens unbedingt erwünscht, da sonst insbesondere mit steigender Umluftrate eine zusätzliche energieintensive Luftentfeuchtung notwendig ist. Für eine genauere Erläuterung dieser Umstände sei auf das Kapitel 2.4 verwiesen. Unter Ausschluss einiger Ausreißer kann hierbei jedenfalls ein Trend zur Wasseraufnahme (Luftentfeuchtung) mit fallender Zulufttemperatur erkannt werden.

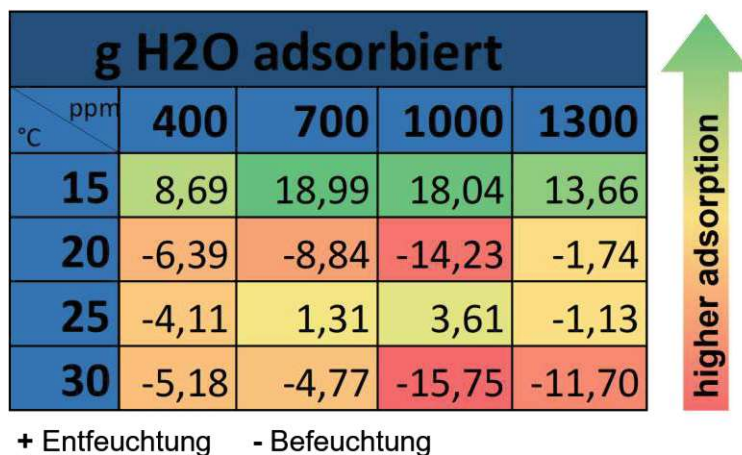


Abbildung 4.8: Heatmap zur Darstellung des H₂O-Adsorptions-/Desorptionsverhaltens

Der zeitliche Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeiten vor und nach dem Adsorbensfestbett ist, in Abbildung 4.9, anhand zweier bei unterschiedlichen Zuluftfeuchtigkeiten durchgeführten Versuchen, ersichtlich. Die Zulufttemperaturen waren bei den Adsorptionsversuchen im Allgemeinen stets mit einer Toleranz im Bereich von nur 0,5 °C konstant. Jener Bereich, in dem die Feuchtigkeit vor dem Festbett höher ist als danach (strichlierte Linie über der Vollen), zeigt an, dass gerade eine Luftentfeuchtung stattfindet und das Adsorbens somit Wasser aufnimmt. Nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustandes nähern sich die beiden Linien an und es gibt keine Wasseraufnahme oder -abgabe mehr von der Zuluft an das Adsorbens. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass eine höhere relative Feuchtigkeit in der Zuluft für eine stärkere Wasseraufnahme sorgt und das Gleichgewicht weiter auf Seiten der Wasseraufnahme liegt. Der Einfluss der relativen Feuchtigkeit ist hierbei stärker als der einer Temperaturänderung um 5 °C. Gleich zu Beginn der Adsorptionen ist erkennbar, dass kurzzeitig voll gesättigte Luft mit 100 % relativer Luftfeuchtigkeit nach dem Festbett gemessen werden kann. Dieser Umstand ist vor allem bei dem zukünftig angedachten Prototypen zur HVAC-Integration oder der weiteren Optimierung zu berücksichtigen. Es wäre günstig, diesen sehr feuchten Luftstrom in den ersten Minuten der Adsorption nicht in den Raum zurückzuführen, sondern stattdessen an die Umgebung abzugeben, um eine unnötige Befeuchtung der Raumluft zu verhindern. Die Größenordnung der Energieeinsparung ist aber jedenfalls mit dem konstruktiven Aufwand abzuwägen.

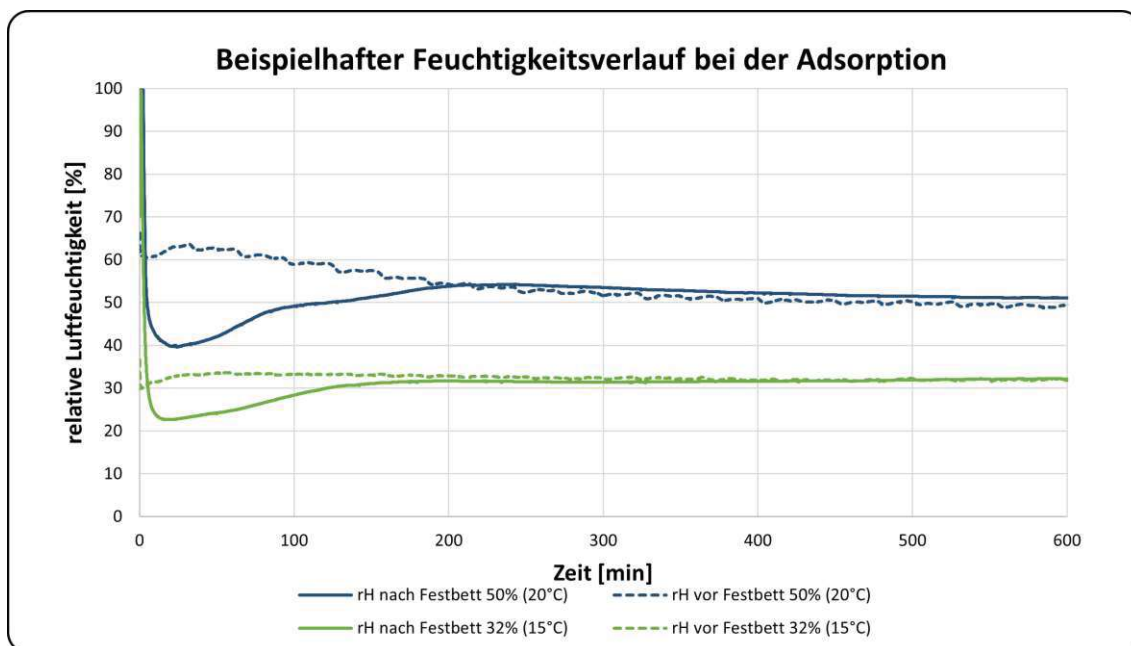


Abbildung 4.9: Beispielhafter Verlauf der relativen Feuchtigkeit vor und nach dem Festbett

Variation der Zuluft-Feuchtigkeit

Zu guter Letzt, wurde wie in Abbildung 4.10 ersichtlich, die relative Luftfeuchtigkeit im Zuluftstrom bei 1000 ppm und einer konstanten Temperatur von 20 °C variiert. Während es bei 20 %rH und 35 %rH zu einer Wasserabgabe (Luftbefeuchtung) kam, konnte bei laut DIN EN 16798-1 [12] für den Sommer üblichen Luftfechtigkeiten im Bereich von 60 %rH eine sehr starke Entfeuchtung gemessen werden. Dies scheint für die HVAC-Integration von DAC-Systemen bei diesen Bedingungen sehr vorteilhaft zu sein. Es fällt weiters auf, dass sich bei 65 %rH selbst nach 700 Minuten Versuchsdauer noch kein Gleichgewicht einzustellen scheint und vom Adsorbens weiterhin Wasser aus der Luft aufgenommen wird. Nichtsdestotrotz sei darauf hingewiesen, dass eine ausreichende Wiederholbarkeit der Versuche vermutlich erst nach einer größeren Anzahl an aufeinander folgenden gleichen Versuchen gegeben ist und es hierfür noch genaueren Untersuchungen bedarf.

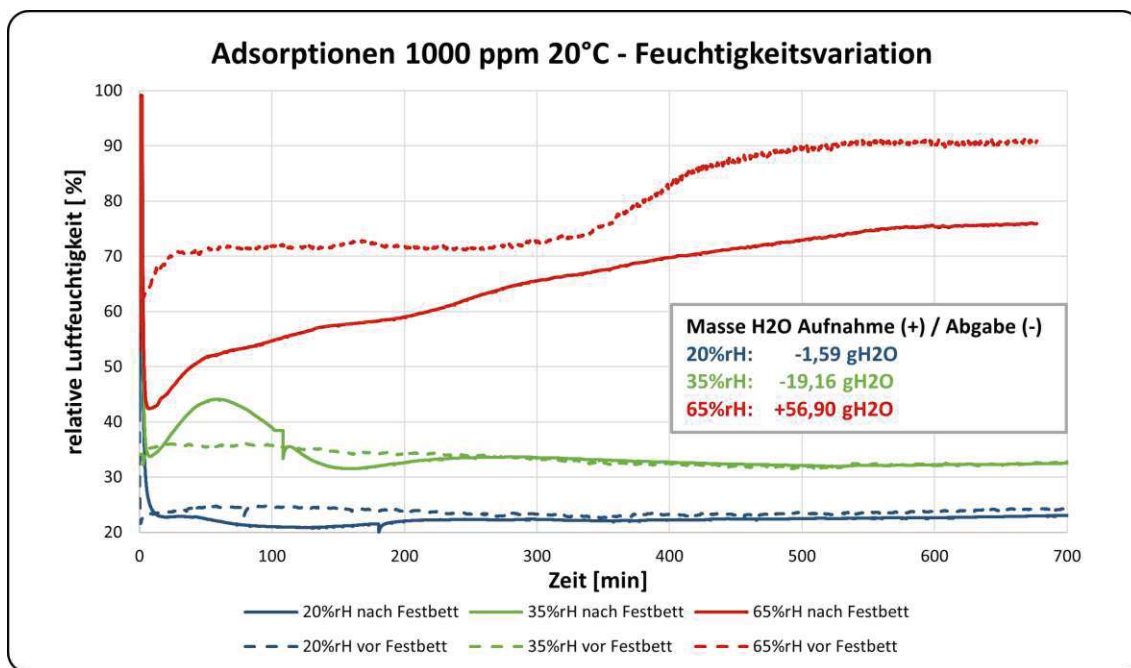


Abbildung 4.10: Variation der relativen Feuchtigkeit in der Zuluft - Wasserbilanz

Betrachtet man die in Abbildung 4.11 ersichtlichen Durchbruchkurven mit zugehörigen CO₂-Bilanzen, so lässt sich daraus vorerst keine wirkliche Erkenntnis gewinnen. Es wäre zu erwarten gewesen, dass sich, wie für aminbasierte Adsorbentien üblich, mit steigender Luftfeuchtigkeit auch die CO₂-Kapazität erhöht. Dies konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden. Wenn diese Thematik näher untersucht werden soll, wäre es empfehlenswert, jede der drei Messaufzeichnungen unmittelbar nacheinander einige Male zu wiederholen, um die Aussagekraft der Messpunkte gewährleisten zu können.

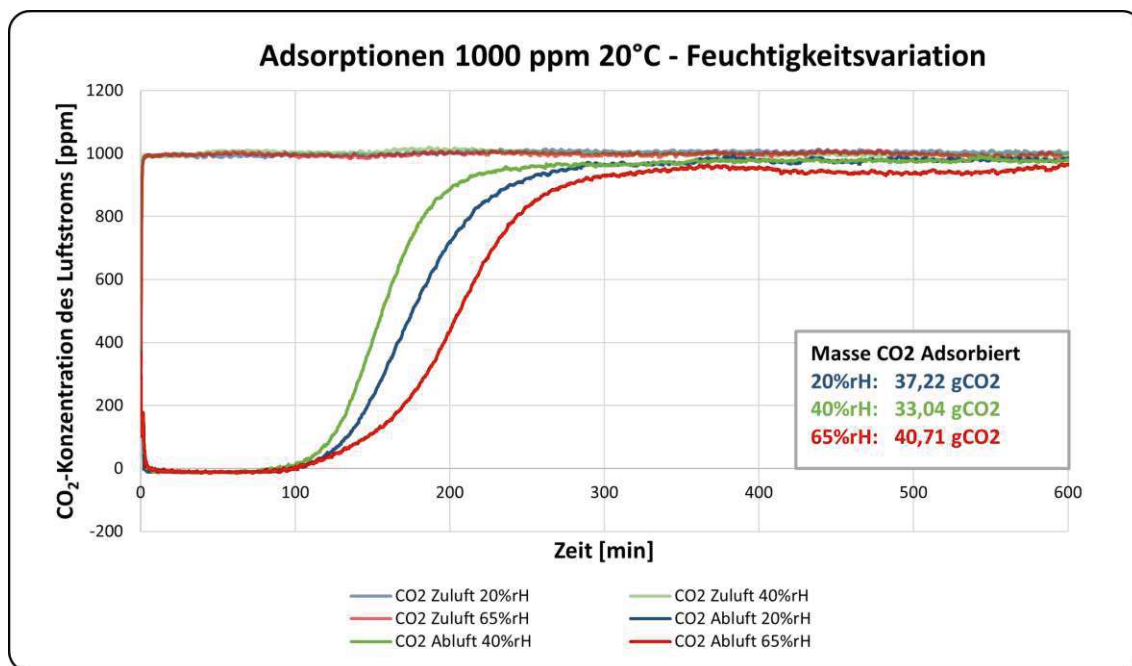


Abbildung 4.11: Variation der relativen Feuchtigkeit in der Zuluft - CO₂-Bilanz

4.4 Weitere Erkenntnisse

Problematik der Feuchtigkeitsmessung an der Versuchsanlage

Ergänzend zu den quantitativen Messergebnissen der Adsorptionsversuche konnten noch weitere Erkenntnisse während des Versuchsbetriebes gewonnen werden. In der vorhandenen Versuchsanlage stellte sich die Feuchtigkeitsmessung als problematisch heraus. Der Feuchtigkeitssensor Vaisala HMP 7 misst nach Angaben des Herstellers die relative Feuchtigkeit, rechnet diese dann über die Temperatur aus der integrierten Temperaturmessung auf eine absolute Feuchtigkeit um und stellt im Anschluss beide Werte zur Verfügung. Im gegebenen Einbauzustand an der Versuchsanlage funktionierte die Temperaturmessung leider nicht, da der Sensor durch Wärmeleitung zwischen dem konischen Rohr und dem Sensorgehäuse, weitgehend unabhängig von der Temperatur des Gasstromes im Rohr, immer ungefähr Umgebungstemperatur misst. Validiert werden konnte dieser Umstand über die zusätzlich vorhandenen Pt100 Temperatursensoren, die zuvor mit dem Kryostaten abgeglichen wurden. Durch deren längere Bauform mit zusätzlich geringeren Masse, die eine geringe thermische Trägheit zufolge hat, konnte die Messung etwa in der Mitte des konischen Rohres erfolgen und ein plausibler Messwert erreicht werden.

Wasserverschleppung über mehrere Versuche

Wurden Versuche mit einer besonders hohen oder niedrigen Feuchtigkeit durchgeführt, wurden dadurch auch noch die nachfolgenden Versuche beeinflusst. Bei

besonders hoher Feuchtigkeit im Festbett, die beispielsweise durch einen Adsorptionsversuch mit hoher Zuluftfeuchtigkeit erreicht wurde, kam es zu einer „Wasserverschleppung“ in die nächsten Versuche und somit zu einer Verfälschung der Bilanzen. Für eine zuverlässige Wasserbilanz ist es also sehr wichtig, den gewünschten Messpunkt ohne zwischenzeitlicher Durchführung anderer Versuche wiederholt zu betrachten. Durch die hohe Anzahl an Versuchen konnte dies in der vorliegenden Arbeit nicht umgesetzt werden. Es wurde jedoch darauf geachtet, nicht unmittelbar einen Versuch mit der höchsten Feuchtigkeit nach einem Versuch mit der geringsten Feuchtigkeit und umgekehrt durchzuführen. Dadurch konnte die Variation der Feuchtigkeit zwischen zwei folgenden Versuchen auf einem angemessenen Niveau gehalten werden und eine erhöhte Wasserverschleppung vermieden werden.

Temperaturverhältnisse bei unterschiedlichen Desorptionsdrücken

Eine weitere interessante Erkenntnis ergibt sich durch Betrachtung der Temperaturverhältnisse im Festbett bei unterschiedlichen Desorptionsdrücken, wie in Tabelle 4.2 ersichtlich. Bei allen drei verschiedenen Drücken wurden die Plattenwärmetauscher und die ins Bett integrierten Rohrwärmetauscher mit konstanter Temperatur von 90 °C über den Kryostaten beaufschlagt. Durch die Abnahme des Siedepunktes von Wasser mit abnehmendem Druck ergibt sich dadurch eine stärkere Überhitzung des Festbettes relativ zum Siedepunkt. Trotz Einbringung von Wasser in Form von Spüldampf während des Prozesses, ergeben sich somit Bedingungen, in denen das Adsorbens durch Wiederverdampfung des zuvor im Festbett befindlichen Wassers eine Trocknung erfährt. Obwohl in den Versuchen kein wirklicher Unterschied im Desorptionsverhalten zwischen 300 mbar(a) und 400 mbar(a) festgestellt werden konnte, fiel die Entscheidung durch die genannte Überhitzung auf den geringeren Desorptionsdruck.

Desorptionsdruck	Max. Betttemperatur	Siedepunkt H ₂ O
700 mbar(a)	90 °C	89 °C
400 mbar(a)	80 °C	75 °C
300 mbar(a)	78 °C	69 °C

Tabelle 4.2: Temperaturverhältnisse bei unterschiedlichen Desorptionsdrücken

4.5 Diskussion

Folgendes Kapitel soll einen zusammenfassenden Kurzüberblick über die gewonnenen Erkenntnisse bei den HVAC-DAC-Versuchen geben. Die insgesamt 24 durchgeführten Adsorptionsversuche mit anschließender Regeneration des Festbettes wurden so gewählt, um mit der Variation der Temperatur und der CO₂-Konzentration übliche Verhältnisse in einem HVAC-System im Sommer- sowie im Winterbetrieb abzubilden. Aus den Versuchen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Die Kurvenform des Adsorptionsverhaltens von CO₂ an Lewatit VP OC 1065 entsprach qualitativ stets den Erwartungen.
- Eine steigende CO₂-Konzentration in der Zuluft führte zu einem schnelleren CO₂-Durchbruch und kohlendioxidhaltige Luft gelangte durch das Festbett hindurch.
- Die aufgetretenen Messungenauigkeiten bzw. Herausforderungen mit der Wiederholbarkeit der Versuche führten bei den CO₂-Bilanzen der Adsorptionen bei einigen Versuchen zu widersprüchlichen Ergebnissen.
- Die gemessenen CO₂-Massen bei der Adsorption und der Desorption weichen teilweise stark voneinander ab, weshalb man auf Ungenauigkeiten bei der Messung schließen kann.
- Die durchgeführten Validierungsversuche für die CO₂-Bilanzierung ließen keine Aussage über die Validität des Messverfahrens zu.
- Bei der Betrachtung der gesamten CO₂-Bilanzen der Adsorptionsversuche in einer gemeinsamen Heatmap (siehe Abbildung 4.7) ergibt sich ein erwartetes Bild. Die Masse des adsorbierten Kohlendioxides steigt mit zunehmender CO₂-Konzentration und fallender Temperatur in der Zuluft an.
- Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 35 %rH in der Zuluft während der Adsorption ergibt sich lediglich bei 15 °C ein zuverlässiges Entfeuchtungsverhalten des Adsorbens. Es ist zu erwarten, dass höhere relative Feuchtigkeiten diesen Effekt auf höhere Temperaturen ausdehnen.
- Unmittelbar nach dem Start der Adsorption tritt für einige Minuten heiße Luft im Sättigungszustand (100 %rH) aus dem Festbett aus, bis sich anschließend unter geeigneten Bedingungen eine Entfeuchtung der Luft während der Adsorption einstellt.
- Höhere relative Feuchtigkeiten in der Zuluft bei der Adsorption führen zu einer stärkeren Wasseraufnahme im Adsorbens und somit zu einer stärkeren Entfeuchtung der Luft.

- Bei sehr trockener Luft mit nur 20 %rH bis hin zu 35 %rH, unter Bedingungen von 20 °C, kann keine Entfeuchtung der Zuluft während der Adsorption mehr beobachtet werden und die Luft wird stattdessen befeuchtet.
- Bei höheren Luftfeuchtigkeiten (z.B. 65 %rH), wie im Sommer üblich, konnte eine deutliche Entfeuchtung im Adsorptionsbetrieb beobachtet werden.
- Eine für aminbasierte Adsorbentien übliche Erhöhung der CO₂-Kapazität mit steigender Zuluftfeuchtigkeit konnte in den Versuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden.
- Durch Wärmeleitung vom konischen Rohr auf den Sensor zur Feuchtigkeitsmessung führt die sensorinterne falsche Temperaturmessung zu einem verfälschten Messwert für die relative Luftfeuchtigkeit.
- Eine hohe Variation der Feuchtigkeitsverhältnisse über unmittelbar folgende Versuche beeinflusst durch eine „Wasserverschleppung“ auch die nachfolgenden Versuche. Für zuverlässige und wiederholgenaue Versuchsergebnisse wird eine mehrfache Wiederholung der Messungen am zu betrachtenden Messpunkt empfohlen.
- Ein geringerer Desorptionsdruck bei gleichbleibender Temperatur der Platten- und Rohrwärmetauscher im Festbett führt zu einer stärkeren Überhitzung des Adsorbens relativ zum Siedepunkt von Wasser und somit trotz Wasserzufuhr in Form von Spüldampf zu einer Trocknung des Adsorbens während der Desorption.

Die untersuchten Messpunkte decken ein möglichst breites Betriebsfeld einer DAC-Anlage mit HVAC-Kopplung ab. Es konnte vor allem gezeigt werden, dass die überaus wichtige Thematik der Wasserbilanz im Adsorptionsbetrieb ein zufriedenstellendes Verhalten aufweist. Dafür sind neben den Adsorptionsbedingungen auch die Desorptionsbedingungen mit einer möglichst starken Überhitzung des Adsorbens gegenüber des Siedepunktes von Wasser verantwortlich. Insbesondere bei höheren Luftfeuchtigkeiten, wie im Sommer üblich, konnte eine deutliche Entfeuchtung beobachtet werden. Probleme sind vor allem im Bereich der quantitativen Messungen der CO₂-Bilanzen aufgetreten. Diese sollten im Zuge von weiteren Untersuchungen validiert werden.

5. HVAC-DAC-Scale-Up

Die aus den DAC-Versuchen an der Versuchsanlage gewonnenen Performancedaten sollen nun im Folgenden auf einen HVAC-Anwendungsfall skaliert werden, um eine Abschätzung der Größenordnung für die erforderliche Adsorbensmenge sowie die Menge des abscheidbaren Kohlendioxides zu erhalten. Bei der in Tabelle 5.1 ersichtlichen Berechnung wird von einem Anwendungsfall in einem Büro mit 100 Personen und einer Bürofläche von 1000 m² ausgegangen. Gemäß der DIN EN 16798-1 [12] kann in der für die Auslegung von raumlufttechnischen Anlagen üblichen Kategorie II von einer notwendigen Außenlufttrate von 7 L/s pro Person zur Kompensation der Personenemissionen und 0,7 L/(s m²) für die Gebäudeemissionen eines schadstoffarmen Gebäudes ausgegangen werden. Die erforderlichen Außenlufttraten ergeben demnach 700 L/s, sowohl für Gebäudeemissionen als auch für Personenemissionen. Bei einer angenommenen Belegungszeit von 10 Stunden pro Tag ergibt sich eine erforderliche mittlere Außenlufttrate von 991,7 L/s.

Bei der CO₂-Konzentration der Raumluft wird ebenfalls von der Kategorie II ausgegangen. Nach DIN EN 16798-1 [12] darf die Kohlendioxidkonzentration 550 ppm über jener der Außenluft liegen. Bei einer angenommenen Atmosphärenkonzentration von 420 ppm ergibt sich demnach ein absoluter Grenzwert von 970 ppm CO₂ für Raumluftkategorie II. Über die Belegungszeit gemittelt folgt die mittlere Kohlendioxidkonzentration von 649,17 ppm. Über die Dichte von Kohlendioxid bei 25 °C und die Konzentration in der Raumluft folgt im modellierten Anwendungsfall ein zur Abscheidung zur Verfügung stehender CO₂-Massenstrom von ca. 4,2 kg/h. Bei der Ermittlung der Performancedaten der Versuchsanlage ergeben sich bei einem Festbettvolumen von ungefähr 0,9 dm³ 571,6 g an im Festbett befindlichem Adsorbens. Die Versuchsdaten der Adsorptionsaufzeichnungen bei einer Konzentration von 700 ppm ergeben über alle Temperaturbereiche im Mittel 32,33 g an adsorbiertem CO₂ über 300 Minuten Adsorptionsdauer.

Um das gesamte Kohlendioxid abzuscheiden, das im vorliegenden Anwendungsfall durch das HVAC-System geleitet wird, sind demnach 649 Versuchsanlagen notwendig. Die dafür notwendige Adsorbensmasse beläuft sich dabei auf ungefähr 370 kg. Die Tatsache, dass sich ein gewisser Anteil des notwendigen Adsorbens in der Regeneration befindet, wurde in dieser Berechnung vernachlässigt. In dem vorliegend modellierten Fall eines Büros mit 100 Personen können demnach pro Tag 101 kg und pro Jahr 36,75 t CO₂ abgeschieden werden. Betrachtet man das nötige Schüttvolumen an Adsorbens, so erscheinen 589 Liter als eine realistische Menge. Anschaulich handelt es sich dabei um ungefähr drei übliche Badewannen voller Adsorbens. Es kann also davon ausgegangen werden, dass eine HVAC-DAC-Anlage für den vorliegenden Anwendungsfall ein Bauvolumen in der Größenordnung eines ISO-Containers (≈ 2,5x2,5x6/12 m) einnehmen würde.

HVAC-DAC-Scale-Up

Berechnung der Außenlufttrate

Annahme: Büroräumlichkeiten mit 100 Personen und 1000m² Bürofläche

Außenlufttrate Kategorie II nach DIN EN 16798-1

Personenemissionen [L/s]	7
Gebäudeemissionen [L/s m ²]	0,7
erf. Außenlufttrate Personen [L/s]	700
erf. Außenlufttrate Gebäude [L/s]	700

Annahme: Belegungszeit 10h voll (Personen + Gebäude) und 14h leer (nur Gebäude)

mittlere Außenlufttrate [L/s] 991,7

Berechnung der CO₂-Konzentration im Raum

CO ₂ -Konzentration Außenluft [ppm]	420
CO ₂ -Konzentration Raumluftkategorie II [ppm]	970

mittlere CO₂ Konzentration [ppm] 649,17

Berechnung des CO₂-Massenstroms zur Abscheidung

Dichte CO ₂ (25°C, 1013mbar) [kg/m ³]	1,81
CO ₂ Volumenstrom aus Raumluft [L/s]	0,6438
CO₂ Massenstrom aus Raumluft [kg/h] 4,195	

Performancedaten Versuchsanlage

Festbettvolumen [dm ³]	0,9073
Schüttdichte Lewatit VP OC 1065 [g/dm ³]	630
Adsorbensmasse Festbett [g] 571,60	

Versuchsdaten: Masse CO₂ Adsorbiert nach 300 min [g]

	700 ppm
15°C	34,73
20°C	33,00
25°C	31,56
30°C	30,03
arithmetischer Mittelwert	32,33

CO₂ Massenstrom adsorbiert [g/h] 6,47

Scale-Up der Versuchsanlage - Ergebnisse

Versuchsanlagenmultiplikator für Büro-Szenario	649
Benötigte Adsorbensmasse [kg]	371
Benötigtes Adsorbensvolumen [L]	589

CO₂ Abscheidung pro Tag [kg] 101

CO₂ Abscheidung pro Jahr [kg] 36746

Tabelle 5.1: Scale-Up der DAC Versuchsanlage auf einen HVAC Anwendungsfall

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigte sich mit der Thematik [Direct Air Capture \(DAC\)](#) von CO_2 aus der Umgebungsluft zum Zwecke eines positiven Einflusses auf den Klimawandel. Dabei wurde in dieser Arbeit insbesondere die Möglichkeit einer [HVAC](#)-Integration näher beleuchtet.

Lackner et al. [2] erwähnte 1999 erstmals die Möglichkeit der CO_2 -Rückgewinnung aus der Atmosphäre als Maßnahme gegen den Klimawandel. Auch die IPCC [10] hebt die Notwendigkeit des Einsatzes von Technologien zur Kohlendioxidentfernung aus der Umgebung hervor. Zur Begrenzung der Erderwärmung auf $1,5\text{ °C}$ müssen demzufolge 100 bis 1000 GtCO_2 im Laufe des 21. Jahrhunderts aus der Atmosphäre entfernt werden.

Die Kosten dafür übersteigen aktuell den CO_2 -Preis deutlich und bilden somit das größte Hindernis. In der [DAC](#)-Forschung finden sich dabei zahlreiche Kostenabschätzungen. Viebahn et al. [3] geht von aktuell $600\text{ \$/tCO}_2$ aus, Fasihi et al. [4] von etwa $250\text{ \$/tCO}_2$ und die National Academics of Sciences [5] nennt einen Bereich von 88 bis $228\text{ \$/tCO}_2$. Nach Ozkan et al. [6] stellen Abscheidungskosten von $< 100\text{ \$/tCO}_2$ die Schranke einer wirtschaftlichen Realisierbarkeit dar, da sich diese im Bereich des CO_2 -Preises im EU-Emissionshandel (aktuell $\approx 70\text{ \$/tCO}_2$ - Tendenz steigend) befinden.

Die [DAC](#)-Forschung bedient sich weitgehend der Adsorptionstechnik. Als Adsorption bezeichnet man die Anreicherung eines vorzugsweise flüssigen oder gasförmigen Stoffes aus einer Lösung auf der äußeren und inneren Oberfläche eines Feststoffes, der als Adsorbens bezeichnet wird [14, Ch.1]. Neben den zahlreichen möglichen Adsorbentien kam bei den Versuchen der vorliegenden Arbeit das aminbasierte Adsorbens Lewatit VP OC 1065 zum Einsatz (vgl. Kapitel 2.2.4). Aminbasierte Adsorbentien eignen sich durch ihre hohe Selektivität besonders gut für die Gewinnung von CO_2 aus extrem niedrig konzentrierten Quellen wie der Umgebungsluft [42]. Die Regeneration wurde mit einer Kombination aus Druckwechsel-Desorption ([PSA](#)) und Temperaturwechsel-Desorption ([TSA](#)) durchgeführt.

Die als [Heating, Ventilation and Air Conditioning \(HVAC\)](#) bezeichnete Raumklimatechnik umfasst das Heizen, Lüften und Kühlen von Räumen und dient damit der Aufrechterhaltung einer behaglichen Raumluft. Eine wichtige normative Grundlage dafür bildet die DIN EN 16798-1 [12], die Berechnungsverfahren zur Auslegung von raumluftechnischen Anlagen sowie Anhaltwerte für das Innenraumklima beinhaltet. In Verbindung mit [DAC](#) sind vor allem die zulässigen CO_2 -Konzentrationen (750 – 1750 ppm, je nach Raumluftqualitätskategorie) sowie die notwendigen Außenluftvolumenströme ($\approx 7\text{ L/s}$ für die Emissionen einer Person und $\approx 7\text{ L/(s m}^2\text{)}$ für die Gebäudeemissionen) von besonderer Relevanz. Zur Berechnung der Wasser-

dampfabgabe von Personen in Abhängigkeit ihres Aktivitätsgrades, stellt die VDI 2078 [53] Formeln zur Verfügung. Je nach Gebäudenutzung ergeben sich durch diese personenbedingten Emissionen von CO₂ und Wasserdampf stündliche Luftwechselzahlen von 0,5-1 für normale Wohngebäude, 3-6 für Büroräume bis hin zu 8-10 für Hörsäle (vgl. Tabelle 2.6).

Eine Integration der DAC-Technologie in HVAC-Systeme kann die erforderlichen Luftwechselzahlen durch Luftreinigung reduzieren und dadurch höhere Umluftraten ermöglichen, die ein Energiesparpotential mit sich bringen. Diese Energiekosteneinsparung eröffnet neues Potential hinsichtlich einer ökonomisch rentablen CO₂-Abscheidung aus erneuerbaren Quellen. (vgl. Kapitel 2.4)

Die durchgeführten HVAC-DAC-Versuche umfassten 24 Adsorptionen mit anschließender Regeneration des Adsorbens. Dabei wurden übliche Bedingungen in einem HVAC-System im Sommer- sowie im Winterbetrieb abgebildet. Es konnte gezeigt werden, dass die überaus wichtige Thematik der Wasserbilanz im Adsorptionsbetrieb ein zufriedenstellendes Verhalten aufweist. Niedrigere Temperaturen und höhere relative Luftfeuchtigkeiten begünstigen das auf den Luftstrom bezogene Entfeuchtungsverhalten des Adsorbens während der Adsorption. Insbesondere bei höheren Luftfeuchtigkeiten, wie im Sommer üblich, konnte eine deutliche Entfeuchtung mit hoher praktischer Relevanz beobachtet werden.

Im Zuge weiterer Untersuchungen gilt es vor allem die Messdaten quantitativ zu validieren sowie die Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse zu überprüfen. In einem automatisierten Versuchsbetrieb wäre es ebenfalls sinnvoll, die gesamte Versuchsmatrix auch bei höheren Luftfeuchtigkeiten zu untersuchen und somit den Übergangspunkt von der Befeuchtung zur Entfeuchtung bei der Adsorption deutlich zu bestimmen. Die im Zuge des übergeordneten Projektes kürzlich fertiggestellte Pilotanlage wurde vom grundlegenden Aufbau bereits für den Einbau in Lüftungsrohre konzipiert und eignet sich für einen weitgehend automatisierten Betrieb. Dadurch ermöglicht diese Anlage die Durchführung von Langzeitbetrachtungen bei einem beschränkten zeitlichen Arbeitsaufwand. Weiters ist die Integration einer genaueren Messtechnik zur Gasanalyse in die bestehenden Anlagen geplant, um die Gewinnung von verlässlichen quantitativen Daten zu ermöglichen.

Abkürzungsverzeichnis

APS	3-Aminopropyltrimethoxysilan	17
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage	1
BET	Brunauer-Emmett-Teller	7
CSA	Composition Swing Adsorption	11
DAC	Direct Air Capture	ii, iii, 1, 2, 3, 4, 14, 16, 18, 20, 24, 26, 29, 30, 31, 32, 38, 40, 54, 58, 59, 60, 62, 63
DCV	Demand Controlled Ventilation	26
HAS	Hyperbranched Aminosilica	18
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning	ii, iii, 2, 3, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 38, 40, 41, 52, 53, 54, 58, 59, 60, 62, 63, 66, 68
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	1, 3

IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry	7, 13
MFC	Mass Flow Controller	43, 44, 46, 47
MOF	Metal Organic Framework	6, 14, 16, 18
PEI	Polyethylenimine	18
PSA	Pressure Swing Adsorption	9, 14, 62
TSA	Temperature Swing Adsorption	10, 30, 62
VRF	Variable Refrigerant Flow	24
VSA	Vacuum Swing Adsorption	10, 14

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufschlüsselung der Kosten von Solid-Sorbent DAC Anlagen [6]	4
2.2	Begriffsdefinition in der Adsorptionstechnik [15, Abb.1.1]	6
2.3	IUPAC-Klassifizierung der Isothermentypen für Gasphasenadsorption [15, Abb.3.2]	8
2.4	Schematische Struktur von metallorganischen Verbindungen [34] . . .	14
2.5	Klassifikation von Aminen [35]	15
2.6	Anteil von Physisorption und Chemisorption bei der CO ₂ -Aufnahme von aminfunktionalisierten Adsorbentien [36]	16
2.7	Klassifikation von aminbasierten Adsorbentien [42]	17
2.8	Einteilung von HVAC Systemen nach Anlagenfunktion [55, Ch. 5.5.5]	22
2.9	Schematischer Aufbau eines HVAC-Systems mit variablem Volumen- strom [55, Abb.5.48]	23
2.10	Belegungsrate von Hotelzimmern im Zeitverlauf [56]	25
2.11	Legende zum Unternehmensüberblick	29
2.12	HVAC-DAC-System (links) und Indoor-DAC-System (rechts) von So- letair Power	31
3.1	DAC-Versuchsanlage im Desorptionsbetrieb	33
3.2	Konisches Rohr mit Wärmetauscher für Adsorption und Gasanalyse .	34
3.3	Festbett mit integriertem Wärmetauscher	34
3.4	Stirnseitige Heizplatten für Festbett mit Dampfauslässen	35
3.5	Unter dem Festbett liegender Verdampfer	36
3.6	Mit Adsorbens befülltes Festbett	37
3.7	Volumenreduktion des Adsorbens bei erstmaliger Desorption nach dem Lagerungszustand	38
3.8	R&I-Fließschema Adsorptionsaufbau	39
3.9	R&I-Fließschema Desorptionsaufbau	40
3.10	Beispielhafte Desorption	42
3.11	Selbstständiger Abfall der CO ₂ -Konzentration ohne Eingriff in das System	44

4.1	Adsorptionsversuche mit 400 ppm CO ₂ Zuluftkonzentration	46
4.2	Adsorptionsversuche mit 700 ppm CO ₂ Zuluftkonzentration	47
4.3	Adsorptionsversuche mit 1000 ppm CO ₂ Zuluftkonzentration	48
4.4	Adsorptionsversuche mit 1300 ppm CO ₂ Zuluftkonzentration	48
4.5	Validierungsversuche mit Samplebag und Gasuhr	49
4.6	Ergebnisse der Validierungsversuche	51
4.7	Heatmap zur Darstellung des CO ₂ -Adsorptionsverhaltens	51
4.8	Heatmap zur Darstellung des H ₂ O-Adsorptions-/Desorptionsverhaltens	53
4.9	Beispielhafter Verlauf der relativen Feuchtigkeit vor und nach dem Festbett	54
4.10	Variation der relativen Feuchtigkeit in der Zuluft - Wasserbilanz	55
4.11	Variation der relativen Feuchtigkeit in der Zuluft - CO ₂ -Bilanz	56

Tabellenverzeichnis

2.1	An die Umgebungsluft abgegebene Wasserdampfmengen nach Quelle [51, Table 3.1 & p.151]	21
2.2	Auslegungskriterien der Be- und Entfeuchtungsanlagen für Räume, deren Feuchte Kriterien durch menschliche Nutzung bestimmt werden [12]	21
2.3	Zulässige CO ₂ -Konzentration in der Raumluft nach Behaglichkeitskategorie	21
2.4	Empfohlener Auslegungs-Außenluftvolumenstrom nach Behaglichkeitskategorie	21
2.5	Luftarten für die Kennzeichnung und Darstellung von raumlufttechnischen Anlagen [55, Tab.5.6]	23
2.6	Ungefähre Luftwechselzahlen verschiedener Raumarten [55, Tab.5.26 & Ch.5.5.4]	25
2.7	HVAC-Unternehmen in Österreich	28
2.8	Modellparameter für Szenarien 1-4 [13]	30
3.1	Adsorptionsmatrix: Prozessbedingungen im Zuluftstrom	41
3.2	Gleichbleibende Desorptionsparameter	41
4.1	CO ₂ -Bilanzen aus Adsorption und Desorption mit Skalierung	52
4.2	Temperaturverhältnisse bei unterschiedlichen Desorptionsdrücken	57
5.1	Scale-Up der DAC Versuchsanlage auf einen HVAC Anwendungsfall	61
A.1	Verwendete Geräte und Sensorik - Versuchsanlage	77

Literaturverzeichnis

- [1] E. S. Sanz-Pérez, C. R. Murdock, S. A. Didas und C. W. Jones, „Direct Capture of CO₂ from Ambient Air“, en, *Chemical Reviews*, Jg. 116, Nr. 19, Okt. 2016, ISSN: 0009-2665, 1520-6890. DOI: [10.1021/acs.chemrev.6b00173](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00173).
- [2] K. Lackner, H.-J. Ziock und P. Grimes, „Carbon Dioxide Extraction From Air: Is It An Option?“, en, Clearwater, Florida, Aug. 1999.
- [3] P. Viebahn, A. Scholz und O. Zelt, „The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis“, en, *Energies*, Jg. 12, Nr. 18, Jan. 2019, ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en12183443](https://doi.org/10.3390/en12183443).
- [4] M. Fasihi, O. Efimova und C. Breyer, „Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants“, en, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 224, S. 957–980, Juli 2019, ISSN: 0959-6526. DOI: [10.1016/j.jclepro.2019.03.086](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086).
- [5] Committee on Developing a Research Agenda for Carbon Dioxide Removal and Reliable Sequestration u. a., *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda*, en. Washington, D.C.: National Academies Press, März 2019, Pages: 25259, ISBN: 978-0-309-48452-7. DOI: [10.17226/25259](https://doi.org/10.17226/25259).
- [6] M. Ozkan, S. P. Nayak, A. D. Ruiz und W. Jiang, „Current status and pillars of direct air capture technologies“, en, *iScience*, Jg. 25, Nr. 4, Apr. 2022, ISSN: 2589-0042. DOI: [10.1016/j.isci.2022.103990](https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103990).
- [7] J. E. Tierney, J. Zhu, J. King, S. B. Malevich, G. J. Hakim und C. J. Poulsen, „Glacial cooling and climate sensitivity revisited“, en, *Nature*, Jg. 584, Nr. 7822, S. 569–573, Aug. 2020, Number: 7822 Publisher: Nature Publishing Group, ISSN: 1476-4687. DOI: [10.1038/s41586-020-2617-x](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2617-x).
- [8] S. Arrhenius, „On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground“, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Jg. 41, Nr. 251, S. 237–276, Apr. 1896, Publisher: Taylor & Francis, ISSN: 1941-5982. DOI: [10.1080/14786449608620846](https://doi.org/10.1080/14786449608620846).
- [9] IPCC u. a., „Special Report: Global Warming of 1.5°C, Summary for Teachers“, *Office for Climate Education*, S. 24, Dez. 2018.
- [10] IPCC u. a., „Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty“, *World Meteorolo-*

- gical Organization, Geneva, Switzerland*, S. 33, 2018. Adresse: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/> (besucht am 16.03.2022).
- [11] Z. Zolfaghari, A. Aslani, A. Moshari und M. Malekli, „Direct air capture from demonstration to commercialization stage: A bibliometric analysis“, en, *International Journal of Energy Research*, Jg. 46, Nr. 1, S. 383–396, 2022, ISSN: 1099-114X. DOI: [10.1002/er.7203](https://doi.org/10.1002/er.7203).
- [12] „DIN EN 16798-1:2022-03, Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung EN 16798-1:2019“, März 2022.
- [13] L. Baus und S. Nehr, „Potentials and limitations of direct air capturing in the built environment“, en, *Building and Environment*, Jg. 208, Jan. 2022, ISSN: 0360-1323. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108629](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108629).
- [14] T. Chi, *Introduction to Adsorption*, en. Elsevier, 2019, ISBN: 978-0-12-816446-4. Adresse: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00297-2>.
- [15] D. Bathen und M. Breitbach, *Adsorptionstechnik*, en. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, ISBN: 978-3-642-62117-8 978-3-642-18235-8. DOI: [10.1007/978-3-642-18235-8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18235-8).
- [16] P. Pourhakkak, A. Taghizadeh, M. Taghizadeh, M. Ghaedi und S. Haghdoost, „Fundamentals of adsorption technology“, en, in *Interface Science and Technology*, G. Mehrorang, Hrsg., Bd. 33, Elsevier, 2021, S. 1–70, ISBN: 978-0-12-818805-7. DOI: [10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818805-7.00001-1).
- [17] R. Veneman, N. Frigka, W. Zhao, Z. Li, S. Kersten und W. Brilman, „Adsorption of H₂O and CO₂ on supported amine sorbents“, en, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Jg. 41, S. 268–275, Okt. 2015, ISSN: 1750-5836. DOI: [10.1016/j.ijggc.2015.07.014](https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.014).
- [18] J. Young, E. García-Díez, S. Garcia und M. v. d. Spek, „The impact of binary water-CO₂ isotherm models on the optimal performance of sorbent-based direct air capture processes.“, en, Juli 2021. DOI: [10.26434/chemrxiv-2021-dvppv-v2](https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2021-dvppv-v2).
- [19] J. García Martínez, „Study of water adsorption on an amine adsorbent for Direct Air Capture of CO₂“, Feb. 2020. Adresse: <http://essay.utwente.nl/80782/>.

- [20] E. Sonnleitner, G. Schöny und H. Hofbauer, „Assessment of zeolite 13X and Lewatit® VP OC 1065 for application in a continuous temperature swing adsorption process for biogas upgrading“, en, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Jg. 8, Nr. 2, S. 379–395, Juni 2018, ISSN: 2190-6823. DOI: [10.1007/s13399-017-0293-3](https://doi.org/10.1007/s13399-017-0293-3).
- [21] S. Sutanto, J. Dijkstra, J. Pieterse, J. Boon, P. Hauwert und D. Brilman, „CO₂ removal from biogas with supported amine sorbents: First technical evaluation based on experimental data“, en, *Separation and Purification Technology*, Jg. 184, S. 12–25, Aug. 2017, ISSN: 13835866. DOI: [10.1016/j.seppur.2017.04.030](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.04.030).
- [22] N. Sun, T. zy, Z. Wei, C. Snape und Y. Sun, „Solid Adsorbents for Low-Temperature CO₂ Capture with Low-Energy Penalties Leading to More Effective Integrated Solutions for Power Generation and Industrial Processes“, *Frontiers in Energy Research*, Jg. 3, März 2015. DOI: [10.3389/fenrg.2015.00009](https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00009).
- [23] F. Çeçen, „Water and Wastewater Treatment: Historical Perspective of Activated Carbon Adsorption and its Integration with Biological Processes“, en, in *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, S. 1–11, ISBN: 978-3-527-63944-1. DOI: [10.1002/9783527639441.ch1](https://doi.org/10.1002/9783527639441.ch1).
- [24] A. Ahmadpour und D. D. Do, „The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation“, en, *Carbon*, Jg. 34, Nr. 4, S. 471–479, Jan. 1996, ISSN: 0008-6223. DOI: [10.1016/0008-6223\(95\)00204-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00204-9).
- [25] M. J. Lashaki, S. Khiavi und A. Sayari, „Stability of amine-functionalized CO₂ adsorbents: a multifaceted puzzle“, en, *Chemical Society Reviews*, Jg. 48, Nr. 12, S. 3320–3405, Juni 2019, Publisher: The Royal Society of Chemistry, ISSN: 1460-4744. DOI: [10.1039/C8CS00877A](https://doi.org/10.1039/C8CS00877A).
- [26] C. Kim, H. S. Cho, S. Chang, S. J. Cho und M. Choi, „An ethylenediamine-grafted Y zeolite: a highly regenerable carbon dioxide adsorbent via temperature swing adsorption without urea formation“, en, *Energy & Environmental Science*, Jg. 9, Nr. 5, S. 1803–1811, Mai 2016, Publisher: The Royal Society of Chemistry, ISSN: 1754-5706. DOI: [10.1039/C6EE00601A](https://doi.org/10.1039/C6EE00601A).
- [27] C. Chen, S.-S. Kim, W.-S. Cho und W.-S. Ahn, „Polyethylenimine-incorporated zeolite 13X with mesoporosity for post-combustion CO₂ capture“, en, *Applied Surface Science*, Jg. 332, S. 167–171, März 2015, ISSN: 0169-4332. DOI: [10.1016/j.apsusc.2015.01.106](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.106).
- [28] D. P. Bezerra u. a., „CO₂ adsorption in amine-grafted zeolite 13X“, en, *Applied Surface Science*, Jg. 314, S. 314–321, Sep. 2014, ISSN: 0169-4332. DOI: [10.1016/j.apsusc.2014.06.164](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.06.164).

- [29] S. C. Lee, C. C. Hsieh, C. H. Chen und Y. S. Chen, „CO₂ Adsorption by Y-Type Zeolite Impregnated with Amines in Indoor Air“, en, *Aerosol and Air Quality Research*, Jg. 13, Nr. 1, S. 360–366, 2013, Publisher: Taiwan Association for Aerosol Research, ISSN: 2071-1409. DOI: [10.4209/aaqr.2012.05.0134](https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0134).
- [30] F. Su, C. Lu, S.-C. Kuo und W. Zeng, „Adsorption of CO₂ on Amine-Functionalized Y-Type Zeolites“, *Energy & Fuels*, Jg. 24, Nr. 2, S. 1441–1448, Feb. 2010, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0887-0624. DOI: [10.1021/ef901077k](https://doi.org/10.1021/ef901077k).
- [31] R. Chatti u. a., „Amine loaded zeolites for carbon dioxide capture: Amine loading and adsorption studies“, en, *Microporous and Mesoporous Materials*, Jg. 121, Nr. 1, S. 84–89, Mai 2009, ISSN: 1387-1811. DOI: [10.1016/j.micromeso.2009.01.007](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.01.007).
- [32] P. D. Jadhav, R. V. Chatti, R. B. Biniwale, N. K. Labhsetwar, S. Devotta und S. S. Rayalu, „Monoethanol Amine Modified Zeolite 13X for CO₂ Adsorption at Different Temperatures“, *Energy & Fuels*, Jg. 21, Nr. 6, S. 3555–3559, Nov. 2007, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0887-0624. DOI: [10.1021/ef070038y](https://doi.org/10.1021/ef070038y).
- [33] L. A. Darunte, K. S. Walton, D. S. Sholl und C. W. Jones, „CO₂ capture via adsorption in amine-functionalized sorbents“, en, *Current Opinion in Chemical Engineering, Nanotechnology / Separation Engineering*, Jg. 12, S. 82–90, Mai 2016, ISSN: 2211-3398. DOI: [10.1016/j.coche.2016.03.002](https://doi.org/10.1016/j.coche.2016.03.002).
- [34] D. Y. Heo, H. H. Do, S. H. Ahn und S. Y. Kim, „Metal-Organic Framework Materials for Perovskite Solar Cells“, en, *Polymers*, Jg. 12, Nr. 9, S. 2061, Sep. 2020, Number: 9 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2073-4360. DOI: [10.3390/polym12092061](https://doi.org/10.3390/polym12092061).
- [35] S.-i. Nakao, K. Yogo, K. Goto, T. Kai und H. Yamada, *Advanced CO₂ Capture Technologies: Absorption, Adsorption, and Membrane Separation Methods*, en, Ser. SpringerBriefs in Energy. Cham: Springer International Publishing, 2019, ISBN: 978-3-030-18857-3 978-3-030-18858-0. DOI: [10.1007/978-3-030-18858-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18858-0).
- [36] T. Gelles, S. Lawson, A. A. Rownaghi und F. Rezaei, „Recent advances in development of amine functionalized adsorbents for CO₂ capture“, en, *Adsorption*, Jg. 26, Nr. 1, S. 5–50, Jan. 2020, ISSN: 1572-8757. DOI: [10.1007/s10450-019-00151-0](https://doi.org/10.1007/s10450-019-00151-0).
- [37] X. Xu, C. Song, J. M. Andrésen, B. G. Miller und A. W. Scaroni, „Preparation and characterization of novel CO₂ “molecular basket” adsorbents based on polymer-modified mesoporous molecular sieve MCM-41“, en, *Microporous and Mesoporous Materials*, Jg. 62, Nr. 1, S. 29–45, Aug. 2003, ISSN: 1387-1811. DOI:

- [10.1016/S1387-1811\(03\)00388-3](https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00388-3). Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181103003883> (besucht am 04.05.2022).
- [38] G. Qi, L. Fu und E. P. Giannelis, „Sponges with covalently tethered amines for high-efficiency carbon capture“, en, *Nature Communications*, Jg. 5, Nr. 1, S. 5796, Dez. 2014, Number: 1 Publisher: Nature Publishing Group, ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/ncomms6796](https://doi.org/10.1038/ncomms6796).
- [39] S. Wang, X. Qiu, Y. Chen und S. Chen, „Preparation and structure tuning of CO₂ adsorbent based on in-situ amine-functionalized hierarchical porous polymer“, en, *Microporous and Mesoporous Materials*, Jg. 330, S. 111585, Jan. 2022, ISSN: 1387-1811. DOI: [10.1016/j.micromeso.2021.111585](https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.111585).
- [40] P. Bollini, S. A. Didas und C. W. Jones, „Amine-oxide hybrid materials for acid gas separations“, en, *Journal of Materials Chemistry*, Jg. 21, Nr. 39, S. 15100, 2011, ISSN: 0959-9428, 1364-5501. DOI: [10.1039/c1jm12522b](https://doi.org/10.1039/c1jm12522b).
- [41] W. C. Wilfong, B. W. Kail, C. W. Jones, C. Pacheco und M. L. Gray, „Spectroscopic Investigation of the Mechanisms Responsible for the Superior Stability of Hybrid Class 1/Class 2 CO₂ Sorbents: A New Class 4 Category“, *ACS Applied Materials & Interfaces*, Jg. 8, Nr. 20, S. 12780–12791, Mai 2016, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 1944-8244. DOI: [10.1021/acsami.6b02062](https://doi.org/10.1021/acsami.6b02062).
- [42] S. A. Didas, S. Choi, W. Chaikittisilp und C. W. Jones, „Amine–Oxide Hybrid Materials for CO₂ Capture from Ambient Air“, *Accounts of Chemical Research*, Jg. 48, Nr. 10, S. 2680–2687, Okt. 2015, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0001-4842. DOI: [10.1021/acs.accounts.5b00284](https://doi.org/10.1021/acs.accounts.5b00284).
- [43] X. Xu, C. Song, J. M. Andresen, B. G. Miller und A. W. Scaroni, „Novel Polyethylenimine-Modified Mesoporous Molecular Sieve of MCM-41 Type as High-Capacity Adsorbent for CO₂ Capture“, *Energy & Fuels*, Jg. 16, Nr. 6, S. 1463–1469, Nov. 2002, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0887-0624. DOI: [10.1021/ef020058u](https://doi.org/10.1021/ef020058u).
- [44] W. Buijs und S. de Flart, „Direct Air Capture of CO₂ with an Amine Resin: A Molecular Modeling Study of the CO₂ Capturing Process“, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Jg. 56, Nr. 43, S. 12297–12304, Nov. 2017, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0888-5885. DOI: [10.1021/acs.iecr.7b02613](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02613).
- [45] H. J. Kwon, C. Lee, J.-W. Kook, J. H. Kim, K. Hwang und J.-Y. Lee, „Amine Functionalized Wheat Bran Husk as Bio-Based Organic Adsorbent for Low-Density Polyethylene Composite of Carbon Dioxide Capture“, en, *Macromolecular Research*, Jg. 28, Nr. 1, S. 1289–1296, Dez. 2020, ISSN: 2092-7673. DOI: [10.1007/s13233-020-8172-3](https://doi.org/10.1007/s13233-020-8172-3).

- [46] S. Luo, S. Chen, Y. Chen, S. Chen, N. Ma und Q. Wu, „Sisal fiber-based solid amine adsorbent and its kinetic adsorption behaviors for CO₂“, en, *RSC Advances*, Jg. 6, Nr. 76, S. 72 022–72 029, Juli 2016, Publisher: The Royal Society of Chemistry, ISSN: 2046-2069. DOI: [10.1039/C6RA14627A](https://doi.org/10.1039/C6RA14627A).
- [47] M. Avishan, A. Noorpoor und S. Nazari Kudahi, „Experimental and Theoretical Investigation of CO₂ Adsorption on Amine-Modified Pumice as an Affordable Adsorbent“, *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, Jg. 40, Nr. 4, S. 1148–1161, Sep. 2021, Publisher: Iranian Institute of Research and Development in Chemical Industries (IRDCI)-ACECR, ISSN: 1021-9986. DOI: [10.30492/ijcce.2020.40298](https://doi.org/10.30492/ijcce.2020.40298).
- [48] C. Gebald, J. A. Wurzbacher, P. Tingaut, T. Zimmermann und A. Steinfeld, „Amine-Based Nanofibrillated Cellulose As Adsorbent for CO₂ Capture from Air“, *Environmental Science & Technology*, Jg. 45, Nr. 20, S. 9101–9108, Okt. 2011, Publisher: American Chemical Society, ISSN: 0013-936X. DOI: [10.1021/es202223p](https://doi.org/10.1021/es202223p).
- [49] A. B. Lumb, „Chapter 13 - Exercise“, en, in *Nunn's Applied Respiratory Physiology (Eighth Edition)*, A. B. Lumb, Hrsg., Elsevier, Jan. 2017, 227–234.e1, ISBN: 978-0-7020-6294-0. DOI: [10.1016/B978-0-7020-6294-0.00013-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-6294-0.00013-7).
- [50] M. Luo, Z. Wang, K. Ke, B. Cao, Y. Zhai und X. Zhou, „Human metabolic rate and thermal comfort in buildings: The problem and challenge“, en, *Building and Environment*, Jg. 131, S. 44–52, März 2018, ISSN: 0360-1323. DOI: [10.1016/j.buildenv.2018.01.005](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.01.005).
- [51] S. Medved, *Building Physics: Heat, Ventilation, Moisture, Light, Sound, Fire, and Urban Microclimate*, en, Ser. Springer Tracts in Civil Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2022, ISBN: 978-3-030-74389-5 978-3-030-74390-1. DOI: [10.1007/978-3-030-74390-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74390-1).
- [52] E. T. Gall und W. W. Nazaroff, „New directions: Potential climate and productivity benefits from CO₂ capture in commercial buildings“, en, *Atmospheric Environment*, Jg. 103, S. 378–380, Feb. 2015, ISSN: 1352-2310. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.01.004](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.004).
- [53] „VDI 2078:2015-06, Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)“, de/en, Juni 2015.
- [54] „DIN EN ISO 13788:2013-05, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren (ISO 13788:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13788:2012“, Mai 2013.

- [55] D. Bohne, *Technischer Ausbau von Gebäuden*, de. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-8348-1832-4 978-3-8348-2253-6. DOI: [10.1007/978-3-8348-2253-6](https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2253-6).
- [56] J. Xie, Y. Pan, W. Jia, L. Xu und Z. Huang, „Energy-consumption simulation of a distributed air-conditioning system integrated with occupant behavior“, en, *Applied Energy*, Jg. 256, S. 113914, Dez. 2019, ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.113914](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113914).
- [57] A. TenWolde und C. L. Pilon, „The effect of indoor humidity on water vapor release in homes“, en, *Proceedings, ASHRAE thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings X : U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory: Buildings X Conference*, S. 9, 2007. Adresse: <http://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/29768> (besucht am 03.06.2022).
- [58] K. Fitzner, Hrsg., *Raumklimatechnik*, de. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, ISBN: 978-3-540-57181-0 978-3-540-68213-4. DOI: [10.1007/978-3-540-68213-4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68213-4).
- [59] G. Anastasi u. a., „Optimized Energy and Air Quality Management of Shared Smart Buildings in the COVID-19 Scenario“, en, *Energies*, Jg. 14, Nr. 8, S. 2124, Jan. 2021, Number: 8 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 1996-1073. DOI: [10.3390/en14082124](https://doi.org/10.3390/en14082124).
- [60] N. Nassif, „A robust CO2-based demand-controlled ventilation control strategy for multi-zone HVAC systems“, en, *Energy and Buildings*, Jg. 45, S. 72–81, Feb. 2012, ISSN: 0378-7788. DOI: [10.1016/j.enbuild.2011.10.018](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.018).
- [61] M. O. Ng, M. Qu, P. Zheng, Z. Li und Y. Hang, „CO2-based demand controlled ventilation under new ASHRAE Standard 62.1-2010: a case study for a gymnasium of an elementary school at West Lafayette, Indiana“, en, *Energy and Buildings*, Jg. 43, Nr. 11, S. 3216–3225, Nov. 2011, ISSN: 0378-7788. DOI: [10.1016/j.enbuild.2011.08.021](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.021).
- [62] A. Franco, L. Miserocchi und D. Testi, „A method for optimal operation of HVAC with heat pumps for reducing the energy demand of large-scale non residential buildings“, en, *Journal of Building Engineering*, Jg. 43, S. 103175, Nov. 2021, ISSN: 2352-7102. DOI: [10.1016/j.jobbe.2021.103175](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103175).
- [63] A. Franco und E. Schito, „Definition of Optimal Ventilation Rates for Balancing Comfort and Energy Use in Indoor Spaces Using CO2 Concentration Data“, en, *Buildings*, Jg. 10, Nr. 8, S. 135, Aug. 2020, Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, ISSN: 2075-5309. DOI: [10.3390/buildings10080135](https://doi.org/10.3390/buildings10080135).

- [64] Z. D. O'Neill, Y. Li, H. C. Cheng, X. Zhou und S. T. Taylor, „Energy savings and ventilation performance from CO₂-based demand controlled ventilation: Simulation results from ASHRAE RP-1747 (ASHRAE RP-1747)“, *Science and Technology for the Built Environment*, Jg. 26, Nr. 2, S. 257–281, Feb. 2020, Publisher: Taylor & Francis, ISSN: 2374-4731. DOI: [10.1080/23744731.2019.1620575](https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1620575).
- [65] Z. Sun, S. Wang und Z. Ma, „In-situ implementation and validation of a CO₂-based adaptive demand-controlled ventilation strategy in a multi-zone office building“, en, *Building and Environment*, Jg. 46, Nr. 1, S. 124–133, Jan. 2011, ISSN: 0360-1323. DOI: [10.1016/j.buildenv.2010.07.008](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.008).
- [66] S. Taheri und A. Razban, „Learning-based CO₂ concentration prediction: Application to indoor air quality control using demand-controlled ventilation“, en, *Building and Environment*, Jg. 205, S. 108 164, Nov. 2021, ISSN: 0360-1323. DOI: [10.1016/j.buildenv.2021.108164](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108164).
- [67] B. Li, B. Wu, Y. Peng und W. Cai, „Tube-based robust model predictive control of multi-zone demand-controlled ventilation systems for energy saving and indoor air quality“, en, *Applied Energy*, Jg. 307, S. 118 297, Feb. 2022, ISSN: 03062619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.118297](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118297).
- [68] M. K. Kim, L. Baldini, H. Leibundgut, J. A. Wurzbacher und N. Piatkowski, „A novel ventilation strategy with CO₂ capture device and energy saving in buildings“, en, *Energy and Buildings*, Jg. 87, S. 134–141, Jan. 2015, ISSN: 0378-7788. DOI: [10.1016/j.enbuild.2014.11.017](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.017).
- [69] M. K. Kim und H. Leibundgut, „Performance of novel ventilation strategy for capturing CO₂ with scheduled occupancy diversity and infiltration rate“, en, *Building and Environment*, Jg. 89, S. 318–326, Juli 2015, ISSN: 03601323. DOI: [10.1016/j.buildenv.2015.02.012](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.012).
- [70] M. K. Kim, L. Baldini, H. Leibundgut und J. A. Wurzbacher, „Evaluation of the humidity performance of a carbon dioxide (CO₂) capture device as a novel ventilation strategy in buildings“, en, *Applied Energy*, Jg. 259, S. 112 869, Feb. 2020, ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2019.03.074](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.074).
- [71] Y. Ji, J. Y. Yong, W. Liu, X. J. Zhang und L. Jiang, „Thermodynamic analysis on direct air capture for building air condition system: Balance between adsorbent and refrigerant“, en, *Energy and Built Environment*, März 2022, ISSN: 2666-1233. DOI: [10.1016/j.enbenv.2022.02.009](https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2022.02.009).
- [72] S. Power, *Products for Carbon Capture*, en-US. Adresse: <https://www.soletairpower.fi/products/> (besucht am 07.08.2022).

A. Anhang

A.1 Verwendete Geräte und Sensorik

Nr.	Name	Bezeichnung
1	Vakuumpumpe	KNF SC 920G
2	Membranpumpe	Grundfos DDE 6-10
3	Kryostat	ThermoFisher Scientific A24B (Bad und Kühlelement), SC 100 (Heizelement)
4	Rotameter	Krohne Luftrotameter 6bar 1,1-10 Nm ³ /h
5	Rotameter	Krohne Luftrotameter 6bar 0,95-9 Nm ³ /h
6	Massendurchflussregler für Gase (MFC)	Bürkert Typ 8711
7	Temperatursensor	Pt100 ø3mm
8	CO2 Sensor	Vaisala GMP 252
9	Feuchtigkeitssensor	Vaisala HMP 7
10	Bildschirm-Sensoranzeige	Vaisala Indigo 520 Transmitter
11	Waage	Precisa 5000 D-12000 G
12	Gasuhr	Zhejiang Sapphire Instrument Science & Technology Co Ltd (Diaphragm Gasmeter)

Tabelle A.1: Verwendete Geräte und Sensorik - Versuchsanlage

A.2 Produktinformationen Lewatit VP OC 1065

PRODUKTINFORMATION LEWATIT® VP OC 1065



Lewatit® VP OC 1065 ist ein makroporöses Divinylbenzol-vernetztes Polymer in Form kugelförmiger Perlen mit primären Aminogruppen. Daher eignet es sich besonders zur Verwendung in folgenden Anwendungen:

- selektive Entfernung von Säuren aus Prozessströmen
- Entfärbung von Stärkezucker und Proteinlösungen
- Adsorption von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid (CO₂)
- Adsorption von Aldehyden

Die besonderen Eigenschaften dieses Produktes können nur dann voll genutzt werden, wenn die angewandte Technologie des Prozesses dem aktuellsten Stand entspricht. Weitere Empfehlungen können von Lanxess, Business Unit Liquid Purification Technologies (LPT) eingeholt werden.

Dieses Dokument enthält wichtige Informationen
und muss vollständig gelesen werden.

Version: 2021-12-10
Letzte Version: 2021-03-04

1/4

LANXESS
Energizing Chemistry

PRODUKTINFORMATION LEWATIT® VP OC 1065



Allgemeine Beschreibung

Lieferform	freie Base
Funktionelle Gruppe	primäres Amin
Matrix	vernetztes Polystyrol
Struktur	makroporös
Erscheinungsform	opak

Spezifizierte Eigenschaften

Gleichheitskoeffizient		max.	1,8
Korngrößenverteilung für >90 vol% aller Perlen		mm	0,3-1,25
Effektive Korngröße	d10	mm	0,52 (+/- 0,05)
Feinkorn	kleiner 0,315 mm	max. vol %	3
Totalkapazität (Lieferform)		min. eq/l	2,1

**PRODUKTINFORMATION
LEWATIT® VP OC 1065**

Typische physikalische und chemische Eigenschaften

Schüttgewicht bei Lieferung	(+/- 5%)	g/l	630
Wassergehalt (Lieferform)		ca. Gew%	47-55
Beständigkeit Temperaturbereich		°C	1-100
Lagerfähigkeit (Temperaturbereich)		°C	-20 - +40
Oberfläche nach BET		ca. m ² /g	50
Porenvolumen		ca. cm ³ /g	0,27
Porendurchmesser		ca. nm	25

Betriebsparameter

Betriebstemperatur		max. °C	100
--------------------	--	---------	-----

**PRODUKTINFORMATION
LEWATIT® VP OC 1065****Zusätzliche Informationen & Regulierungen****Sicherheitsmaßnahmen**

Starke Oxidationsmittel, z.B. Salpetersäure, können im Kontakt mit Ionenaustauschern heftige Reaktionen verursachen.

Toxizität

Das Sicherheitsdatenblatt ist zu beachten. Es enthält weitere Angaben zu Kennzeichnung, Transport und Lagerung sowie Informationen zu Handhabung, Produktsicherheit und Ökologie.

Entsorgung

In der Europäischen Union müssen Ionenaustauscher entsprechend der Europäischen Abfallverordnung entsorgt werden, die auf der Internetseite der Europäischen Union abgerufen werden kann.

Lagerung

Es wird empfohlen, Ionenaustauscher bei Temperaturen über dem Gefrierpunkt von Wasser, überdacht, trocken und ohne sie direkt dem Sonnenlicht auszusetzen zu lagern. Wenn der Ionenaustauscher gefrieren sollte, sollte er nicht verwandt werden sondern langsam, schrittweise bei angemessener Temperatur auftauen.

Verpackung

Erfahrungsgemäß ist die Haltbarkeit des Verpackungsmittels für eine zuverlässige Lagerung des Produktes unter den oben beschriebenen Bedingungen auf 24 Monate begrenzt. Daher wird empfohlen das Produkt innerhalb dieses Zeitraums zu verwenden. Anderfalls ist es erforderlich, den Zustand der Verpackung regelmäßig zu überprüfen.

Die vorstehenden Informationen und unsere anwendungstechnische Beratung in Wort, Schrift und durch Versuche erfolgen nach bestem Wissen, gelten jedoch nur als unverbindliche Hinweise, auch in Bezug auf etwaige Schutzrechte Dritter. Die Beratung befreit Sie nicht von einer eigenen Prüfung unserer aktuellen Beratungshinweise – insbesondere unserer Sicherheitsdatenblätter und technischen Informationen – und unserer Produkte im Hinblick auf ihre Eignung für die beabsichtigten Verfahren und Zwecke. Anwendung, Verwendung und Verarbeitung unserer Produkte und der aufgrund unserer anwendungstechnischen Beratung von Ihnen hergestellten Produkte erfolgen außerhalb unserer Kontrollmöglichkeiten und liegen daher ausschließlich in Ihrem Verantwortungsbereich. Der Verkauf unserer Produkte erfolgt nach Maßgabe unserer jeweils aktuellen Allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen.

LANXESS Deutschland GmbH

Liquid Purification Technologies
Kennedyplatz 1
50569 Koeln
Germany

+49-221-8885-0
lewatit@lanxess.com

www.lanxess.com
www.lpt.lanxess.com

Dieses Dokument enthält wichtige Informationen
und muss vollständig gelesen werden.

Version: 2021-12-10
Letzte Version: 2021-03-04

4/4

LANXESS
Energizing Chemistry

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

ABSCHNITT 1: Bezeichnung des Stoffs beziehungsweise des Gemischs und des Unternehmens**1.1 Produktidentifikator**

Handelsname : LEWATIT VP OC 1065
Produktnummer : 04355989

1.2 Relevante identifizierte Verwendungen des Stoffs oder Gemischs und Verwendungen, von denen abgeraten wird

Verwendung des Stoffs/des Gemisches : Ionenaustauscher, Harze und Katalysatoren

1.3 Einzelheiten zum Lieferanten, der das Sicherheitsdatenblatt bereitstellt

Lieferant : LANXESS Deutschland GmbH
Production, Technology,
Safety & Environment
51369 Leverkusen, Germany
Telefon : +4922188852288
E-Mailadresse der für SDB verantwortlichen Person : infosds@lanxess.com

1.4 Notrufnummer

+492143099300 Sicherheitszentrale CHEMPARK Leverkusen
+4314064343 Vergiftungsinformationszentrale der Gesundheit

ABSCHNITT 2: Mögliche Gefahren**2.1 Einstufung des Stoffs oder Gemischs****Einstufung (VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008)**

Keine gefährliche Substanz oder Mischung.

2.2 Kennzeichnungselemente**Kennzeichnung (VERORDNUNG (EG) Nr. 1272/2008)**

Keine gefährliche Substanz oder Mischung.

2.3 Sonstige Gefahren

Dieser Stoff/diese Mischung enthält keine Komponenten in Konzentrationen von 0,1 % oder höher, die entweder als persistent, bioakkumulierbar und toxisch (PBT) oder sehr persistent und sehr bioakkumulierbar (vPvB) eingestuft sind.

Umweltbezogene Angaben: Der Stoff/dieses Gemisch enthält keine Bestandteile, die gemäß REACH Artikel 57(f) oder der delegierten Verordnung (EU) 2017/2100 der Kommission oder der

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006



LEWATIT VP OC 1065

Version 2.0	Überarbeitet am: 06.05.2021	SDB-Nummer: 103000009921	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019 Land / Sprache: AT / DE
----------------	--------------------------------	-----------------------------	--

delegierten Verordnung (EU) 2018/605 der Kommission in Mengen von 0,1 % oder mehr endokrinschädliche Eigenschaften aufweisen.

Toxikologische Angaben: Der Stoff/dieses Gemisch enthält keine Bestandteile, die gemäß REACH Artikel 57(f) oder der delegierten Verordnung (EU) 2017/2100 der Kommission oder der delegierten Verordnung (EU) 2018/605 der Kommission in Mengen von 0,1 % oder mehr endokrinschädliche Eigenschaften aufweisen.

ABSCHNITT 3: Zusammensetzung/Angaben zu Bestandteilen

3.2 Gemische

Chemische Charakterisierung : Styrol-Divinylbenzol-Copolymer mit Aminomethylen-Gruppen in Form der freien Base

Inhaltsstoffe

Anmerkungen : Keine gefährlichen Inhaltsstoffe

ABSCHNITT 4: Erste-Hilfe-Maßnahmen

4.1 Beschreibung der Erste-Hilfe-Maßnahmen

- Schutz der Ersthelfer : Es sollen keine Maßnahmen ergriffen werden, die mit persönlichem Risiko einhergehen oder nicht ausreichend trainiert wurden.
- Nach Einatmen : Die betroffene Person an die frische Luft bringen und in einer Position ruhigstellen, die das Atmen erleichtert. Atemwege freihalten. Bei nicht vorhandener oder unregelmäßiger Atmung oder beim Auftreten eines Atemstillstands ist durch ausgebildetes Personal eine künstliche Beatmung oder Sauerstoffgabe einzuleiten. Atemwege offen halten. Eng anliegende Kleidungsstücke (z. B. Kragen, Krawatte, Gürtel oder Bund) lockern. Bei Auftreten von Symptomen, ärztliche Betreuung aufsuchen.
- Nach Hautkontakt : Mit Seife und viel Wasser abwaschen. Verunreinigte Kleidung und Schuhe ausziehen. Bei Auftreten von Symptomen, ärztliche Betreuung aufsuchen.
- Nach Augenkontakt : Bei Beschwerden Arzt hinzuziehen.
- Nach Verschlucken : Mund mit Wasser ausspülen. Kleine Mengen Wasser trinken lassen. Nie einer ohnmächtigen Person etwas durch den Mund einflößen. Bei Beschwerden Arzt hinzuziehen.

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

4.2 Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen

Symptome : Keine Symptome bekannt oder erwartet.

4.3 Hinweise auf ärztliche Soforthilfe oder Spezialbehandlung

Behandlung : Keine besonderen Maßnahmen erforderlich.

ABSCHNITT 5: Maßnahmen zur Brandbekämpfung**5.1 Löschmittel**Geeignete Löschmittel : Löschmaßnahmen auf die Umgebung abstimmen.
Im Brandfall Sprühwasser (Nebel), Schaum oder Löschpulver einsetzen.

Ungeeignete Löschmittel : Keine bekannt.

5.2 Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren

Besondere Gefahren bei der Brandbekämpfung : kein(e,er)

Gefährliche Verbrennungsprodukte : Kohlenmonoxid
Kohlendioxid (CO₂)
Stickoxide (NO_x)
Metalloxide**5.3 Hinweise für die Brandbekämpfung**

Besondere Schutzausrüstung für die Brandbekämpfung : Feuerwehrleute sollten angemessene Schutzkleidung und umluftunabhängige Atemgeräte mit vollem Gesichtsschutz tragen, die im Überdruckmodus betrieben werden.

Weitere Information : Im Brandfall den Ort des Geschehens umgehend abriegeln und alle Personen aus dem Gefahrenbereich evakuieren.
Es sollen keine Maßnahmen ergriffen werden, die mit persönlichem Risiko einhergehen oder nicht ausreichend trainiert wurden.**ABSCHNITT 6: Maßnahmen bei unbeabsichtigter Freisetzung****6.1 Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen, Schutzausrüstungen und in Notfällen anzuwendende Verfahren**Personenbezogene Vorsichtsmaßnahmen : Es sollen keine Maßnahmen ergriffen werden, die mit persönlichem Risiko einhergehen oder nicht ausreichend trainiert wurden.
Verschüttete Substanz nicht berühren oder betreten.
Entsprechende persönliche Schutzausrüstung anlegen.
Rutschgefahr auf verschüttetem Produkt.

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

6.2 Umweltschutzmaßnahmen

Umweltschutzmaßnahmen : Vermeiden Sie die Verbreitung und das Abfließen von freigesetztem Material sowie den Kontakt mit dem Erdreich, Gewässern, Abflüssen und Abwasserleitungen. Bei der Verunreinigung von Gewässern oder der Kanalisation die zuständigen Behörden in Kenntnis setzen.

6.3 Methoden und Material für Rückhaltung und Reinigung

Reinigungsverfahren : Behälter aus dem Austrittsbereich entfernen. Material aufsaugen oder zusammenkehren und in entsprechend beschrifteten Abfallbehälter geben. Nicht in die Kanalisation, Oberflächen- und Grundwasser sowie in den Boden gelangen lassen. Abfälle in anerkannten Abfallbeseitigungsanlagen entsorgen.

6.4 Verweis auf andere Abschnitte

Hinweise zur Entsorgung finden Sie in Abschnitt 13.
Persönliche Schutzausrüstung siehe unter Abschnitt 8.

ABSCHNITT 7: Handhabung und Lagerung**7.1 Schutzmaßnahmen zur sicheren Handhabung**

Hinweise zum sicheren Umgang : Verunreinigte Kleidung und Schutzausrüstung vor dem Betreten von Essräumen ausziehen. Die mit der Substanz umgehenden Personen müssen sich vor dem Essen, Trinken oder Rauchen die Hände und das Gesicht waschen. Entsprechende persönliche Schutzausrüstung anlegen. Das Essen, Trinken und Rauchen ist in Bereichen, in denen diese Substanz verwendet, gelagert oder verarbeitet wird, zu verbieten.

Hygienemaßnahmen : Waschen Sie nach dem Umgang mit chemischen Produkten und am Ende des Arbeitstages ebenso wie vor dem Essen, Rauchen und einem Toilettenbesuch gründlich Hände, Unterarme und Gesicht. Kontaminierte Kleidung vor der erneuten Verwendung waschen. Stellen Sie sicher, dass in der Nähe des Arbeitsbereichs Augenspülstationen und Sicherheitsduschen vorhanden sind. Geeignete Methoden zur Beseitigung kontaminierter Kleidung wählen.

7.2 Bedingungen zur sicheren Lagerung unter Berücksichtigung von Unverträglichkeiten

Anforderungen an Lagerräume und Behälter : Entsprechend den örtlichen Vorschriften lagern. Nur im Originalbehälter aufbewahren. Vor direktem Sonnenlicht schützen. Nur in trockenen, kühlen und gut belüfteten Bereichen aufbewahren. Nicht zusammen mit unverträglichen Stoffen (siehe Abschnitt 10) und nicht mit Nahrungsmitteln und Getränken lagern. Behälter bis zur Verwendung versiegelt halten. Nicht in unbeschrifteten Behältern aufbewahren. Behälter, welche geöffnet wurden, sorgfältig verschließen und aufrecht lagern,

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006



LEWATIT VP OC 1065

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe:
2.0	06.05.2021	103000009921	11.02.2019
			Land / Sprache: AT / DE

um das Auslaufen zu verhindern. Zur Vermeidung einer Kontamination der Umwelt geeigneten Behälter verwenden.

Maßnahmen gegen elektrostatische Entladungen treffen.
Nicht eintrocknen lassen.

Empfohlene Lagerungstemperatur : -20 - 40 °C

7.3 Spezifische Endanwendungen

Bestimmte Verwendung(en) : Keine Daten verfügbar

ABSCHNITT 8: Begrenzung und Überwachung der Exposition/Persönliche Schutzausrüstungen

8.1 Zu überwachende Parameter

Enthält keine Stoffe mit Arbeitsplatzgrenzwerten.

8.2 Begrenzung und Überwachung der Exposition

Technische Schutzmaßnahmen

Keine Informationen verfügbar.

Persönliche Schutzausrüstung

Augenschutz : Schutzbrille mit Seitenschutz

Handschutz

Material : Polyvinylchlorid - PVC
Tragedauer : < 60 min

Material : Nitrilkautschuk - NBR
Tragedauer : < 60 min

Anmerkungen : Nach Produktkontamination Handschuhe sofort wechseln und fachgerecht entsorgen. Die arbeitsplatzspezifische Eigenschaft sollte mit den Schutzhandschuhherstellern abgeklärt werden.

Haut- und Körperschutz : Bei der Arbeit geeignete Schutzkleidung tragen.

Atemschutz : Bei der Entwicklung von Staub oder Aerosol Atemschutz mit anerkanntem Filtertyp verwenden.

Filtertyp : P1 Filter

ABSCHNITT 9: Physikalische und chemische Eigenschaften

9.1 Angaben zu den grundlegenden physikalischen und chemischen Eigenschaften

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version 2.0	Überarbeitet am: 06.05.2021	SDB-Nummer: 103000009921	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019 Land / Sprache: AT / DE
----------------	--------------------------------	-----------------------------	--

Aussehen	: Perlen
Aggregatzustand	: fest
Farbe	: Hell, beige, undurchsichtig
Geruch	: geruchlos
Geruchsschwelle	: Keine Daten verfügbar
pH-Wert	: < 9 Konzentration: 10 %
Schmelzpunkt/Gefrierpunkt	: Keine Daten verfügbar
Siedepunkt/Siedebereich	: Keine Daten verfügbar
Flammpunkt	: Keine Daten verfügbar
Verdampfungsgeschwindigkeit	: Keine Daten verfügbar
Entzündbarkeit (fest, gasförmig)	: Keine Daten verfügbar
Obere Explosionsgrenze	: Keine Daten verfügbar
Untere Explosionsgrenze	: Keine Daten verfügbar
Dampfdruck	: Keine Daten verfügbar
Relative Dampfdichte	: Keine Daten verfügbar
Relative Dichte	: Keine Daten verfügbar
Dichte	: 1,04 g/cm ³ (20 °C)
Schüttdichte	: 600 - 700 kg/m ³
Löslichkeit(en) Wasserlöslichkeit	: unlöslich
Verteilungskoeffizient: n-Octanol/Wasser	: Keine Daten verfügbar
Zündtemperatur	: > 250 °C
Zersetzungstemperatur	: Keine Daten verfügbar
Viskosität	: Keine Daten verfügbar
Explosive Eigenschaften	: Keine Daten verfügbar

SICHERHEITSDATENBLATT
gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006



LEWATIT VP OC 1065

Version 2.0	Überarbeitet am: 06.05.2021	SDB-Nummer: 103000009921	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019 Land / Sprache: AT / DE
----------------	--------------------------------	-----------------------------	--

Oxidierende Eigenschaften : Keine Daten verfügbar

Partikeleigenschaften
Bewertung : Keine Daten verfügbar

Partikelgröße : Keine Daten verfügbar

9.2 Sonstige Angaben

Keine Daten verfügbar

ABSCHNITT 10: Stabilität und Reaktivität

10.1 Reaktivität

Für dieses Produkt oder seine Inhaltsstoffe liegen keine speziellen Daten bezüglich der Reaktivität vor.

10.2 Chemische Stabilität

Das Produkt ist chemisch stabil.

10.3 Möglichkeit gefährlicher Reaktionen

Gefährliche Reaktionen : Keine gefährlichen Reaktionen bekannt bei bestimmungsgemäßem Umgang.

10.4 Zu vermeidende Bedingungen

Zu vermeidende Bedingungen : Bei Brand oder thermischer Zersetzung Entwicklung von Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und anderen toxischen Gasen.
Maßnahmen gegen elektrostatische Entladungen treffen.
Nicht eintrocknen lassen.

10.5 Unverträgliche Materialien

Zu vermeidende Stoffe : Oxidationsmittel

10.6 Gefährliche Zersetzungsprodukte

Gefährliche Zersetzungsprodukte : Keine Zersetzung bei normaler Lagerung.

ABSCHNITT 11: Toxikologische Angaben

11.1 Angaben zu den Gefahrenklassen im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Akute Toxizität

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Produkt:

Akute orale Toxizität : LD50 (Ratte): > 5.000 mg/kg

SICHERHEITSDATENBLATT
gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

Ätz-/Reizwirkung auf die Haut

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Produkt:

Anmerkungen : Prüfergebnisse eines analogen Produktes

Schwere Augenschädigung/-reizung

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Produkt:

Anmerkungen : Prüfergebnisse eines analogen Produktes

Sensibilisierung der Atemwege/Haut**Sensibilisierung durch Hautkontakt**

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Sensibilisierung durch Einatmen

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Keimzell-Mutagenität

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Karzinogenität

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Reproduktionstoxizität

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Spezifische Zielorgan-Toxizität bei einmaliger Exposition

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Spezifische Zielorgan-Toxizität bei wiederholter Exposition

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

Aspirationstoxizität

Nicht klassifiziert nach den vorliegenden Informationen.

11.2 Angaben über sonstige Gefahren**Endokrinschädliche Eigenschaften****Produkt:**

Bewertung : Der Stoff/dieses Gemisch enthält keine Bestandteile, die gemäß REACH Artikel 57(f) oder der delegierten Verordnung (EU) 2017/2100 der Kommission oder der delegierten Verordnung (EU) 2018/605 der Kommission in Mengen von 0,1 % oder mehr endokrinschädliche Eigenschaften aufweisen.

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006



LEWATIT VP OC 1065

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

ABSCHNITT 12: Umweltbezogene Angaben

12.1 Toxizität

Keine Daten verfügbar

12.2 Persistenz und Abbaubarkeit

Keine Daten verfügbar

12.3 Bioakkumulationspotenzial

Keine Daten verfügbar

12.4 Mobilität im Boden

Keine Daten verfügbar

12.5 Ergebnisse der PBT- und vPvB-Beurteilung

Produkt:

Bewertung : Dieser Stoff/diese Mischung enthält keine Komponenten in Konzentrationen von 0,1 % oder höher, die entweder als persistent, bioakkumulierbar und toxisch (PBT) oder sehr persistent und sehr bioakkumulierbar (vPvB) eingestuft sind..

12.6 Endokrinschädliche Eigenschaften

Produkt:

Bewertung : Der Stoff/dieses Gemisch enthält keine Bestandteile, die gemäß REACH Artikel 57(f) oder der delegierten Verordnung (EU) 2017/2100 der Kommission oder der delegierten Verordnung (EU) 2018/605 der Kommission in Mengen von 0,1 % oder mehr endokrinschädliche Eigenschaften aufweisen.

12.7 Andere schädliche Wirkungen

Produkt:

Sonstige ökologische Hinweise : Keine besonderen Wirkungen oder Gefahren bekannt.

ABSCHNITT 13: Hinweise zur Entsorgung

13.1 Verfahren der Abfallbehandlung

Produkt : Wiederverwendbarkeit überprüfen.
Produktabfälle und ungereinigte Leergebinde verpacken bzw. verschließen, kennzeichnen und unter Beachtung der nationalen behördlichen Vorschriften einer geeigneten Entsorgung bzw. Wiederverwendung zuführen.
Bei größeren Mengen Rücksprache mit dem Lieferanten.
Bei Weitergabe ungereinigter Leergebinde ist der Abnehmer auf die mögliche Gefährdung durch Produktreste hinzuweisen.
Nach gegenwärtigem Kenntnisstand des Lieferanten ist dieses Produkt nicht als gefährlicher Abfall im Sinne der EU-

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version 2.0	Überarbeitet am: 06.05.2021	SDB-Nummer: 103000009921	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019 Land / Sprache: AT / DE
----------------	--------------------------------	-----------------------------	--

Richtlinie 91/689/EWG zu betrachten.

Bei der Entsorgung innerhalb der EU ist der jeweils gültige Abfallschlüssel nach dem Europäischen Abfallverzeichnis (EAV) zu verwenden.

ABSCHNITT 14: Angaben zum Transport**14.1 UN-Nummer oder ID-Nummer**

Nicht als Gefahrgut eingestuft

14.2 Ordnungsgemäße UN-Versandbezeichnung

Nicht als Gefahrgut eingestuft

14.3 Transportgefahrenklassen

Nicht als Gefahrgut eingestuft

14.4 Verpackungsgruppe

Nicht als Gefahrgut eingestuft

14.5 Umweltgefahren

Nicht als Gefahrgut eingestuft

14.6 Besondere Vorsichtsmaßnahmen für den Verwender**ADN**

Weitere Transportangaben : Wenn Packstücke größer als 3 m³: Gefahrgut der Unterklasse 4.2

ADR

Weitere Transportangaben : Wenn Packstücke größer als 3 m³: Gefahrgut der Unterklasse 4.2

RID

Weitere Transportangaben : Wenn Packstücke größer als 3 m³: Gefahrgut der Unterklasse 4.2

IMDG

Weitere Transportangaben : If packagings larger than 3 m³: dangerous good of division 4.2.

IATA (Fracht)

Weitere Transportangaben : If packagings larger than 3 m³: dangerous good of division 4.2.

IATA (Passagier)

Weitere Transportangaben : If packagings larger than 3 m³: dangerous good of division 4.2.

Gefahrenhinweise

: Kein gefährliches Transportgut
Frostempfindlich ab -20 °C.
Getrennt von Nahrungs- und Genußmitteln halten

14.7 Massengutbeförderung auf dem Seeweg gemäß IMO-Instrumenten

Auf Produkt im Lieferzustand nicht zutreffend.

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

ABSCHNITT 15: Rechtsvorschriften**15.1 Vorschriften zu Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz/spezifische Rechtsvorschriften für den Stoff oder das Gemisch**

- REACH - Beschränkungen der Herstellung, des Inverkehrbringens und der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse (Anhang XVII) : Nicht anwendbar
- Internationales Chemiewaffenübereinkommen (CWÜ) Listen der toxischen Chemikalien und Ausgangsstoffe : Nicht anwendbar
- REACH - Liste der für eine Zulassung in Frage kommenden besonders besorgniserregenden Stoffe (Artikel 59). : Dieses Produkt enthält keine besonders besorgniserregenden Stoffe (REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006, Artikel 57).
- REACH - Verzeichnis der zulassungspflichtigen Stoffe (Anhang XIV) : Nicht anwendbar
- Verordnung (EG) Nr. 1005/2009 über Stoffe, die zum Abbau der Ozonschicht führen : Nicht anwendbar
- Verordnung (EU) 2019/1021 über persistente organische Schadstoffe (Neufassung) : Nicht anwendbar
- Verordnung (EG) Nr. 111/2005 des Rates zur Festlegung von Vorschriften für die Überwachung des Handels mit Drogenaustauschstoffen zwischen der Gemeinschaft und Drittländern. : Nicht verboten und/oder eingeschränkt
- Verordnung (EG) Nr. 649/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Aus- und Einfuhr gefährlicher Chemikalien : Nicht anwendbar
- Brandgefahrenklasse : Nicht anwendbar
- Seveso III: Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen. : Nicht anwendbar

15.2 Stoffsicherheitsbeurteilung

Nicht anwendbar

ABSCHNITT 16: Sonstige Angaben**Volltext anderer Abkürzungen**

ATE = Schätzwert akute Toxizität; BCF = Biokonzentrationsfaktor; GHS = Global harmonisiertes System zur Einstufung und Kennzeichnung von Chemikalien; IATA = Internationale Flug-

SICHERHEITSDATENBLATT

gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006

**LEWATIT VP OC 1065**

Version	Überarbeitet am:	SDB-Nummer:	Datum der letzten Ausgabe: 11.02.2019
2.0	06.05.2021	103000009921	Land / Sprache: AT / DE

Transport-Vereinigung; IMDG = Gefährliche Güter im internationalen Seeschiffsverkehr; PBT = Persistent, bioakkumulierbar und toxisch; vPvB = Sehr persistent und sehr bioakkumulierbar

Weitere Information

Die Angaben stützen sich auf den heutigen Stand der Kenntnisse und Erfahrungen. Dieses Sicherheitsdatenblatt und sein Anhang [sofern nach Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) erforderlich] beschreiben Produkte im Hinblick auf Sicherheitserfordernisse. Die Angaben haben nicht die Bedeutung von Beschaffenheitsangaben, Eigenschaftszusicherungen oder Garantien.