

## Diplomarbeit

# Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines - Sprühwäschers zur Kohlendioxid- Abscheidung

erstellt für

**AE&E GesmbH & Co. KG**

**Vorgelegt von:**

Nikolas Trofaier

0235013

**Betreuer:**

Ao.Univ.Prof.,Dipl.-Ing.,Dr.techn. Josef Draxler

Leoben, 11.3.2010

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Für meine Familie.

## **Kurzfassung**

### **Planung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Sprühwäschers zur Kohlendioxid-Abscheidung**

Das Abscheiden von Kohlendioxid aus Rauchgasen von großen, stationären Emissionsquellen gilt momentan als eines der vielversprechendsten, mittelfristigen Verfahren in einem Instrumentenmix zum Stabilisieren von globalen Treibhausgasemissionen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Neue Absorptionsmittel und Absorptionsverfahren für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung“ soll dabei das Potential von Sprühwäschern zur CO<sub>2</sub>-Wäsche ermittelt werden. Das Ziel dieser Diplomarbeit war es, einen vorhandenen Versuchswäscher für SO<sub>2</sub> für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung umzubauen.

Im Wesentlichen mussten dazu eine Desorbereinheit bestehend aus beheiztem Sumpftank und Kolonne ausgelegt und konstruiert werden. Außerdem mussten die notwendigen Wärmeübertragungseinheiten, Pumpen und Rohrleitungen sowie Mess- und Regeltechnikeinrichtungen geplant werden. Die Versuchsanlage arbeitet mit einem maximalen Gasstrom von 160 Bm<sup>3</sup>/h und einen maximalen Flüssigkeitsstrom von 2 m<sup>3</sup>/h. Sie wurde am Technikum des Verfahrenstechnikinstituts der Montanuniversität Leoben aufgebaut.

Als Waschflüssigkeit wurde für erste Versuche eine 30 m% Monoethanolamin-Lösung verwendet, mit der aus dem künstlich hergestellten Rauchgasstrom das CO<sub>2</sub> ausgewaschen wurde. Die ersten Versuchsergebnisse lieferten Abscheidegrade von 20% bis 30% und ließen eine weitere Steigerung erwarten.

## **Abstract**

# **Design, assembly and commissioning of a test plant for carbon dioxide spray-scrubbing**

Separating carbon dioxide from flue gases of large, stationary emission sources is considered one of the most promising medium-term processes for global greenhouse gas stabilization.

One of the goals of the research project “New absorption media and absorption processes for CO<sub>2</sub>-sequestration” was to determine the potential of spray scrubbers for CO<sub>2</sub> absorption. Thus, this master’s thesis was aimed to convert an existing SO<sub>2</sub> scrubber into a CO<sub>2</sub> spray scrubbing test plant. For that, a desorption unit consisting of a reboiler tank and a desorption column had to be designed and laid out. In addition, heat transfer units, pumps, pipings, measuring devices and automatic control mechanisms had to be planned and installed.

The constructed test plant has a maximum gas flow of 160 Bm<sup>3</sup>/h and a maximum liquid flow rate of 2 m<sup>3</sup>/h. It was set up at the Institute of Process Technology and Industrial Environmental Protection at the University of Leoben.

The main washing liquid used to separate CO<sub>2</sub> from the artificial flue gas stream was a 30 wt% monoethanolamine-solution. The first test results showed a separation efficiency of 20% to 30% and suggested further increases.

---

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>4</b>
1.1 Problemstellung.....	4
1.2 Ziele.....	5
<b>2 GRUNDLAGEN .....</b>	<b>7</b>
2.1 Klimawandel und Treibhausproblematik .....	7
2.2 Absorption und Sprühwäsche.....	11
2.2.1 Physikalische Absorption.....	12
2.2.2 Chemische Absorption.....	17
2.3 Physikalisch-chemische Eigenschaften der Einsatzstoffe.....	19
2.3.1 Kohlendioxid .....	19
2.3.2 Monoethanolamin .....	21
2.4 Verfahrensbeschreibung der Kohlendioxidwäsche mit Monoethanolamin (MEA) .....	22
<b>3 AUSLEGUNG DER ANLAGE .....</b>	<b>25</b>
3.1 Ist-Stand der bestehenden Anlage.....	25
3.2 Verfahrenstechnische Auslegung.....	27
3.2.1 Berechnung der Desorptionsenergie und Dimensionierung des Heizstabs	33
3.2.2 Auslegung der Rohrleitungen .....	37
3.2.3 Behälter und Kolonne .....	41
3.2.4 Wärmetauscher .....	45
3.2.5 Mess- und Regeltechnik .....	48
3.3 Maschinenbauliche Auslegung und Festigkeitsberechnungen .....	59
3.3.1 Werkstoffwahl .....	59
3.3.2 Auslegung des Druckbehälters.....	62
3.3.3 Festigkeitsberechnungen.....	67
3.4 Aufstellungsplan .....	76
<b>4 AUFBAU DER ANLAGE.....</b>	<b>77</b>
4.1 Stahlbauarbeiten .....	77
4.2 Installation der Mess- und Regeltechnik .....	86
4.3 Anschluss des Heizflansches.....	88
4.4 Wärmedämmung.....	89

---

4.5	Aufsetzen der Lookout Programmierung.....	90
<b>5</b>	<b>INBETRIEBNAHME .....</b>	<b>93</b>
5.1	Grundlegendes zur Inbetriebnahme .....	93
5.2	Abnahmeprüfung und Reinigung.....	97
5.3	Dichtheitsprüfung.....	97
5.4	Füllen.....	99
5.5	Inbetriebnahme.....	100
5.6	Messprotokoll .....	102
<b>6</b>	<b>ABSCHIEDEVERSUCH .....</b>	<b>104</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>109</b>
	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>112</b>
7.1	Literaturverzeichnis .....	112
7.2	Abbildungsverzeichnis.....	114
7.3	Tabellenverzeichnis.....	117
7.4	Abkürzungsverzeichnis.....	118
	<b>ANHANG.....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Es gilt mittlerweile als allgemein erwiesen, dass menschliche Aktivitäten negative Auswirkungen auf das globale Klima haben. Zahlreiche Studien und Untersuchungen von verschiedensten internationalen Organisationen wurden in den letzten Jahren zu diesem Thema verfasst und bestätigen den anthropogenen Einfluss auf klimatische Veränderungen. Die Auswirkungen eines drastischen Wandels des Weltklimas können für die Menschen und den Planeten verheerend sein. Dieses Bedrohungspotential wird früher oder später zu enormen nationalen und internationalen Anstrengungen führen, um den Ausstoß von Treibhausgasen stark zu reduzieren.

Eine der viel versprechendsten Möglichkeiten um mittelfristig das globale Klima zu stabilisieren könnte die sogenannte „Carbon Capture and Storage“-Technologie sein, kurz auch als CCS bezeichnet. Dabei wird Kohlendioxid, welches mengenmäßig das bei weitem wichtigste Treibhausgas ist<sup>1</sup>, bei großen zentral Emittenten abgeschieden, aufbereitet und anschließend in geologische Schichten endgelagert. Vor allem Anlagen der Schwerindustrie sowie Kraftwerke und dabei insbesondere Kohlekraftwerke sind besonders geeignet für den Einsatz von CCS.

In der Tat ist das Abscheiden von Kohlendioxid das letzte große Verbesserungspotential für konventionelle Kohlekraftwerke. Diese Kraftwerke stellen das Rückgrad der weltweiten Stromproduktion dar und sind in westlichen Ländern dank Werkstoffverbesserung, Wirkungsgradsteigerungen von Teilsystemen und des Gesamtprozesses sowie durch Kraft-Wärmekopplung bereits am oberen Ende ihres Verbesserungspotentials angelangt. Das Standard-Kohlekraftwerk in westlichen Ländern verfügt heutzutage über SO<sub>2</sub>-Waschanlagen, Entstickungsanlagen und Anlagen zur Staubabscheidung. Die verbleibenden gasförmigen Emissionen sind Wasserdampf und CO<sub>2</sub>. Genau hier setzt CCS im Wesentlichen an. Man will und könnte das letzte große Problem der Kohlekraftwerkstechnik damit lösen.

Bei der CO<sub>2</sub>-Abscheidung lassen sich drei Hauptverfahren unterscheiden: der sogenannte Pre-Combustion-Prozess, der Post-Combustion-Prozess und das Oxyfuel-Verfahren. Das momentan am weitesten entwickelte Verfahren ist der Post-Combustion-Prozess. In diesem Prozess wird das CO<sub>2</sub> nach dem Verbrennungsprozess vom Rauchgas getrennt, aufbereitet

---

<sup>1</sup> Treibhausgase werden mittels ihres „Global Warming Potentials“ (GWP) verglichen (Siehe Anhang). Dies beschreibt das Potential eines Gases, zur Erderwärmung beizutragen. CO<sub>2</sub> ist zwar nicht das klimaschädlichste Gas, aber es ist das mit Abstand wichtigste, da es praktisch bei jedem Verbrennungsvorgang von kohlenstoffhaltigem Material freigesetzt wird und somit auch nicht vermieden werden kann. Aus diesem Grund werden alle anderen klimaschädlichen Gase auf CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet. (vgl. Anhang II)

und in eine Endlagerstätte überführt. Der große Vorteil des Verfahrens ist, dass der Prozess unter etwas anderen Betriebsbedingungen und in kleinerem Maßstab in der Erdölraffinerie sowie in der chemischen Industrie bereits seit einiger Zeit eingesetzt wird und sich dort auch gut bewährt hat. Für die großtechnische Anwendung im Kraftwerksbereich, wo viel höhere Gasvolumenströme und niedrigere Drücke auftreten, wurde bereits sehr viel Forschung betrieben und zahlreiche Pilot- und Testanlagen aufgebaut. Durch das verfahrenstechnische Nachschalten der CO<sub>2</sub>-Reinigungsstufe besteht die Möglichkeit, theoretisch jedes Kraftwerk oder jeglichen sonstigen Großemittenten nachzurüsten.

Üblicherweise wird das CO<sub>2</sub> durch Absorption in einem Lösungsmittel aus dem Rauchgas entfernt. Durch Temperaturerhöhung und Strippen mit Wasserdampf wird das Gas wieder aus dem Lösungsmittel desorbiert. Durch Kondensation kann der Wasserdampf aus dem gasförmigen Gemisch entfernt werden, wonach anschließend gasförmiges CO<sub>2</sub> vorliegt. Dies muss dann für eine etwaige Endlagerung komprimiert werden. Der überwiegende Teil der internationalen Forschungsaktivitäten beschränkt sich auf die Anwendung von sogenannten Packungskolonnen. Diese erzeugen zwar durch ihre feste, gleichmäßig aufgebaute Struktur eine sehr große Austauschoberfläche zwischen der gasförmigen und der flüssigen Phase und somit einen guten Stoffaustausch. Andererseits haben Packungskolonnen aber den großen Nachteil, nur kleine Gasgeschwindigkeiten zu ermöglichen sowie einen großen Druckabfall zu verursachen.

Um jedoch CCS auf große Rauchgasvolumenströme anwenden zu können, wie sie eben in Kraftwerken vorkommen, ist ein hoher Durchsatz von Nöten um technische und wirtschaftliche Machbarkeit zu gewährleisten. Hohe Durchsätze und geringer Druckverlust sind wiederum Charakteristika von Sprühwäschern, welche der Industrie bereits sehr gut aus der SO<sub>2</sub>-Reinigung bekannt sind. Bei Sprühwäschern wird die Waschflüssigkeit durch viele Düsen, die in mehreren Ebenen in der Kolonne angeordnet sind in den Rauchgasstrom eingespritzt. Der Transfer dieser Vorteile auf die CO<sub>2</sub>-Wäsche könnte ein großes Verbesserungspotential für die CCS-Technologie darstellen.

Aus diesem Grunde hat AE&E gemeinsam mit dem Institut für Verfahrenstechnik der Montanuniversität Leoben ein Projekt gestartet, welches die Potentiale der Sprühwäsche für die Kohlendioxidabscheidung erörtern soll. Im Rahmen dieses Projektes wurde diese Diplomarbeit definiert, welche von DI Nikolas Trofaier mit Unterstützung von DI Martin Koller verfasst wurde. Betreut wurde die Arbeit von Professor Dr. Josef Draxler vom Verfahrenstechnik Institut. Die Durchführung der Festigkeitsberechnungen wurde vom Maschinenbauinstitut unter der Leitung von Dr. Stoschka unterstützt.

## 1.2 Ziele

Ziel der Arbeit war es, den am Technikum des Institut für Verfahrenstechnik vorhandenen Sprühwäscher so um- und auszubauen, dass mit der neuen Anlage Versuche zur CO<sub>2</sub>-

Sprühwäsche im kontinuierlichen Betrieb durchgeführt werden können. Dafür wurden folgende Arbeitsschritte festgelegt:

1. Erheben des Ist-Zustandes der Anlage am Technikum und Potentialbestimmung für den Umbau
2. Verfahrenstechnische und physikalisch-chemische Auslegung der Anlage
3. Maschinenbauliche Auslegung der einzelnen Apparate und Bauteile, Anfertigen von Werkstattzeichnungen und Bestellen der Teile
4. Auslegung und Bestellen der mess- und regeltechnischen Einrichtungen
5. Aufbau der Anlage am Technikum
6. Inbetriebnahme der Anlage
7. Erste Abscheideversuche mit der Anlage

Der Vorteil des vorhandenen Sprühwäschers am Technikum ist, dass seine Dimensionen strömungstechnische Bedingungen erlauben, welche jenen in realen Sprühwäschern sehr nahe kommen. Das Hauptziel des Projektes war es, eine Versuchsanlage zu schaffen, die unter möglichst realitätsnahen Bedingungen funktionieren kann. Darum wurde auch als primäres Waschmittel Monoethanolamin (MEA) gewählt, mit welchem bereits zahlreiche Studien durchgeführt wurden und welches bis jetzt das größte Potential verspricht. Um den kontinuierlichen Betrieb zu ermöglichen, musste eine Desorptionseinheit bestehend aus einem Sumpftank zum Aufheizen, einer Desorberkolonne und einem Kondensator geplant werden.

Es entstand eine Anlage mit einem maximalen Gasvolumenstrom von  $160 \text{ Bm}^3/\text{h}$  und einem maximalen Flüssigkeitsvolumenstrom von  $2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dank des sehr flexiblen und erweiterbaren Aufbaus können viele Einflussparameter variiert werden. So kann zum Beispiel die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im künstlichen Rauchgasstrom auf bis zu 30 vol% erhöht werden. Es kann Schwefeldioxid zugegeben werden um Verunreinigungen zu simulieren, oder es können auch unterschiedliche Sprühdüsen getestet werden.

Für die Versuche soll die Konzentration der Waschflüssigkeit auf 30 m% eingestellt werden, um eine bessere Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten. Die Konzentration wird während der Versuche laufend kontrolliert werden, um MEA-Verluste auf Grund von Degradation auszugleichen. Als Versuchsparameter soll das L/G-Verhältnis, die Absorbtemperatur und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Rauchgas variiert werden. Die Auswirkungen auf den Abscheidegrad werden dokumentiert werden. Zusätzliche sollen auch die Auswirkungen auf den Energiebedarf für die Desorption bestimmt werden.

## 2 Grundlagen

Das nachfolgende Kapitel soll wesentliche Grundlagen der Klimaproblematik erläutern und dadurch die Notwendigkeit von CCS dokumentieren. Es werden die physikalischen und chemischen Eigenschaften der beiden wichtigsten Reagentien,  $\text{CO}_2$  und MEA, beschrieben. Zusätzlich wird auf die Grundlagen des thermischen Trennverfahrens der Absorption/Desorption eingegangen und dessen Anwendung auf die Kraftwerkstechnik im Detail diskutiert.

### 2.1 Klimawandel und Treibhausproblematik

Wie bereits eingangs erwähnt gilt es mittlerweile als wissenschaftlich bewiesen, dass die Erhöhung der Durchschnittstemperatur der erdnahen Atmosphäre sowie der Meere auf eine Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts durch menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist. Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) spricht von einer 99%igen Sicherheit. Verantwortlich für diesen anthropogenen Anteil des Treibhauseffekts ist das Freisetzen von klimaschädlichen Gasen aus unterschiedlichen Quellen: u.a. Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ), Distickstoffoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW), Fluor-Kohlenwasserstoffe (FKW). Die Gase besitzen alle ein unterschiedliches Treibhausgaspotential. Aufgrund seiner jährlich ausgestoßenen Menge ist aber  $\text{CO}_2$  das mit Abstand wichtigste Gas, da es bei jedem Verbrennungsvorgang von kohlenstoffhaltigen Energieträgern entsteht. [1]

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen sehr anschaulich und vereinfacht den Zusammenhang zwischen dem Anstieg der durchschnittlichen globalen Temperatur und der erhöhten Konzentration von  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre.

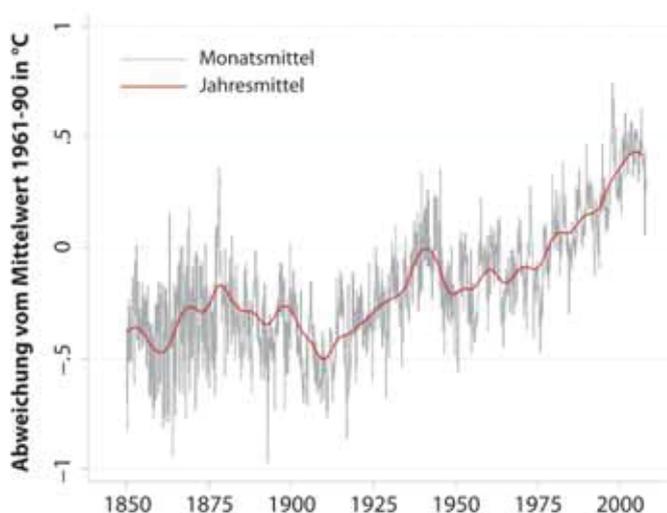


Abbildung 1: Globaler Temperaturverlauf 1850 – 2008 [1]

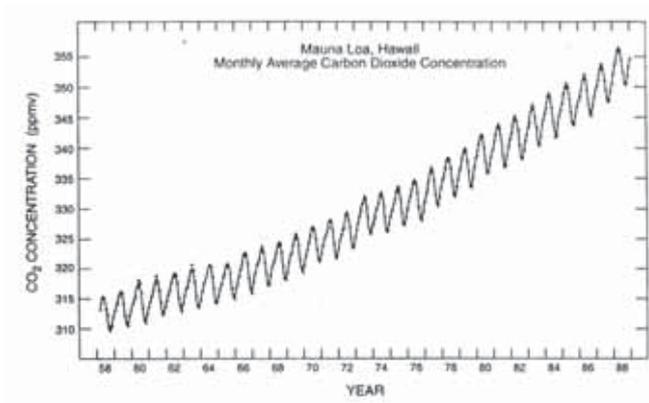


Abbildung 2: CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre<sup>2</sup> [1]

Die meisten CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen durch die Verbrennung der fossilen Primärenergieträger Kohle, Erdöl und Erdgas, die den Großteil des globalen Energiebedarfs decken.

Der größte Primärenergieeinsatz findet in stationären Anlagen zur thermischen und elektrischen Energieerzeugung statt. Zusätzlich werden auch noch für industrielle Prozesse und für den Transportsektor große Mengen an Primärenergieträgern benötigt. Weltweit gibt es über 7.500 punktförmige Emissionsquellen, die mehr als 0.1 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr emittieren. [1]



Abbildung 3: Stationäre Emissionsquellen weltweit [1]

Abbildung 3 zeigt, dass sich diese Quellen im Wesentlichen auf vier Gebiete aufteilen: der Osten von Nordamerika, Nord-West-Europa, Südostasien und Südasiens (Indien). Der Großteil dieser Anlagen sind Kraftwerke. Weitere große Emittenten sind Zementfabriken, Anlagen der Eisen- und Stahlindustrie sowie Petrochemische Anlagen. [1]

<sup>2</sup> Der gezackte Verlaufe der Kurve entsteht durch die jahreszeitlich-bedingten Unterschiede.

Die Umwandlung der Primärenergie kann entweder dezentral am Ort der Verwendung erfolgen, wo direkt die benötigte Nutzenergie erzeugt wird, wie es zum Beispiel bei der Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser aus Erdgas in einem Einfamilienhaus der Fall ist, oder aber durch einen Zwischenschritt und die Umwandlung in Sekundärenergie im Kraftwerk, welche dann in Form von Strom oder Wärme an den Endverbraucher weitergeliefert wird.

Alle Umwandlungsprozesse basieren aber in irgendeiner Weise auf der Verbrennung des Primärenergieträgers. Bei Verbrennungsprozessen von kohlenstoffhaltigen Energieträgern entstehen immer CO<sub>2</sub>-Moleküle, welche in die Atmosphäre abgegeben werden und wo sie verbleiben bis sie entweder durch Photosynthese von Pflanzen gebunden werden oder in einer chemischen Gleichgewichtsreaktion in Wasser gelöst werden.

Um dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegenzuwirken, kann man nun versuchen, die gesamte ausgestoßene Menge an CO<sub>2</sub> zu reduzieren. Dies kann entweder durch Verwendung von fossilen Energieträgern mit geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen, durch den Ersatz von fossilen Primärenergieträgern mit sogenannten erneuerbaren Energien, durch die Effizienzsteigerungen von bisherigen Technologien oder durch das Abscheiden und Endlagern von CO<sub>2</sub> erfolgen. [1] In Abbildung 4 sind die spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen von verschiedenen fossilen Energieträgern gezeigt.

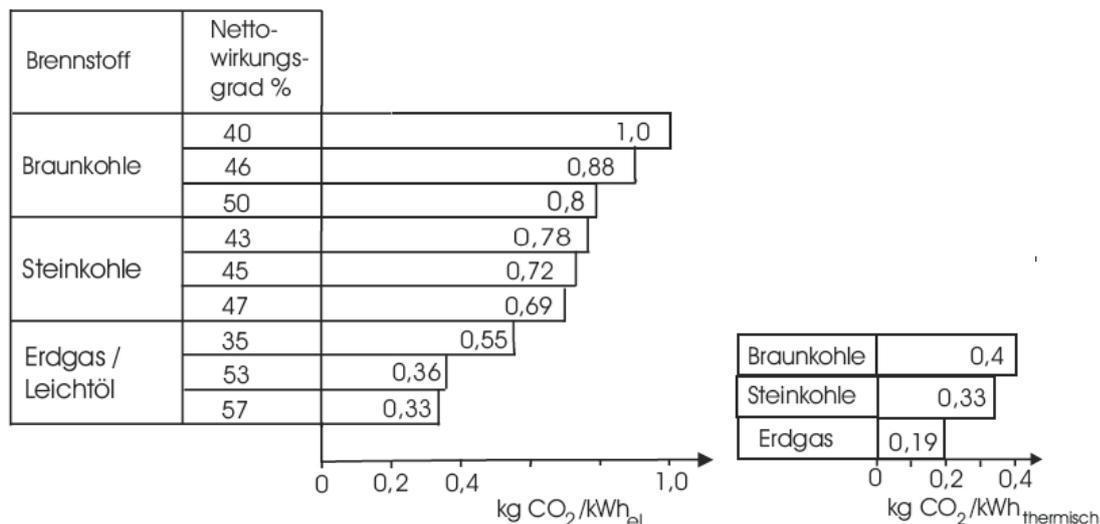


Abbildung 4: CO<sub>2</sub>-Emissionen von Primärenergieträgern [2]

Die Abbildung zeigt, dass ein Wechsel von Energieträgern sehr sinnvoll sein kann. Sie illustriert aber auch, dass sich ein Großteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf Grund der weltweiten Abhängigkeit von Kohle bei der Stromerzeugung nicht vermeiden lässt. Das Problem der Kohlekraftwerke erfordert also neue Lösungsansätze und dabei kann CO<sub>2</sub>-Sequestrierung mittelfristig eine entscheidende Rolle spielen. Die Kohlendioxid-Abscheidung ist aber ein sehr energieintensiver Prozess, der umfangreiches technisches Equipment erfordert.

Deswegen macht er auch nur für stationäre, großtechnische Anlagen, wie Kraftwerke oder große Industrieanlagen, Sinn.

Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> wird komprimiert und zu einer geeigneten Lagerstätte transportiert wo es dann für möglichst lange Zeit gespeichert wird. Abbildung 5 zeigt die drei Teilbereiche eines CCS-Systems: Abscheidung, Transport, Endlagerung

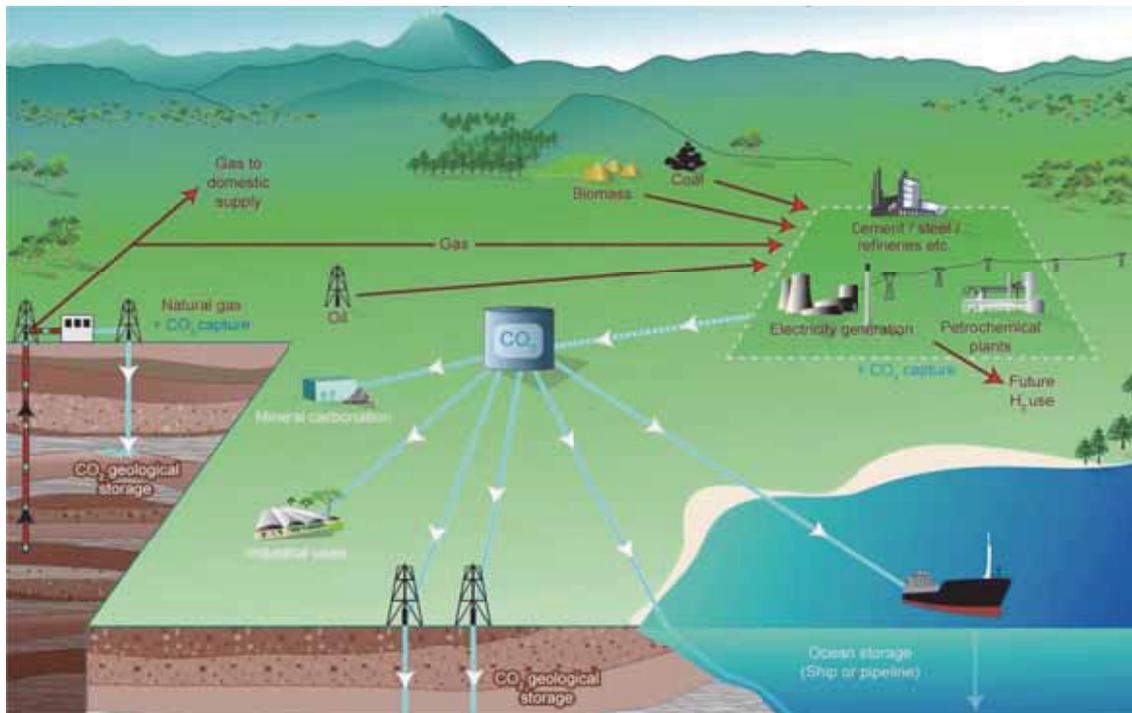


Abbildung 5: Schema eines CCS-Systems [1]

Die notwendigen technischen Verfahren für die drei Bereiche sind teilweise bereits, wenn auch mit anderem Zweck, in unterschiedlichen Industriebereichen im Einsatz und teilweise befinden sie sich noch in der Entwicklungs- bzw. Erprobungsphase. So ist die Abtrennung von CO<sub>2</sub> in manchen industriellen Prozessen wie zum Beispiel der Ammoniak- oder Methanolsynthese Standard. Der Transport von CO<sub>2</sub> stellt aus technischer Sicht kein Problem dar. In der Erdölindustrie wird das Gas schon seit einiger Zeit zur Steigerung der Produktion von Ölfeldern in den Boden injiziert. Langzeitversuche mit CO<sub>2</sub> in geologischen Speicherstätten gibt es allerdings noch nicht. Und bei der Einbringung von CO<sub>2</sub> in Ozeane befindet man sich überhaupt erst am Anfang der Versuchsphase. [1]

Theoretisch besteht das Potential mit Hilfe des CCS-Verfahrens fossil-befeuerte Kraftwerke klimafreundlicher zu betreiben. Dies kann ein wesentliches Element eines Instrumenten-Mixes sein, der notwendig ist, um die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau zu begrenzen, bei dem für den Planeten und seine Bewohner keine Gefahr mehr ausgeht.

## 2.2 Absorption und Sprühwäsche

Hier werden die physikalisch chemischen Grundlagen der Sprühwäsche erläutert. Unter Absorption versteht man ganz allgemein das Abtrennen einer Gaskomponente (Absorptiv) aus einem Gasgemisch mit Hilfe eines selektiv wirkenden Absorbens unter Bildung eines Absorbats. In den meisten praktischen Prozessen wird ein flüssiges Absorbens verwendet. Dies bezeichnet man auch als Wasch- oder Lösungsmittel.

Den umgekehrten Vorgang, also die Entfernung des aufgenommenen Absorptivs aus dem Absorbat heißt Desorption. Dabei wird die aufgenommene Gasphase durch Temperatursteigerung und/oder Partialdruckerniedrigung von der als Sorbens dienenden Flüssigkeit getrennt. Das Absorptionsmittel wird dadurch wiedergewonnen und kann erneut eingesetzt werden. [3]

Man unterscheidet im Wesentlichen drei Desorptionsmethoden [3]:

1. Austreiben im inerten Gasstrom (Strippen)
2. Austreiben durch Entspannen des Absorptionsmittels bei Absorptionstemperatur
3. Austreiben durch Erwärmen des Absorptionsmittels auf Temperaturen unterhalb der Siedetemperatur des Absorptionsmittels.

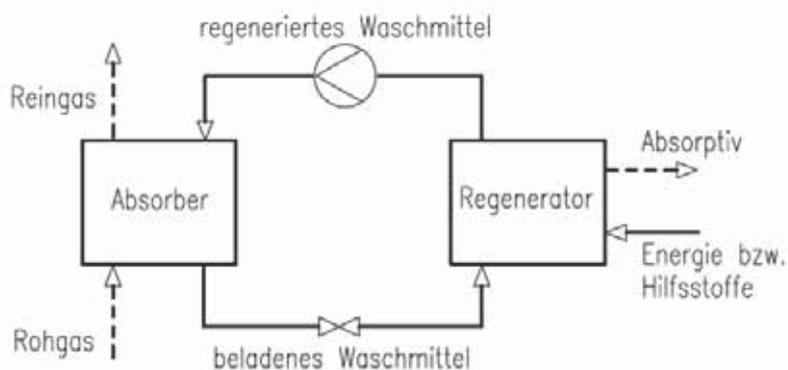


Abbildung 6: Verfahrensschema des Absorptions/Desorptions-Prozesses [4]

Die Stoffübertragung zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase kann entweder physikalischer oder chemischer Art sein. Bei der physikalischen Absorption sind vor allem physikalische Bindungskräfte wirksam, während bei der chemischen Absorption das Lösungsmittel mit dem zu absorbierenden Stoff eine chemische Bindung eingeht. [3]

## 2.2.1 Physikalische Absorption

Der Absorptionsprozess wird in grosstechnischen Anlagen zumeist in sogenannten Absorptionskolonnen durchgeführt. Zur Auslegung dieser Kolonnen ist es zuerst notwendig die theoretische Trennstufenzahl zu ermitteln. Dazu muss die Arbeitslinie ermittelt werden und die Gleichgewichtskurve bekannt sein. Gerechnet wird mit Molbeladungen anstelle von Molanteilen, da sich der Gasmengenstrom vom Sumpf zum Kopf verringert und der Flüssigkeitsmengenstrom sich vom Kopf bis zum Sumpf infolge der Aufnahme an gelöstem Gas vergrößert. Gleichbleibende Mengenströme können erreicht werden, wenn als Bezugsbasis in der gasförmigen Phase die an der Absorption nicht beteiligte Stoffkomponente und in der flüssigen Phase das reine Absorptionsmedium verwendet wird. Dies ist bei Verwendung von Beladungen der Fall. [5]

Die Molbeladung in der Flüssigphase wird als  $X_i$  bezeichnet und jene der Gasphase als  $Y_i$ . Sie sind definiert als:

$$X_i = \frac{\text{kmol zu absorbierende Komponente}}{\text{kmol Absorptionsmittel}} = \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{\text{inert}}} \quad \text{Gl 1}$$

$$Y_i = \frac{\text{kmol zu absorbierende Komponente}}{\text{kmol Trägergas}} = \frac{\text{kmol}_i}{\text{kmol}_{\text{inert}}} \quad \text{Gl 2}$$

„kmol Absorptionsmittel“ bezeichnet dabei die Menge an reinem Absorptionsmittel (z.B.: MEA) und „kmol Trägergas“ steht für die nicht absorbierte oder inerte Gasmenge (z.B.: Luft). Der Zusammenhang zwischen Molbeladung und Molanteil ( $x_i$  bzw.  $y_i$ ) ergibt sich dann durch [5]:

$$X_i = \frac{x_i}{1 - x_i} \quad [\text{kmol/kmol}] \quad \text{Gl 3}$$

bzw.

$$Y_i = \frac{y_i}{1 - y_i} \quad [\text{kmol/kmol}] \quad \text{Gl 4}$$

Die Bilanzierung einer Kolonne erfolgt mit den Molbeladungen und den durchgesetzten Molenströmen.

$$L * X_{i,e} + G * Y_{i,e} = L * X_{i,a} + G * Y_{i,a} \quad \text{Gl 5}$$

e...Eintritt

a...Austritt

L...Molenstrom Flüssigphase

G...Molenstrom Gasphase

Durch Umformen erhält man die Gleichung der Arbeitsgeraden des Absorbers:

$$Y_e = \frac{L}{G}(X_a - X_e) + Y_a \quad [\text{kmol/kmol}] \quad \text{Gl 6}$$

Zur Ermittlung der Gleichgewichtslinie muss man sich zuerst Gedanken über die Phasengleichgewichte bei der Absorption machen. Wird ein Gas durch eine Flüssigkeit abgetrennt, liegt ein System mit zwei Komponenten (Gaskomponenten und Absorbtionsmittel) und zwei Phasen (Gas und Flüssigkeit) vor. Entsprechend der Gibbs'schen Phasenregel,

$$F = K - P + 2 \quad \text{Gl 7}$$

ergeben sich also für die Absorption zwei Freiheitsgrade ( $F=2$ ). Da von den drei Grundgrößen Druck  $p$ , Temperatur  $T$  und Konzentration  $c$  üblicherweise die Temperatur als konstant betrachtet wird, ist die Löslichkeit des Gases vom Druck abhängig. Wenn das Absorptiv und das Absorbens eine ideale Lösung bilden, dann kann das Verhältnis des Partialdrucks in der Gasphase und der Konzentration in der Lösung durch das Raoult'sche Gesetz angegeben werden [3]:

$$p_i = x_i * p_d \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl 8}$$

Da man die Gasphase näherungsweise auch als ideales Gas betrachten kann, besteht zwischen dem Molanteil der Übergangskomponente und dem Partialdruck folgender Zusammenhang der durch das Gesetz von Dalton ausgedrückt wird:

$$p_i = y_i * p_{ges} \quad [\text{Pa}] \quad \text{Gl 9}$$

Aus diesen beiden Gleichungen erhält man:

$$y_i = x_i * \frac{p_d}{p_{ges}} \quad [\text{kmol/kmol}] \quad \text{GI 10}$$

Es ergibt sich also ein gerader Verlauf für die Gleichgewichtslinie. Für technische Prozesse wird das physikalische Lösungsgleichgewicht jedoch zumeist mit dem Henry Gesetz beschrieben, welches für ideal verdünnte Lösungen ein Grenzgesetz für die Absorption darstellt:

$$p_i = H_{ij} * x_i \quad [\text{Pa}] \quad \text{GI 11}$$

Der Henrykoeffizient  $H_{ij}$  hängt von der Art des Absorptivs  $i$  und des Absorbens  $j$  ab. Er steigt mit der Temperatur stark an. [4] Durch Zusammenführen des Daltonschen Gesetztes und des Henry'schen Gesetztes lässt sich der Gleichgewichtszustand der Phasen beschreiben:

$$H_{ij} * x_i = y_i * p_{ges} \quad \text{GI 12}$$

Wenn man nun die Molanteile durch die Molbeladungen ersetzt, erhält man eine Gleichgewichtslinie in Kurvenform. [3]

$$Y_i = \frac{H_{ij} * X_i}{p_{ges} + (p_{ges} - H_{ij}) * X_i} \quad [\text{kmol/kmol}] \quad \text{GI 13}$$

Im Diagramm

Abbildung 7 sind die Arbeitslinie und die Gleichgewichtslinie für einen Absorptionsprozess dargestellt.

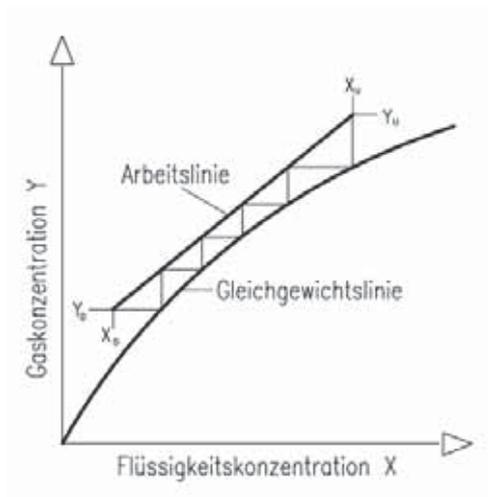


Abbildung 7: Arbeitsdiagramm für die Absorption [4]

Um nun die Anzahl der Gleichgewichtsstufen zu ermitteln wird bei der grafischen Lösung ein Treppenzug zwischen Arbeitslinie und Gleichgewichtslinie eingetragen. Der Startpunkt befindet sich bei der eintretenden Konzentration der Gasphase ( $Y_u$ ) auf der Arbeitslinie. Von dort aus wird eine vertikale Linie bis zum Schnitt mit der Gleichgewichtslinie gezogen. An diesen Punkt wiederum wird eine horizontale Linie gelegt, die sich mit der Arbeitslinie schneidet. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die gewünschte Gasaustrittskonzentration ( $Y_o$ ) erreicht ist. Die Anzahl der Schnittpunkte auf der Gleichgewichtslinie steht für die Anzahl der Gleichgewichtsstufen. Die Methodik ist für die Desorption dieselbe. Allerdings liegt hier die Arbeitslinie unter der Gleichgewichtslinie, wie man in Abbildung 8 erkennen kann.

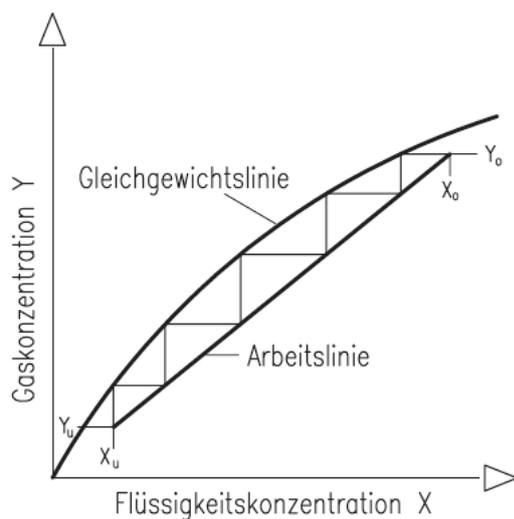


Abbildung 8: Arbeitsdiagramm für die Desorption [4]

Die wichtigsten Kenngrößen für das Auslegen einer Absorptions/Desorptions-Anlage sind neben der Anzahl der Gleichgewichtsstufen die minimale Waschmittelmenge und die minimale Strippdampfmenge. Beide Größen können über die Stoffbilanz errechnet werden.

### Minimale Waschmittelmenge

Für den Gegenstromabsorber mit einer unendlichen Anzahl an Trennstufen lautet die Stoffbilanz:

$$G * y_{i,e} = L * x_{i,a} \quad \text{Gl 14}$$

Umgeformt ergibt das:

$$L = G * \frac{y_{i,e}}{x_{i,a}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{Gl 15}$$

Die minimale Lösungsmittelmenge ergibt sich dann aus der Annahme, dass die Flüssigkeitskonzentration  $x_{i,a}$  im Idealfall den Gleichgewichtswert zur Gaskonzentration  $y_{i,u}$  erreicht. Für diesen Fall gilt in umgeformter Weise Gleichung 12:

$$\left(\frac{y_{i,e}}{x_{i,a}}\right)^* = \frac{H_{ij}}{p_{ges}} \quad \text{Gl 16}$$

Durch Einsetzen erhält man:

$$L_{\min} = G * \frac{H_{ij}}{p_{ges}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{Gl 17}$$

Wie man aus Gleichung 17 erkennen kann, ist die minimale Waschmittelmenge direkt proportional zur Gasmenge und indirekt proportional zum Gesamtdruck in der Kolonne. Da der Henry-Koeffizient mit der Temperatur steigt, sollte die Absorption bei niedrigen Temperaturen durchgeführt werden. Als Richtwert für die tatsächliche Lösungsmittelmenge einer Anlage wird die minimale Lösungsmittelmenge häufig mit dem Faktor 1,3 multipliziert.  
[4]

## Minimale Strippgasmenge

Für die Berechnung der minimalen Strippgasmenge drückt man aus Gleichung 14 den Gasmengenstrom aus und ersetzt die Gas- und Flüssigphasenkonzentrationen am Boden durch jene am Kopf.

$$G = L * \frac{y_{i,a}}{x_{i,e}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{GI 18}$$

Im Idealfall lässt sich das Phasengleichgewicht am Kopf dann wieder durch Umstellen von Gleichung 12 ausdrücken:

$$y_{i,a}^* = \frac{H_{ij}}{p_{ges}} * x_{i,e} \quad \text{GI 19}$$

Einsetzen in Gleichung 18 ergibt die minimale Strippdampfmenge:

$$G = L * \frac{p_{ges}}{H_{ij}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{GI 20}$$

Man erkennt, dass für den Desorptionsvorgang niedrige Drücke und hohe Temperaturen vorteilhaft sind. [4]

### 2.2.2 Chemische Absorption

Physikalische Absorption alleine ist in vielen Waschprozessen nicht ausreichend um die geforderten Reinheiten des Gases herzustellen. Wenn die aus dem Gasstrom auszuscheidenden Komponenten in der Flüssigkeit sehr schlecht löslich sind oder in sehr geringen Konzentrationen vorliegen, würden sich dadurch sehr große Kolonnendimensionen ergeben. [4] Durch Zugeben eines Absorptionsmittels, das mit der aus der Gasphase übergetretenen Komponente  $i$  eine chemische Verbindung eingeht, kann die Aufnahmefähigkeit des Waschmittels stark gesteigert werden. Bei dieser chemischen Absorption wird das Absorptiv (a) zuerst physikalisch ins Fluid aufgenommen und reagiert dann mit dem Waschmittel (b) in der Lösung. Zwischen der gebundenen Komponente aus der Gasphase und dem Absorptionsmittel wirken dann chemische Bindungskräfte und das Phasengleichgewicht wird zum chemischen Gleichgewicht. Dieses wird über die Gleichgewichtskonstante  $K_i^*$  beschrieben. [6] Man unterscheidet dabei irreversible und reversible Reaktionen,

Irreversibel:  $a + \nu * b \rightarrow p$

Reversibel:  $a + \nu * b \leftrightarrow p$

Wobei  $\nu$  für den stöchiometrischen Koeffizienten steht und  $p$  für das Produkt. [4]

Durch die Auswahl eines geeigneten Absorptionsmittels kann die gewünschte Gaskomponente sehr selektiv herausgelöst werden. Die chemische Reaktion verändert nämlich das Phasengleichgewicht dadurch, dass nur ein kleiner Teil der Komponente in der flüssigen Phase gelöst vorliegt. Nur dieser gelöste Teil steht mit dem Partialdruck in der Gasphase im physikalischen Gleichgewicht. Der übrige Teil des Absorptivs wurde zum Reaktionsprodukt ( $p$ ) umgesetzt. Die Gesamtkonzentration des Absorptivs setzt sich also aus dem gelösten Anteil und dem reagierten Teil zusammen, wodurch die Kapazität der Flüssigkeit stark erhöht wird [4]. Dies drückt sich im Arbeitsdiagramm dadurch aus, dass die Gleichgewichtslinie um das Verhältnis der Konzentration von  $b$  zu  $\nu$  nach rechts verschoben wird. Die minimale Lösungsmittelmenge errechnet sich demnach bei der chemischen Absorption nach folgender Gleichung [4]:

$$L_{\min} = G * \frac{y_{i,e}}{x_{i,a,a} + \frac{x_{i,a,b}}{\nu}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{Gl 21}$$

Da die Absorption ein exothermer Prozess ist, wird Wärme frei. Diese Reaktionswärme muss abgeführt werden.

Für die Desorption muss dann zusätzlich zu der Energie, die zum Aufheizen des Absorptionsmittels und zum Verdampfen eines Teils des Wassers notwendig ist, auch noch die Reaktionswärme zum Aufbrechen der chemischen Bindung zugeführt werden.

## 2.3 Physikalisch-chemische Eigenschaften der Einsatzstoffe

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten chemischen und physikalischen Eigenschaften der beiden Schlüsselchemikalien CO<sub>2</sub> und MEA beschrieben. Diese sind sowohl für die verfahrenstechnische Auslegung des chemischen Prozesses als auch für die mechanische Dimensionierung der Apparaturen essentiell.

### 2.3.1 Kohlendioxid

Das CO<sub>2</sub>-Molekül besitzt eine molekulare Masse von 44,0098 kg/kmol [7] und ist wegen seiner linearen Molekülstruktur kein Dipol, da sich die Dipolmomente der polaren Kohlenstoff-Sauerstoff-Verbindungen nach außen hin aufheben.

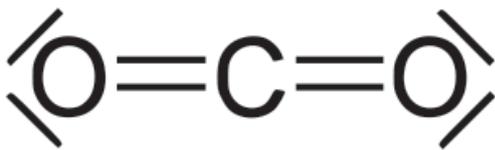


Abbildung 9: Strukturformel CO<sub>2</sub>

Auf Grund dieser inneren Dipole ist CO<sub>2</sub> dennoch gut in Wasser löslich. Die Löslichkeit ist sogar höher als jene von Sauerstoff. Bei Raumtemperatur beträgt zum Beispiel die Konzentration von CO<sub>2</sub> im Sättigungszustand 1700 mg je Liter Wasser, jene von O<sub>2</sub> aber nur 9 mg/l. 99% des in Wasser gelösten Kohlendioxids wird nur physikalisch gebunden. 1% bildet mit Wassermolekülen Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) und deren Dissoziationsprodukte Hydrogencarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Carbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Das Gleichgewicht zwischen den einzelnen Spezies hängt vom pH-Wert in der Lösung ab. Mit steigender Temperatur nimmt auch die Löslichkeit des Gases in Wasser ab. [8]

Wie man aus dem Phasendiagramm in Abbildung 10 erkennen kann ist CO<sub>2</sub> bei Raumtemperatur und atmosphärischen Bedingungen gasförmig. Bei 31°C liegt die kritische Temperatur. Durch Drucksteigerung kann es verflüssigt werden. Bei der kritischen Temperatur sind dafür 73,7 bar notwendig, bei Raumtemperatur ungefähr 60 bar. Im festen Aggregatzustand wird es als Trockeneis bezeichnet. Es schmilzt aber nicht, sondern sublimiert bei -78°C. Bei - 56.5°C und 5.18 bar hat es seinen Tripelpunkt. [8]

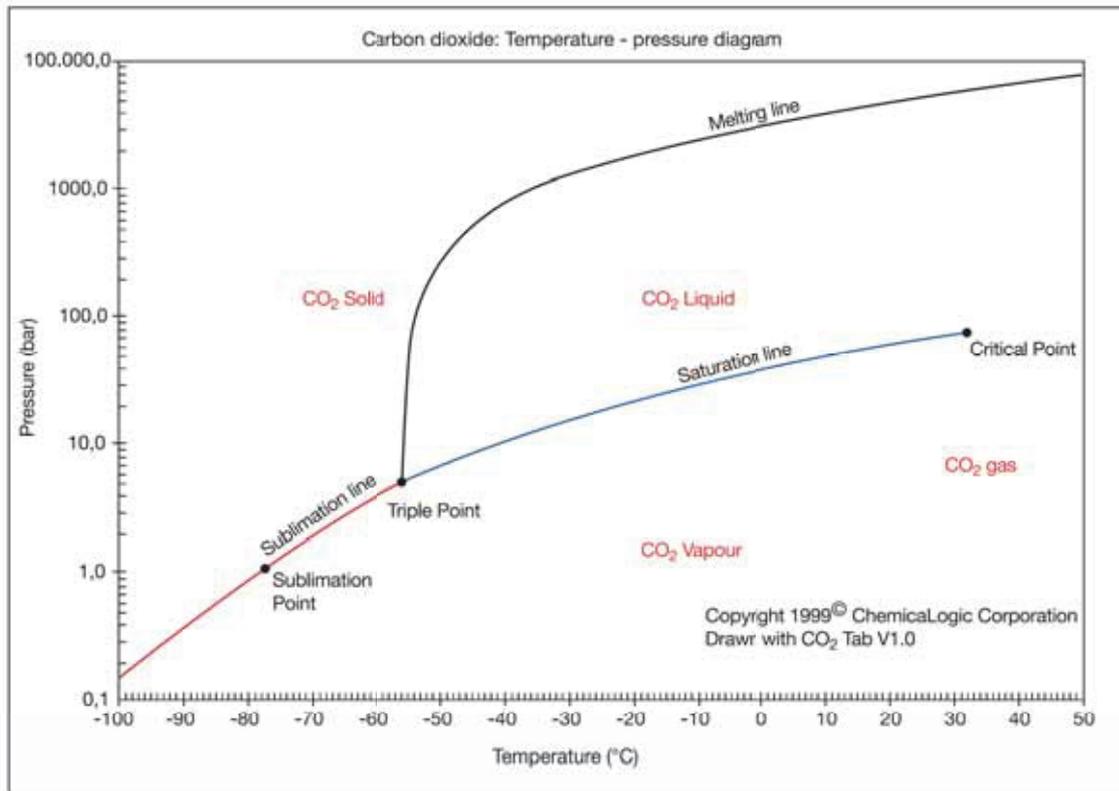


Abbildung 10: Phasendiagramm von CO<sub>2</sub> [1]

CO<sub>2</sub> besitzt eine freie Gibbs'sche Bildungsenergie von  $\Delta_B G^\circ = -394,4$  kJ/mol und ist dadurch thermodynamisch sehr stabil und wenig reaktionsfähig. Es sind daher alle weiteren chemischen Umsetzungen thermodynamisch nicht begünstigt und um entsprechende Umsatzraten zu erzielen, müssen die Prozesse aktiviert und katalysiert werden bzw. Sekundärreaktionen zur Beeinflussung der Gleichgewichtslagen und zur Stabilisierung eingesetzt werden. [9]

Der Großteil der Reaktionen mit CO<sub>2</sub> verlaufen zwar exotherm mit negativer Reaktionsenthalpie, haben aber eine positive freie Gibbs'sche Reaktionsenergie und finden daher nur durch hohe Drücke und in bestimmten Temperaturbereichen statt. [9]

### 2.3.2 Monoethanolamin

MEA ist bei Umgebungsbedingungen eine farblose, hygroskopische, ölige Flüssigkeit mit ammoniakähnlichem Geruch. Seine Summenformel ist  $C_2H_7NO$ .

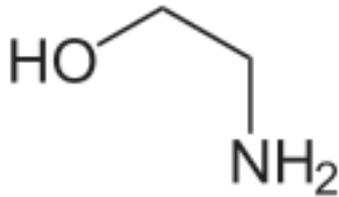


Abbildung 11: Strukturformel MEA

Es wird aus Ethylenoxid und Ammoniak hergestellt. Neben seinem Einsatz als Absorptionsmittel für  $CO_2$  und Schwefelwasserstoff wird es auch noch in der Farbstoffindustrie, als Reinigungsmittel, als Lösungsmittel sowie als Schmierstoff eingesetzt. Die Molmasse beträgt 61,08 g/mol. Es schmilzt bei  $10^\circ C$  und siedet bei  $172^\circ C$ . Seine Dichte beträgt bei  $20^\circ C$   $1,03 \text{ kg/m}^3$ . [10] Der Flammpunkt liegt bei  $95^\circ C$  und die Zündtemperatur bei  $420^\circ C$ . MEA ist vollständig mit Wasser mischbar und bei einer Lösung mit der Konzentration von 20 g/l besitzt es bei  $20^\circ C$  einen pH-Wert von 12. Der Dampfdruck beträgt 0,3 hPa bei  $20^\circ C$ . Der Reinstoff ist ätzend und darf nicht in die Kanalisation gelangen. [11]

Die großen Vorteile von Monoethanolamin beim Einsatz in der Aminwäsche sind die schnelle Reaktionsgeschwindigkeit, die leichte Rückgewinnung, die niedrigen Lösungsmittelkosten und die schlechte Löslichkeit von Kohlenwasserstoffen in der Lösung. Durch seine relativ niedrige molare Masse wird die Gesamtmenge an Lösung reduziert, die durch die Anlage zirkulieren muss. Der große Nachteil von MEA ist die hohe Reaktionsenthalpie mit  $CO_2$ . Da der Dampfdruck höher ist als bei anderen Alkanolaminen treten auch höhere Verdampfungsverluste auf. [12]

Da es immer wieder zu Korrosionsproblemen mit MEA-Lösungen gekommen ist, die einen höheren Massenprozentsatz als 15% aufwiesen, wurden dazu mehrere Studien durchgeführt [12]. Diese haben gezeigt, dass die größten Korrosionsraten an Stellen auftraten, an denen hohe Temperaturen und hohe Strömungsgeschwindigkeiten herrschten. Dabei traten bei einfachen unlegierten Stählen Korrosionsraten von 1 mm pro Jahr auf. Edelmetalle hingegen zeigten eine sehr gute Beständigkeit mit Korrosionsraten von unter  $5 \mu\text{m}$  pro Jahr. [13]

## 2.4 Verfahrensbeschreibung der Kohlendioxidwäsche mit Monoethanolamin (MEA)

Wie bereits erwähnt ist das Verfahren der Kohlendioxidwäsche mit Aminen bereits aus anderen Industriesektoren seit längerer Zeit bekannt. Es handelt sich dabei um einen chemisorptiven Prozess, bei dem wässrige primäre (Monoethanolamin, MEA) oder sekundäre (Diethanolamin, DEA) Amine mit dem CO<sub>2</sub> eine chemische Bindung eingehen [14]. Vor allem MEA besitzt eine hohe spezifische Selektivität für CO<sub>2</sub>. Allerdings benötigt der Desorptionsvorgang einen hohen Energieeinsatz. In Tabelle 1 sind die partiellen molaren Lösungsenthalpien bei unendlicher Verdünnung von CO<sub>2</sub> für verschiedene Massenprozent an MEA bei 298,15 K aufgelistet:

Tabelle 1: Lösungsenthalpien von CO<sub>2</sub> in MEA [15]

Massenbruch MEA w	$\Delta_{\text{sol}}H^\circ$ [kJ/mol]
0,1	-81,0
0,2	-82,6
0,3	-82,0

Der Prozess für den Kraftwerkseinsatz setzt sich folgendermaßen zusammen: Das Rauchgas aus dem Verbrennungsprozess tritt am Ende der Rauchgasreinigungskette am Boden in die Absorberkolonne für die CO<sub>2</sub>-Wäsche ein. Somit wurden bereits eine Entstaubung, eine SO<sub>2</sub>-Wäsche und eine Entstickung durchgeführt. Im Absorber wird das Rauchgas im Gegenstrom zur von oben einströmenden MEA-Lösung geführt. Über Füllkörper, Packungen oder Sprühdüsen wird dabei eine möglichst große Austauschoberfläche für den Stoffübergang geschaffen. Die Dimensionierung, die Wahl und die Anordnung der Verteilungsapparate in der Kolonne wird so gewählt, dass möglichst viel des CO<sub>2</sub>'s von der gasförmigen in die flüssige Phase übergeht und mit dem MEA reagiert. Der idealerweise CO<sub>2</sub>-freie Rauchgasstrom tritt am Kopf der Kolonne aus und wird über den Schornstein in die Umgebung abgegeben. [2]

Der Absorptionsvorgang sollte bei einer Temperatur zwischen 40°C und 60°C stattfinden. Durch die Absorptionswärme, die bei der Reaktion von CO<sub>2</sub> und MEA frei wird, erwärmt sich der Flüssigkeitsstrom abhängig von der Rauchgastemperatur um ca. 20°C und tritt somit mit 60°C bis 80°C am Boden aus der Kolonne aus. Von dort wird die beladene MEA-Lösung durch einen Wärmetauscher zum Kopf der Desorptionskolonne gepumpt. Im Wärmetauscher erfolgt der Energieaustausch mit der aufgeheizten und regenerierten MEA-Lösung aus dem Desorberboden. Dabei wird die beladene Lösung auf 100°C bis 120°C aufgeizt. In der Desorberkolonne rinnt die Lösung über Füllkörper oder eine Packung nach unten. Im Gegenstrom dazu wird Dampf von unten nach oben geleitet. Der Dampf wird über einen externen Wärmetauscher erzeugt, der durch Anzapfdampf aus dem Kraftwerksprozess



Es treten folgende Teilreaktionen auf [16]:

Ionisierung von Wasser:



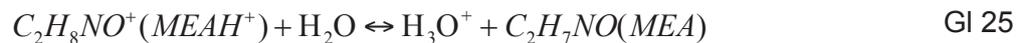
Hydrolyse und Ionisierung von gelöstem  $\text{CO}_2$ :



Dissoziation von Bicarbonat:



Dissoziation von protonierter MEA ( $\text{MEAH}^+$ ):



Carbamat-Reversion ( $\text{MEACOO}^-$ ) zu Bicarbonat:



Die vereinfachte Gesamtreaktion lautet:



### 3 Auslegung der Anlage

Im folgenden Kapitel sollen die Schritte zur Auslegung der Versuchsanlage beschrieben werden. Dafür wird zuerst auf den Zustand der bestehenden Anlage zur SO<sub>2</sub>-Wäsche eingegangen. Danach werden die physikalisch-chemischen Berechnungen des Absorptionsprozesses durchgeführt und die sich daraus ergebenden Bauteile beschrieben. Anschließend werden die notwendigen Festigkeitsberechnungen dokumentiert und für die berechneten Behälter Zeichnungen angefertigt. Als letzter Punkt wird ein Aufstellungsplan der Gesamtanlage in 2D und 3D gezeigt.

#### 3.1 Ist-Stand der bestehenden Anlage

Bei der am Technikum vorhandenen Anlage handelt es sich um einen SO<sub>2</sub>-Wäscher, der mit dem Gegenstromprinzip arbeitet. Abbildung 13 zeigt ein Fließschema der Anlage. Sie besteht aus den Hauptkomponenten Gasmischstrecke, Absorberkolonne aus Plexiglas, Absorbersumpftank, Gebläse, Suspensionspumpe, Lösungsmittelpumpe, Gasanalytik.

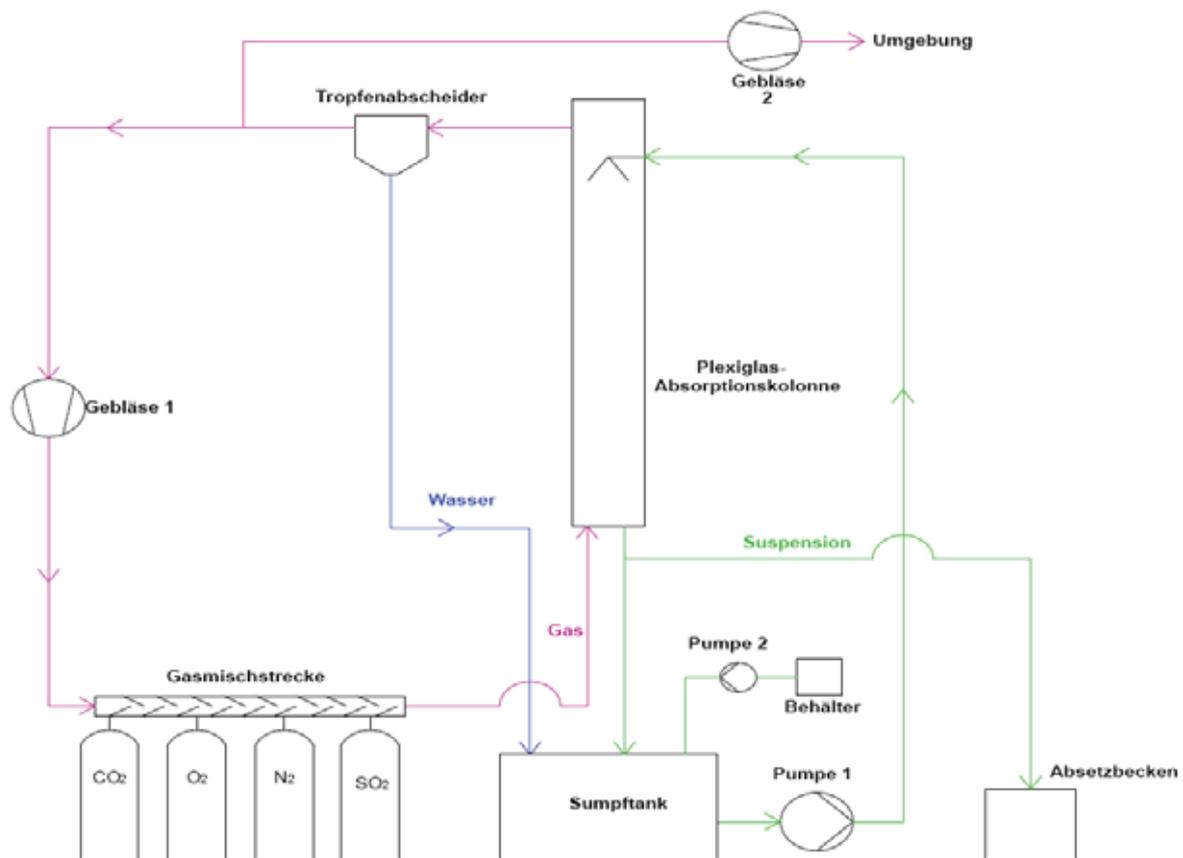


Abbildung 13: Fließschema des SO<sub>2</sub>-Wäschers

Über die Gasmischstrecke kann ein synthetisches Rauchgas eingestellt werden, welches mit einer beliebigen Konzentration aus folgenden Gasen beladen werden kann: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>. Mittels eines Gebläses wird der gewünschte Gasvolumenstrom eingestellt, wobei Volumenströme bis zu 160 Bm<sup>3</sup>/h möglich sind.

Die Zusammensetzung des Rohgases wird kurz vor dem Eintritt in die Absorberkolonne bestimmt. Dazu wird eine kleine Menge Gas aus dem Rauchgasstrom abgesaugt und deren Zusammensetzung mittels IR- bzw UV-Messung in der Gasanalytikstation ermittelt. Auf gleichem Wege wird die Zusammensetzung des Gasstroms ermittelt, der aus dem Absorber am Kopf austritt. Die Entnahmestelle dazu befindet sich nach dem Tropfenabscheider. Aus der Differenz der beiden Messungen lässt sich die abgeschiedene Menge bestimmen. Die Schläuche zur Entnahme sind beheizt, damit kein Wasser auskondensieren kann.

Das am Kopf des Absorbers austretende Gas wird rezirkuliert und die fehlende Gasmenge in der Gasmischstrecke so ergänzt, dass konstante Betriebsbedingungen erreicht werden. Im Absorber kommt das Gas mit dem Absorptionsmittel in Kontakt und reißt dabei auch eine gewisse Menge an Flüssigkeit mit. Diese wird im Tropfenabscheider wieder entfernt und in den Sumpftank rückgeführt.

Das Absorptionsmittel wird bei Anlagenstillstand im Absorbersumpftank gespeichert. Von dort wird es mit Hilfe einer Suspensionspumpe zum Kopf der Kolonne gepumpt und mit einer Düse in den Absorber gesprüht. Die Pumpe trägt die Bezeichnung „Grundfos-Pumpe“ – der Herstellername – und besitzt eine maximale Fördermenge von 3 m<sup>3</sup>/h. Das Absorptionsmittel sammelt sich am Boden der Kolonne und rinnt über eine Kunststoffleitung wieder zurück in den Sumpfbehälter. Im Sumpfbehälter hält ein Rührer die Suspension in Bewegung und sorgt so für eine gute Durchmischung und verhindert auch, dass sich Feststoffe absetzen können. Über einen kleinen elektrischen Heizstab kann der Sumpfbehälter beheizt werden. Er verfügt auch über eine Messstelle zur pH-Wert Bestimmung und kann mittels eines Deckels relativ dicht verschlossen werden.

Diese Anlage musste nun so erweitert und umgebaut werden, dass mit dem oben beschriebenen Aminwäscheverfahren eine kontinuierliche Versuchsanlage betrieben werden kann.

### 3.2 Verfahrenstechnische Auslegung

Für die verfahrenstechnische Auslegung musste die bisherige Anlage um einige wesentlichen Komponenten erweitert werden. Die zu ergänzenden Grundeinheiten waren die Desorberkolonne mit angeschlossenem Sumpftank, in welchem ein Heizregister installiert werden musste. Weiters war ein zentraler Wärmetauscher notwendig, um die beim Desorbieren an die aufgeheizte MEA-Lösung übertragene Energie wieder zurückzugewinnen. Zusätzlich musste auch noch ein Rückkühler vorgesehen werden, um die regenerierte MEA-Lösung kurz vor dem Eintritt in den Absorber auf ein niedrigeres Temperaturniveau kühlen zu können.

Um Betriebsmittel zu sparen soll der Großteil des abgeschiedenen  $\text{CO}_2$ 's wieder in die Gasmischstrecke rückgeführt werden. Dazu wird das aus dem Kopf des Desorbers austretende  $\text{CO}_2$ -Wasserdampf-Gemisch in einem Wärmetauscher abgekühlt, sodass das Wasser kondensiert. Die beiden Phasen werden in einem kleinen Behälter (Flash) getrennt. Das Kondensat wird in den Desorbersumpf zurückgeleitet, und das  $\text{CO}_2$  wird in die Gasmischstrecke rückgeführt. Von dieser Rückführung wird ein Teilstrom an die Umgebung abgezweigt, wodurch die Regelung der Gaszudosierung vereinfacht wird. Basierend auf dem grundlegenden Fließbild für Absorption und Desorption in Abbildung 6 ergibt sich mit den Überlegungen für die Versuchsanlage das in Abbildung 14 dargestellte erweiterte Blockfließbild.

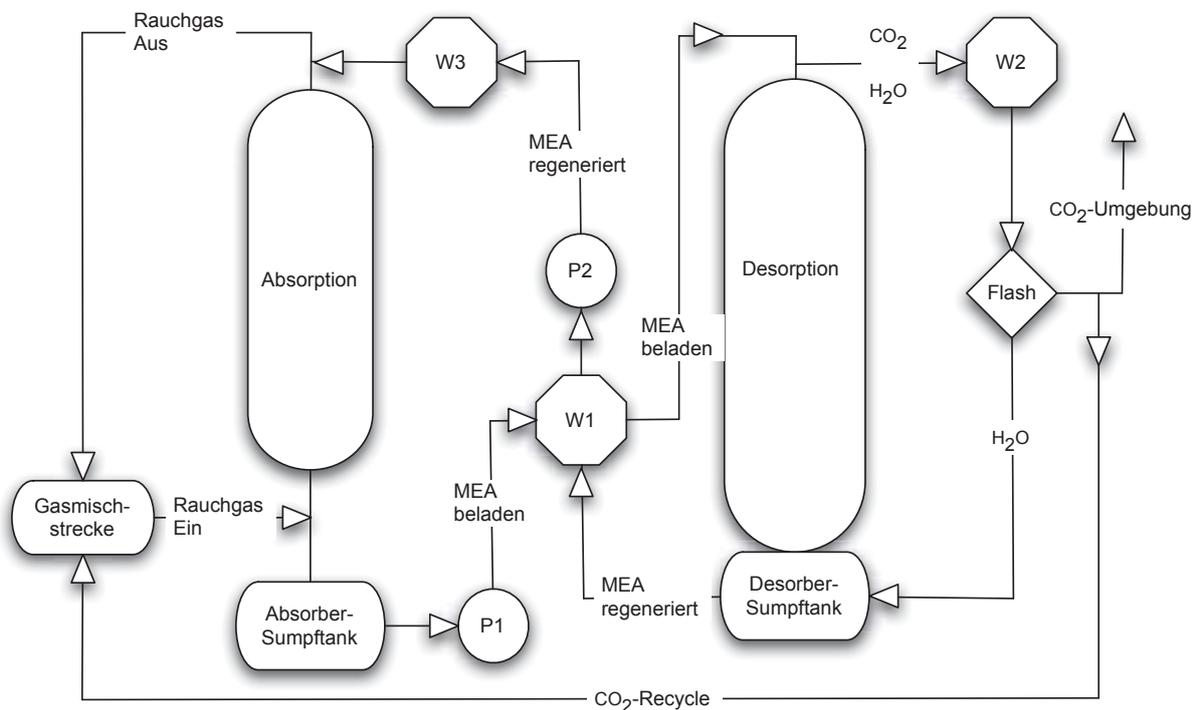


Abbildung 14: Blockfließbild der Versuchsanlage

Zwei wesentliche Designkriterien der Anlage waren zum einen ein möglichst modularer Aufbau, um etwaige Erweiterungen und Umbauten zu erleichtern, und zum anderen eine möglichst zentrale und automatische Messwertaufnahme und Regelung. Um den zweiten

Punkt sicher zu stellen, wurde beschlossen, die mess- und regeltechnischen Einrichtungen über die Lookout-Software von National Instruments zu steuern. Lookout ist eine HMI/SCADA-Software<sup>3</sup> zur Produktions- und Prozesssteuerung. Mit ihr können einfache Messwerte von Sensoren über Datenerfassungsmodul aufgenommen werden und Steuerbefehle über Steuerungsmodul an Regeleinrichtungen weitergegeben werden.

Für den Erweiterungsteil der Anlage müssen als Messgrößen Druck, Temperatur, Füllstand und Durchfluss aufgenommen werden. Eine Durchflussmessung ist allerdings noch vom bestehenden Wäscher vorhanden. Da die beiden Pumpen zwar über Frequenzumformer verfügen, diese aber über fest verbaute Potentiometer im Schaltschrank bedient werden, ist ein Einbinden der Pumpen in die Lookout-Regelung nicht möglich. Somit können die Ventile, die Beheizung des Sumpftanks, die Gasmischung und die Alarmschalter in der Lookout-Programmierung geregelt werden.

Für die Versuchsanlage wird nun das in Abbildung 15 dargestellte Verfahrensfließbild entwickelt. Die grafische Darstellung wird basierend auf der DIN EN ISO 10628 vorgenommen [17].

Tabelle 2: Bezeichnung der Bauteile

<b>Bauteil</b>	<b>Kurzbezeichnung</b>
Absorberkolonne	K1
Desorberkolonne	K2
Absorbersumpftank	B1.1
Tropfenabscheider	B1.2
Desorbersumpftank	B2.1
Flash	B2.2
Pumpe Schmitt	P1
Pumpe Grundfos	P2
Gebälse	G1
Wärmetauscher	W1
Kondensator	W2
Rückkühler	W3
Gasmischstrecke	R1

<sup>3</sup> HMI = Human Machine Interface; SCADA = Supervisory Control and Data Acquisition

Im Fließbild sind alle Bauteile eingetragen und mit Bezeichnungen versehen. Kolonnen tragen die Bezeichnung „K“, Behälter jeglicher Art „B“, Wärmeübertragungseinrichtungen „W“, Gebläse und Verdichter „G“<sup>4</sup>, Pumpen „P“ und Mischvorrichtungen werden mit „R“ bezeichnet. Außerdem sind auch alle Ströme mit der Bezeichnung „S“ und einer durchlaufenden Nummerierung versehen worden. Die wichtigsten Ströme erhalten eine Kurzbeschreibung und für alle Ströme werden die chemischen Spezies angegeben. In Tabelle 3 sind alle Bauteile mit ihrer Bezeichnung nochmals zusammengefasst, und Tabelle 3 bietet eine Übersicht über die Ströme.

Tabelle 3: Bezeichnung der Ströme

Kurzbezeichnung	Beschreibung
S0	Verbindung von K1 zu B1.1
S1	Verbindung von R1 zu K1
S2	Verbindung von B1.1 zu P1
S3	Verbindung von P1 zu W1
S4	Verbindung von W1 zu K2
S5	Verbindung von K2 zu W2
S6	Verbindung von W2 zu B2.2
S7	Verbindung von B2.2 bis zur Abzweigung der Rückleitung S9
S8	Verbindung von der Abzweigung zur Umgebungsluft
S9	Verbindung von der Abzweigung zur Gasrückleitung aus dem Absorber
S10	Verbindung von B2.2 zu B2.1
S11	Verbindung von B2.1 zu W1
S12	Verbindung von W1 zu P2
S13	Verbindung von P2 zu W3
S14	Verbindung von W3 zu K1
S15	Verbindung von K1 bis B1.2
S16	Verbindung von B1.2 bis zur Vereinigung mit S9
S17	Verbindung von der Vereinigung bis V1
S18	Verbindung von V1 bis R1
S19	Verbindung von B1.2 zu B1.1

<sup>4</sup> Eigentlich ist die Normbezeichnung „V“. Um hier aber Verwechslungen mit Ventilen zu vermeiden, wird „G“ verwendet.

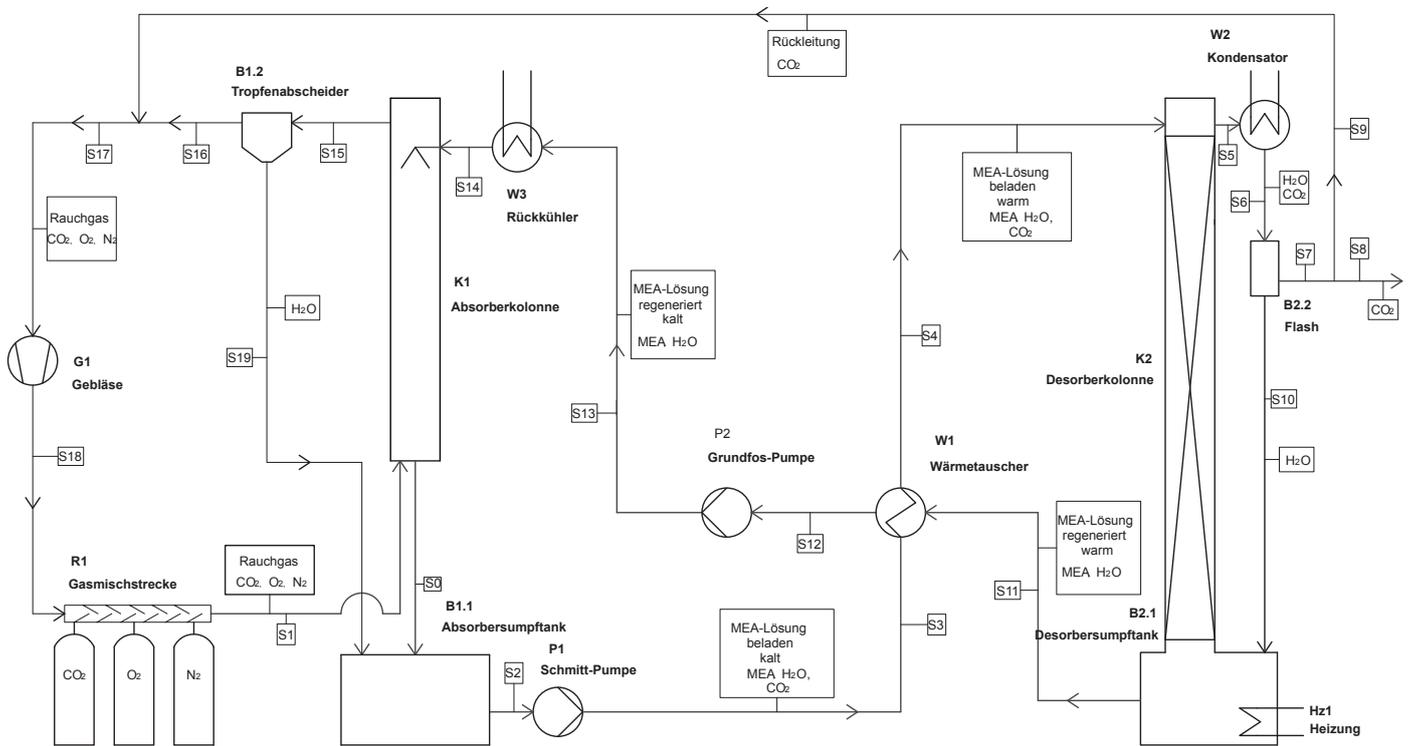


Abbildung 15: Verfahrensfließbild der Versuchsanlage

Um nun die einzelnen Bauteile der Versuchsanlage auszulegen, müssen im Wesentlichen zwei Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Zum einen ist dies die Größe und die Betriebsdaten des bestehenden Wäschers und zum anderen müssen infrastrukturelle Gegebenheiten am Technikum beachtet werden. Dabei spielen die vorhandene Aufstellungsfläche, die beschränkte Hallenhöhe und vor allem die maximal mögliche elektrische Anschlussleistung eine entscheidende Rolle. Die Gesamthöhe der Konstruktion darf 4,2 m nicht überschreiten, um die Verwendung des Brückenkrans nicht zu gefährden.

Vom bestehenden Sprühwäscher werden die in Tabelle 4 angeführten Betriebsdaten für die Auslegung herangezogen:

Tabelle 4: Betriebsdaten des Sprühwäschers<sup>5</sup>

Maximaler Flüssigkeitsvolumenstrom $V_{\text{sus}}$	2 m <sup>3</sup> /h
Maximaler Gasvolumenstrom $V_{\text{gas}}$	160 Bm <sup>3</sup> /h

Da Rauchgase aus konventionellen Kohlekraftwerken im Durchschnitt 12-14 Vol% CO<sub>2</sub> enthalten, wird als Ausgangskonzentration für die Berechnung 14 Vol% CO<sub>2</sub> für die Gasmischstrecke festgesetzt [2]. Aus dem Vergleich anderer Forschungsprojekte zeigte sich, dass üblicherweise mit 30m% MEA-Lösungen<sup>6</sup> ( $x_{\text{MEA}}$ ) gearbeitet wird [18]. Nach dem Einstellen von stationären Bedingungen im Kreislauf besitzt die regenerierte MEA-Lösung meist eine CO<sub>2</sub>-Beladung von 0,2 - 0,3 mol CO<sub>2</sub>/mol MEA. Im Absorptionsvorgang wird die Lösung dann bis auf 0,4 – 0,5 mol CO<sub>2</sub>/mol MEA beladen. Das bedeutet, dass jedes Mol MEA in der Lösung durchschnittlich 0,2 bis 0,3 Mol CO<sub>2</sub> absorbiert.

Um nun die Massenströme in der Anlage und die daraus resultierenden Anlagendimensionen berechnen zu können, werden noch folgende zusätzliche Annahmen getroffen:

<sup>5</sup> Bei diesen Volumenströmen ergeben sich für die Absorberkolonne eine Leerrohrgeschwindigkeit von 2,5 m/s sowie ein L/G-Verhältnis von 12,5. Diese Werte entsprechen denen von Großanlagen.

<sup>6</sup> Andere Forschungsprojekte verwendeten auch 15 bzw. 20m% MEA-Lösungen .

Tabelle 5: Annahmen zur Anlagenauslegung

CO <sub>2</sub> -Abscheidung im Absorber $\alpha_{CO_2}$	90%
Eintrittstemperatur in den Absorber $T_{abs}$	40°C
Eintrittstemperatur in den Desorber $T_{des,e}$	110°C
Druck im Desorber $p_{des}$	2 bar
Temperatur im Desorber $T_{des}$	120°C
Aufnahmekapazität 30m% MEA-Lösung	0,22 mol/mol
Menge an verdampftem Wasser im Desorber zum Strippen $x_{strip}$	3m% <sup>7</sup>

Ausgehend vom Abgasvolumenstrom lässt sich der theoretische Suspensionsmassenstrom berechnen. Dazu berechnet man zuerst den Volumenstrom an abgeschiedenem CO<sub>2</sub>:

$$\dot{V}_{CO_2} = \dot{V}_{Gas} * y_{CO_2} * \alpha_{CO_2} \quad [m^3/h] \quad \text{Gl 28}$$

Der Massenstrom an abgeschiedenem CO<sub>2</sub> errechnet sich dann aus

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{V}_{CO_2} * \rho_{CO_2,tabs} \quad [kg/h] \quad \text{Gl 29}$$

$\rho_{CO_2,tabs}$  ist in dieser Formel die Dichte von CO<sub>2</sub> bei der Absorbereintrittstemperatur<sup>8</sup>. Mit der Molmasse von CO<sub>2</sub> ergibt sich der Molenstrom von CO<sub>2</sub>.

<sup>7</sup> Wird gemäß Kapitel 2 „Minimale Strippgasmenge“ abgeschätzt.

<sup>8</sup> Die Werte werden aus einer Stoffwertetabelle entnommen.

$$\dot{n}_{CO_2} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{MM_{CO_2}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{GI 30}$$

Aus diesem wiederum berechnet sich der erforderliche Molenstrom an MEA in der Lösung durch Division mit der Beladungsdifferenz:

$$\dot{n}_{MEA} = \frac{\dot{n}_{CO_2}}{\Delta x_{CO_2}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{GI 31}$$

Daraus wiederum ergibt sich der MEA-Massenstrom durch Multiplikation mit der Molmasse:

$$\dot{m}_{MEA} = \dot{n}_{MEA} * MM_{MEA} \quad [\text{kg/h}] \quad \text{GI 32}$$

Der Massenstrom Wasser berechnet sich aus den Massenanteilen an der Lösung:

$$\dot{m}_{H_2O} = \dot{m}_{MEA} * \frac{x_{H_2O}}{x_{MEA}} \quad [\text{kg/h}] \quad \text{GI 33}$$

Die Summe der beiden Massenströme ergibt den gesamten, theoretischen Lösungsmassenstrom:

$$\dot{m}_{ges} = \dot{m}_{MEA} + \dot{m}_{H_2O} \quad [\text{kg/h}] \quad \text{GI 34}$$

### 3.2.1 Berechnung der Desorptionsenergie und Dimensionierung des Heizstabs

Der theoretische Energieaufwand zur Desorption des in der Lösung absorbierten  $CO_2$ 's errechnet sich aus der Summe der Reaktionsenthalpie, der Erwärmung der Suspension von Absorbentemperatur auf Desorbentemperatur und der Verdampfungsenthalpie für die angenommene Strippdampfmenge.

Die Reaktionsenthalpie der Lösungsreaktion lautet:

$$\dot{Q}_l = \dot{n}_{CO_2} * \Delta_{sol} H^\circ \quad [\text{kJ/h}] \quad \text{GI 35}$$

Mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 16 kann der  $c_p$ -Wert der Suspension bestimmt werden und somit die notwendige Energie zum Erhitzen auf Desorbtemperatur errechnet werden:

$$\dot{Q}_{\Delta T} = \dot{m}_{MEA} * c_{p_{sus}} * \Delta T \quad [\text{kJ/h}] \quad \text{Gl 36}$$

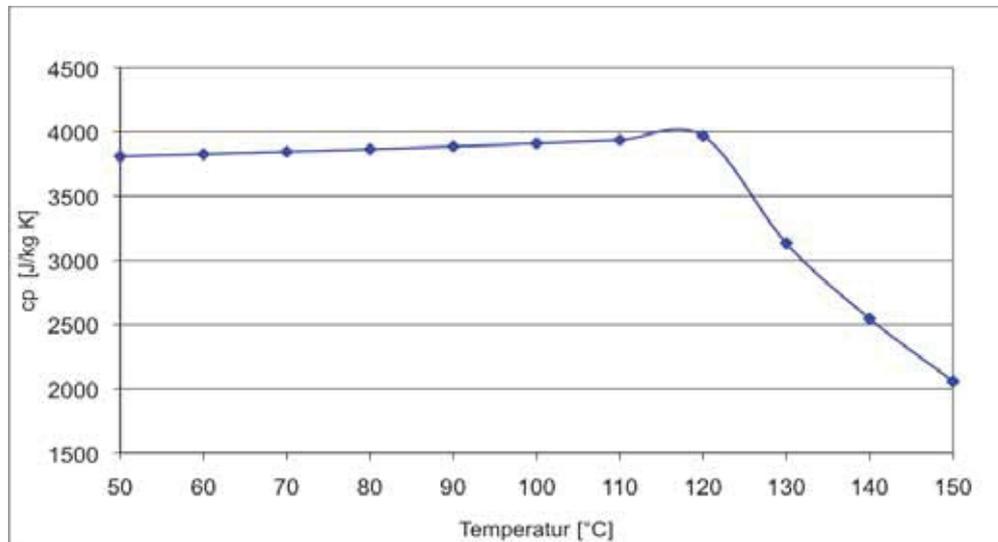


Abbildung 16:  $c_p$ -Werte einer 30%igen MEA-Lösung bei 2 bar<sup>9</sup>

Zum Erzeugen der angenommenen Menge an Stripddampf muss folgende Energiemenge zugeführt werden:

$$\dot{Q}_{verd} = \dot{m}_{H_2O} * \Delta h_{verd,T} \quad [\text{kJ/h}] \quad \text{Gl 37}$$

Damit ergibt sich der gesamte Energieaufwand zu:

$$\dot{Q}_{ges} = \dot{Q}_I + \dot{Q}_{\Delta T} + \dot{Q}_{verd} \quad [\text{kJ/h}] \quad \text{Gl 38}$$

Die erforderliche Heizleistung errechnet sich durch:

$$P_{heiz} = \frac{\dot{Q}_{ges}}{3600} \quad [\text{kW}] \quad \text{Gl 39}$$

<sup>9</sup> Das Diagramm wurde mit Hilfe der Datenbank von AspenPlus® erstellt.

Tabelle 6: Ergebnis der theoretischen Heizleistungsberechnung

$\dot{V}_{CO_2}$ [m <sup>3</sup> /h]	17,68
$\dot{m}_{CO_2}$ [kg/h]	30,01
$\dot{n}_{CO_2}$ [kmol/h]	0,682
$\dot{n}_{MEA}$ [kmol/h]	3,1
$\dot{m}_{MEA}$ [kg/h]	189,37
$\dot{m}_{ges}$ [kg/h]	631,24
$\dot{Q}_l$ [kJ/h]	55,931
$\dot{Q}_{\Delta T}$ [kJ/h]	25,043
$\dot{Q}_{verd}$ [kJ/h]	29,193
$\dot{Q}_{ges}$ [kJ/h]	110,168
$P_{heiz}$ [kW]	30,6 <sup>10</sup>

Wie man aus Abbildung 17 erkennen kann, beträgt die Dichte einer 30m%igen MEA-Lösung bei 40°C ca. 1,005 kg/m<sup>3</sup>. Das würde bedeuten, dass der Lösungsmittelstrom nur ca. 630 l beträgt. Die Lösungsmittelpumpe jedoch liefert einen maximalen Volumenstrom von 2 m<sup>3</sup>/h, was einen beträchtlichen Überschuss darstellt. Die Anlage muss aber in der Lage sein diese Menge zu fördern und die Heizung muss auch diese Lösungsmittelmenge aufheizen und regenerieren können. Die geforderte Heizleistung für 2 m<sup>3</sup>/h Flüssigkeitsvolumen errechnet sich ähnlich wie oben aus folgenden Schritten:

Zuerst wird über die Dichte der 30 m%igen MEA-Lösung und dem Massenanteil an MEA aus dem maximalen Flüssigkeitsstrom der entsprechende Molenstrom an MEA errechnet:

$$\dot{n}_{MEA} = \rho_{sus} * \dot{V}_{sus} * \frac{x_{MEA}}{MM_{MEA}} \quad [\text{kmol/h}] \quad \text{Gl 40}$$

Mit Gleichung 27 ergibt sich daraus wieder der Massenstrom an MEA. Und mit den Gleichungen 28 und 29 lassen sich der Massenstrom an Wasser und der Gesamtmassenstrom errechnen.

<sup>10</sup> Entspricht einem Energieaufwand von ca. 3,67 GJ/t CO<sub>2</sub>.

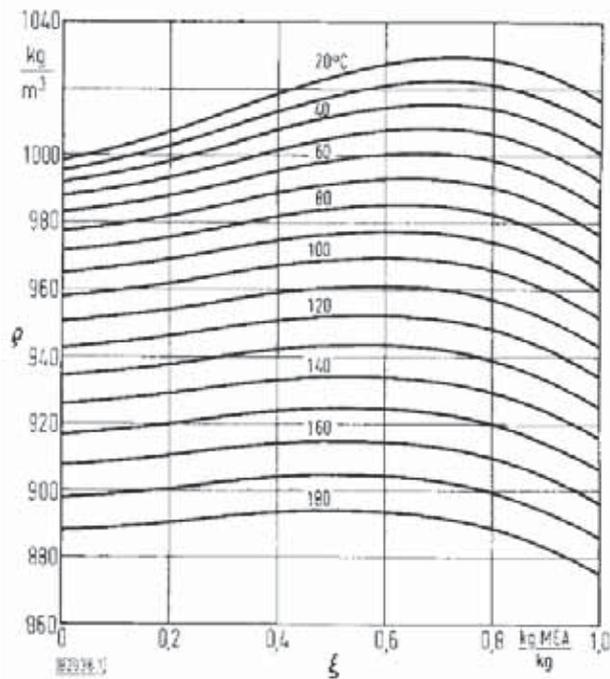


Abbildung 17: Dichte von MEA-Lösungen abhängig von der Temperatur [19]

Der genaue Wert für die Dichte der MEA-Lösung wurde aus der Stoffdatenbank von AspenPlus® entnommen und beträgt für eine 30m%ige Lösung bei 2 bar und 120°C 1050 kg/m<sup>3</sup>.

Die neuen Enthalpieströme errechnen sich ebenfalls wie oben aus den Gleichungen 30, 31, 32, 33, sowie 34 für die notwendige elektrische Leistung. Wie man aus Tabelle 7 erkennen kann, ist die geforderte Heizleistung wesentlich höher, wenn mit dem entsprechenden Flüssigkeitsüberschuss gearbeitet wird.

Tabelle 7: Ergebnisse der maximalen Heizleistungsberechnung

$n_{MEA}$ [kmol/h]	10,3
$m_{MEA}$ [kg/h]	630
$m_{ges}$ [kg/h]	2100
$\dot{Q}_l$ [kJ/h]	62221,1
$\dot{Q}_{\Delta T}$ [kJ/h]	83313,4
$\dot{Q}_{verd}$ [kJ/h]	97121,4
$\dot{Q}_{ges}$ [kJ/h]	242655,9
$P_{heiz}$ [kW]	67,4 <sup>11</sup>

<sup>11</sup> Entspricht einem Energieaufwand von ca. 6,22 GJ/t CO<sub>2</sub>.

Um aber beim Hochfahren der Anlage vernünftige Aufheizzeiten zu erreichen, wurde vereinbart einen Heizflansch mit ausreichender Überkapazität zu installieren. Es wurde daher ein 90 kW Heizflansch der Firma Elektra-Lindau bestellt.



Abbildung 18: 90 kW Heizflansch von Elektra Lindau [20]

### 3.2.2 Auslegung der Rohrleitungen

Als nächster Schritt wird basierend auf den maximalen Volumenströmen für die Flüssigphase und die Gasphase die Dimensionierung der Rohrleitungen und die Festlegung der Strömungsgeschwindigkeiten vorgenommen. In der Literatur finden sich folgende allgemeine Anhaltswerte für die Strömungsgeschwindigkeiten und den Druckverlust in Rohrleitungen:

Tabelle 8: Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverlust in Rohrleitungen [21]

Fluid	Geschwindigkeit [m/s]	Druckverlust $\Delta P$ [kPa/m]
Flüssigkeit, gepumpt, nicht zäh	1 – 3	0,5
Gase und Dämpfe	15 – 30	0,05

Folglich werden für die Flüssigseite 2 m/s und für die Gasseite 20 m/s angenommen. Der Rohrleitungsquerschnitt ergibt sich aus:

$$A_R = \frac{\dot{V}}{v} \quad [\text{m}^2] \quad \text{Gl 41}$$

Woraus dann der Rohrleitungsdurchmesser berechnet wird:

$$A_R = \frac{d^2 * \pi}{4} \rightarrow d \quad [\text{m}] \quad \text{Gl 42}$$

Für die Flüssigseite ergibt das einen Mindestdurchmesser von 19 mm, und 53 mm sind es für die Gasseite. Da bei der bestehenden Anlage für Flüssigkeiten hauptsächlich 1“-Rohre und für Gase vor allem 2“-Rohre verwendet wurden, wird diese Einteilung auch für den

Erweiterungsteil übernommen. Der Innendurchmesser von 1“-Rohren beträgt laut ISO 6708 27,2 mm und 53,0 mm für 2“-Rohre. Somit sind die berechneten Mindestdurchmesser erfüllt. Zusätzlich werden auch noch ½“-Rohre mit einem Innendurchmesser von 16,0 mm für kleinere Leitungen verwendet.

Um die Rohrleitungen untereinander und mit Armaturen und Apparaten zu verbinden, werden mehrere Verbindungstechniken verwendet. Diese sind:

- Schweißverbindungen zum Verbinden von geraden Rohren und Rohrleitungsteilen wie 90°-Bögen, Anschweißnippel oder Vorschweißbördel.
- Flanschverbindungen zum Anschließen von Rohrleitungen an Apparate und Behälter mittels Vorschweißbördel und Losflansch.
- Holländerverbindungen zum Verbinden von Rohrleitungen und Armaturen.
- Diverse andere Fittings wie Muffen, Doppelnippel, Reduzierungen, T-Stücke und Reduzierungen (geschweißt oder geschraubt).

In Tabelle 9 sind alle verwendeten Verbindungselemente dargestellt. Sämtliche Ströme werden anschließend nochmals mit der Simulationssoftware AspenPlus® nachgerechnet und die Ergebnisse mit den händischen Berechnungen verglichen. Das Programm kann alle Ströme genau bilanzieren und berechnet die jeweilige Zusammensetzung. Die Ergebnisse der AspenPlus®-Berechnung sind in Tabelle 10 angeführt.

Tabelle 9: Rohrleitungsverbindungselemente

 <p>Abbildung 19: Doppelnippel</p>	 <p>Abbildung 20: Holländer</p>
 <p>Abbildung 21: 90°-Bogen mit Innengewinde</p>	 <p>Abbildung 22: 90°-Bogen zum Vorschweißen</p>
 <p>Abbildung 23: T-Stück mit Innengewinde</p>	 <p>Abbildung 24: T-Stück zum Vorschweißen</p>
 <p>Abbildung 25: Reduzierung</p>	 <p>Abbildung 26: Losflansch</p>
 <p>Abbildung 27: Vorschweißbördel</p>	 <p>Abbildung 28: Reduzierstück</p>
 <p>Abbildung 29: Kugelhahn</p>	 <p>Abbildung 30: Panzerschlauch</p>

Tabelle 10: Stromtabelle aus der AspenPlus®-Simulation

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
Temperatur [°C]	40.3	50	50	105.5	111.2	25	25	24.1	24.1	25	120.9	55	55	40	40	36.7
Druck [bar]	1.05	1	2	2	2	2	2	1.02	1.02	2	2	2	2	2	1	1
Massenstrom [kg/h]	225.35	1533.14	1540.63	1540.63	120.81	120.81	64.46	0.64	63.82	56.35	1476.17	1476.17	1476.17	1476.1	168.3	232.20
Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	180.088	1.6	1.607	20.338	73.083	18.514	18.457	0.362	35.886	0.057	1.533	1.463	1.463	1.452	150	186.60
Enthalpie [Gcal/h]	-0.169	-4.751	-4.779	-4.694	-0.311	-0.347	-0.134	0.001	-0.133	-0.213	-4.527	-4.612	-4.612	-4.631	0.063	-0.196
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	1.251	958.217	958.408	75.75	1.653	6.526	3.493	1.778	1.778	993.549	962.692	1008.848	1008.848	1016.4	1.123	1.244
<b>Massenstrom [kg/h]</b>																
H <sub>2</sub> O	8.122	1085.899	1093.353	1094.42	56.446	56.417	0.44	0.004	0.436	55.979	1097.38	1098.165	1098.165	1098.1	15.15	15.59
MEA	0	26.708	26.749	83.448	0.098	0	0	0	0	0	185.942	182.254	182.254	181.89	0	0
CO <sub>2</sub>	67.088	0.071	0.071	21.168	62.267	62.196	62.04	0.62	61.419	0.157	0.099	0	0	0	5.052	66.471
N <sub>2</sub>	134.623	1.606	1.62	1.62	1.634	1.634	1.619	0.016	1.603	0.014	0	0	0	0	133.0	6
O <sub>2</sub>	15.523	0.363	0.366	0.366	0.375	0.375	0.366	0.004	0.363	0.008	0	0	0	0	15.15	15.517
<b>Massenanteil</b>																
H <sub>2</sub> O	0.036	0.708	0.71	0.71	0.467	0.467	0.007	0.007	0.007	0.993	0.743	0.744	0.744	0.744	0.09	0.067
MEA	0	0.017	0.017	0.054	0.001	0	0	0	0	0	0.126	0.123	0.123	0.123	0	0
CO <sub>2</sub>	0.298	0	0	0.014	0.515	0.515	0.962	0.962	0.962	0.003	0	0	0	0	0.03	0.286
N <sub>2</sub>	0.597	0.001	0.001	0.001	0.014	0.014	0.025	0.025	0.025	0	0	0	0	0	0.79	0.58
O <sub>2</sub>	0.069	0	0	0	0.003	0.003	0.006	0.006	0.006	0	0	0	0	0	0.09	0.067

### 3.2.3 Behälter und Kolonne

Als nächster Schritt werden die drei zentralen Bauteile der Desorberanlage ausgelegt: Desorbersumpftank, Kolonne und Flash.

Für die Versuchsplanung wird vereinbart die Anlage mit maximal  $1,3 \text{ m}^3$  Waschflüssigkeit zu füllen. Dies stellt also die größte Flüssigkeitsmenge dar, die die Anlage im Betrieb aufnehmen wird müssen. Diese muss sich auf folgende Anlagenteile aufteilen: Absorbersumpftank, Desorbersumpftank, Flash und das Rückhaltevolumen von Rohrleitungen, Pumpen, Wärmetauschern und Kolonnen. Die eigentlichen Flüssigkeitsspeicher sind aber die beiden Sumpftanks. Dort kann die MEA-Lösung bei Anlagenstillstand gespeichert werden bzw. im Sumpftank angemischt werden. Dieser fasst maximal 700 l.

#### Sumpftank

Beim Auslegen des Desorbersumpftanks müssen folgende Überlegungen berücksichtigt werden:

- Das Gesamtvolumen soll ausreichend groß sein, um genügend Speichervolumen zu bieten.
- Die Dimensionen müssen so gewählt werden, dass der Heizstab sicher installiert und betrieben werden kann. Außerdem muss sichergestellt sein, dass der Heizstab immer (!) vollständig von Flüssigkeit umgeben ist, um ein Überhitzen und Durchbrennen zu verhindern.
- Das Volumen soll nicht zu groß gewählt werden, da sich dadurch lange Aufheizzeiten sowie lange Umwälzzeiten ergeben.

Aus diesen Überlegungen heraus wird angenommen, dass der Desorbersumpftank ein Volumen von ca. 500 l fassen soll. Da die Eintauchtiefe des Heizflansch, wie in Abbildung 31 dargestellt, 1.300 mm beträgt, wird eine Gesamtlänge von 1.600 mm für den Tank angenommen.

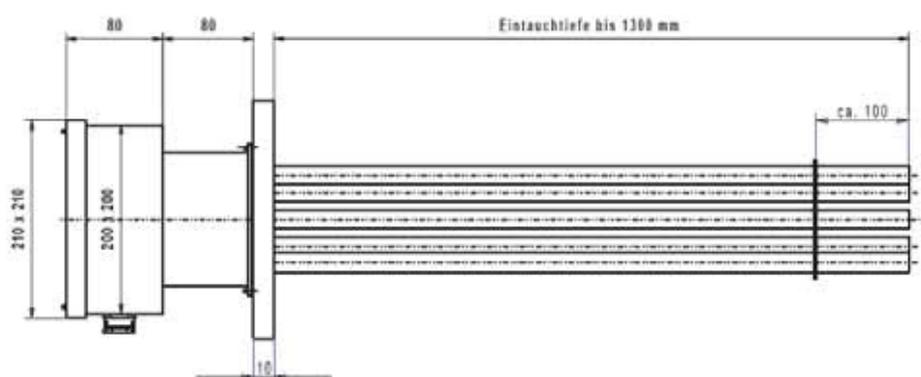


Abbildung 31: Abmessungen des Heizflansch [20]

Der Mindestdurchmesser lässt sich dann aus folgender Formel errechnen:

$$V_t = A_t * h_t = \frac{d_t^2 * \pi}{4} * h_t \quad [\text{m}^3] \quad \text{Gl 43}$$

Er beträgt für die oben gemachten Annahmen 630 mm. Nach Rücksprache mit der Metallbaufirma SKM, die für die Anfertigung der Behälter engagiert wird, wird um den Bau zu vereinfachen allerdings ein Normrohr mit einem Durchmesser von 606 mm gewählt. Dies ergibt ein Behältervolumen von 0,461 m<sup>3</sup>. Dafür sollte aber bei der Konstruktion eine Möglichkeit vorgesehen werden, das Behältervolumen bei Bedarf vergrößern zu können.

### Kolonne

Bei der Auslegung der Desorberkolonne ist man vor allem durch wirtschaftliche Überlegungen und durch die Hallenhöhe limitiert. Der Durchmesser soll möglichst groß gewählt und die Höhe möglichst hoch gewählt werden, um ausreichend Volumen für die Füllkörper zu bieten. Die maximal zulässige Gesamthöhe für Sumpftank und aufgesetzter Desorberkolonne beträgt 4,2 m, da sonst der Brückenkran in der Technikumshalle nicht mehr bewegt werden könnte. Für den Sumpftank werden inklusive der Standkonsolen und des Flanschrohres für die Kolonnenmontage eine Gesamthöhe von 1.000 mm angenommen. Daraus ergibt sich eine Höhe von 3.200 mm für die Kolonne.

Der Durchmesser wird in erster Instanz mit 200 mm angenommen, wird dann aber nach erneuter Rücksprache mit SKM auf ein EN ISO 1127 219,1 Rohr geändert, welches einem Innendurchmesser von 213,9 mm entspricht. Eine weitere Vergrößerung des Durchmessers würde zu einem drastischen Anstieg der Fertigungskosten führen.

Mit Gleichung 43 errechnet sich das Volumen der Kolonne zu 0,121 m<sup>3</sup>. Wenn man am Kopf der Kolonne 200 mm für Flüssigkeitseintritt und Gasaustritt frei lässt, bleiben noch 0,113 m<sup>3</sup> an Volumen. Als Füllkörper werden Pall-Ringe mit einem Durchmesser von 25 mm gewählt. Diese besitzen laut Hersteller eine Oberfläche von 210 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Wird die Kolonne also mit diesen Pall-Ringen bis auf eine Höhe von 3 m angefüllt, ergibt das eine Austauschoberfläche von 23,73 m<sup>2</sup>.

Damit die Pall-Ringe nicht am unteren Ende der Kolonne in den Sumpftank fallen, wird am Anschlussflansch ein Lochboden mitverschraubt.

### Flash

Das am Kopf der Kolonne austretende Gasgemisch aus CO<sub>2</sub> und Wasserdampf wird im Kondensator abgekühlt, sodass das Wasser kondensiert vorliegt. Die beiden Phasen müssen anschließend noch voneinander getrennt werden. Dazu wird ein Flash unterhalb des Wärmetauschers installiert. Das Wasser rinnt im Flash nach unten in den Auslauf und von dort zurück in den Sumpftank. Das CO<sub>2</sub> steigt nach dem Eintritt im Flash nach oben und tritt

am Kopf aus. Bei der Konstruktion ist vor allem darauf zu achten, dass den beiden Phasen ausreichend Volumen gegeben wird, damit sie sich vollständig trennen. Um zu verhindern, dass Blasen von CO<sub>2</sub> mit dem Wasser wieder in den Sumpftank gesaugt werden, sollte immer ein konstanter Flüssigkeitsspiegel im Flash bestehen bleiben. Dies wird dadurch sicher gestellt, dass sich der Flash nach unten hin konisch verengt und schließlich in einem ½“-Stutzen mündet. Der Eintritt und der Gasaustritt haben im Gegensatz dazu einen Durchmesser von 2“. Um die notwendigen Behältervolumen und die daraus resultierenden Dimensionen abzuschätzen, müssen zuerst einige Annahmen für den Gasstrom aus dem Desorber gemacht werden.

Die Gemischtemperatur am Kopf der Kolonne vor dem Eintritt in den Kondensator wird mit 110°C angenommen. Der Kondensator soll das Gemisch auf 25°C abkühlen. Mit den errechneten Massenströmen aus Kapitel 3.2.1 und den Dichten von Wasser und CO<sub>2</sub> aus Tabelle 11 lassen sich aus Gleichung 44 die Volumenströme in den Flash berechnen.

Tabelle 11: Stoffwerte von Wasser/Dampf und CO<sub>2</sub>

	<b>Wasser/Dampf</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>Dichte bei 110° C [kg/m<sup>3</sup>]</b>	950,7	2,77470
<b>Spezifisches Volumen bei 110° C [m<sup>3</sup>/kg]</b>	1,05	0,36040
<b>Dichte bei 40° C [kg/m<sup>3</sup>]</b>	992,3	3,40950
<b>Spezifisches Volumen bei 40°C [m<sup>3</sup>/kg]</b>	1,01	0,29330
<b>Dichte bei 25° C [kg/m<sup>3</sup>]</b>	997,2	3,58650
<b>Spezifisches Volumen bei 25° C [m<sup>3</sup>/kg]</b>	1,00	0,27882

$$\dot{m} = \dot{V}^* \rho \quad [\text{kg/h}]$$

Gl 44

Bei 25°C treten demnach 44,2 l/h Wasser und 17,62 m<sup>3</sup>/h CO<sub>2</sub> in den Flash ein. Um für die Herstellung Normteile verwenden zu können, wird ein DN 100 Rohr als Nennweite vorgeschlagen. Bei 3 mm Wandstärke besitzt es einen Innendurchmesser von 94 mm. Die benötigte Höhe wird abgeschätzt und mit 360 mm festgelegt. Allerdings soll auch hier wieder eine konstruktive Möglichkeit der Volumenvergrößerung vorgesehen werden. Daraus ergibt sich ein Gesamtvolumen von 2,5 l, wodurch eine ausreichend große Erweiterung für die Phasentrennung gegeben sein sollte. Die endgültige Funktionsüberprüfung erfolgt dann im Betrieb.

## Syphon

Bei genauerer Betrachtung der Drücke in der Anlage bzw. der Strömungszustände fällt auf, dass es für das aus dem Sumpftank entweichende CO<sub>2</sub>-Wasserdampf-Gemisch theoretisch zwei Strömungspfade gibt: einen durch die Desorberkolonne und einen durch die Wasserrückleitung aus dem Flash. Um dies zu verhindern, soll in die Wasserrückleitung ein Syphon eingebaut werden, der dafür sorgt, dass immer ein gewisser Wasserspiegel in der Leitung bestehen bleibt. Die Nennweite des Syphons beträgt so wie jene der Rohrleitung ebenfalls ½“. Für die Höhe der S-förmigen Biegung wurden 300 mm angenommen.

In Tabelle 12 sind nochmals alle Bauteildimensionen zusammengefasst.

Tabelle 12: Behälterdimensionen

	Durchmesser [m]	Höhe/ Länge [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
<b>Sumpftank</b>	0,6	1,6	0,461
<b>Kolonne</b>	0,219	3,2	0,121
<b>Flash</b>	0,1	0,36	0,0025
<b>Syphon</b>	½“	0,3	-

### 3.2.4 Wärmetauscher

Die nächste wichtige Bauteilgruppe, die es auszulegen gilt, sind die drei Wärmetauscher: der zentrale Wärmetauscher, der Kondensator und der Rückkühler. Die drei Aggregate haben folgende Aufgaben:

- Der zentrale Wärmetauscher kühlt den aus dem Desorbersumpftank austretenden Absorptionsmittelstrom und erwärmt die beladene Lösung am Weg zum Kopf des Desorbers.
- Der Kondensator kühlt das  $\text{CO}_2$ -Wasserdampfgemisch mit Kühlwasser, sodass das Wasser auskondensiert. Dabei wird sowohl die Verdampfungswärme als auch die Wärme zum Abkühlen auf die gewünschte Temperatur frei.
- Der Rückkühler bringt die bereits abgekühlte und regenerierte MEA-Lösung ebenfalls mit Kühlwasser auf das gewünschte Temperaturniveau für die Absorption.

Zur Auslegung wird von jedem Wärmetauscher die zu übertragende Wärmemenge, die Mengenströme der ein- und austretenden Ströme und die gewünschten Temperaturen benötigt. Mit den Stromwerten aus Tabelle 10 und den dafür getroffenen Annahmen für die Temperaturen lässt sich die unten angeführte Spezifikationstabelle für die Wärmetauscher zusammenstellen.

Für den zentralen Wärmetauscher sind beide Massenströme gegeben. Die Eintrittstemperatur der beladenen MEA-Lösung ist von der Absorption vorgegeben. Die Ein- und Austrittstemperaturen der regenerierten Waschflüssigkeit werden festgelegt bzw. sind vorgegeben. Somit bleibt als einzige Variable die Austrittstemperatur der beladenen MEA-Lösung übrig. Der abgegebene Wärmestrom lässt sich mit Gleichung 36 berechnen. Unter der Annahme, dass der gesamte abgegebene Wärmestrom ans andere Medium übertragen wird, kann dann mit derselben Gleichung das maximal erreichbare Temperaturniveau für den Austrittsstrom errechnet werden.

Im Kondensator muss die Kondensationswärme des Strippdampfes abgeführt werden. Die abgegebene Wärmemenge lässt sich über die Strippdampfmenge und die Enthalpiedifferenz nach Gleichung 35 berechnen. Diese Wärmemenge muss durch das Kühlwasser aufgenommen werden. Die Eintrittstemperatur des Kühlwassers wird mit durchschnittlich  $20^\circ\text{C}$  angenommen. Als maximale Austrittstemperatur wird  $60^\circ\text{C}$  festgesetzt. Somit gilt es die erforderliche Menge an Kühlwasser zu bestimmen. Was ebenfalls unter Verwendung von Gleichung 36 mit der Wärmekapazität von Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  möglich ist.

Dieselben Überlegungen sind für die Berechnung des Rückkühlers anzustellen. Allerdings muss hier durch das Kühlwasser nur die Wärmemenge zum Abkühlen der regenerierten MEA-Lösung von 55°C auf ca. 40°C abgeführt. Die abgegebene Wärmemenge und die notwendige Menge an Kühlwasser errechnen sich aus Gleichung 36.

Tabelle 13: Spezifikationen der Wärmetauscher

	<b>Wärmetauscher</b>	<b>Kondensator</b>	<b>Rückkühler</b>
<b>Medium kalt</b>	MEA-Lösung beladen	Wasser	Wasser
<b>Medium warm</b>	MEA-Lösung regeneriert	CO <sub>2</sub> -Wasserdampf	MEA-Lösung regeneriert
<b>Mengenstrom kalt [kg/h]</b>	1540,6	?	?
<b>Mengenstrom warm [kg/h]</b>	1476,2	120,7	1476,2
<b>Eintrittstemperatur kalt [°C]</b>	55	20	20
<b>Austrittstemperatur kalt [°C]</b>	?	60	45
<b>Eintrittstemperatur warm [°C]</b>	120	110	55
<b>Austrittstemperatur warm [°C]</b>	55	30	40
<b>cp-Wert Eintritt kalt [kJ/(kg*K)]</b>	3,809	4,18	4,18
<b>cp-Wert Eintritt warm [kJ/(kg*K)]</b>	3,967	-	3,809

Die Berechnungen lieferten folgende Ergebnisse:

- Maximale Austrittstemperatur der beladenen MEA-Lösung: 119°C
- Kühlwassermenge für den Kondensator: 649 kg/h
- Kühlwassermenge für den Rückkühler: 504 kg/h

Mit diesen groben Spezifikationen wird anschließend Alfa Laval beauftragt, die Wärmetauscher zu planen und zu bauen<sup>12</sup>.

Die von Alfa Laval gelieferten Wärmetauscher sind alle Plattenwärmetauscher, welche die Vorteile einer kompakten Bauweise und eines guten Wärmeübergangs besitzen [17]. Für den zentralen Wärmetauscher wird ein Plattenwärmetauscher der Type TL6 mit einer Leistung von 98,31 kW verwendet. Er besitzt 2“-Anschlussflansche mit jeweils vier Gewindestangen zur Montage des Gegenflansches. Ein Foto ist in Abbildung 32 gezeigt. Der

<sup>12</sup> Die an Alfa Laval übermittelten Spezifikationsblätter finden sich im Anhang.

Druckverlust wird vom Hersteller mit 5,71 kPa für die warme Seite und mit 18,4 kPa für die kalte Seite angegeben.



Abbildung 32: Alfa Laval TL6 Plattenwärmetauscher

Für den Kondensator wird ein Plattenwärmetauscher der Type M6 verwendet, wie er in Abbildung 38 gezeigt ist. Allerdings erfolgt der Anschluss nicht wie im Bild über Rohrstützen mit Außengewinde, sondern ebenfalls über 2"-Flansche. Der Kondensator besitzt eine Leistung von 41,26 kW und einen Druckverlust von 5,37 kPa auf der warmen und 16,6 kPa auf der kalten Seite.



Abbildung 33: Alfa Laval M6 Plattenwärmetauscher

Der leistungsmäßig kleinste Wärmetauscher ist der Rückkühler. Für ihn wird das Modell T2 gewählt. Er besitzt eine Leistung von 21,88 kW und wird über  $\frac{3}{4}$ "-Gewinde angeschlossen. Sein Druckverlust beträgt 11,4 kPa auf der warmen und 18,4 kPa auf der kalten Seite.



Abbildung 34: Alfa Laval T2 Plattenwärmetauscher

### 3.2.5 Mess- und Regeltechnik

Für das Auslegen der Ventile und Sensoren der Anlage müssen zuerst eine Mess- und Regellogik erstellt werden. Es muss also festgelegt werden, welche Messgrößen mit welchen Sensoren an welcher Stelle in der Anlage zu erfassen sind, um die Vorgänge in der Anlage möglichst wirklichkeitsgetreu abbilden zu können, und eine einfache Steuerung zu erlauben. Außerdem muss definiert werden, an welchen Stellen der Anlage Regelungen vorzusehen sind und von welchen Messgrößen diese abhängen.

Wie bereits zuvor beschrieben, ist beschlossen worden, die Erfassung und Steuerung mittels Lookout vorzunehmen. Die Messwertaufnahme und Regelung des Absorberteils existiert bereits und muss nicht mehr ausgelegt werden. Für die Erweiterung mit dem Desorberteil können die beiden flüssigseitigen Durchflussmesser weiterverwendet werden. Sie erfassen im Strom S3 und S13 den Volumenstrom an beladener bzw. regenerierter MEA-Lösung. Ihre Bezeichnungen sind FIR-1 und FIR-2. Der Gasvolumenstrom wird im S1 nach der Gasmischstrecke erfasst bzw. im S15 nach dem Austritt aus dem Absorberkopf.

Die zu ergänzenden Sensoren für den Desorber werden nun in weiterer Folge beschrieben. Im S3 soll kurz vor dem Eintritt in den Wärmetauscher die Temperatur (TR-1) erfasst werden. Ebenso am Austritt im S4 (TR-2). Damit kann man den aufgenommenen Wärmestrom nachrechnen und die Funktionsfähigkeit des Wärmetauschers überprüfen. Die Temperatur wird im S4 nochmals kurz vor dem Eintritt in den Desorberkopf erfasst (TR-3), Dadurch ist die genaue Eintrittstemperatur bekannt und man kann den Temperaturverlust in der Rohrleitung ermitteln.

Im Kopf der Desorberkolonne und im Sumpftank sind zwei weitere Temperatursensoren (TR-4 & TR-6) installiert. Somit kann das Temperaturgefälle über die Desorberhöhe dargestellt werden.

Nach dem Kondensator wird die Temperatur im S6 erfasst. Diese Messstelle ist wichtig, da von ihr der Durchfluss an Kühlwasser durch den Kondensator abhängt. Die Temperatur im S6 muss ausreichend niedrig sein, um das enthaltene Wasser zu kondensieren.

Zur Erstellung der gesamten Wärmebilanz des Wärmetauschers W1 werden kurz vor bzw. nach Ein- und Austritt die Temperatursensoren TR-7 und TR-8 installiert. Vor dem Rückkühler wird noch ein zweiter Temperatursensor (TR-9) im S13 montiert. Der letzte Temperatursensor des Desorberteils (TR-10) wird kurz nach dem Austritt aus dem Rückkühler angebracht. Von ihm hängt wiederum die Durchflussmenge an Kühlwasser durch den Rückkühler ab. Somit sind alle wichtigen Messwerte für den Waschflüssigkeitskreislauf erfasst.

Als Standardbetriebszustand in der Desorbereinheit wird wie bereits zuvor erläutert ein Absolutdruck von 2 bar und eine Temperatur von 120°C angestrebt. Der Druck in Kolonne und Sumpftank wird durch Regenerieren der MEA-Lösung und das Austreiben des CO<sub>2</sub>'s erzeugt. Dieser Überdruck hat für die Regelung der Anlage mehrere Auswirkungen.

Der Überdruck liegt im Sumpftank, in der Kolonne, im Kondensator, im Flash und in den Rohrleitungen S4, S5, S6, S7, S10 und S11 an. Für die Pumpe P1 bedeutet dies, dass sie einen höheren Widerstand zu überwinden hat. Für die Grundfos-Pumpe P2 reduziert sich jedoch die aufzubringende Pumpenleistung. Weiters stellt der Überdruck sicher, dass das am Kopf der Desorberkolonne austretende CO<sub>2</sub>-Wasserdampf-Gemisch den Kondensator durchströmt und in den Flash gelangt. Das kondensierte Wasser rinnt von dort wieder zurück in den Sumpftank, über die Rohrleitung S10 und den Syphon. Das CO<sub>2</sub>-Gas wird aus dem Flash herausgedrückt und strömt über S7 in die Rückleitung bzw. in die Abzweigung zur Umgebungsluft. Da aber sowohl in der Rückleitung S9 als auch in S8 Umgebungsdruck herrscht, muss an dieser Stelle mit einem Regelventil sichergestellt werden, dass der Überdruck gehalten wird.

Diese sogenannte Vordruckregelung wird durch zwei Ventile und einen Drucksensor realisiert. Sowohl im S8 als auch im S9 wird dazu ein Magnetventil (V4 bzw. V3) installiert. Zusätzlich wird im S7 ein Drucksensor (PIC-2) angebracht. Im V3 wird ein kleine, konstante Durchflussmenge eingestellt. Über den PIC-2 wird der Absolutdruck im Desorberkreis gemessen, und das Ventil V4 regelt abhängig von diesem Messwert den Durchfluss durch die Rohrleitung S9. Liegen am PIC-2 mehr als der eingestellte Soll-Wert von 2 bar an, öffnet es, sind es weniger, schließt es.

Im Kopf der Kolonne K2 und im Sumpftank B2.1 wird jeweils ein Drucksensor angebracht (PIR-1 und PIR-3). Im Sumpftank muss außerdem noch ein kontinuierlicher Füllstandsmesser (LIC-1) angebracht werden. Mit ihm wird der exakte Füllstand im Sumpftank gemessen um sicherzustellen, dass immer ein gewisses Flüssigkeitslevel über dem Heizflansch gehalten wird.

Dazu wird im S12 nach dem Wärmetauscher und noch vor der Pumpe P2 ein Magnetventil (V1) eingebaut. Der Überdruck in der Kolonne drückt also die regenerierte MEA-Lösung aus dem Sumpftank durch die Rohrleitung S11 und durch den Wärmetauscher. Der Durchfluss durch die Rohrleitung und somit der Abfluss aus dem Sumpftank wird dann durch die Ventilöffnung von V1 reguliert, welche vom Messwert des LIC-1 abhängt. Im erweiterten Verfahrensfließbild in Abbildung 35 sind die zusätzlich beschriebenen Ventile und Sensoren eingetragen.

Zur Absicherung gegen einen zu hohen Druckanstieg, eine etwaige Überhitzung bzw. ein zu rasches Absinken des Füllstands im Sumpftank werden für den Fall des Versagens der Sensoren zusätzlich ein Füllstandsalarm (LA), ein Temperaturalarm (TA) und ein Druckalarm (PA) installiert. Außerdem wird ein mechanisches Überdruckventil als letzte Sicherheitseinrichtung angebracht, welches ab einem Absolutdruck von 3bar öffnet. Das Überdruckventil wird als Standardbauteil bei der Firma RS bestellt und ist in Abbildung 36 gezeigt.

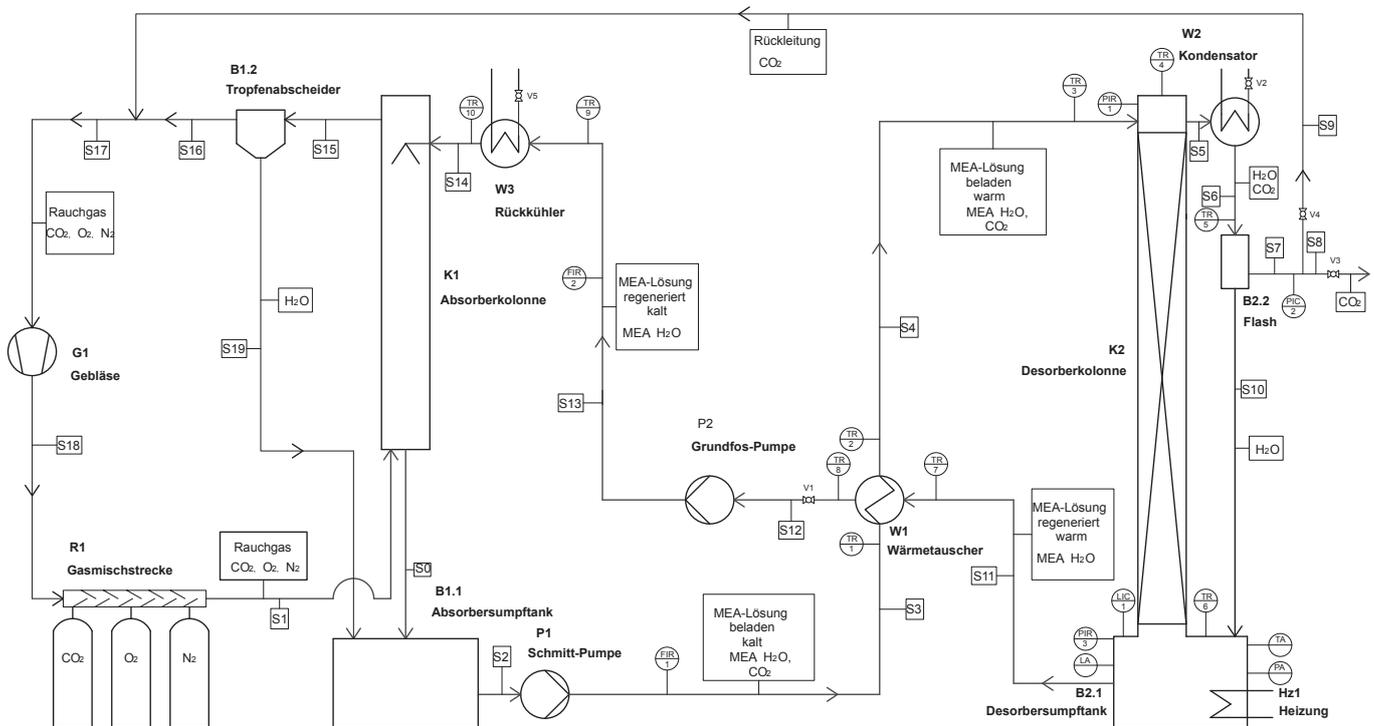


Abbildung 35: Erweitertes Verfahrensfließbild



Abbildung 36: Überdruckventil 3 bar absolut [22]

Für die Magnetventile werden Ventile der Firma Bürkert und Aircom verwendet. Für das Ventil V1 wird das Modell 2836 von Bürkert in der Edelstahlausführung eingebaut, da wegen der MEA-Lösung im S13 Korrosionsgefahr besteht. Eingebaut wird es über ein  $\frac{3}{4}$ "-Innengewinde. Außerdem wird auch noch für das Ventil V3 ein Bürkert Ventil vom Typ 2833 mit  $\frac{1}{8}$ "-Anschluss verwendet. Allerdings in der Messingausführung, da im S9 keine Korrosionsgefahr besteht. Für die anderen drei Ventile V2, V4 und V5 können Messingventile der Firma Aircom vom Typ PV34 bzw. PV40 mit  $\frac{1}{4}$ "-Anschlüssen verwendet werden, da sie gassetig im CO<sub>2</sub>-Strom bzw. im Kühlwasserzulauf installiert werden. Die Ventilarten sind in den nachfolgenden Abbildungen gezeigt.



Abbildung 37: 2-Wege Proportionalventil  $\frac{3}{4}$ " von Bürkert [23]



Abbildung 38: 2-Wege Proportionalventil  $\frac{1}{8}$ " von Bürkert [23]



Abbildung 39: Proportionalvolumenstromregler ¼“ PV34/40 von Aircom [24]

Als Temperatursensoren werden Standard-Thermoelemente vom Typ K eingesetzt. Typ K bedeutet, dass es sich um das Thermopaar Nickelchrom-Nickel handelt[25]. Die Thermoelemente werden ebenfalls bei RS bestellt und haben einen Messbereich bis 1770° C. In Abbildung 40 ist eines der verwendeten Thermoelemente dargestellt.



Abbildung 40: Thermoelement Typ K [22]

Thermoelemente bestehen grundsätzlich aus zwei unterschiedlichen Metalldrähten (Thermopaar), die gegeneinander isoliert sind. Die Drähte sind an einem Ende miteinander verschweißt und am anderen Ende offen. Wenn an der Schweißstelle und am offenen Drahtende (Vergleichsstelle) unterschiedliche Temperaturen herrschen, kann am offenen Ende eine kleine Spannung (Thermospannung) abgegriffen werden. Je höher die Temperaturdifferenz, desto höher ist diese Spannung. Sie muss zur weiteren Verarbeitung in einem Messumformer umgewandelt werden. [17]

Die Auswahl der übrigen Sensoren wird gemeinsam mit einem Berater von Endress+Hauser durchgeführt. Es werden für die drei Drucksensoren zwei unterschiedliche Sensormodelle ausgewählt, da nicht an allen drei Stellen die gleichen Messgenauigkeiten gefordert sind, und der Preis der Sensoren mit der Messgenauigkeit steigt. So werden für den PIR-1 und den PIR-3 zwei Cerabar PMC45 Sensoren bestellt. Diese Sensoren arbeiten mit einer metallischen Messmembran und besitzen eine Messabweichung von +/- 0,2% der eingestellten Messspanne [26].

Für den PIC-2 wird jedoch ein Cerabar PMC71 eingesetzt, da für die Vordruckregelung eine möglichst genaue Messgrößenerfassung von Vorteil ist. Der PMC71 arbeitet zwar auch mit einer metallischen Messmembran, besitzt aber eine Messgenauigkeit von bis zu +/- 0,075% der eingestellten Messspanne [26].

Für die Füllstandsmessung, also den LIC-1, wird ein Levelflex FMP40 Sensor mit Koaxialsonde eingebaut. Dieser Sensor arbeitet nach dem Prinzip der geführten Laufzeitmessung mittels eines Füllstandsradar. Dabei wird die Distanz vom Einbaupunkt des Sensors bis zur Produktoberfläche gemessen, indem Hochfrequenzimpulse entlang der Sonde geführt werden und von der Produktoberfläche reflektiert werden. Diese reflektierten Impulse werden von der Auswerteelektronik empfangen und in Füllstandsignale umgewandelt, wobei das Maß der Reflexion von der Dielektrizitätskonstanten des Produktes abhängt. [26]

Für die drei Alarme, welche im Sumpftank installiert werden, kommen ebenfalls Endress+Hauser Sensoren zum Einsatz. Für den Druckschalter PA wird ein Ceraphant PTP35 installiert. Er soll sicherstellen, dass ein Druck von 2,5 bar im Desorberteil nicht überschritten wird und schaltet deswegen im Bedarfsfall die Sumpfheizung ab. Der Sensor arbeitet mit einer metallischen Messmembran und einer piezoresistiven Druckmesszelle und wird zur Messung und Überwachung von Absolut- und Überdruck eingesetzt [26]. Er wird über einen speziellen Adapter in ein 1/2“ Gewinde eingeschraubt.

Als Levelalarm LA wird ein Liquiphant FTL 50H ausgewählt. Er kann zur Minimum- oder Maximum-Detektion in Behältern oder Rohrleitungen eingesetzt werden. Hier soll er sicherstellen, dass der Flüssigkeitsspiegel im Sumpftank nie unter die Oberkante des Heizflansches absinkt. Sollte dies der Fall sein, muss der LA ebenfalls die Heizung abschalten. Der Liquiphant arbeitet mit einer Schwinggabel. Diese wird im Medium in Schwingung versetzt und schwingt mit einer gewissen Eigenresonanz. Wenn sich das umgebende Medium ändert, ändert sich auch die Schwingungsfrequenz und der Grenzschalter schaltet um. [26] Eingebaut wird der Liquiphant über ein 1 1/2“ Gewinde.

Der Temperaturalarm TA ist im Wesentlichen ein Pt100 Fühler. Das Modell trägt die Bezeichnung Thermophant TTR31. Das Messprinzip beruht darauf, dass der sich an der Spitze befindliche Sensor aus Platin seinen Widerstandswert temperaturabhängig ändert. Diese Widerstandsänderung wird elektronisch erfasst und an die Leitstelle weitergeleitet. [26] Der Temperaturalarm ist eine weitere Sicherheitseinrichtung, die sicherstellen soll, dass es zu keiner Überhitzung im Sumpftank und zu keiner Beschädigung des Heizstabs kommt. Er wird in ein 1/4“ Gewinde eingeschraubt. In Tabelle 14 finden sich Abbildungen aller eingesetzten Sensortypen.

Tabelle 14: Sensoren [26]

 <p>Abbildung 41: Levelsensor Endress+Hauser Levelflex FMP40</p>	 <p>Abbildung 42: Temperaturalarm Endress+Hauser Thermophant TTR31</p>
 <p>Abbildung 43: Druck-Messer Endress+Hauser Cerabar S PMC71</p>	 <p>Abbildung 44: Druckalarm Endress+Hauser Ceraphant PTP35</p>
 <p>Abbildung 45: Drucksensor Endress+Hauser Cerabar M PMC45</p>	 <p>Abbildung 46: Levelalarm Endress+Hauser Liquiphant FTL50</p>

Üblicherweise werden die Messsignale eines bestimmten Messgerätes in einem Messumformer in genormte Einheits-Stromsignale umgeformt. Normalerweise wird hierfür der Stromstärkenbereich von 4 bis 20 mA verwendet. Dieser Signalbereich besitzt bei 4 mA

einen sogenannten „lebenden Nullpunkt“, der es erlaubt das Messsignal 0 (4 mA Einheitssignal) vom Störfall mit einem fehlenden Messsignal (0 mA Einheitssignal) zu unterscheiden. [17]

Alle Sensoren, mit Ausnahme der Thermoelemente, verwenden als Ausgangssignal, das 4 bis 20 mA Signal. Das Signal wird mit einem vier-poligen Kabel zur Leitwarte übertragen. Dieses Kabel ist auch für die Stromversorgung der Sensoren zuständig. Es wird auch für die Versorgung und Steuerung der Ventile eingesetzt. Für die Übertragung der Thermospannung von den Thermoelemente müssen spezielle zwei-polige Kabel eingesetzt werden, die die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften wie das zugehörige Thermopaar besitzen. Die Leitungen stellen die verbilligte Fortsetzung des Thermopaars dar. [25]

### **Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild**

Die gesamte Versuchsanlage mit allen Apparaten, Behältern, Rohrleitungen, Armaturen und allen Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen ist im Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild (kurz R&I) in Abbildung 49 dargestellt. In diesem Fließbild sind alle wesentlichen Informationen enthalten, die zum Aufbau der Anlage notwendig sind. Für die Darstellung und Bezeichnung der Bauteile gibt es eigene Standards. Die Kurzbezeichnungen aus dem Grundfließbild erhalten für das R&I-Schema erweiterte Angaben. Die Bezeichnung der Kugelhähne und Ventile erfolgt anhand der DIN EN ISO 10628. Darin werden Absperrarmaturen mit V und Absperrventile mit B bezeichnet. Die beiden ersten Zahlen nach dem Buchstaben stehen für die Rohrleitung, in der das Ventil oder der Kugelhahn angebracht wird. Die beiden letzten Zahlen sind eine fortlaufende Zählnummer für die jeweilige Rohrleitung. Wenn ein Ventil oder Kugelhahn in einem Behälter montiert wird, wird die Rohrleitungsnummer durch die Behälterbezeichnung ersetzt. So steht also die Bezeichnung V1302 für einen Kugelhahn in der Rohrleitung S13 mit der Zählnummer 2, während VB2.101 einen Kugelhahn im Sumpftank des Desorbers bezeichnet.

Die Beschriftung der Rohrleitungen wird an die DIN EN ISO 10628 und an die Guidelines Technik „Rohrleitungsbezeichnung“ der Interessensgemeinschaft Regelwerke Technik angelehnt. Die Rohrleitungsbezeichnung setzt sich aus folgenden Zeilen zusammen:

Nummer der Rohrleitung – Nennweite in Zoll – PN-Stufe (Nenndruck)<sup>13</sup> – Werkstoffklasse<sup>14</sup>

Die Rohrleitungsnummer S4-1"-9-10E0 steht also für die Rohrleitung S4 mit einer Nennweite von 1", der PN-Schlüssels 9, welche einem Nenndruck von 2 bar entspricht, und der Werkstoffklasse 10E0 für nichtrostende, austenitische Stähle.

<sup>13</sup> Die PN-Stufen laut der Guideline Technik 12-0017-1 „Rohrleitungsbezeichnung“ der IGR finden sich im Anhang.

<sup>14</sup> Gemäß der DIN EN 1092-1 bezeichnen die Werkstoffklassen 10E0 bis 12E0 nichtrostende, austenitische Stähle für geringe Korrosionsbelastungen .

Im R&I-Fließbild finden sich außerdem noch folgende Zusatzsymbole:



Abbildung 47: Panzerschlauch



Abbildung 48: Syphon

Das vollständige R&I-Fließschema ist in Abbildung 49 dargestellt. In Tabelle 15 sind alle Sensoren für den Desorberteil nochmals zusammengefasst. Die Tabelle enthält die Kurzbezeichnung aus dem Grundfließbild und die abgekürzte Benennung für die Lookout-Programmierung. Zusätzlich ist auch der Messbereich der Sensoren bzw. der Betriebsdruck der Ventile angegeben. Außerdem erfolgt eine kurze Funktionsbeschreibung und die Typenbezeichnung laut Herstellerangabe.



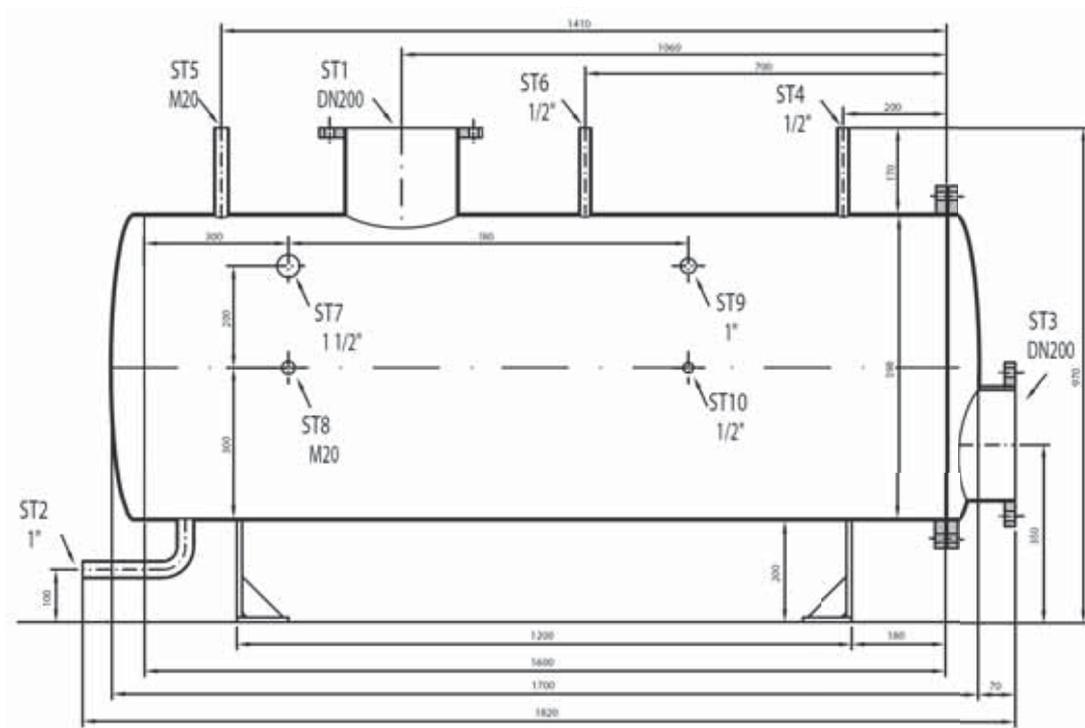


Abbildung 53: Skizze des Desorbersumpftanks

Tabelle 15: Auflistung aller Sensoren und Ventile

<b>Kurz-bezeichnung</b>	<b>Bezeichnung MRT</b>	<b>Messbereich</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Typen-bezeichnung</b>
PIR-1	P-Kopf	0-3 bar	Druckmessung Kolonnenkopf	PMC45 Cerabar M
PIC-2	P-Flash-A	0-3 bar	Vordruckregelung	PMC71 Cerabar S
PIR-3	P-Sumpf	0-3 bar	Druckmessung Sumpftank	PMC45 Cerabar M
LIC-1	Fuellst	0-600 mm	Füllstandsmessung Sumpftank	FMP40 Levelflex M
TR-1	T-WT-K-E	-270-1770°C	Temperaturmessung im kalten Eintritt des Wärmetauschers	Thermoelement Typ K
TR-2	T-WT-K-A	-270-1770°C	Temperaturmessung im kalten Austritt des Wärmetauschers	Thermoelement Typ K
TR-3	T-Kopf-E	-270-1770°C	Temperaturmessung vor dem Eintritt in den Kolonnenkopf	Thermoelement Typ K
TR-4	T-Kopf	-270-1770°C	Temperaturmessung im Kolonnenkopf	Thermoelement Typ K
TR-5	T-Kond	-270-1770°C	Temperaturmessung nach dem Kondensator	Thermoelement Typ K
TR-6	T-Sumpf	-270-1770°C	Temperaturmessung im Sumpftank	Thermoelement Typ K
TR-7	T-WT-W-E	-270-1770°C	Temperaturmessung im warmen Eintritt des Wärmetauschers	Thermoelement Typ K
TR-8	T-WT-W-A	-270-1770°C	Temperaturmessung im warmen Austritt des Wärmetauschers	Thermoelement Typ K
TR-9	T-RK-E	-270-1770°C	Temperaturmessung am Eintritt zum Rückkühler	Thermoelement Typ K
TR-10	T-RK-A	-270-1770°C	Temperaturmessung am Austritt zum Rückkühler	Thermoelement Typ K
V1	V-Fuellst	0-3 bar	Ventil regelt den Abfluss aus dem Sumpftank	2-Wege Proportionalventil Typ 2836
V2	V-T-Kond	0-3 bar	Ventil regelt den Zufluss von Kühlwasser zum Kondensator	PV40-04 Prop.-Volumenstromregler
V3	V-Umgeb.	0-3 bar	Ventil setzt die abgegebene Menge an CO <sub>2</sub> in Umgebung fest	2-Wege Proportionalventil Typ 2836
V4	V-P-Flash.	0-2 bar	Ventil regelt den Druck im Desorberteil	PV34-80_01 Prop.-Volumenstromregler
V5	V-T-RK	2 bar max	Ventil regelt den Zulauf von Kühlwasser im Rückkühler	PV40-04 Prop.-Volumenstromregler
PA	P-Alarm	3 bar	Alarm zur Abschaltung der Heizung bei Drucküberschreitung	PTP35 Ceraphant T
LA	L-Alarm	300 mm	Alarm zur Abschaltung der Heizung bei Füllstandsunterschreitung	FTL50 Liquiphant M
TA	T-Alarm	130°C	Alarm zur Abschaltung der Heizung bei Temperaturüberschreitung	TTR31 Thermophant T

### 3.3 Maschinenbauliche Auslegung und Festigkeitsberechnungen

Gemäß der europäischen Druckgeräterichtlinie (DGRL) stellen Druckgeräte bis zu einem Überdruck von 0,5 bar kein besonderes Druckrisiko dar. Bei einem Überdruck von mehr als 0,5 bar ist die DGRL anzuwenden. [27] Da als Betriebsdruck für die Versuchsanlage ein Absolutdruck von 2 bar notwendig ist, muss also für die Anlage eine Sicherheitsberechnung gemäß der DGRL durchgeführt werden. Im Anhang I der DGRL sind grundlegende Sicherheitsanforderungen angeführt, welche mit Berechnungen anhand der AD2000-Merkblätter erfüllt werden [27]. Die AD2000-Merkblätter besitzen jedoch nicht den Status einer harmonisierten Norm.

Es werden nun für folgende druckbeaufschlagte Bauteile Festigkeitsberechnungen im Sinne der AD-Merkblätter durchgeführt:

- Rohrleitungen ½“, 1“, 2“
- Desorbersumpftank
- Desorberkolonne
- Flash

#### 3.3.1 Werkstoffwahl

Für Chemieapparate, die chemischen Angriffen ausgesetzt sind, werden vor allem nichtrostende Stähle eingesetzt, die sich durch eine besondere Beständigkeit gegen chemische Korrosion auszeichnen. Diese Gruppe von Stählen besitzt mindestens einen Chromgehalt von 12%. Durch den Chromanteil kommt es zu Sauerstoffanlagerungen auf dem Werkstoff wodurch eine korrosionsbeständige Oberfläche gebildet wird. Diese Sauerstoffschicht wird auch als Passivschicht bezeichnet. Die nichtrostenden Stähle werden in drei Gruppen eingeteilt: [17]

- Ferritische Stähle
- Austenitische Stähle
- Martensitische Stähle

Auf Grund der Korrosionsgefahr durch die MEA-Lösung werden in der gesamten Versuchsanlage fast ausschließlich nichtrostende, säurebeständige austenitische Stähle eingesetzt. Diese Stähle sind durch einen Chromgehalt von mindestens 18% und einen Nickelgehalt von mindestens 8% gekennzeichnet. Sie weisen meistens eine sehr gute Zähigkeit bis zu tiefen Temperaturen auf und besitzen auch eine gute Warmfestigkeit bei Temperaturen oberhalb von 600°C [27]. Sie sind die bevorzugten Werkstoffe in Chemieanlagen zum Bau von Apparaten, Behältern, Rohrleitungen und Armaturen.

Austenitische nichtrostende Stähle besitzen keine ausgeprägte Streckgrenze. Deshalb wird zur Beschreibung ihrer Festigkeit die 0,2% - Dehngrenze  $R_{p0,2}$  verwendet. Sie lassen sich weiters gut unter Schutzgas schweißen und beim Schweißen mit Lichtbogen-Handschiessen oder dem Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG-Schweißen) werden die Werkstoffeigenschaften in der Schweißzone nur wenig verändert. [17]

Beim Aufbau der Versuchsanlage wird das WIG-Schweißen eingesetzt. Es zählt zu den Schutzgasschweißverfahren, bei denen der Lichtbogen und das Schmelzbad durch ein Schutzgas gegen die Atmosphäre abgeschirmt werden. Beim WIG-Verfahren kommt eine nichtabschmelzende Wolframelektrode zum Einsatz, die zur besseren Führung meist spitz zugeschliffen wird. Als Schutzgase werden inerte Gase wie Argon oder Helium verwendet. [28] Das Verfahren ist in Abbildung 50 schematisch gezeigt.

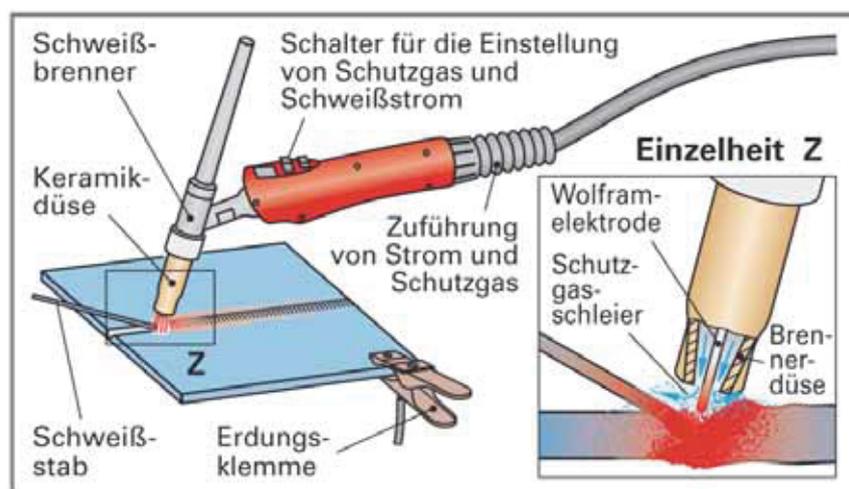


Abbildung 50: WIG-Schweißen [17]

Der Schweißstab mit dem Zusatzwerkstoff wird dem Lichtbogen mit Hand nachgeführt und schmilzt dort ab. Die Schweißanlage selbst besteht aus einer Stromquelle, welche mit Gleichstrom oder Wechselstrom betrieben werden kann, und dem Schweißbrenner, der durch ein Schlauchpaket mit der Stromquelle verbunden ist. In diesem Schlauchpaket sind die Schweißstromleitung, die Schutzgasschläuche und die Steuerleitung zusammengefasst. [28]

Bei der Verarbeitung von austenitischen Edelstählen ist weiters darauf zu achten, dass die angesprochene Passivschicht nicht zerstört wird. Deswegen müssen Anlauffarben, Zunder, Schlackenreste, Fremdeisen, Schweißspritzer und dergleichen nach der Verarbeitung entfernt werden. Dazu können die Verfahren Bürsten, Schleifen, Beizen oder Strahlen angewendet werden, wobei beim Bürsten nur mit nichtrostenden Stahlbürsten gearbeitet werden darf. [29]

Für die Versuchsanlage werden die beiden Edelstähle mit den Nummern 1.4571 und 1.4307 gewählt. Wobei der Werkstoff 1.4571 für den Sumpftank, die Kolonne und den Flash zum

Einsatz kommt und 1.4307 für alle Rohrleitungen, Fittings und die meisten Armaturen eingesetzt wird. Die Werkstoffnummer bei Stählen besteht aus der Hauptgruppennummer 1 für Stahl, einer zweistelligen Nummer für die Stahlgruppe und einer weiteren zweistelligen Zählnummer ohne Rückschlüsse. Diese Zählnummer kann bei Bedarf auch noch erweitert werden. Stähle der „40er“-Stahlgruppennummer gehören zu den chemisch beständigen Stählen. [28]

Die beiden Kurznamen für die Werkstoffe sind X2CrNi18-9 für 1.4307 und X6CrNiMoTi17-12-2 für 1.4571. In dieser Kurzbezeichnung steht das vorangestellte X für hochlegierte Stähle. Danach folgt der Kohlenstoffgehalt, die Legierungselemente und der jeweilige Prozentsatz am Legierungselement. Wird kein Zahlenwert für ein Legierungselement angegeben, ist der Gehalt sehr niedrig. [17] Für den Edelstahl 1.4307 bedeutet dies einen Kohlenstoffgehalt von 2/100% also 0,02%, einen Chromanteil von 18% und einen Nickelanteil von 9%. Für den Edelstahl 1.4571 ergibt sich folglich ein Kohlenstoffgehalt von 0,06%, ein Chromgehalt von 17%, ein Nickelgehalt von 12%, ein Molybdängehalt von 2% und ein maximaler Titangehalt von 0,7%.

In der Tabelle 16 sind die wichtigsten Werkstoffkennwerte für die beiden Edelstahlsorten zusammengestellt. Die Daten wurden aus der Werkstoffdatenbank von ThyssenKrupp entnommen.

Tabelle 16: Werkstoffeigenschaften

	<b>1.4571</b>	<b>1.4307</b>
<b>Erzeugnisform</b>	Nahtloses Rohr	Geschweißtes Rohr
<b>Dehngrenze <math>R_{p0,2}</math> bei 20°C [N/mm<sup>2</sup>]</b>	190	200
<b>Dehngrenze <math>R_{p0,2}</math> bei 100°C [N/mm<sup>2</sup>]</b>	185	-
<b>Dehngrenze <math>R_{p0,2}</math> bei 150°C [N/mm<sup>2</sup>]</b>	175	-
<b>Zugfestigkeit <math>R_m</math> [N/mm<sup>2</sup>]</b>	490 – 690	500 – 700
<b>Dichte bei 20°C [kg/dm<sup>3</sup>]</b>	8,0	7,9
<b>Elastizitätsmodul bei 20°C [kN/mm<sup>2</sup>]</b>	200	200
<b>Wärmeleitfähigkeit bei 20°C [W/m K]</b>	15	15
<b>Spez. Wärmekapazität bei 20°C [J/kg]</b>	500	500
<b>Mittlerer Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen 20°C und 100°C [1/K]</b>	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$16,0 \cdot 10^{-6}$

### 3.3.2 Auslegung der Druckbehälter

Um die endgültig notwendige Form der Behälter und deren Festigkeit berechnen zu können, müssen zuerst basierend auf den verfahrenstechnischen Auslegungen in Kapitel 3.2 technische Skizzen der Behälter angefertigt werden. Dabei sind vor allem die äußeren Abmaße, die Anschlussdimensionen und der Einbauort zu berücksichtigen. Für den Sumpftank, die Kolonnen und den Flash werden die Längenangaben aus Tabelle 17 gezeigt.

Tabelle 17: Abmessungen für Auslegung

	Durchmesser [mm]	Höhe/ Länge [mm]
<b>Sumpftank</b>	600	1.600
<b>Kolonne</b>	219	3.200
<b>Flash</b>	100	360

Die Zusammenstellung der Behälter wurde gemeinsam mit der Firma SKM durchgeführt. Für das Anfertigen wurden ausschließlich Normteile verwendet. Die drei Behälter setzen sich aus folgenden Normteilen zusammen:

#### 1. Sumpftank:

- 1 Grundkörper aus DN600-Rohr
- 2 DN600 Klöpperböden (einer geschweißt, einer geflanscht)
- 2 DN200 Stutzen mit je einem glatten Schweißflansch
- 2 Stutzen mit M20 Innengewinde
- 2 Stutzen mit ½“ Außengewinde
- 1 Stutzen mit ½“ Innengewinde
- 1 Stutzen mit 1“ Außengewinde
- 1 Stutzen mit 1“ Innengewinde
- 1 Stutzen mit 1 ½“ Innengewinde

#### 2. Desorberkolonne:

- 1 Grundkörper aus DN200-Rohr
- 2 DN200 Schweißflansche
- 1 ebene Deckplatte in DN200
- 4 Stutzen mit ½“ Innengewinde
- 1 Stutzen mit 1“ Innengewinde
- 3 Stutzen mit 1 ½“ Innengewinde
- 1 Stutzen mit 1“ Innengewinde

### 3. Flash:

- 1 Grundkörper aus DN100-Rohr
- 1 kegelförmige Reduzierung von DN100 auf 1/2"
- 1 ebene Deckplatte in DN100
- 1 Stutzen mit 1/2" Außengewinde
- 2 Stutzen mit 2" Außengewinde

In Abbildung 51, Abbildung 53 und Abbildung 52 sind Zeichnungen der zusammengebauten Behälter zu sehen. In den Zeichnungen sind die Abmaße (in mm) eingetragen und alle Anschlüsse bezeichnet.

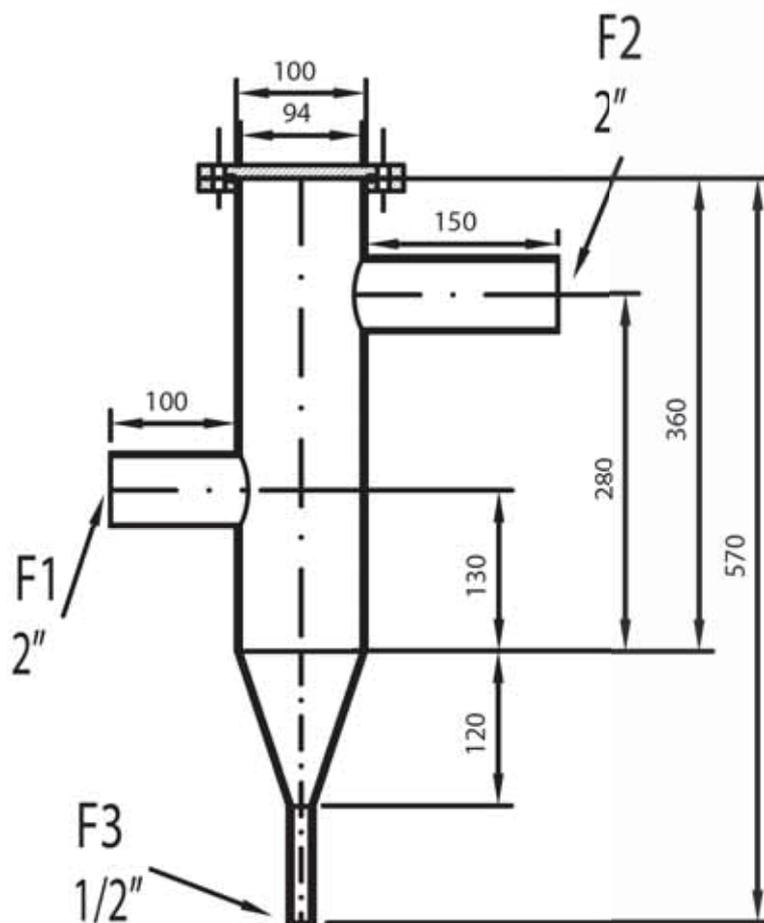


Abbildung 51: Skizze des Flashs

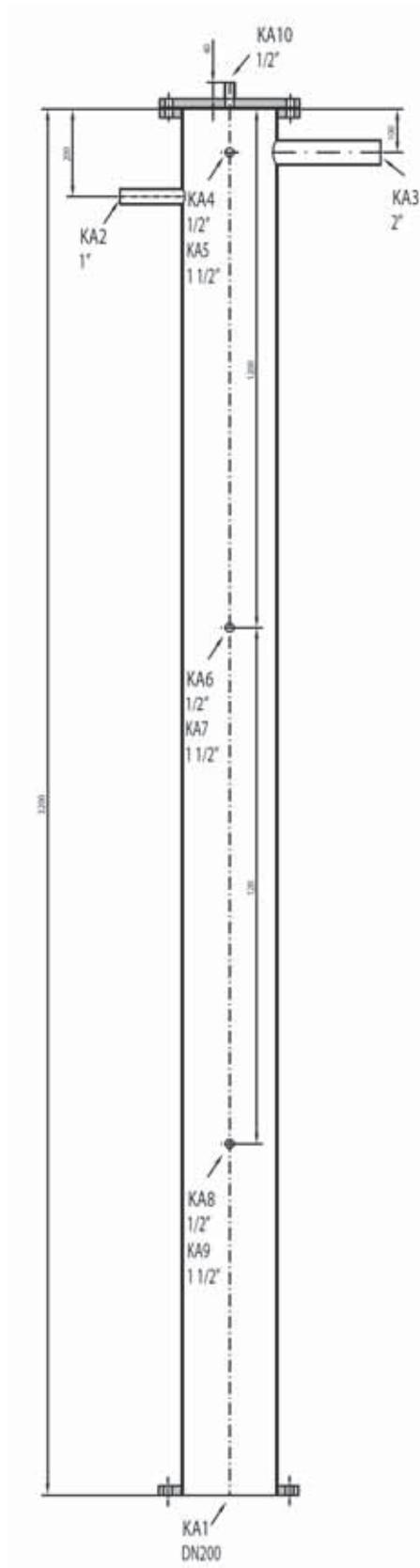


Abbildung 52: Skizze der Desorberkolonne

In Tabelle 18 sind alle Anschlüsse der Behälter mit ihren Bezeichnungen und den Dimensionen aufgelistet.

Tabelle 18: Anschlussliste

Behälter	Bezeichnung	Dimension
<b>Kolonne</b>	KA1	DN200
	KA2	1"
	KA3	2"
	KA4	1/2"
	KA5	1 1/2"
	KA6	1/2"
	KA7	1 1/2"
	KA8	1/2"
	KA9	1 1/2"
<b>Flash</b>	F1	2"
	F2	2"
	F3	1/2"
<b>Sumpftank</b>	ST1	DN200
	ST2	1"
	ST3	DN200
	ST4	1/2"
	ST5	M20
	ST6	1/2"
	ST7	1 1/2"
	ST8	M20
	ST9	1"
	ST10	1/2"

Um die Nachvollziehbarkeit der folgenden Berechnungen zu vereinfachen, werden in Tabelle 19 die Abmaße der verwendeten Normrohre zusammengefasst.

Tabelle 19: Maße der Normrohre

Dimension	Außendurchmesser [mm]	Innendurchmesser [mm]	Wandstärke [mm]
<b>DN600</b>	606	598	4
<b>DN200</b>	219,1	213,1	3
<b>2"</b>	60,3	53	3,65
<b>1 ½"</b>	48,3	41,8	3,25
<b>1"</b>	33,7	27,2	3,25
<b>½"</b>	21,3	16	2,65

### 3.3.3 Festigkeitsberechnungen

Mit den Dimensionen der Bauteile aus Kapitel 3.3 und den Werkstoffkennwerten können nun die Bauteile zunächst auf ihre statische Festigkeit berechnet werden. Für die Festigkeitsberechnungen wird nach den AD2000-Merkblättern vorgegangen, welche mit der Fachliteratur ergänzt werden. Der Festigkeitsnachweis konzentriert sich auf die kritischen Verbindungsstellen der verwendeten Komponenten, die Überprüfung der verwendeten Normteile – d.h. Auslegung nach Betriebsdruck – erfolgt im Rahmen der Auswahl der Normteilkomponenten. Es werden für die in Tabelle 19 angeführten Rohre bzw. Zylinder die Mindestwandstärken für den statischen Betriebszustand in der Anlage errechnet. Durch den Zusammenbau der Zylinderkörper zum endgültigen Bauteil und die dabei entstehenden Ausschnitte, kommt es in den Grundkörpern zu Verschwächungen. Die dadurch erhöhten notwendigen Mindestwandstärken werden ebenfalls berechnet.

Durch den ständigen Druckwechsel in der Versuchsanlage, ändern sich auch die Beanspruchungen zyklisch. Über die gesamte Lebensdauer der Anlage entsteht so eine signifikante Anzahl von Lastwechseln als dynamische Beanspruchung. Ergänzend zu dem statischen Festigkeitsnachweis wird deswegen eine Überprüfung auf Schwingbeanspruchung an einer kritischen Schweißnaht im Sumpftank durchgeführt.

Bei den Berechnungen kommen dabei folgende AD2000-Merkblätter zum Einsatz:

- B 0: Berechnung von Druckbehältern
- B 1: Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck
- B 2: Kegelförmige Mäntel unter innerem und äußerem Überdruck
- B 3: Gewölbte Böden unter innerem und äußerem Überdruck
- B 9: Ausschnitte in Zylindern, Kegeln und Kugeln
- S 2: Berechnungen auf Schwingbeanspruchungen

Für alle Berechnungen gelten dabei folgende Größen:

- **Berechnungstemperatur:**  $T=120^{\circ}\text{C}$
- **Berechnungsdruck:**  $p=2$  bar Überdruck; dies entspricht dem Druck, bei dem das Überdruckventil anspricht
- **Dehngrenze  $R_{p0,2}$  bei  $120^{\circ}\text{C}$ :**  $K=181$  N/mm<sup>2</sup>; interpoliert aus den Werten für  $100^{\circ}\text{C}$  und  $150^{\circ}\text{C}$ <sup>15</sup>
- **Sicherheitsbeiwert:**  $S=1,5$ ; Wert für Walz- und Schmiedestähle laut B0
- **Zuschlag für Wanddickenunterschreitung:**  $c_1=0$ ; für austenitische Edelstähle laut B0
- **Zuschlag für Abnutzung:**  $c_2=0$ ; für austenitische Edelstähle laut B0
- **Ausnutzung der zulässigen Berechnungsspannung in der Schweißnaht:**  $\nu=1$ ; laut

Mit diesen Grundgrößen erfolgt nun die Berechnung der erforderlichen Mindestwandstärken in den Bauteilen. Dabei gilt, dass die erforderliche Wanddicke ( $s$ ) immer kleiner sein muss als die auszuführende bzw. die ausgeführte Wanddicke ( $s_e$ ).

Es gilt dabei folgender Zusammenhang:

$$s = s_v + c_1 + c_2 \dots [\text{mm}] \quad \text{GI 45}$$

$s$  berechnet sich abhängig von der Form des Körpers nach unterschiedlichen Formeln. Für Zylinder- und Kugelschalen unter innerem Überdruck gilt:

$$s_v = \frac{D_a * p}{20 * \frac{K}{S} * \nu + p} \dots [\text{mm}] \quad \text{GI 46}$$

Die Nebenbedingung hierfür ist  $D_a/D_i < 1,2$ .

Für kegelförmige Mäntel unter innerem und äußerem Überdruck gilt das Merkblatt B2. Die Wandstärke errechnet sich aus folgender Formel:

$$s_{v,K} = \frac{D_K * p}{20 * \frac{K}{S} * \nu - p} * \frac{1}{\cos \varphi_1} \dots [\text{mm}] \quad \text{GI 47}$$

<sup>15</sup> Werte wurden aus dem Böhler Edelstahlhandbuch entnommen.

$\varphi_1$  steht dabei für den Öffnungswinkel des Kegels.

Für den Klöpperboden erhält man die Wandstärke aus dem Merkblatt B3:

$$s_{V,B} = \frac{D_a * p * \beta}{40 * \frac{K}{S} * v} \dots [\text{mm}] \quad \text{Gl 48}$$

Die Berechnungsbeiwerte  $\beta$  können im Bild 7 des Merkblattes abgelesen werden oder auch errechnet werden. Kommt es zu Ausschnitten im Grundkörper, erhöhen sich die erforderlichen Mindestwandstärken. Für Ausschnitte in zylindrischen Grundkörpern wird folgende Formel aus B9 angewendet:

$$s_{V,A} = \frac{D_a * p}{20 * \frac{K}{S} * v_A + p} \dots [\text{mm}] \quad \text{Gl 49}$$

Der Verschwächungsbeiwert  $v_a$  wird aus den Bildern im Anhang des Merkblattes entnommen und ist abhängig vom Verhältnis der Wandstärke des Grundkörpers zum Innendurchmesser des Grundkörpers und dem Verhältnis der beiden Innendurchmesser. Ist die ausgeführte Wandstärke geringer als die erforderliche Mindestwandstärke, muss eine Verstärkung in den Grundkörper eingefügt werden, deren Mindestbreite sich folgendermaßen errechnet:

$$b = \sqrt{(D_i + s_{V,A}) * s_{V,A}} \dots [\text{mm}] \quad \text{Gl 50}$$

Sollten mehrere Ausschnitte im selben Grundkörper vorhanden sein, müssen diese einen Mindestabstand  $l$  von größer als  $2*b$  besitzen. Die Mindestlänge des angeschweißten Stutzens erhält man aus:

$$l_s = 1,25 * \sqrt{(d_i + s_{V,S}) * s_{V,S}} \dots [\text{mm}] \quad \text{Gl 51}$$

Für einen Ausschnitt im Klöpperboden ändert sich der Berechnungsbeiwert gemäß AD-Merkblatt B3. Anhand dieser Formeln werden für die Bauteile der Versuchsanlage folgende Berechnungen durchgeführt:

#### 1. Desorberkolonne:

- Mindestwandstärke des zylindrischen Grundkörpers
- Mindestwandstärke eines 1“-Zylinders
- Mindestwandstärke eines 2“-Zylinders
- Verschwächung durch 1“-Ausschnitt

- Verschwächung durch 2“-Ausschnitt

## 2. Flash:

- Mindestwandstärke des Zylindrischen Grundkörpers
- Mindestwandstärke der kegelförmigen Reduzierung
- Verschwächung durch 1“-Ausschnitt
- Verschwächung durch 2“-Ausschnitt

## 3. Desorbersumpftank:

- Mindestwandstärke des Zylindrischen Grundkörpers
- Mindestwandstärke des Klöpperbodens
- Mindestwandstärke eines DN200-Zylinders
- Verschwächung des Grundkörpers durch 1“-Ausschnitt
- Verschwächung des Grundkörpers durch 2“-Ausschnitt
- Verschwächung des Grundkörpers durch DN200-Ausschnitt
- Verschwächung des Klöpperbodens durch DN200-Ausschnitt

Die Berechnungen werden mit dem Computeralgebrasystem Mathcad 14.0 durchgeführt und sind im Anhang III dokumentiert. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20: Ergebnisse der statischen Berechnungen

Berechnungen			Ausgeführte Wandstärke
<b>Kolonne</b>	Mindestwandstärke DN200	0,272 mm	3 mm
	Mindestwandstärke 1“	0,042 mm	3,25
	Mindestwandstärke 2“	0,075 mm	3,65
	1“-Ausschnitt	0,446 mm	3 mm
	2“-Ausschnitt	0,604 mm	3 mm
<b>Flash</b>	Mindestwandstärke DN100	0,124 mm	3 mm
	Mindestwandstärke	1,792 mm	3 mm

	Kegel		
	2"-Ausschnitt	0,31 mm	3 mm
<b>Sumpftank</b>	Mindestwandstärke DN600	0,752 mm	4 mm
	1"-Ausschnitt	1,003 mm	4 mm
	DN200-Ausschnitt im Grundkörper	2,98 mm	4 mm
	DN200-Ausschnitt im Klöpferboden	2,87 mm	4 mm

Wie man aus der Tabelle erkennen kann, ist die größte statische Mindestwandstärke beim DN200-Ausschnitt im zylindrischen Sumpfkörper notwendig. Da die Anlage in ihrer Betriebszeit auch dynamischen Lastwechseln durch das Hoch- und Niederfahren der Anlage unterworfen ist, wird für diese kritische Stelle eine Berechnung auf Schwingbeanspruchung durchgeführt.

Nimmt man an, dass an 20 Versuchstagen im Monat vier vollständige Lastwechsel von 1 bar auf 2 bar Überdruck erfolgen, so ergibt das bei einer Betriebsdauer von 10 Monaten pro Jahr auf 15 Jahren insgesamt 12.000 Lastwechsel. Dies entspricht dem Zeitfestigkeitsbereich auf der Wöhlerlinie (vgl. Anhang S2). Anhand des Merkblattes S2 wird nun gezeigt, dass diese tatsächliche Lastspielzahl (N) unter der maximal zulässigen Lastspielzahl für die ausgewählte Verschwächung liegt.

Dazu wird mit Hilfe des Softwarepakets Abacus 6.9 am Maschinenbauinstitut eine Finite Elemente Simulation am Ausschnitt des Sumpftanks vorgenommen. Mit Hilfe des Programms wird eine linear elastische Berechnung der von-Mises Vergleichsspannungen bei 1 bar und 2 bar durchgeführt. Die Spannungsplots der beiden Drücke liefern die Ober- bzw. Unterspannungen ( $\sigma_o$  bzw.  $\sigma_u$ ). Die Spannungsschwingbreite ( $2 \cdot \sigma_{va}$ ) errechnet sich dann aus der Differenz der beiden Spannungen.

Abbildung 54 zeigt einen Viertelschnitt des DN200-Stutzens am Sumpftank. Man erkennt, dass die maximale Vergleichsspannung am Nahtübergang der Kehlnaht auftritt.

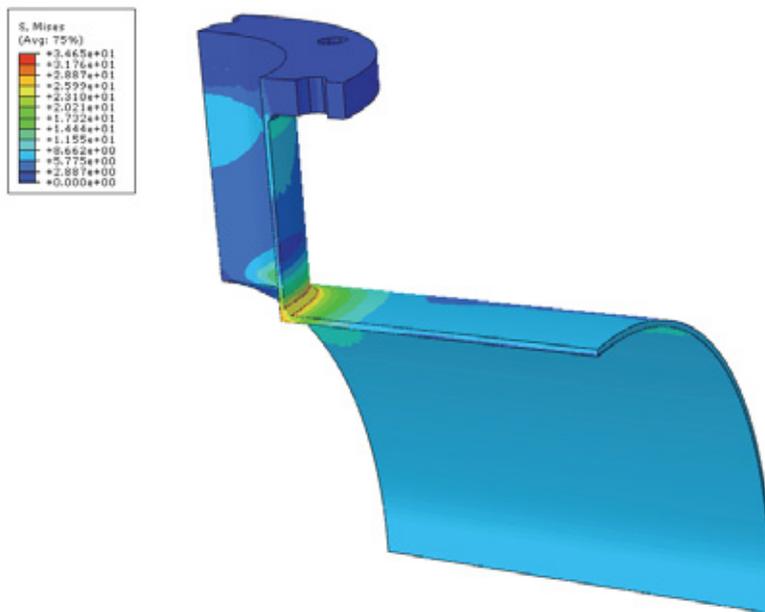


Abbildung 54: Maximale Vergleichsspannung am Nahtübergang

In Abbildung 55 und Abbildung 56 sind zwei Innenansichten der Spannungsplots bei 1 bar und 2 bar gezeigt. Aus der Legende lassen sich die jeweils maximalen Vergleichsspannungen ablesen. Für 1 bar beträgt die maximale Spannung  $69,3 \text{ N/mm}^2$  ( $\sigma_o$ ) und für 2 bar  $34,7 \text{ N/mm}^2$  ( $\sigma_u$ ). Die Spannungsschwingbreite ist demnach  $34,6 \text{ N/mm}^2$  und die Amplitudenspannung ( $\sigma_a$ )  $17,3 \text{ N/mm}^2$ .

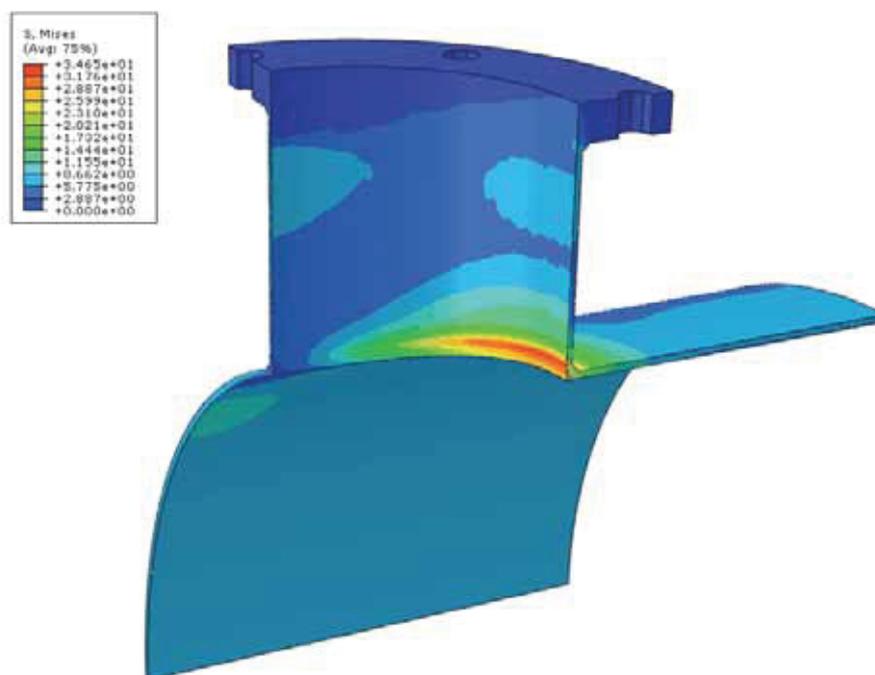


Abbildung 55: Spannungsplot bei 1bar Überdruck

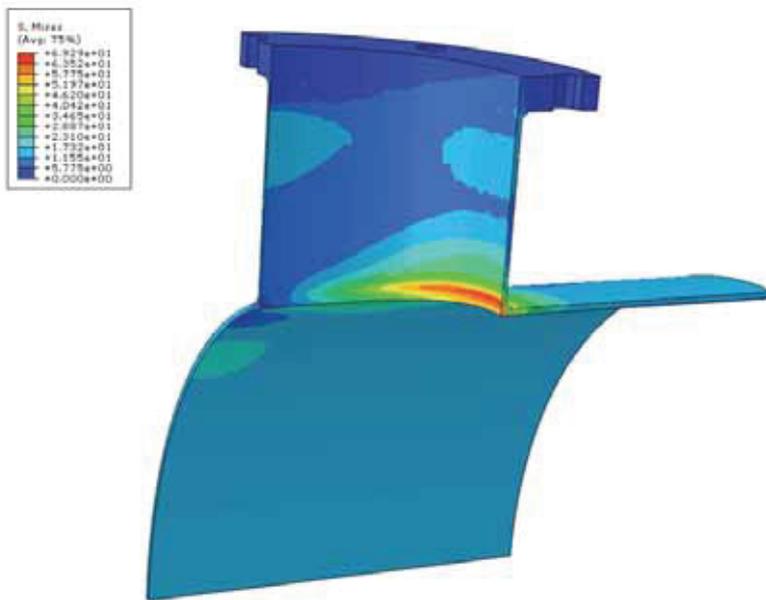


Abbildung 56: Spannungsplot bei 2 bar Überdruck

Mit diesen Werten wird anhand des Merkblattes die zulässige Lastspielzahl ( $N_{zul}$ ) bei bekannter Spannungsschwingbreite für geschweißte Bauteile errechnet.

In Abbildung 57 ist zusätzlich noch ein Spannungsplot des gesamten Stutzens gezeigt und in Abbildung 58 sieht man ein Foto des Sumpftanks mit dem aufgesetzten DN-200 Stutzen nach der Endmontage.

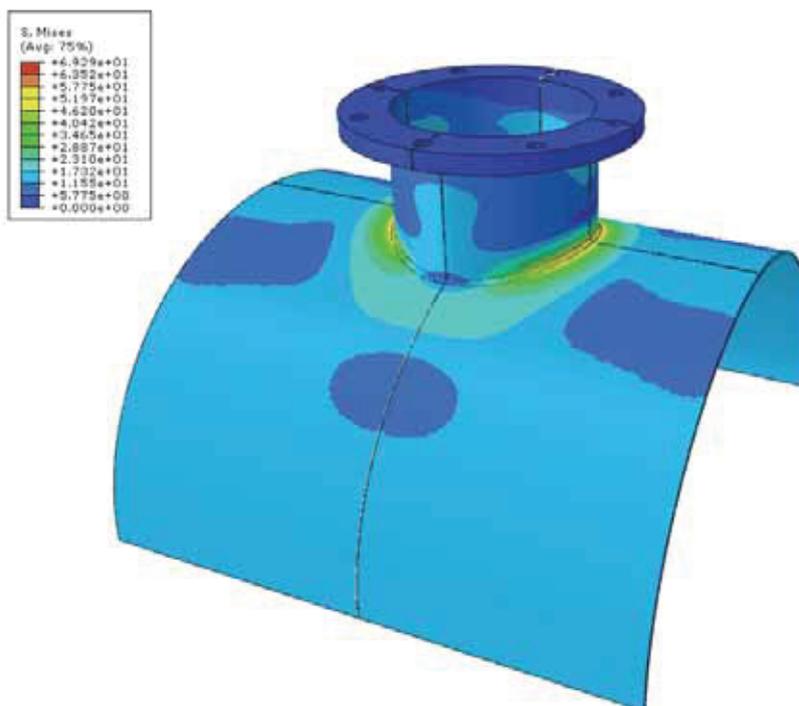


Abbildung 57: Spannungsplot des vollständigen Bauteils



Abbildung 58: Sumpftank mit DN200-Stutzen

Die Berechnung der zulässigen Lastwechsel erfolgt über die Formel:

$$N_{zul} = \frac{B1}{(2 * \sigma_a^*)^3} \quad \text{GI 52}$$

B1 ist eine Konstante, die von der Bauteilform und der Art der Schweißnaht abhängt. Die Werte sind in Tafel 4 tabelliert. In Gleichung 53 wird die errechnete Spannungsschwingbreite eingesetzt. Den Korrekturfaktor  $f_T$  kann man für austenitische Stähle und bei einer Temperatur von 120°C laut Anhang als 1 annehmen.

$$2 * \sigma_a^* = \frac{2 * \sigma_a}{f_d * f_T} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{GI 53}$$

Der zweite Korrekturfaktor  $f_d$  errechnet sich aus untenstehender Formel und der tatsächlichen Lastspielzahl. Für  $F_d$  wird 0,64 angenommen.

$$f_d = F_d^{\frac{0,4343 * \ln N - 2}{4,301}} \dots [\text{mm}] \quad \text{GI 54}$$

Die detaillierten Berechnungen werden mittels Mathcad erstellt und sind im Anhang angeführt. Sie liefern als Ergebnis eine maximal zulässige Lastspielzahl von 1,76 Mio. Lastwechseln. Demgegenüber steht eine Lastwechselzahl von zwölftausend Zyklen auf eine Laufzeit von fünfzehn Jahren.

#### **Zusammenfassung der Festigkeitsüberprüfung:**

Die Komponenten der erweiterten Versuchsanlage wurden einem statischen Festigkeitsnachweis zur Überprüfung der Mindestwandstärke unterzogen. Es zeigt sich, dass die verwendeten Wandstärken einen Korrosionszuschlag der Anlage von bis zu einem Millimeter unterstützen. Für die höchstbeanspruchte Stelle des zylindrischen Ausschnitts im Grundkörper des Sumpftanks wurde eine dynamische Schwingfestigkeitsberechnung nach AD-Merkblatt S2 durchgeführt. Die schwingfeste Bemessung zeigt, dass die dimensionierte Versuchsanlage zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung auch für den Betrieb mit wesentlich höheren Lastwechselzahlen, d.h. kürzeren Betriebsintervallen und damit höherfrequenten Beanspruchungen, geeignet ist.

### 3.4 Aufstellungsplan

Um den Aufbau zu erleichtern und vor allem um die Bestellmengen für Rohrleitungen und Kabel abschätzen zu können, muss ein Aufstellungsplan für die neuen Bauteile im Technikum angefertigt werden. Dazu wird die Fläche rund um den SO<sub>2</sub>-Wäscher freigeräumt und vermessen. Die Außenabmessungen der bestehenden Anlage wird ebenfalls im Plan eingezeichnet. Die neuen Anlagenteile werden so hinzugefügt, dass sich eine möglichst einfache und möglichst kurze Rohrleitungsführung ergibt. Außerdem soll ein leichter Zugang zu allen Teilen möglich sein. Der Aufstellungsplan ist in Abbildung 59 gezeigt.

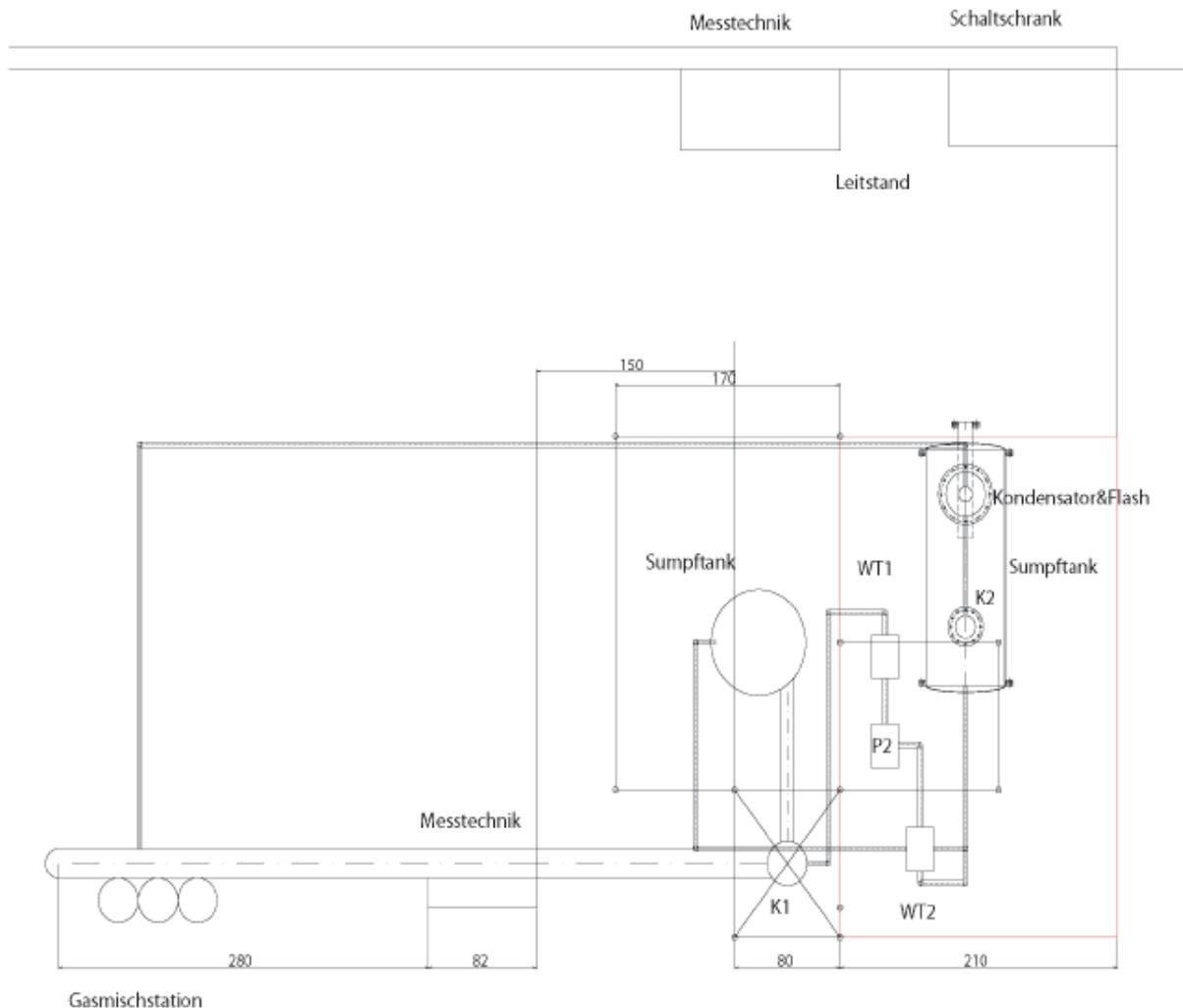


Abbildung 59: Aufstellungsplan Grundriss (Längen in cm)

## 4 Aufbau der Anlage

Nachdem alle Bauteile ausgelegt waren und alle Bestellungen aufgegeben waren, konnte mit den Aufbauarbeiten begonnen werden. Die Aufbauarbeiten setzten sich grob aus folgenden 4 Phasen zusammen:

- Stahlbauarbeiten (inklusive der Kühlwasserinstallation)
- Einbau und Anschluss der Mess- und Regeltechnik (soweit nicht schon während der Stahlbauphase notwendig)
- Elektroinstallation des Heizflansches
- Lookout-Programmierung

### 4.1 Stahlbauarbeiten

Der grundlegendste Arbeitsschritt beim Aufbau der Versuchsanlage war das Verbinden der Apparate, Behälter und Ventile mit Rohrleitungen. Diese mussten mit den in Kapitel 3 beschriebenen Verbindungsmöglichkeiten zusammengesetzt werden. Da aber gerade das Dichtschweißen von Edelstahlrohrleitungen besonderes Know-How und Equipment erfordert, welches am Technikum nicht vorhanden ist, wurde von der Stahlbaufirma SKM, ein erfahrener Schweißer angefordert. SKM war auch für die Fertigung der anderen Behälter verantwortlich und daher mit dem Projekt schon vertraut.

#### **Aufstellen von Kolonne und Sumpftank**

Als erster Schritt wurden die gelieferten Pall-Ringe in das obere Ende der Desorberkolonne geschüttet. Die Kolonne wurde bis knapp unter der Einlassöffnung des beladenen Absorptionsmediums angefüllt, was eine gesamte Füllkörperhöhe von 3 m entspricht. Danach wurde sie mit Hilfe des Krans angehoben und auf den Anschlussstutzen des Sumpftanks gestellt. Dieser war zuvor bereits mit Hilfe eines Hubwagens an seinen vorgesehenen Aufstellungsort gebracht worden. Die Kolonne wurde am Flansch mit Sechskantmuttern befestigt. Um ein Umkippen zu verhindern, wurde das Seil des Krans weiterhin an der Kolonne belassen und ein wenig auf Zug beansprucht. Zuletzt wurde noch der Heizflansch in den für ihn vorgesehenen Stutzen am Sumpftank eingeführt und mit Sechskantschrauben angeflanscht. In Abbildung 60 ist der fertig installierte Heizflansch gezeigt. Die Starkstromkabeln sind in diesem Bild bereits angeschlossen.



Abbildung 60: Installierter Heizflansch

### **Aufbau des Gerüsts**

Nun wurde mit dem Aufbau eines Gerüsts um die Kolonne und den Sumpftank herum begonnen. Dabei wurde versucht, die bestehende Gerüstkonstruktion der alten Anlage möglichst fortzusetzen. Es wurden zwei vertikale Stützen aufgestellt, an denen in zwei Ebenen horizontale Träger angebracht wurden.



Abbildung 61: Gerüst, Kolonne und Sumpftank

Die horizontalen Träger wiederum wurden mit der alten Gerüststruktur verbunden, um so einen einheitlichen Aufbau zu erhalten. Die erste horizontale Ebene befindet sich in einer Höhe von 2,40 m. Auf ihr wurden links und rechts der Kolonne und parallel zum Sumpftank Holzbalken mit Schellen befestigt, um eine Arbeitsplattform zu bilden. Die zweite horizontale Ebene befindet sich in einer Höhe von 3,4 m und dient somit auch als Handlauf und Geländer für die Arbeitsplattform. In Abbildung 61 erkennt man die bereits isolierte Desorberkolonne mit Sumpftank sowie den Gerüstaufbau mit der Arbeitsplattform. Auf Höhe der ersten und zweiten Ebene wurden an der Kolonne Rohrschellen mit Gewinde montiert. An der jeweils gegenüberliegende Seite wurden an den Querträgern ebenfalls Schellen angebracht. In die Rohrschellen wurden dann zwei Gewindestangen eingeschraubt, welche durch Bohrungen in den Schellen am Querträger geführt und mit Sechskantmuttern verspannt wurden. Somit war die Kolonne gegen seitliches Umkippen gesichert, und das Seil zum Kran konnte entfernt werden.

### **Installation der Rohrleitungen**

Als nächstes wurde ein Brett auf Höhe der zweiten Ebene auf zwei Querträgern mit Schellen befestigt. Auf dieses wurde der Kondensator mit Hilfe des Krans gehoben und so aufgestellt, dass der Gasaustritt der Kolonne genau in einer Linie mit dem Gaseintritt des Kondensators lag. Dieser wurde mit Schrauben am Brett befestigt. Nun wurde die Rohrleitung S5 angefertigt. Dazu wurde ein 2“-Holländer auf den Gasaustrittsstutzen der Kolonne geschraubt. Alle Gewinde wurden mit PTFE-Dichtungsband<sup>16</sup> abgedichtet. Der Holländer wurde mit einem Doppelnippel mit einem Kugelhahn verbunden. An diesen wiederum wurde ein 2“-Rohr mit Außengewinde befestigt. Zur Verbindung mit dem Kondensator wurde ans andere Ende ein Bördel mit Losflansch angeschweißt. Der Losflansch wurde auf die vier Gewindestangen des Kondensators geschoben und an der Dichtfläche eine Viton-Flachdichtung angebracht. Danach wurde der Flansch mit Sechskantmuttern und Beilagscheiben befestigt.

Der fertig installierte Kondensator ist in Abbildung 62 gezeigt. Für die 2“-Rohrleitung S6 vom Kondensator zum Flash wurde ebenfalls wie oben beschrieben ein Losflansch an den Kondensator angeschraubt. Die Rohrleitung führt dann über ein kurzes horizontales Stück, einen angeschweißten 90°-Bogen und ein vertikales Rohrstück nach unten zum Flash. Am Ende des vertikalen Stücks wurde ein Nippel angeschweißt, auf dem ein Holländer befestigt wurde, welcher den S6 mit dem Flash verbindet.

---

<sup>16</sup> PTFE = Polytetrafluorethylen



Abbildung 62: Kondensator

Im flachen Deckel des Flashs war eine Nut eingefräst worden, in die eine O-Ringdichtung eingelegt wurde. Der Deckel wurde mit Sechskantschrauben geschlossen und der Flash über den Holländer befestigt.

Um den Flash abzustützen wurde nun zuerst die S10 Rohrleitung mit dem Syphon gebaut. Die Leitung besitzt einen  $\frac{1}{2}$ "-Durchmesser. Am unteren Auslass des Flash wurde auf den Stutzen mit Außengewinde ein Kugelhahn geschraubt. Daran wurde über einen Holländer der Syphon befestigt. Das Schauglas im Syphon wurde vorübergehend durch ein gleich großes Edelstahlrohr ersetzt. Am anderen Ende des Syphons wurde ebenfalls ein Holländer befestigt. Mit diesem wurde der Syphon am Anschlussstutzen des Sumpftanks angeschraubt. Am Stutzen war zusätzlich auch noch ein Kugelhahn installiert worden, um die leichte Demontage des Syphons zu ermöglichen. Beide Bauteile sind in nachfolgenden Abbildungen 63 und 64 gezeigt.



Abbildung 63: Flash



Abbildung 64: Syphon

Nachdem der Kernbereich um die Desorberkolonne fertig gestellt war, wurde mit der Verknüpfung des Desorberteils mit dem Absorberteil begonnen. Zuerst wurde dazu die Rohrleitung S11 vom Sumpftank zum Wärmetauscher gebaut. Am Auslassstutzen des Sumpftanks war bereits von SKM ein versperrbarer Kugelhahn montiert worden. Über einen 1“-Doppelnippel wurde an diesem ein Bördel und daran wieder über einen Doppelnippel ein redundantes T-Stück mit Innengewinde angebracht. Über drei verschweißte 90°-Bögen führte die Rohrleitung zum warmen Eintrittsstutzen in den Wärmetauscher. Kurz vor dem Eintritt wurden ein T-Stück für den Temperatursensor TR-7 und ein 1“-Kugelhahn montiert. An den Kugelhahn wurde eine Erweiterung auf 2“ angebracht und an diese ein Bördel mit Losflansch geschweißt, um die Rohrleitung mit dem Wärmetauscher verbinden zu können. Diese Kombination aus Bördel – Losflansch – Reduzierung/Erweiterung – Kugelhahn – T-Stück wurde bei allen vier Anschlüssen des Wärmetauschers verwendet.



Abbildung 65: Wärmetauscher mit Anschlüssen

Vom Austrittsstutzen des Wärmetauschers führt die S12 Leitung zur Grundfos-Pumpe. In diese Leitung wurde zusätzlich zum T-Stück für den TR-8, einem T-Stück mit einem 1/2“-Ablasshahn und einem redundanten T-Stück auch das Ventil V1 eingebaut. Dieses musste über zwei Reduzierungen und zwei Holländer integriert werden, da es über 3/4“-Anschlüsse verfügt. In Abbildung 66 sind beide Pumpen gezeigt.

Von der Grundfos-Pumpe weg führt die 1“-Leitung S13. Der Anschluss bei der Pumpe erfolgte mittels Holländer. Kurz vor dem Eintritt in den Rückkühler wurde ein weiterer Holländer und ein T-Stück für den TR-9 angebracht. Der Anschluss an den Rückkühler erfolgte über einen Doppelnippel und eine Reduzierung auf 3/4“, welches die Dimension des Anschlussstutzen des Rückkühlers ist. Der Rückkühler mit all seinen Anschlüssen ist auf dem Foto in Abbildung 67 zu sehen.



Abbildung 66: Schmitt-Pumpe (links) und Grundfos-Pumpe (rechts)



Abbildung 67: Rückkühler

Danach wurde die Verbindung des Rückkühlers mit dem Anschlussstutzen zur Sprühdüse im Absorber fertiggestellt. Der Rückkühler selbst hat relativ kleine Dimensionen und eine geringe Masse und konnte deswegen idealerweise direkt neben dem Absorber auf einem bereits von der alten Anlage bestehenden Plateau platziert werden. Er musste dort auch nicht fixiert werden. Die S14 Rohrleitung ist also relativ kurz und beinhaltet lediglich einen 1“-Kugelhahn, einen Holländer zum Abschließen des Rückkühlers und den Temperatursensor TR-10. Ein Foto des fertigen Rückkühlers sieht man in Abbildung 67. Am linken Bildrand erkennt man die Temperaturmessstellen mit den Thermoelementen.

Anschließend wurden die Zuleitung und Ableitung für die beladene MEA-Lösung zum Wärmetauscher zusammengebaut. Da der Aufstellungsort der Schmitt-Pumpe durch deren Lage zum Durchflusssensor QIR-1 fixiert war, konnte die Position relativ zum Sumpftank des Absorbers nicht verändert werden. Die vorhandene Kunststoffleitung wurden ersetzt. Zwischen dem Tank und der Pumpe war aber zu wenig Spielraum, um eine Edelstahlleitung zu

installieren. Deswegen wurde für die S2 Leitung ein 2“-Panzerschlauch eingebaut, den man leicht entsprechend anpassen konnte. Das Anschließen des Panzerschlauchs an der Pumpe musste aber mit besonderer Vorsicht durchgeführt werden, um nicht das Kunststoffgewinde der Pumpe zu beschädigen. Am Druckstutzen der Pumpe wurde am Außengewinde eine Hälfte eines Holländers mit der PTFE Flachdichtung befestigt und an diesen ein gerades Rohr mit Außengewinde angeschraubt. Auf dessen anderes Ende wurde ein 1“-Bördel mit Losflansch angeschweißt. Dieser wurde am QIR-1 befestigt. Die Länge der Zuleitung zum Durchflusssensor war länger als die geforderte Mindestlänge der Zulaufstrecke von  $6 \cdot d_i$  und somit für die Durchflussmessung ausreichend. Die Verbindung des Durchflusssensors mit der Leitung S3 war ebenfalls geflanscht und der kalte Eintritt in den Wärmetauscher war genauso gestaltet wie die Anschlüsse auf der warmen Seite mit einer Kombination aus Bördel – Losflansch – Reduzierung/Erweiterung – Kugelhahn – T-Stück. Die längste Rohrleitung der Anlage ist die Verbindungsleitung S4 vom kalten Austritt aus dem Wärmetauscher zum Eintritt in den Desorber am Kopf der Kolonne. Hier wurden zwei Temperatursensoren in T-Stücken installiert (TR-2 und TR-3). Zusätzlich wurde auch noch ein Probenahmestutzen mit Kugelhahn in einem weiteren T-Stück eingebaut.

Die letzten verbleibenden Edelstahlleitungen, die noch zu installieren waren, waren die CO<sub>2</sub>-Rückleitung zur Gasmischstrecke (S7 und S9) und die Abzweigung zur Umgebungsluft S8. In die kurze 2“-Anschlussleitung vom Flash zur Verzweigung mussten auf engem Raum sehr viele Rohrleitungselemente verbaut werden. Am Anschlussstutzen des Flashs wurde auf das 2“-Außengewinde ein 90°-Bogen geschraubt, an diesen dann ein Doppelnippel und ein T-Stück zur Aufnahme des Drucksensors PIC-2. Daran anschließend kam ein kurzes gerades Rohrstück mit Außengewinde auf beiden Enden, danach ein 2“-Kugelhahn, ein Doppelnippel und dann wieder ein T-Stück. Da das Ventil V3 nur einen Durchmesser von 1/8“ und das Ventil V4 nur einen Durchmesser von 3/4“ besitzt, musste unmittelbar nach dem T-Stück mit Hilfe mehrerer Reduzierstücke von 2“ auf den jeweiligen Durchmesser reduziert werden. Diese starken Verengungen stellen sowohl strömungstechnisch als auch regelungstechnisch ein Problem dar. Sie waren aber nicht zu vermeiden, da beide Ventile für die geforderten Durchflüsse nur in diesen Dimensionen erhältlich waren. Die Rohrleitung S8 wurde unmittelbar nach dem Ventil wieder auf 2“ erweitert und wurde über zwei lange Edelstahlleitungen an die bereits vorhandene Abluftleitung im Technikum angeflanscht. Der Austritt aus dem Flash und die Verzweigungsstelle von S7, S8 und S9 sind in Abbildung 68 und Abbildung 69 gezeigt.



Abbildung 68 : CO<sub>2</sub>-Rückleitung beim Austritt aus dem Flash

In Abbildung 68 blickt man oben auf den Austritt aus dem Flash. Links im Bild sieht man die 2"-Leitung aus dem Kondensator und am rechten unteren Bildrand erkennt man den Drucksensor PIC-2 für die Vordruckregelung.



Abbildung 69: Verzweigungsstelle von S7 (links), S8 (links unten) und S9 (rechts)

In die Rückleitung S9 wurden nach dem Ventil zuerst ein 3/4"-T-Stück mit Kugelhahn zum Ablassen von Kondenswasser eingebaut. Um ein Abknicken der Ventilgewinde zu verhindern, wurden die Rohrleitungen mit Rohrschellen abgestützt. Nach dem Kugelhahn folgte die Erweiterung auf 2" mittels einer 2"-Reduzierung. An diese Reduzierung wurde dann ein Panzerschlauch angeschlossen, um die nachfolgende Rohrleitung in einem Winkel von ca. 25° nach oben neigen zu können. Dieser leichte Anstieg wurde eingebaut, um eventuell im CO<sub>2</sub>-Strom verbliebenes Wasser, das auskondensiert, zum Ablasshahn zurückzuleiten. Über einen weiteren Panzerschlauch wurde die Rohrleitung in die Vertikale gedreht und über ein gerades Rohrstück, einen 90°-Bogen und einen Bördel mit Losflansch an die aus dem Absorberkopf kommende Gasrückleitung zur Mischstrecke angeflanscht. Somit war der CO<sub>2</sub>-Kreis geschlossen und alle Schweißarbeiten waren abgeschlossen.

## Anschluss des Kühlwassers

Zuletzt mussten noch Anschlüsse zu den Kühlkreisläufen des Kondensators und des Rückkühlers gelegt werden. Das Kühlwasser wurde aus einem normalen Leitungswasseranschluss neben der Versuchsanlage entnommen. Da die Leitung nur Wasser und keine korrosiven Lösungen führen sollte, wurden einfache, temperaturbeständige Kunststoffschläuche verwendet. Zum Anschließen wurden einfache  $\frac{3}{4}$ "-Messing-Fittinge gekauft. Das gesamte Kühlwasser wird mit einer einzigen Leitung aus dem Wasserhahn entnommen. Kurz vor dem Kondensator wird die Leitung mit einem Y-Stück in zwei Kühlleitungen aufgeteilt. Eine führt zum Kondensator und die andere zum Rückkühler. Vor dem Eintritt in den Kondensator wird das Messing-Ventil V2 an den Schlauch angeschraubt. Am Austritt des Ventils wird eine Erweiterung auf 1" angebracht und daran ein Kugelhahn. Da der Durchmesser der Anschlussstutzen zum Kondensator 2" beträgt, muss nach dem Kugelhahn noch auf 2" erweitert werden. Dazu wurden die vorhandenen Edelstahl-Fittinge verwendet. Dasselbe musste auch auf der Kühlwasseraustrittsseite durchgeführt werden. Der Anschluss des Rückkühlers wurde nach demselben Prinzip vorgenommen, nur dass hier direkt an die  $\frac{3}{4}$ "-Anschlüsse des Rückkühlers angeschlossen werden konnte.

Das erhitzte Kühlwasser aus beiden Wärmetauschern wird wieder über ein Y-Stück in einer gemeinsamen Leitung vereinigt und über einen Schlauch mit 1"-Durchmesser zu einem Kanalanschluss im Technikum geführt und dort entsorgt. Die Abbildung 70 zeigt die Verzweigungen der Kühlwasser Zu- und Rückleitung. In den gelben Schläuchen wird das kalte Wasser geführt, und das erhitzte Wasser wird in den temperaturbeständigeren blauen Schläuchen zurückgeleitet.



Abbildung 70: Kühlwasserverteilung

Mit dem Fertigstellen der Kühlwasserleitungen waren alle Leitungen der Versuchsanlage verlegt und es konnte mit dem Einbau und dem Anschließen der Messtechnik begonnen werden.

## 4.2 Installation der Mess- und Regeltechnik

Der Einbau der Sensoren war relativ unkompliziert. Alle Sensoren hatten festgelegte Plätze, an denen Einbaustutzen mit Innengewinde vorgesehen worden waren. Somit brauchten nur die Gewinde der Sensoren mit PTFE-Dichtungsband umwickelt und die Sensoren mit einer Armaturen- oder Rohrzanze eingeschraubt werden. Für die Thermoelemente waren an geeigneter Stelle T-Stücke in die Rohrleitungen eingebaut worden. Zum Einbau wurden die Thermoelemente in eigene Fixierungen eingeschoben, welche ein 1/8"-Außengewinde besitzen. Die Fixierungen wurden so auf den Thermoelementen platziert, dass beim endgültigen Festziehen, die Spitze des Thermoelements in der Mitte der jeweiligen Rohrleitung lag bzw. beim TR-4 möglichst weit in die Kolonne hineinragte. Die meisten Einbaustellen für Thermoelemente waren 1"-T-Stücke (TR-1, TR-2, TR-3, TR-7, TR-8, TR-9, TR-10). Lediglich der TR-4 und TR-6 wurden in 1/2"-Stutzen eingebaut und der TR-5 in ein 2"-T-Stück. Um also die Thermoelemente mit ihren Fixierungen einbauen zu können mussten bei 1/2" eine Reduzierung, bei 1" zwei Reduzierungen und bei 2" drei Reduzierungen verwendet werden. Jede einzelne dieser Schraubverbindungen stellte natürlich eine potentielle Leckagestelle dar und musste deswegen gut mit PTFE-Band abgedichtet werden.

Da die Ventile bereits alle im Zuge des Rohrleitungsbaus installiert worden waren, konnte nun mit dem Anschließen der Ventile und Sensoren an die Mess- und Steuerkabeln begonnen werden. Für die Thermoelemente musste dazu, wie zuvor beschrieben, ein spezielles, zweipoliges Thermoelementkabel verwendet werden. Für die Ventile und die übrigen Sensoren wurde ein vier-phasiges geschirmtes Mess- und Steuerkabel verwendet. Je nach Art und Anforderung des Sensors bzw. des Ventils wurden dann zwei, drei oder vier Pole verwendet.



Abbildung 71: Leitstand der Versuchsanlage

Alle Kabel wurden zu einem Schaltschrank neben dem Leitstand der Versuchsanlage (Abbildung 71) gezogen, wo sie an drei verschiedene National Instruments (NI) I/O-Modulen

angeschlossen wurden. Um die I/O-Module mit der Lookout Software am Computer der Steuerwarte zu verbinden wurde im Schaltschrank ein NI FP1001 Network Interface installiert. Zur Messung der Thermoelementsignale wurde ein FP-TC-120 Thermoelementmodul eingebaut. Es besitzt acht Kanäle mit 16-bit-Auflösung. Weiters wurde für die Messsignale der Drucksensoren, der Alarme und des Füllstandsensors ein FP-AI-110 Analogeingangsmodul mit acht Spannungs- und Stromeingängen angehängt. Für die Steuerung der Ventile wurde ein FP-AO-200 Analogausgangsmodul mit ebenfalls acht Kanälen installiert. Es kann mit Steuerstromsignalen im Bereich von 4 bis 20mA und 0 bis 20 mA arbeiten.

Abbildung 72 zeigt einen Blick in den neu bestellten Schaltschrank mit den National Instrument Modulen links unten und der Stromversorgung links oben. Die Kabel der Ventile und Sensoren sind hier bereits angeschlossen. Die roten Kabel gehören zu den Thermoelementen und die weiß-grauen Kabel versorgen die Sensoren und Ventile.



Abbildung 72: Schaltschrank mit National Instruments Modulen

Um ein Chaos beim Ziehen der Kabel zu vermeiden wurden die bereits von der alten Anlage vorhandene Kabeltasche verwendet, die zu einem anderen Schaltschrank neben der Steuerwarte führt. Zum anderen wurden Kabel von Sensoren aus einem gemeinsamen Bereich der Anlage zusammengefasst, mit Kabelbindern verbunden und durch aufgeklebte oder angeschraubte Kunststoffrohre zur Kabeltasche geführt. Alle Enden der Kabel waren mit der Bezeichnung des dazugehörenden Sensors markiert, wodurch keine Verwechslungen entstehen konnten.

An den Thermoelementen und den dazugehörenden Kabeln wurden einfache Steckverbindungen montiert, mit denen Kabel und Sensoren verbunden werden konnten. Der Anschluss der Sensoren erfolgte nach dem jeweiligen Handbuch. Für die Ventile waren Steuereinheiten mitgeliefert worden, welche auf Steckverbindungen an den Ventilen montiert

wurden. Die Kabel wurden in den Anschlussbuchsen der Steuereinheiten verdrahtet. Zuletzt wurden alle Kabel an den jeweiligen Stellen an den Modulen angeschlossen.

### 4.3 Anschluss des Heizflansches

Da der Heizflansch eine elektrische Leistung von 90 kW besitzt, musste er von einem Elektroinstallationsunternehmen ans Stromnetz angeschlossen werden. Von einem separaten Schaltschrank aus mussten zwei Starkstromkabel über einen Metallträger zum Heizflansch verlegt werden. An der Versuchsanlage selbst wurden die Kabel am Gerüst befestigt und zur Anschlussbuchse am Heizflansch geführt, wo sie an den entsprechenden Klemmen vom Fachunternehmen verdrahtet wurden.



Abbildung 73: Schaltschrank mit Thyristor

Um die Heizleistung variieren zu können, wurde im Schaltschrank ein Thyristor installiert, der über ein vier-phasiges Kabel von der Messwarte aus mit Steuersignalen versorgt wird. Thyristoren sind elektrisch schaltbare Bauelemente, die über Phasenanschnittsteuerung oder Impulsgruppenbetrieb eine Leistungsregelung von elektrischen Verbrauchern ermöglichen, welche mit Wechselspannung versorgt werden [30]. Der Thyristor wird über einen Schutzschalter und 125 A Sicherungen ans Netz angeschlossen, und die Kabel für den Heizflansch werden am Thyristor angeschlossen. Wird also eine gewünschte Heizleistung von der Steuerung verlangt, schaltet der Thyristor die Stromversorgung für den Heizstab entsprechend lange ein. In Abbildung 73 ist der angeschlossene Thyristor im Schaltschrank gezeigt. Das graue Kabel am unteren Bildrand ist das Steuerkabel vom Leitstand.

## 4.4 Wärmedämmung

Um den Energiebedarf zu senken und Wärmeverluste zu reduzieren, wurden die beheizten Anlagenteile und jene, in denen ein gewisses Temperaturniveau gehalten werden soll, wärmeisoliert. Dazu wurden 10 cm dicke Rollmatten und 7 cm dicke Rohrisolierungen aus Steinwolle mit Aluminiumbeschichtung verwendet. Der Desorbersumpftank wurde vollständig mit 50 cm breiten Steinwollstreifen umwickelt, sodass auch alle Stutzen und Flansche gedämmt waren. Die Matten wurden mit Aluminiumband befestigt und zusammengezogen.

Dasselbe wurde auch mit der Desorberkolonne durchgeführt, die zusätzlich noch eine isolierte Abdeckung für den Kopf erhielt. Weiters wurde auch noch der Wärmetauscher mit den Isoliermatten gedämmt. Die beiden Rohrleitungen S4 und S11 wurden mit den 1 m langen Isolierschellen eingehüllt, da gerade hier ein möglichst geringer Wärmeverlust wichtig ist, um Heizenergie zu sparen. Das Isolieren der heißen Anlagenteile dient aber nicht nur der Energieoptimierung, sondern soll auch Personen im Anlagenbereich vor Verbrennungen schützen.

Bei den Isolierarbeiten war es außerdem wichtig mit Mundschutz und Arbeitshandschuhen zu arbeiten, da die feinen Steinwollefasern eine Belastung für Haut und Atemtrakt darstellen. In Abbildung 74 ist nochmals ein Ausschnitt des vollständig isolierten Sumpftanks und der Desorberkolonne zu sehen. Im Hintergrund erkennt man auch ein kurzes Stück der isolierten S11 Rohrleitung. Gut zu sehen sind auch der Syphon und das mechanische Überdruckventil, die zum Schutz vor Verbrennungen gedämmt wurden.



Abbildung 74: Wärmedämmungen

## 4.5 Aufsetzen der Lookout Programmierung

Die Aufnahme der Messwerte der Sensoren und die Steuerung der Ventile erfolgt wie zuvor beschrieben über National Instruments Module welche über Lookout bedient werden. Die Programmierung der Regelung wurde vom Technikumpersonal durchgeführt. Es wurde eine Benutzeroberfläche erstellt, auf der wie in einer Steuerwarte alle Messwerte abgelesen und der Großteil der Anlageneinstellungen vorgenommen werden kann. Ein Screenshot der Benutzeroberfläche ist in Abbildung 77 gezeigt.

Auf der Benutzeroberfläche werden alle aktuellen Messwerte der Sensoren an der entsprechenden Stelle im Fließschema mit dem dazugehörigen Zahlenwert angezeigt. Über den Datenlogger am Bildschirm kann die Datenaufzeichnung gestartet werden. Das Ausgabeformat ist ein Textfile, das zur weiteren Verarbeitung erst in ein Tabellenformat konvertiert werden muss. Über den Bildschirm greift man auch auf die Eingabemaske für die Gasmischung zu, wo der Volumenanteil an den Gasen CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> im Rauchgas eingestellt wird. Die jeweilige Zudosierung wird ebenfalls am Bildschirms in l/min angegeben. Zusätzlich gibt es auch eine Anzeige der Konzentration von SO<sub>2</sub> in ppm und von CO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub> in Vol%. Für das Rauchgas werden außerdem der Volumenstrom, der Druck, die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit angegeben. Die beiden Anzeigen für die pH-Werte geben allerdings keine realen Werte wieder, da beide Sensoren deinstalliert wurden. Am Absorber wurden außerdem zwei Temperatursensoren deaktiviert, sowie die Differenzdruckmessung über die Kolonnenhöhe stillgelegt. In beiden Fällen waren die Sensoren defekt und wurden auch für den Versuchsaufbau nicht benötigt. Die Gasaustrittskonzentration wird ebenfalls im Benutzerfenster angezeigt und natürlich auch durch den Datenlogger erfasst.

Für den Desorberteil wurden mehrer Regelschleifen programmiert. Erstens wurde festgelegt, dass die Heizung des Sumpftanks nur dann eingeschaltet werden kann, oder sich selbst einschaltet, wenn alle drei Alarmschalter keine Fehlermeldung liefern. Zusätzlich muss die im Sumpftank gemessene Temperatur niedriger sein als die manuell eingegebene Maximaltemperatur. Dieser „Go“-Zustand wird durch drei grüne Lampen über den Alarmen angezeigt. In diesem Fall leuchtet auch die Lampe der „Heizung-Freigabe“ grün. Erst dann kann an dem Schieberegler für die Heizung die Heizleistung vorgegeben werden. Wird die Heizung eingeschaltet, scheint zusätzlich ein Pop-Up-Window auf mit der Nachricht „Heizung eingeschaltet“. Sollte einer der Alarme plötzlich unter bzw. über den entsprechenden Grenzwert fallen, schaltet sich die Heizung automatisch ab, unabhängig davon, ob am Schieber ein Vorgabewert eingestellt ist oder nicht. In diesem Fall wechseln die Leuchten am jeweiligen Alarm und an der „Heizung-Freigabe“ auf rot.

An den Schieberegler für die fünf Ventile wird ebenfalls ein Öffnungswinkel in Prozenten des maximalen Öffnungswinkels angegeben. Diese Ventilstellungen lassen sich allerdings nur manuell adjustieren und müssen für einen stationären Betriebspunkt angepasst werden. Das Ventil V4 ist mit dem Drucksensor PIC-2 nach dem Gasaustritt aus dem Flash gekoppelt und öffnet bis auf den eingestellten Prozentsätze, wenn der Druck am Sensor den Soll-Druck von 2 bar übersteigt. Nur bei geöffneter Ventilstellung leuchtet die dazugehörige Lampe grün. Am Ventil V3, welches für die kontinuierliche Abgabe von CO<sub>2</sub> an die Umgebung

verantwortlich ist, wird ein möglichst niedriger Stellwert festgesetzt, um allzu häufiges Öffnen und Schließen von V4 zu vermeiden. Die Ventile V2 und V5, die den Zulauf von Kühlwasser zum Rückkühler und zum Kondensator regeln, werden von der gewünschten Zieltemperatur im austretenden Strom geregelt. Über dem TR-5 und dem TR-10 sind Fenster zur Sollwertvorgabe für die Ventilregelung angebracht.

Der Füllstand im Desorbersumpftank, wird sowohl über eine graphische Anzeige dargestellt als auch über einen Prozent-Zahlenwert angezeigt. Abhängig von diesem Wert verändert das Ventil V1 seine Stellung. Zusätzlich wird der Gesamtflüssigkeitsstrom durch die Anlage auch durch einen Vergleich der Volumenströme im S3 und S13 kontrolliert. Ist die Differenz zwischen den beiden Strömen geringer als  $0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ , leuchtet die zentral angezeigte Signalleuchte „Flow Status“ grün auf.

Somit kann von der Benutzeroberfläche aus fast die gesamte Anlage kontrolliert und gesteuert werden. Lediglich das Einschalten und Einstellen des Gebläses und der beiden Pumpen muss rechts neben der Steuerwarte an den Potentiometern am Schaltschrank vorgenommen werden. Zusätzlich muss auch noch die Gasanalytik des Absorberteils eingeschaltet werden und das Kühlwasser per Hand aufgedreht werden.



Abbildung 75: Schaltschrank für P1, P2 und G1



Abbildung 76: Gasanalytik

Die Hauptschalter und Potentiometer für die Pumpen und das Gebläse sind in Abbildung 75 gezeigt. Den Schrank mit den Gasanalytikmodulen sieht man in Abbildung 65.

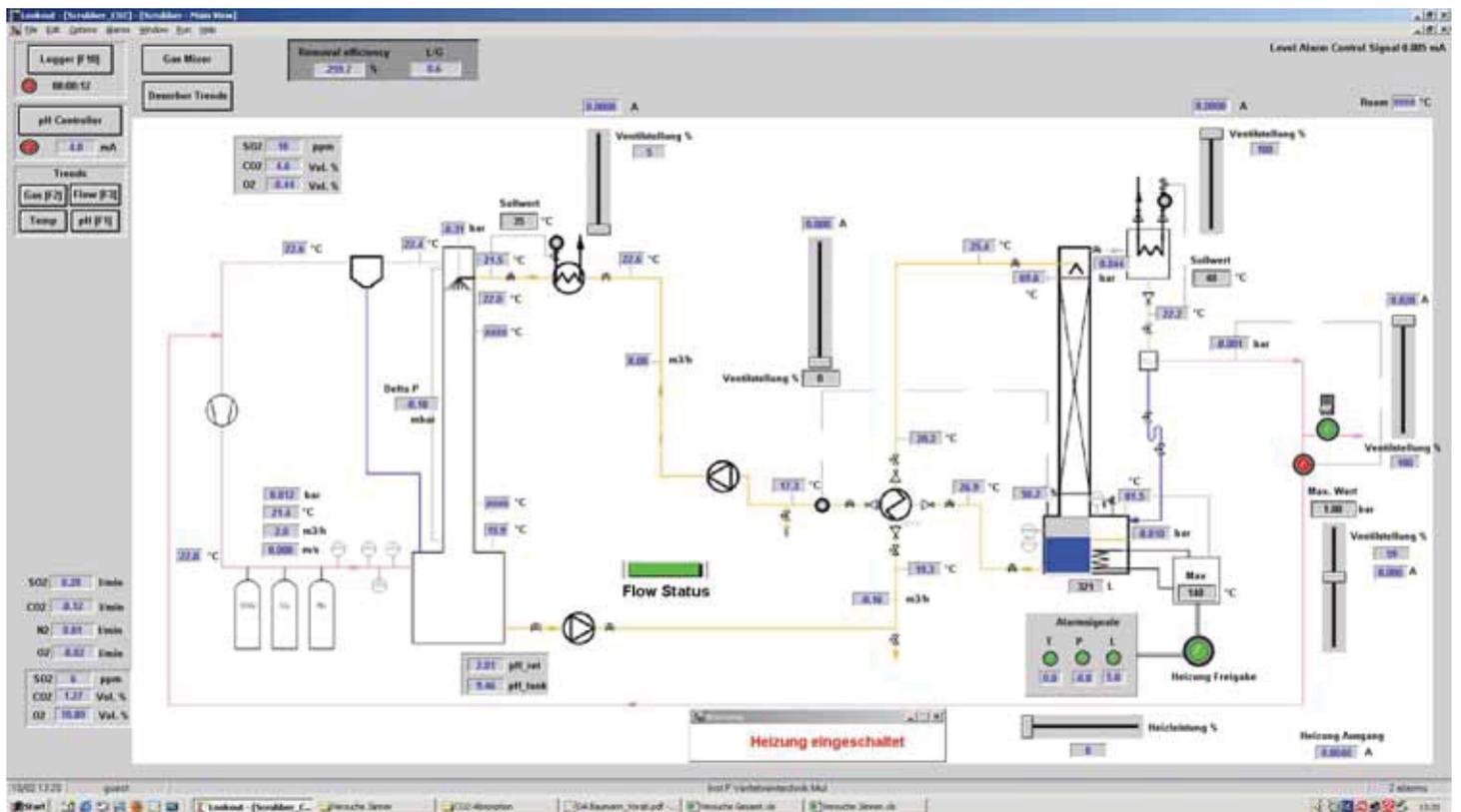


Abbildung 77: Benutzeroberfläche der Lookout-Programmierung

## 5 Inbetriebnahme

### 5.1 Grundlegendes zur Inbetriebnahme

Nach dem Abschluss der Montage- und Programmierungsarbeiten war der nächste Schritt vor dem eigentlichen Betrieb der Anlage die Inbetriebnahme. Bei der Inbetriebnahme soll die Sicherheit und die Funktionstüchtigkeit von Teilen sowie der Gesamtanlage sichergestellt werden. Bevor auf die tatsächlichen Arbeitsschritte bei der Versuchsanlage eingegangen wird, sollen nun kurz die theoretischen Schritte einer allgemeinen Inbetriebnahme erläutert werden. Der Ablauf der Inbetriebnahme setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Aufgaben zusammen [31]:

1. Abnahmeprüfung
2. Reinigung
3. Dichtheitsprüfung
4. Füllen der Anlage und Druckprüfung
5. Funktionsprüfung
6. Inbetriebnahme
7. Messprotokoll

**Ad 1) Abnahmeprüfung:** Die Abnahmeprüfung soll vor allem klären ob der Zustand der Anlage mit den Planungsunterlagen übereinstimmt und so die Funktionsfähigkeit der Anlage sicherstellen. Hierbei sind vor allem das Fließbild, die Aufstellungspläne und die elektrischen Pläne zu kontrollieren. Folgende Kontrollpunkte sind dabei zu erörtern [31]:

- Kontrolle der Leitungsführung an Hand des Fließschemas.
- Prüfung der Leitungsverlegung
- Prüfung, ob an den höchsten Systempunkten Entlüftungsventile angebracht wurden und ob an den tiefsten Stellen Entleerungshähne vorgesehen wurden.
- Überprüfung der Brennstoff- bzw. Energieversorgung.
- Kontrolle von elektrischen Leitungen und deren Anschlüsse.
- Prüfung der Einbaustellen von Armaturen und Regelventilen.
- Prüfung der Schweißverbindungen und der Schraubverbindungen.
- Kontrolle von Pumpensperrflüssigkeiten.

**Ad 2) Reinigung:** Als nächster Schritt nach der Abnahmeprüfung erfolgt die Reinigung der Anlage. Jegliche Art von Verunreinigung, welche beim Aufbau der Anlage entstanden sein kann, ist hierbei zu entfernen, um eine Beschädigung der Anlage im Betrieb oder eine mögliche Verletzung von Personen auszuschließen. Die Reinigung mit Beizmitteln, die nachträgliche Neutralisation und Trocknung wird allerdings nur bei Großanlagen durchgeführt. Normalerweise werden Leitungen und Behälter mit Druckluft durchgeblasen und soweit als möglich optisch auf grobe Verschmutzung kontrolliert. [31]

**Ad 3) Dichtheitsprüfung:** Um verfahrenstechnische Anlagen auf ihre Dichtheit zu überprüfen, wird die Anlage entweder mit Wasser angefüllt oder mit Druckluft beaufschlagt. Dadurch soll sichergestellt werden, dass weder Betriebsmedien austreten können, noch Verunreinigungen von außen in die Anlage gelangen. Bei der Wahl des Prüfmediums ist allerdings zu beachten, dass Wasser sich nur wieder schwer aus allen Teilen der Anlage entfernen lässt. Dies ist eigentlich nur durch sehr lange Aufheizzeiten möglich. [31]

Aus diesem Grund werden Druckprüfungen, wo auch immer möglich, nur mit Luft durchgeführt. Als Überdruck werden üblicherweise 0.5 bar eingestellt. Danach werden alle Verbindungsstellen und Schweißnähte mit einer Seifenlösung überzogen. Sollten Undichtheiten vorhanden sein, bilden sich Seifenblasen an der Oberfläche. Dabei ist es nicht zu empfehlen, den Prüfdruck auf mehr als 1 bar anzuheben, da die Gefahr besteht, dass die Seifenlauge durch die hohe Geschwindigkeit vom Gas durchströmt wird, ohne Blasen zu bilden. Pumpen sollten bei der Dichtheitsprobe abgesperrt werden, da durch sie eine große Gasleckage auftritt. Somit kann der Prüfdruck nicht aufrecht erhalten werden. [31]

**Ad 4) Füllen:** Wenn durch die Druckprüfung sichergestellt wurde, dass kein Betriebsmedium aus der Anlage austreten kann, kann diese schließlich befüllt werden. Die Anlage sollte immer langsam vom tiefsten Punkt weg gefüllt werden um der Luft die Möglichkeit zu geben durch geöffnete Ventile oder Hähne zu entweichen. Der Füllvorgang muss so lange fortgesetzt werden, bis der Mindestfüllstand im Ausdehnungsgefäß erreicht ist. Nach dem Füllen der Anlage sollen alle druckbeaufschlagten Baugruppen mit dem Füllmedium einer Druckprüfung unterzogen werden. [31]

**Ad 5): Funktionsprüfung:** Bei der Funktionsprüfung werden alle Anlagenteile auf ihren problemlosen Betrieb getestet, ohne die Anlage dabei thermisch durch Heizungen zu belasten. Die Funktionsprüfung umfasst unter anderem folgende Aufgaben [31]:

- Einstellen der Mess-, Regelungs- und Begrenzungseinrichtungen.
- Kontrolle, ob alle Armaturen im Kreislaufsystem geöffnet wurden.
- Prüfung der Funktionsfähigkeit von Pumpen und Gebläsen.
- Einschalten und Überprüfen der elektrischen Schaltschränke und des Hauptschalters.
- Entlüftung von Anlagenteilen und Nachfüllen des Betriebsmediums.
- Etwaige Schmutzfänger reinigen.
- Optische und akustische Signale überprüfen.

**Ad 6) Inbetriebnahme:** Die erste thermische Inbetriebnahme der Anlage erfolgt durch das Einschalten des Brenners, der Heizung oder des Wärmetauschers. Dabei soll die Anlage stufenweise auf Betriebstemperatur gebracht werden, wobei bei jeder Stufe eine gewisse Verweilzeit einzuhalten ist. Dabei sollen laufend die Dichtheit, die Wärmedehnung und Oberflächentemperatur von Bauteilen und die Funktion von Pumpen, Gebläsen und Wärmetauschern überprüft werden. Sobald die Betriebstemperatur erreicht wird, soll nochmals die gesamte Anlage auf den ordnungsgemäßen Zustand geprüft werden. Eventuell sind Schraub- und Flanschverbindungen nachzuziehen. Danach sollen die Sicherheitseinrichtungen auf ihre Funktionsfähigkeit überprüft werden indem die Schaltpunkte verändert werden und die Grenzbereiche der Anlage eingestellt werden. Es werden hierbei vor allem folgende Bauteile überprüft und eingestellt [31]:

- Temperaturbegrenzer
- Niveaubegrenzer
- Strömungsbegrenzer
- Sicherheitsventile
- Druckbegrenzer

**Ad 7) Messprotokoll:** Als abschließender Punkt der Inbetriebnahmeprozedur ist ein sogenanntes Messprotokoll anzufertigen. Dieses enthält die wichtigsten Kenndaten bei Nennlastbetrieb wie zum Beispiel Volumenströme, Einstellungen an Pumpen und Gebläsen, die sich einstellenden Vor- und Rücklauftemperaturen und die Drücke an den wichtigsten Stellen. Bei elektrischen Erhitzern sollen die Stromaufnahmedaten dokumentiert werden und bei Heißgaserhitzern der Brennstoffverbrauch und die Gastemperatur.

Die nachfolgenden Kapitel werden nun die tatsächlich durchgeführten Schritte bei der Inbetriebnahme der Versuchsanlage am Technikum dokumentieren und die dabei aufgetretenen Probleme und gemachten Erfahrungen beschreiben.

## 5.2 Abnahmeprüfung und Reinigung

Als erster Punkt nach der Fertigstellung der Versuchsanlage wurden anhand des R&I Fließbildes der Aufbau kontrolliert. Es wurden alle Edelstahlleitungen und ihre Anschlüsse zu den Wärmetauschern, der Desorbekolonne, dem Sumpftank, dem Flash und den Ventilen überprüft. Alle Übergänge und Verbindungsstücke wurden grob auf ihren festen Sitz geprüft. Dasselbe wurde für die Kunststoffleitungen des Kühlwasser durchgeführt. Dabei konnten keine offensichtlichen Leckagen oder Konstruktionsfehler bei der Verlegung entdeckt werden.

Danach wurden alle Entleerungshähne und Probenahmestutzen, sowie die eingebauten Blindstoppel kontrolliert. Auch hier konnten keine groben Fehler gefunden werden. Die Kontrolle der Verlegung der Steuer- und Messkabeln sowie der beiden Starkstromkabel für den Heizflansch brachten ebenfalls keine offensichtlichen Installationsfehler zum Vorschein. Beim Kalibrieren der Thermoelemente wurde allerdings entdeckt, dass durch die nicht abgeschirmten Kabel falsche Messwerte angezeigt werden. Die Thermoelementkabel mussten daher durch geschirmte Kabel ersetzt werden.

Bei der Überprüfung der Ventile und deren Einbaurichtung stellte sich heraus, dass das Ventil V4 in die falsche Richtung eingebaut worden war. Dies wurde umgehend korrigiert. Abschließend wurden noch die Verschraubung der Flansche an den Wärmetauschern, an Kopf und Boden der Kolonne sowie am Panzerschlauch des Absorbiersumpftanks überprüft. Dabei wurden keine offensichtlichen Mängel festgestellt.

Nach den Kontrollen der Aufbauarbeit wurde die Anlage einer groben äußerlichen Reinigung unterzogen. Innere Verschmutzungen von Bauteilen der alten Anlage waren schon soweit als möglich beim Aufbau beseitigt worden. Nun wurden vor allem noch Restmaterialien von der Konstruktion entsorgt. Darum wurden herumliegende Reste von Dichtmaterial, überschüssige Schrauben und Muttern sowie Werkzeug entfernt. Von einer inneren Reinigung mit speziellen Reinigungsmitteln wurde abgesehen, da das nachfolgende Durchspülen mit Druckluft und die anschließenden Probeläufe mit Wasser als ausreichend erachtet wurden.

## 5.3 Dichtheitsprüfung

Für die Dichtheitsprüfung wurde der neugebaute Desorberteil zuerst mit Druckluft beaufschlagt. Dazu wurde ein Druckluftschlauch über eine eigens eingeschraubte Kupplung an das untere Ende des Syphons angehängt. Dieser wurde dazu vorübergehend auf der Seite des Sumpftanks abgeschlossen. Der Druckluftschlauch ist an das hausinterne Druckluftsystem angeschlossen. Der Druck wurde über einen händisch zu bedienenden Druckregler eingestellt.

Um den Desorberteil für die Überprüfung vom Absorberteil zu entkoppeln wurde der 2“-Kugelhahn im S7 nach dem PIC-2 geschlossen. Außerdem wurden die 1“-Kugelhähne am warmen Austritt (S12) bzw. am kalten Eintritt (S3) zum Wärmetauscher geschlossen. Für dieses abgeschlossene Volumen wurde nun stufenweise der Druck erhöht und jeweils für

eine bestimmte Zeit auf einem Druckniveau gehalten, um den Druckverlust bestimmen zu können.

Aus Erfahrungen mit dem SO<sub>2</sub>-Wäscher konnte angenommen werden, dass man vernünftige Messergebnisse erzielen würde, wenn der Druckabfall für die Gesamtanlage 10 mbar in 10 min bei Betriebsdruck nicht übersteigen würde. Allerdings musste schon bei der ersten Druckstufe von 0,5 Überdruck festgestellt werden, dass erhebliche Leckagen vorhanden waren. Der Druckabfall betrug mindestens 10 mbar pro Minute. Für eine schnelle Fehlstellenanalyse wurde Rauch auf alle Übergangs- und Anschlussstellen geblasen. Dabei zeigte sich, dass ein Großteil der Holländerverbindungen undicht war. Diese wurden als erste Verbesserung mit Rohrzangen nachgezogen.

Bei einer neuerlichen Überprüfung mit Seifenlauge zeigten sich aber zahlreiche undichte Stellen. Der Druckabfall war ebenfalls noch immer unverändert hoch. Blasenbildung war praktisch an jeder Verbindungsstelle im Desorberteil zu beobachten. Es wurden in der Folge alle Flanschschrauben nochmals kräftig nachgezogen, da sowohl bei den Wärmetauschern als auch am Kopf der Kolonne viel Luft ausgetreten war. Außerdem waren noch immer fast alle Holländer und sehr viele der Schraubverbindungen undicht.

Zur Fehlersuche wurden die Holländer ausgebaut. Dabei wurde festgestellt, dass viele der PTFE-Flachdichtungen in den Holländern durch den Zusammenbau offensichtlich beschädigt worden waren und eigentlich nicht mehr benutzt werden konnten. Um diese zu ersetzen wurden für die Dimensionen ½“, 1“ und 2“ bei einem Fachgeschäft eigens angefertigte PTFE-Dichtungen mit einer etwas größeren Dicke nachbestellt. Von diesen wurden dann abhängig von der Verbindungsstelle bis zu zwei Dichtungen pro Holländer eingebaut. Die Holländer wurden erneut mit Rohrzangen festgezogen und zeigten bei der neuerlichen Überprüfung mit Seifenlauge keine nennenswerte Blasenbildung mehr.

Weitaus problematischer stellte sich hingegen das Abdichten von verschraubten Rohrabschnitten dar. Vor allem 2“-Elemente schienen sehr undicht zu sein. Diese Rohrteile können allerdings im eingebauten Zustand nur sehr unzulänglich nachgezogen werden da sich dadurch die Verbindungen lockern. Deswegen mussten ganze Abschnitte an Holländern oder Flanschen in einem Stück demontiert werden. Diese Stücke wurden dann vollständig zerlegt, neu gedichtet und nachgezogen. Teilweise reichte es aus mehr PTFE-Dichtungsband zu verwenden und die Elemente stärker anzuziehen. Bei anderen Abschnitten brachte aber auch der mehrmalige Aus- und Einbau keine Verbesserung.

So wurde schlussendlich entschieden, diese Stellen nicht PTFE-Dichtungsband zu dichten sondern Dichthanf und Neofermit-Dichtmasse zu verwenden. Es zeigte sich, dass dadurch auch die 2“-Leitungen praktisch keinen Druckverlust mehr hatten. Der Druck konnte langsam bis auf 2 bar Überdruck gesteigert werden, was bereits 1 bar über dem zukünftigen Betriebsdruck lag. Nach einigen kleineren Nachjustierungen wurden dann letztlich das Ziel von maximal 10 mbar Druckverlust in 10 Minuten erreicht. Außerdem konnte die Funktionstauglichkeit des mechanischen Überdruckventils demonstriert werden, welches bei 3 bar Absolutdruck öffnete.

## 5.4 Füllen

Nachdem die Dichtheit des Desorberteils mit Druckluft ausreichend sichergestellt werden konnte, wurde die Anlage mit Wasser befüllt. Dazu wurde am Auslassstutzen nach dem Sumpftank in der S11 Rohrleitung ein Wasserschlauch angeschlossen und zuerst der Sumpftank von unten her befüllt. Der Kugelhahn am Eintritt zum Wärmetauscher in der S11 war geschlossen. Es wurden also nur der Sumpftank und die Rohrleitung mit Wasser gefüllt. Nun konnte auch der Füllstandssensor LIC-1 kalibriert werden.

Am Sumpftank und in der S11 Rohrleitung konnten keine Undichtheiten festgestellt werden. Also wurde der Kugelhahn zum Wärmetauscher geöffnet und weiter Wasser mit dem Füllschlauch nachgefördert. Dann wurde die Grundfos-Pumpe P2 langsam hochgefahren, um das Wasser aus dem Sumpftank und der Rohrleitung in den Kopf des Absorbers zu pumpen. Der Wasserzulauf durch den Füllschlauch wurde wieder abgeschaltet und die Drehzahl der Pumpe langsam erhöht. Allerdings war auch bei einer großen Drehzahleinstellung am Potentiometer der Pumpe, kein nennenswerter Wasserfluss aus der Sprühdüse im Absorber zu erkennen. Dies änderte sich auch nicht nach mehrmaligem Entlüften und Anfüllen der Pumpe. Da sowohl der FIC-2 einwandfrei gearbeitet hatte und auch alle Kugelhähne am Rückkühler vollständig geöffnet waren, konnte der Wasserstrom nur im Ventil V1 blockiert werden. Die Vermutung lag nahe, dass der Druckabfall über V1 für die Grundfos-Pumpe zu groß war. Es wurde deshalb beschlossen das Ventil an seinen Holländerverbindungen zu demontieren und durch ein 1“-Rohrleitungsstück zu ersetzen.

Der Volumenstrom aus der Sprühdüse änderte sich auch schlagartig, nachdem das Ventil ausgetauscht worden war. Man einigte sich deshalb darauf, die Versuchsanlage ohne das Ventil V1 zu betreiben. Um dennoch ein zu schnelles Entleeren des Desorbbersumpftanks zu verhindern, wurde die Lookout-Programmierung erweitert. Es wurde eine Statusanzeige eingefügt, die den Flüssigkeitsstrom aus beiden Sumpfbehältern durch die jeweiligen Pumpen vergleicht. Bei einem zu großen Ungleichgewicht wird eine Fehlermeldung ausgegeben, welche zum Nachjustieren der Pumpeneinstellungen auffordert.

Durch den Betrieb von P2 wurde das Wasser aus dem Desorbbersumpftank über den Wärmetauscher und die Absorberkolonne in den Absorbbersumpftank gepumpt. Nun konnte auch die Schmitt-Pumpe P1 in Betrieb genommen und das Wasser wieder über den Wärmetauscher zurück in den Kopf der Desorbberkolonne gefördert werden. Der Kreislauf war somit geschlossen. Nacheinander wurden die Auslasshähne kurz geöffnet, um eingeschlossene Luftblasen entweichen zu lassen. Einige Holländerverbindungen mussten zwar nochmals nachgezogen werden, aber sonst traten keine gravierenden Leckagen auf. Außerdem zeigte sich, dass mit den beiden Pumpen relativ rasch ein stationärer Zustand erreicht werden konnte.

Um den Betrieb unter den Bedingungen des Überdrucks zu simulieren, wurde am ½“-Anschluss in der Kopfplatte der Desorbberkolonne die Druckluftleitung angeschlossen. Mit ihr wurde der Druck im Desorberteil auf 2 bar absolut erhöht. Auch hier traten nur kleinere Undichtheiten auf, die leicht behoben werden konnten.

Auf der Flüssigseite wurde auch noch die Funktionsfähigkeit und Dichtheit des Kühlwasserkreislaufs getestet. Es mussten zwar kleinere Leckagen beseitigt werden, der Durchfluss und die Regelbarkeit der Ventile waren aber einwandfrei.

Zuletzt wurden noch das Gebläse und die Gasmischstrecke eingeschaltet. Sowohl der Umluftbetrieb als auch das Einstellen und Zudosieren einer beliebigen Rohgasmenge funktionierte problemlos. Auch hier ließ sich recht rasch ein stationärer Betriebspunkt finden. Durch den Gasstrom bildete sich auch ein guter Sprühkegel im Absorber aus. Die Grundfunktionen der Versuchsanlage waren also einsatzbereit.

## 5.5 Inbetriebnahme

Nun blieben nur noch die Funktionsüberprüfung der Heizung und ihrer Regelung übrig. Beim Befüllen des Desorbersumpftanks hatte sich gezeigt, dass die Alarmschalter zur Heizungsabschaltung funktionierten. Somit konnte auf der Benutzeroberfläche eine Heizleistung für den Heizstab eingestellt werden. Diese wurde stufenweise erhöht, und die Temperaturänderungen in den unterschiedlichen Teilen der Anlage wurden registriert. Erfreulicherweise konnten die geplanten, kurzen Aufheizzeiten erreicht werden. Bei vollständig geschlossenen Kugelhähnen in Strom S7 und S11 heizte sich der Sumpftank innerhalb einer Stunde von 20°C auf 120°C auf. Die Wärmedämmung war auch ausreichend, da nach Abschalten der Heizung nach einer Stillstandzeit von knapp vier Tagen noch immer 60°C im Sumpftank gemessen wurden.

Eine äußerst wichtige Funktionsüberprüfung im warmen Betriebszustand war die der Plattenwärmetauscher. Vor allem der Rückkühler musste in der Lage sein die Flüssigkeit aus dem Sumpftank nach dem zentralen Wärmetauscher auf einer Temperatur von maximal 60°C zu halten. Andernfalls drohte eine Beschädigung der Plexiglaskolonne. Beim stufenweisen Aufheizen des Flüssigkeitskreises funktionierten aber sowohl der Wärmetauscher als auch der Rückkühler einwandfrei. Die Volumenstromregelung des Kühlwassers für den Rückkühler über den TR-10 konnte problemlos vorgenommen werden. Auch beim Betrieb mit 120°C konnten an der Kühlung keine Mängel festgestellt werden.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Versuchsanlage sich mit Wasser als Waschmedium so wie geplant betreiben und steuern lässt. Es können bei Pumpen und Gebläse stationäre Zustände eingestellt werden, und das Aufheizen und Halten der Temperatur im Sumpftank funktionierte ebenso wie das Regeln der Durchflüsse und Temperaturen.

Die Anlage konnte schließlich mit der Monoethanolamin-Lösung befüllt werden. Dazu wurde zuerst das ganze Wasser abgepumpt. Danach wurde nochmals der Druckluftschlauch angeschlossen und die Anlage bei geöffneten Auslasshähnen und Probenahmestutzen durchgeblasen bis kein Wasser mehr austrat.

Für die MEA-Lösung war ein 200 kg 99,9%iges Monoethanolaminfass beschafft worden. Zur vereinfachten Berechnung wurden sowohl für MEA als auch für Wasser eine Dichte von

1 kg/dm<sup>3</sup> angenommen. Aus dem MEA-Fass wurden mittels einer Bohrmaschinenpumpe 40 l MEA abgepumpt und separat gelagert. Die restlichen 160 l wurden ebenfalls mit der Bohrmaschinenpumpe in den Absorbersumpftank gepumpt.

Um eine 30 m%ige Lösung zu erhalten mussten noch 373 l Wasser zugegeben werden. Zum Befüllen wurde allerdings mittels eines Ionentauschers deionisiertes Wasser verwendet. Das gesamte Flüssigkeitsvolumen im Sumpftank betrug demnach also 533 l.

Nach dem Füllen wurde die Anlage wieder langsam hochgefahren. Dazu wurde zuerst nur P2 betrieben um den Großteil der Flüssigkeit in den Desorbersumpftank zu fördern bis dort ein Füllstand von knapp 400 l erreicht war und alle Alarmer ein grünes Signal lieferten. Danach wurde P2 wieder abgeschaltet und der Kugelhahn am Auslass des Sumpftanks geschlossen. Nun wurde die Sumpfheizung eingeschaltet und die MEA-Lösung langsam aufgeheizt.

Bei einer Sumpftemperatur von 70°C wurden die Kugelhähne wieder geöffnet und beide Pumpen in Betrieb genommen, sodass die Lösung in der Anlage gleichmäßig zirkulierte. Die Lösung wurde bis auf 120°C aufgeheizt. Erst danach wurde auch das Gebläse eingeschaltet und die Gaszudosierung eingestellt. Mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 14% wurde die Anlage solange betrieben, bis sich die reine MEA-Lösung bis zur Grundbeladung von 0,2 mol CO<sub>2</sub>/mol MEA angereichert hatte<sup>17</sup>.

Mit dem Abschluss der Grundbeladung der Monoethanolamin-Lösung war die Anlage nun betriebsbereit und es konnte mit den Versuchen begonnen werden.

---

<sup>17</sup> Die CO<sub>2</sub>-Beladung wird durch Probenahme und anschließende Analyse bestimmt.

## 5.6 Messprotokoll

Hier soll nun das aus den Erfahrungen der Inbetriebnahme erstellte Messprotokoll der Anlage beschrieben werden. Es könnte auch als verkürztes Betriebshandbuch bezeichnet werden und teilt sich in die drei wesentlichen Abschnitte Hochfahren, Nennbetrieb und Herunterfahren auf.

### Hochfahren

Befindet sich die Anlage im kalten Zustand müssen mehrere Tätigkeiten durchgeführt werden, um diese in Betrieb zu nehmen. Zuerst sollte eine grobe Sichtkontrolle der Anlage erfolgen, um sicherzustellen ob in der Abwesenheit durch Fremdpersonen irgendwelche nicht entdeckten Beschädigungen entstanden sind oder ob sich sonst irgendein nicht standardmäßiger Anlagenzustand erkennen lässt. Um sicherzugehen, dass es zu keinem ungewollten Austritt von Betriebsmedium kommt oder dass Anlagenteile ungewollt abgesperrt sind, sollten alle Kugelhähne auf ihre korrekte Stellung kontrolliert werden. Alle durchflossenen Hähne müssen vollständig geöffnet sein und alle Ablasshähne und Probenahmestutzen müssen gut geschlossen sein.

Danach sollte der Computer am Leitstand eingeschaltet werden und der gleich daneben liegende Wasserhahn für das Kühlwasser aufgedreht werden. Während der Computer hochfährt kann man im Schaltschrank den Schütz für die Stromversorgung des Heizstabs einschalten. Anschließend wird die Gasmischstrecke in Betrieb genommen, indem dort alle Hähne an den Gasflaschen aufgedreht werden und am Regulator ein Vordruck von 2 bar eingestellt wird. Im Schaltschrank neben der Gasmischstrecke muss die Gasanalytik aktiviert werden. Dazu müssen hinter dem eigentlichen Bedienbrett die Messgaspumpen eingeschaltet werden.

Am Computer wird nun Lookout gestartet und die Benutzeroberfläche aufgerufen. Im Datenlogger wird ein neuer File erstellt und die Aufzeichnung wird gestartet. Am Schaltschrank für Pumpen und Gebläse werden die Hauptschalter für P1, P2 und das Gebläse eingeschaltet und die Potentiometer langsam hochgedreht.

Beim Hochdrehen der Pumpen ist ständig die Kontrollanzeige für den abgeglichenen Durchfluss und die Füllstandsanzeige des Sumpftanks zu beachten. Es sollte ein Level von ca. 300 l immer im Tank gehalten werden. Wenn der Durchfluss im S12 bzw. S13 nicht ausreichend groß ist, müssen die davor liegenden Kugelhähne nochmals kontrolliert werden oder aber die Grundfos-Pumpe entlüftet werden.

Wenn sich konstante Durchflüsse eingestellt haben, kann die Heizung aktiviert werden. Am Leitstand wird die Gasmischung im Lookout aufgerufen und die gewünschte Gaszusammensetzung eingestellt. Zum Aufheizen sollten nicht mehr als 60% der maximalen Heizleistung notwendig sein. Durch das Aufheizen steigt allerdings auch der Druck in der Anlage und der wiederum bewirkt ein Absinken der Pumpenleistung und einen Rückgang des Flüssigkeitsstromes. Darauf muss geachtet werden und die jeweilige Drehzahl muss bei

Bedarf am Potentiometer nachgestellt werden. Außerdem müssen beim Aufheizen die Temperaturen nach den Wärmetauschern ständig beobachtet werden. Vor allem der TR-10 sollte niemals Temperaturen über 65° C anzeigen. Notfalls müssen die Ventilstellungen nachjustiert werden.

### **Nennbetrieb**

Sobald sich ein stationärer Zustand eingestellt hat, kann man beginnen die eigentliche Versuchszeit zu rechnen. Üblicherweise wird ein Versuch für eine Dauer von mindestens zwei Stunden gefahren. Mit dem Hochfahren und Aufheizen kann man bis zum Ende des ersten Versuchs von einer Dauer von drei bis vier Stunden ausgegangen werden.

- Für den Nennbetrieb haben sich folgende Standardeinstellungen ergeben.
- Um einen Flüssigkeitsstrom von 2 m<sup>3</sup>/h zu erhalten müssen an den Potentiometern der beiden Pumpen P1 und P2 die Einstellungen 800 (Schmitt) und 4 (Grundfos) gewählt werden.
- Ein Gasvolumenstrom von 160 Bm<sup>3</sup>/h durch das Gebläse entspricht einer Potentiometerstellung bei der ersten Markierung.
- Die Gaszusammensetzung in der Eingabemaske von Lookout wird auf 80 vol% N<sub>2</sub>, 14 vol% CO<sub>2</sub> und 6 vol% O<sub>2</sub> gesetzt.
- Der Schieberegler für die Sumpfheizung wird auf 55% gestellt.
- Am TR-5 sollten 40°C gemessen werden, was sich üblicherweise durch eine Ventilstellung von ca. 20% am V2 beim Kondensator ergibt.
- Für den Rückkühler wird eine Soll-Temperatur von 35°C im Zulauf zum Absorber empfohlen, was einer Ventilstellung von ca. 30% am V5 entspricht.

### **Herunterfahren**

Um die Anlage herunterzufahren, muss zuerst die Heizung abgeschaltet werden. Dazu wird die Heizleistung auf der Benutzeroberfläche auf 0 gesetzt und der Schütz im Schaltschrank abgeschaltet. Um die MEA-Lösung abzukühlen, muss am Rückkühler das Kühlwasserventil maximal geöffnet werden die Soll-Temperatur auf 10°C eingestellt werden, um kontinuierlichen Durchfluss zu gewährleisten. Danach wird die Gasmischung im Lookout ausgeschaltet, und die Gasflaschen an der Gasmischstrecke geschlossen. Somit kann auch die Gasanalytik stillgelegt werden. Am Schaltschrank für die Pumpen kann nun das Gebläse zurückgedreht werden und sobald die Temperatur im Desorber-Sumpftank auf unter 90° C gefallen ist, können auch P1 und P2 abgeschaltet werden. Links daneben kann dann der Kühlwasserhahn zuge dreht werden und zuletzt wird noch die Datenaufzeichnung beendet und der Rückkühler auf seine Grundeinstellungen zurückgesetzt. Bei längeren Stillstandszeiten sollte der Computer ganz ausgeschaltet werden.

## 6 Abscheideversuch

Um die Funktionsfähigkeit der Anlage endgültig zu demonstrieren, wurde noch ein vollständiger Abscheideversuch über eine Dauer von zwei Stunden durchgeführt. Ziel des Versuchs war es, die Anlage am Auslegungspunkt zu testen. Über die Potentiometer der Pumpen wurde am Schaltschrank ein Flüssigkeitsstrom von 2 m<sup>3</sup>/h eingestellt. Am Potentiometer des Gebläses wurde die Einstellung für einen Gasvolumenstrom von 160 Bm<sup>3</sup>/h gewählt. Die Gaszusammensetzung wurde über das Regelfenster der Lookout-Oberfläche eingestellt. Hierbei wurde ein CO<sub>2</sub>-Anteil von 14 vol%, ein O<sub>2</sub>-Anteil von 6 vol% und ein N<sub>2</sub>-Anteil von 80 vol% festgesetzt.

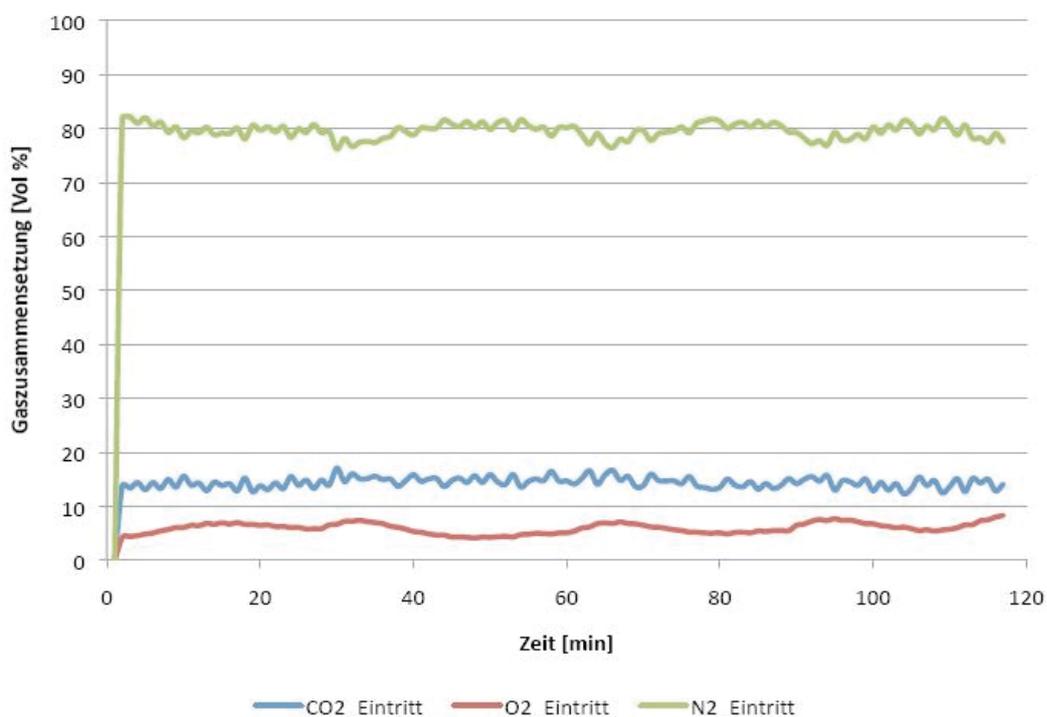


Abbildung 78: Gaszusammensetzung

Wie man aus Abbildung 78 erkennen kann, schwankt die Gaszusammensetzung über einen Bereich von mehreren Prozentpunkten. Die Schwankungsbreite bleibt allerdings über die Dauer des Versuchs konstant. Außerdem stellt sich der gewünschte Zielwert, um den die Werte dann schwanken, bereits nach einigen Minuten ein.

Die Gasmischstrecke reagiert also sehr schnell auf die vorgegebenen Soll-Werte und ist in der Lage die Konzentration trotz des Recyclestrom an  $\text{CO}_2$  in einer gewissen Schwankungsbreite konstant zu halten.

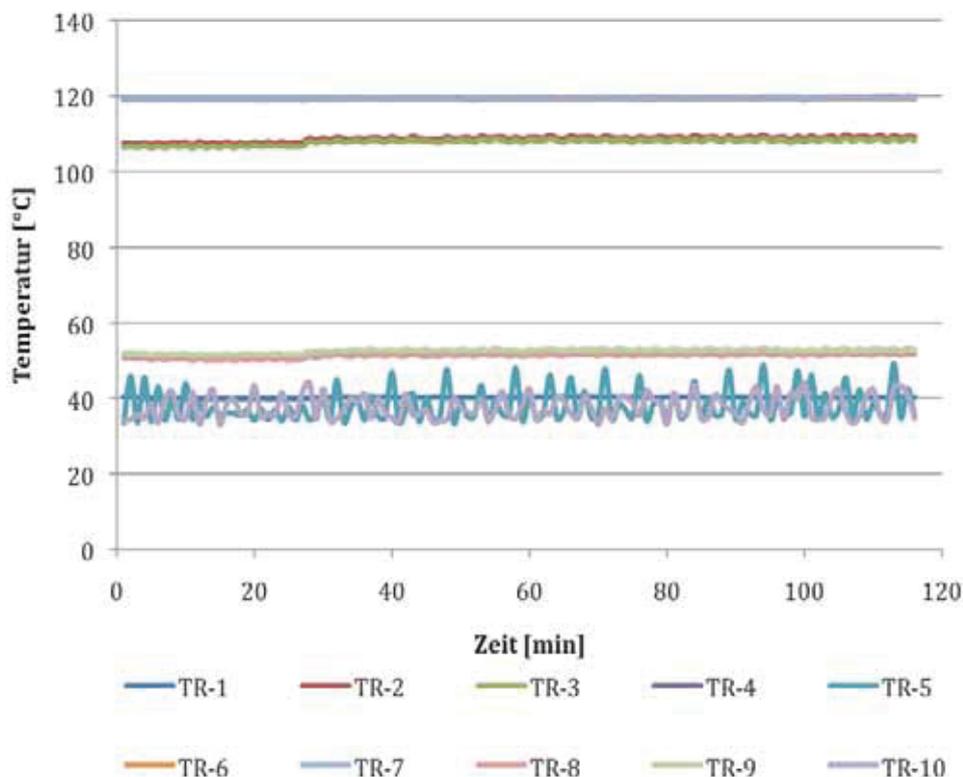


Abbildung 79: Temperaturverläufe an den Desorbermessstellen

Das Temperaturprofil der Anlage in Abbildung 79 liefert ein ganz ähnliches Bild. Da kurz vor dem Abscheideversuch, noch Pump- und Heizztests durchgeführt wurden, war die MEA-Lösung im Sumpftank noch warm. Das erklärt die sehr kurzen Aufheizzeiten. Wie man in der Grafik sehen kann, erreicht die Temperatur im Sumpftank (TR-6) bereits nach wenigen Minuten die geforderte Temperatur von  $120^\circ\text{C}$  und bleibt über die gesamte Versuchsdauer sehr konstant. Sie ist außerdem praktisch deckungsgleich mit den Temperaturen im Desorberkopf (TR-4) und im heißen Eintritt des Wärmetauschers (TR-7). Da alle drei Temperatursensoren konstant  $120^\circ\text{C}$  anzeigen, können die Wärmeverluste über die Kolonnenhöhe und entlang der Rohrleitung S11 wegen der Steinwollgedämmung als Null angenommen werden. Das Gleiche gilt für die anderen eintretenden und austretenden Ströme des Wärmetauschers W1. Die beladene MEA-Lösung aus dem Sumpftank in S2 hat konstant  $40^\circ\text{C}$  (TR-1). Sie tritt mit ca.  $110^\circ\text{C}$  wieder aus dem Wärmetauscher aus (TR-2) und verliert in der langen S3 Rohrleitung bis zum Eintritt am Desorberkopf (TR-3) kaum Wärme.

Die beiden einzigen Temperatursensoren, die schwankende Messwerte während der Versuchszeit anzeigen, sind jener am Austritt des Kondensators (TR-5) und jener nach dem Rückkühler bzw. kurz vor dem Eintritt in den Absorberkopf (TR-10). Die Schwankungen rühren daher, dass beide Sensoren als Stellwertgeber für die Regelung des

Kühlwasserzuflusses in den Wärmetauschern verantwortlich sind, und sich durch den variierenden Durchfluss an Kühlwasser auch die Temperatur des Mediums ändert.

Relativ starken Schwankungen unterliegen auch die Volumenströme, wie man in Abbildung 80 erkennen kann. Während die Grundfos-Pumpe (rot) recht rasch ihren Zielwert von 2 m<sup>3</sup>/h erreicht, wird mit der Schmitt-Pumpe (blau) zuerst der Füllstand im Desorbersumpftank auf über 300 l erhöht. Sobald dieser erreicht wird muss noch einige Male nachjustiert werden, bis sich die beiden Volumenströme nach ca. 30 min decken. Es sind danach zwar noch kleinere Schwankungen bei der Schmitt-Pumpe zu sehen, diese bleiben aber mit einer Schwankungsbreite von ca. 50 l/h relativ konstant.

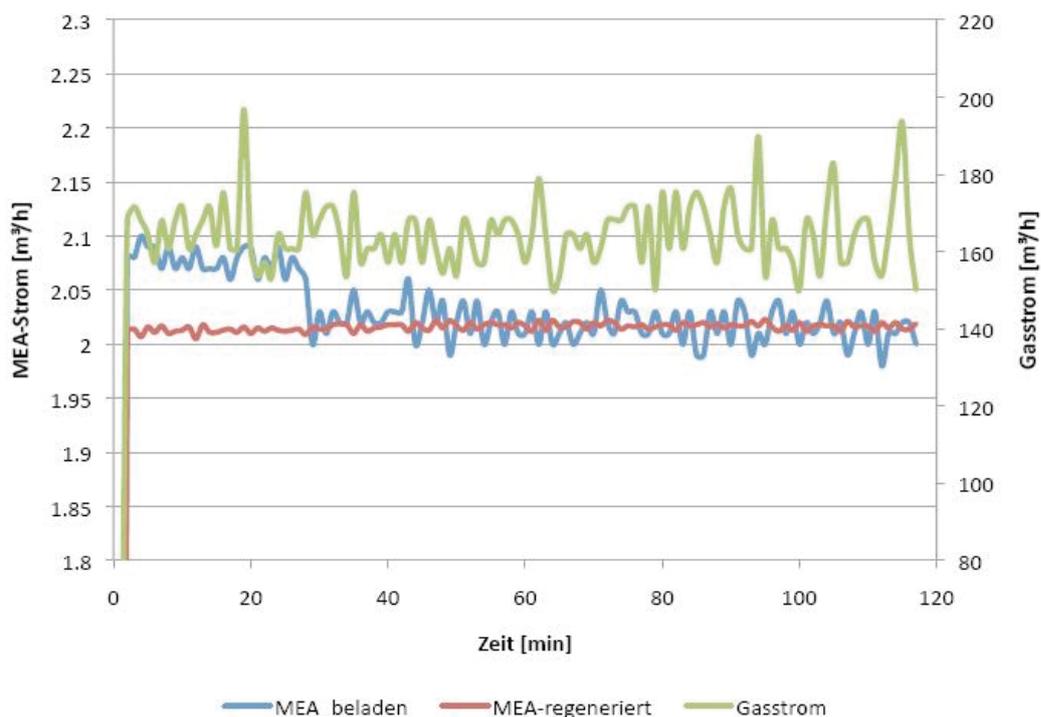


Abbildung 80: Volumenströme

Wesentlich größer fallen hingegen die Schwankungen am Gebläse aus. Hier lässt sich offensichtlich der Einfluss des CO<sub>2</sub>-Recyclestroms erkennen. Bei der Inbetriebnahme ist der Gebläsevolumenstrom recht konstant geblieben. Durch das Zuschalten der Rückleitung muss aber die Regelung der Gasmischstrecke zusätzlich zur Gasrückführung aus dem Absorberkopf auch noch auf das rückgeführte CO<sub>2</sub> reagieren, wodurch offenbar recht starke Schwankungen im Gasstrom entstehen.

Durch die Schwankungen variiert auch das L/G-Verhältnis zwischen 11 l und 13 l Lösungsmittel pro m<sup>3</sup> Rauchgas, was für eine wirtschaftliche, industrielle Anwendung noch etwas zu hoch wäre.

Der Füllstand im Desorbersumpftank wird von den kurzzeitigen Schwankungen im Lösungsmittelstrom kaum beeinflusst (Abbildung 81). Wie man in der Grafik sehen kann, erhöht sich der Füllstand auf ca. 310 l durch eine stärkere Förderleistung der Schmitt-

Pumpe. Nachdem bei der Pumpe dann die Drehzahl reduziert wird, sinkt der Füllstand durch die Schwankungen im Volumenstrom während der Versuchsdauer leicht ab. Es besteht aber nie die Gefahr, dass er durch zu starke Schwankungen auf das Mindestfüllstandsniveau von 226 l abfällt.

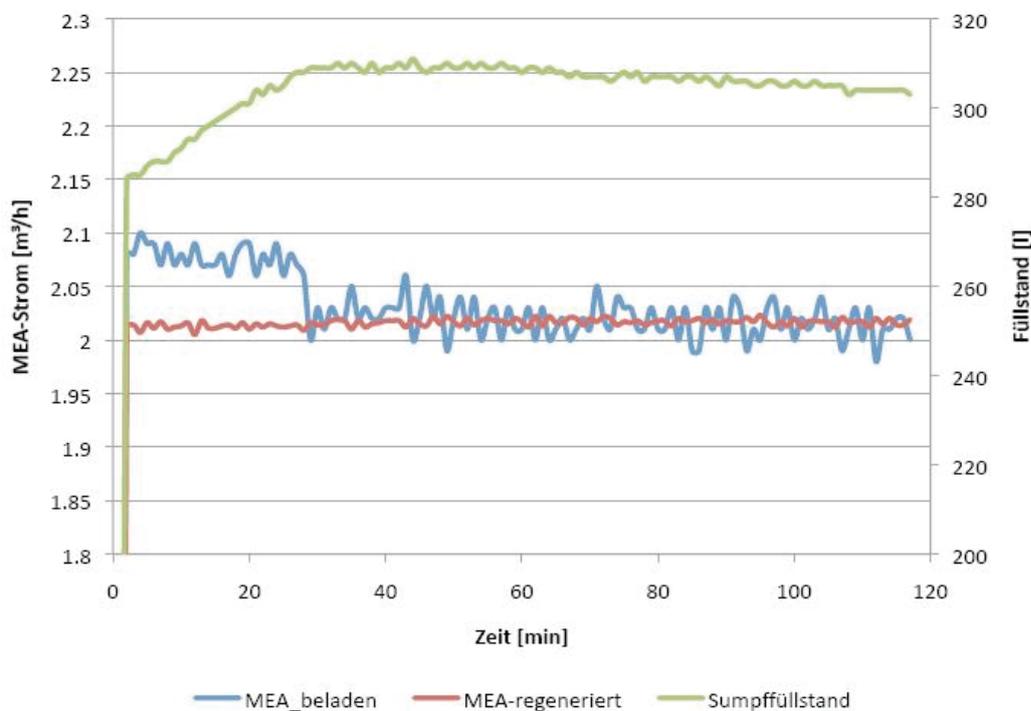


Abbildung 81: Füllstandsänderungen

Bei der Auswertung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Rauchgasstrom vor und nach dem Absorber erkennt man vor allem bei der Eintrittskonzentration starke Schwankungen, die wiederum auf die Regelung des  $\text{CO}_2$ -Recyclestroms zurückzuführen sind. Der  $\text{CO}_2$ -Anteil im Rauchgas-Eintritt liegt zeitweise um bis zu 3 Prozentpunkte über der Sollkonzentration von 14vol%. Dadurch ergeben sich natürlich auch Schwankungen in der abgeschiedenen Menge an  $\text{CO}_2$ . Die Abscheideleistung in Prozenten der Eintrittskonzentration variiert also zwischen 20% und knapp 30%.

Dieser Wert erscheint auf den ersten Blick recht niedrig. Er wurde aber mit einer Anlage erzielt, die noch nicht optimiert wurde und für die noch keine Versuchsergebnisse vorlagen. Der Versuch war der erste Probelauf mit den Betriebsmedien und sollte vor allem zur Überprüfung der Stabilität der Anlage am Betriebspunkt dienen. Durch Variation der Betriebsparameter der Anlage muss deren Auswirkung auf die Abscheideleistung in den weiterführenden Versuchen erst bestimmt werden. Dabei wird es vor allem auch darum gehen, die wirtschaftlich wichtigen Charakteristika des minimalen Energieverbrauchs und der minimalen Lösungsmittelmenge bezogen auf die Abscheideleistung zu ermitteln.

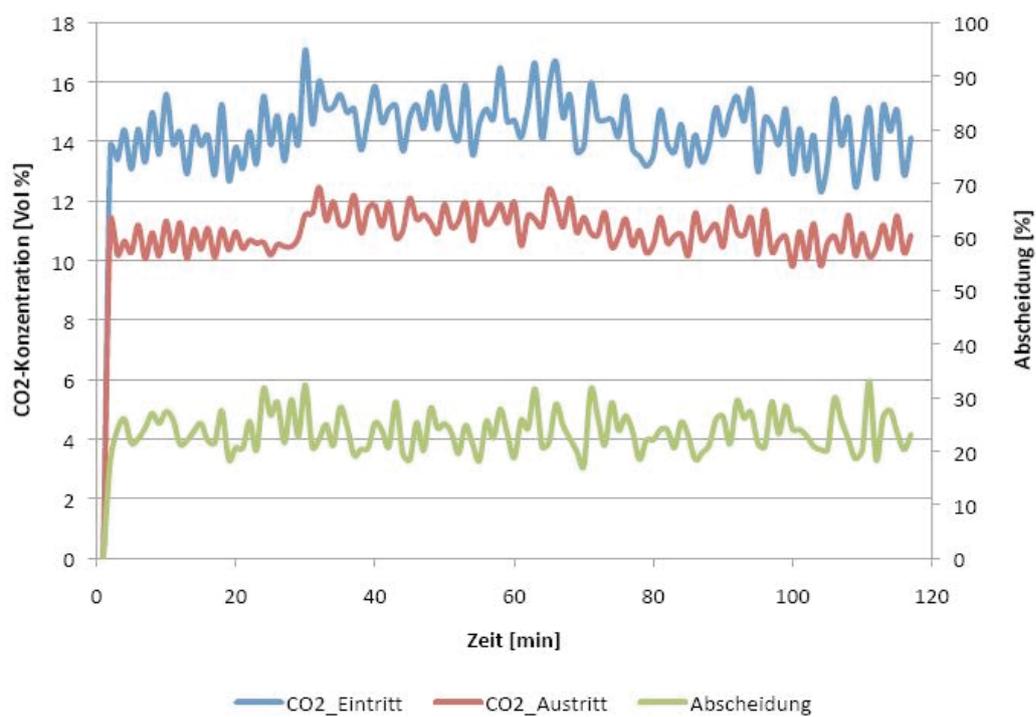


Abbildung 82: Abscheideleistung

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Abscheiden von Kohlendioxidgas aus dem Rauchgasstrom von großen, stationären Emissionsquellen gilt als eines der erfolgversprechendsten Verfahren, um mittelfristig die globalen Treibhausgasemissionen zu stabilisieren. Zahlreiche Forschungsprojekte haben in den letzten Jahren versucht, die einzelnen Technologien weiterzuentwickeln und zur Marktreife zu bringen. Die meisten Projekte konzentrieren sich dabei auf den Einsatz von Packungskolonnen, die nach der Verbrennung in das Abgasreinigungssystem von Kraftwerken integriert werden.

Packungskolonnen besitzen zwar den Vorteil, dass sie einen sehr guten Stoffübergang ermöglichen, führen aber auch zu einem hohen Druckabfall und lassen nur kleine Volumenströme zu.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Montanuniversität Leoben und der AE&E Austria wird deswegen das Potential von Sprühwäschern für die CO<sub>2</sub>-Abscheidung ermittelt. Sprühwäscher sind ideal geeignet um große Abgasvolumenströme aus kalorischen Kraftwerken zu verarbeiten.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde dazu ein bereits bestehender Versuchswäscher für die SO<sub>2</sub>-Abtrennung so umgebaut, dass man im kontinuierlichen Betrieb Versuche zur CO<sub>2</sub>-Wäsche durchführen kann. Dazu musste die bestehende Anlage um eine Desorptionseinheit erweitert werden, welche im Wesentlichen aus einem Sumpftank mit elektrischem Heizflansch und einer Desorberkolonne mit Füllkörpern besteht. Zusätzlich mussten auch noch drei Wärmetauscher, ein Flash, zahlreiche Rohrleitungen und die komplette Mess- und Regeltechnik ausgelegt und installiert werden.

Als Waschflüssigkeit für die Versuche wurde eine 30m%ige Monoethanolamin-Lösung (MEA) eingesetzt. MEA geht beim Absorptionsvorgang eine chemische Bindung mit dem CO<sub>2</sub> ein und muss deswegen unter hohem Energieaufwand wieder im Desorber regeneriert werden. Dabei fallen CO<sub>2</sub> und Wasserdampf an, welcher durch Kondensation aus dem Gasgemisch abgetrennt wird. Das abgeschiedene CO<sub>2</sub> soll in realen Anlagen verdichtet werden und in geologisch-geeigneten Schichten endgelagert werden. In der Versuchsanlage wird es allerdings wiederverwendet, um Betriebsmittel zu sparen.

Beim Auslegen des Erweiterungsteils war man durch die Gegebenheiten am Technikum des Verfahrenstechnikinstituts in Leoben beschränkt und musste vor allem auf die beschränkte elektrische Anschlussleistung und auf die limitierte Hallenhöhe Rücksicht nehmen. Die Bauteile wurden dabei so dimensioniert, dass man einen maximalen Flüssigkeitsvolumenstrom von 2 m<sup>3</sup>/h und einen Gasvolumenstrom von 160 Bm<sup>3</sup>/h verarbeiten kann. Die verfahrenstechnische Auslegung wurde vom Projektteam erarbeitet und die Detailauslegung wurde gemeinsam mit den Lieferanten der jeweiligen Bauteile durchgeführt. Als Werkstoff kam durchgehend austenitischer Edelstahl zum Einsatz um der Korrosionsgefahr durch die MEA-Lösung vorzubeugen.

So wurde schlussendlich zum bestehenden Sprühwäscher aus Plexiglas mit einem Durchmesser von 15 cm, eine Edelstahl-Kolonne mit 3,2 m Höhe und einem Durchmesser von 21 cm, sowie ein Sumpftank mit 1,6 m Länge und einem Durchmesser von 60 cm hinzugefügt. Für den Sumpftank, die Kolonne und den Flash wurden exemplarisch Festigkeitsberechnungen durchgeführt, um die Sicherheit gegenüber der Druckbeanspruchung zu überprüfen. Dabei konnte sowohl für den statischen Betriebszustand als auch für wechselnde Beanspruchungen nachgewiesen werden, dass die Bauteile ausreichend dimensioniert wurden.

In den Sumpftank wurde ein Heizstab mit einer elektrischen Anschlussleistung von 90 kW installiert. Zur Energieübertragung zwischen kalter und warmer Lösung wurde ein 98 kW Plattenwärmetauscher eingebaut. Zum Kondensieren des Wassers im Austrittsstrom aus dem Desorber, sowie zum Rückkühlen der MEA-Lösung vor dem Eintritt in den Absorber wurden ebenfalls Plattenwärmetauscher mit 41 kW bzw. 22 kW Leistung eingesetzt.

Um die Anlage möglichst zentral steuern zu können und um eine einfache Erfassung der Betriebsparameter zu ermöglichen, wurde die Mess- und Regeltechnik über National Instruments Module in eine Lookout-Programmierung integriert. Über die Benutzeroberfläche der Software lassen sich sowohl alle wesentlichen Einstellungen an der Anlage vornehmen als auch alle Betriebsparameter ablesen. Nur das Einstellen der Drehzahlen der Pumpen und des Gebläses, sowie das Einschalten der Gasmischstrecke und des Kühlwassers müssen separat vorgenommen werden.

Der eigentliche Aufbau der Anlage wurde von einer Stahlbaufirma unterstützt, welche alle notwendigen Schweißarbeiten durchführte. Für den elektrischen Anschluss des Heizflansches wurde ebenfalls ein Fachunternehmen hinzugezogen. Alle übrigen Arbeiten, wie das Aufstellen und Zusammenstellen der Bauteile, das Abdichten und Anschließen der Rohrleitungen, das Installieren und Verkabeln der Sensoren und Ventile und das Aufsetzen der Lookout-Programmierung, wurden vom Projektteam gemeinsam mit dem Technikumpersonal erledigt.

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wurden zuerst zahlreiche Undichtheiten durch die Überprüfung mittels Druckluft festgestellt. Nachdem diese beseitigt waren, wurden Pumpversuche mit Wasser vorgenommen, um letzte Leckagen zu detektieren. Das Einstellen der Pumpen konnte nach einigen Versuchen relativ problemlos durchgeführt werden. Bei der Inbetriebnahme des Gebläses und der Gasmischstrecke mussten zwar starke Schwankungen im Volumenstrom festgestellt werden, diese bewegten sich aber konstant in einer gewissen Bandbreite.

Bei der thermischen Inbetriebnahme wurden die Funktionsfähigkeit des Heizflansches und vor allem das Ansprechen der Sicherheitseinrichtungen getestet. Dabei wurden keine größeren Mängel festgestellt. Durch den großzügig dimensionierten Heizflansch ergaben sich kurze Aufheizzeiten im Sumpftank. Durch die gute Wärmedämmung hält die Anlage außerdem die Temperatur sehr konstant und mit den Wärmetauschern lassen sich die notwendigen Temperaturniveaus problemlos in den jeweiligen Anlagenteilen einstellen.

Zuletzt wurde noch ein Abscheideversuch durchgeführt, bei dem die Funktionsfähigkeit der Anlage am Auslegungspunkt von 2 m<sup>3</sup>/h Flüssigkeitsvolumenstrom und 160 Bm<sup>3</sup>/h Gasvolumenstrom demonstriert werden sollte.

Die Anlage wurde mit einer 30m%igen Lösung bestehend aus 160 kg MEA und 373 l Wasser befüllt. Im Rauchgasstrom wurde ein CO<sub>2</sub>-Gehalt von 14 vol% eingestellt und der Versuch für ca. zwei Stunden gefahren. Die Ergebnisse zeigten, dass mit diesem ersten Probelauf bereits eine Abscheidung von 20 bis 30 % erzielt werden konnte. Dies lässt weitere Steigerungen vermuten, da die Betriebsparameter noch in keiner Weise angepasst oder optimiert waren. Erst durch weiterführende Versuche, in denen die einzelnen Einflussgrößen systematisch variiert werden, kann deren genauer Einfluss auf die Abscheideleistung, den Energieverbrauch und den Lösungsmittelverbrauch bestimmt werden.

Zusammenfassend kann aber gesagt werden, dass sich die Anlage in der Inbetriebnahmephase und in den ersten Versuchen als voll funktionsfähig bestätigt hat. Sie erfüllt die an sie gestellten Anforderungen des realitätsnahen Absorptions-/Desorptions-Prozesses, des modularen und flexiblen Aufbaus und der zentralen Messwertaufnahme und der Steuerbarkeit. Durch die weiterführenden Versuche wird sie zusätzlich optimiert werden können und so sicherlich aussagekräftige Ergebnisse über das Einsatzpotential der Sprühabsorption zur Kohlendioxid-Abscheidung liefern.

## Verzeichnisse

### 7.1 Literaturverzeichnis

1. B. Metz, et al.: *Carbon Dioxide Capture and Storage*. 2005, Cambridge, New York: Cambridge University Press. 442.
2. S. Karl: *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*. 6.ed. 2009, Berlin-Heidelberg: Springer.
3. B. Armin: *Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure*. 1992, Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
4. A. Mersmann, et al.: *Thermische Verfahrenstechnik*. 2 ed. 2005, Berlin Heidelberg: Springer. 642.
5. S. Weiß, et al.: *Thermische Verfahrenstechnik*. 1993, Leipzig Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
6. K. Sattler: *Thermische Trennverfahren*. 3 ed. 2001, Mörlenbach: Wiley-VCH. 690.
7. H. Auracher, et al.: *VDI-Wärmeatlas*, ed. V.D. Ingenieure. Vol. 10. 2006, Berlin Heidelberg: Springer.
8. R. Perry, et al.: *Chemical Engineering*. 8 ed. 2007, New York.
9. D. Spasova, et al.: *CO<sub>2</sub>-Emissionsreduktion durch chemisorptive CO<sub>2</sub>-Abscheidung mit Wertstoffgewinnung*. Chemie Ingenieur Technik, 2004. **76**(12): p. 1819-1822.
10. E. Schmidt. *Gefahrstoffdatenbank: Stoffbeschreibung: Monoethanolamin*. 2008, In: <http://www.chemie.uni-hamburg.de/claks/gefahrstoffe/141-43-5.htm>.
11. J. Müller: *Sicherheitsdatenblatt Monoethanolamin 99%*. 2008, Abteilung Produktsicherheit: Duisburg. p. 6.
12. F. Jou, et al.: *The Solubility of CO<sub>2</sub> in a 30 Mass Percent Monoethanolamine Solution*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1995. **73**: p. 140-147.
13. J. Kittel, et al.: *Corrosion in MEA units for CO<sub>2</sub> capture: pilot plant studies*. Energy Procedia, 2009. **1**: p. 791-797.
14. R. Geodecke: *Fluid Verfahrenstechnik*. Vol. 2. 2006, Heppenheim: Wiley-VCH. 1219.
15. J. Carson, et al.: *Enthalpy of Solution of carbon dioxide in (water + monoethanolamine, or diethanolamine, or N-methyldiethanolamine) and (water + monoethanolamine + N-methyldiethanolamine) at T=298.15K*. Chemical Thermodynamics, 2000. **32**: p. 1285-1296.
16. Y. Liu, et al: *Representing Vapor-Liquid Equilibrium for an Aqueous MEA-CO<sub>2</sub> System Using the Electrolyte Nonrandom-Two-Liquid Model*. American Chemical Society, 1999(38): p. 2080-2090.
17. E. Ignatowitz: *Chemietechnik*. 8 ed. Europa Fachbuchreihe. 2007, Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.

18. S. Freguia, et al.: *Modelling of CO<sub>2</sub> Capture by Aqueous Monoethanolamine*. AIChE, 2003. **49**(7): p. 1676-1686.
19. M. Aksmanovic: *Die Dichte wäßriger Mono- und Diäthanolmin-Lösungen*. Chemie Ingenieur Technik, 1971. **43**(11): p. 687-689.
20. Elektra Lindau: *Produktkatalog*. 2009, In: <http://www.elektra-lindau.de>.
21. R. Sinnott, et al.: *Chemical Engineering Design*. 3 ed. Chemical Engineering. Vol. 6. 1999, Oxford: Butterworth Heinemann.
22. RS Componens: *Produkte*. 2009, In: <http://at.rs-online.com/web/>.
23. Bürkert. *Products*. 2009, In: [www.buerkert.com](http://www.buerkert.com).
24. Aircom: *Produktübersicht*. 2009, In: [www.aircom.net](http://www.aircom.net).
25. G. Strohrmann: *Messtechnik im Chemiebetrieb*. 10 ed. 2004, München: Oldenburg Industrieverlag. 450.
26. Endress+Hauser: *Messgeräte*. 2009, In: [www.de.endress.com](http://www.de.endress.com).
27. W. Wagner: *Festigkeitsberechnungen im Apparate- und Rohrleitungsbau*. 7 ed. Kamprath Reihe. 2007, Würzburg: Vogel Fachbuch.
28. H. Dobler, et al.: *Fachkunde Metall*. 54 ed. Europa Fachbuchreihe für metalltechnische Berufe. 2003, Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel.
29. ThyssenKrupp: *Werkstoffdatenblätter*. Edelstahl Service Center 2009, In: <http://www.edelstahl-service-center.de>.
30. P. Bastian, et al: *Fachkunde Elektrotechnik*. 22 ed. Europa-Fachbuchreihe für elektronische Berufe. 1999, Haan-Gruiten Europa Lehrmittel.
31. W. Wagner: *Planung im Anlagenbau*. 3. Auflage ed. 2009, Würzburg: Vogel Fachbuch. 216.

## 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Globaler Temperaturverlauf 1850 – 2008 [1] .....	7
Abbildung 2: CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre [1].....	8
Abbildung 3: Stationäre Emissionsquellen weltweit [1] .....	8
Abbildung 4: CO <sub>2</sub> -Emissionen von Primärenergieträgern [2] .....	9
Abbildung 5: Schema eines CCS-Systems [1].....	10
Abbildung 6: Verfahrensschema des Absorptions/Desorptions-Prozesses [4] .....	11
Abbildung 7: Arbeitsdiagramm für die Absorption [4].....	15
Abbildung 8: Arbeitsdiagramm für die Desorption [4].....	15
Abbildung 9: CO <sub>2</sub> -Molekül .....	19
Abbildung 10: Phasendiagramm von CO <sub>2</sub> [1].....	20
Abbildung 11: MEA-Molekül .....	21
Abbildung 12: Verfahrensschema zur CO <sub>2</sub> -Wäsche mit MEA [2].....	23
Abbildung 13: Fließschema des SO <sub>2</sub> -Wäschers .....	25
Abbildung 14: Blockfließbild der Versuchsanlage .....	27
Abbildung 15: Verfahrenfließbild der Versuchsanlage .....	30
Abbildung 16: Cp-Werte einer 30%igen MEA-Lösung bei 2 bar .....	34
Abbildung 17: Dichte von MEA-Lösungen in Abhängigkeit von der Temperatur [19] .....	36
Abbildung 18: 90 kW Heizflansch von Elektra Lindau [20].....	37
Abbildung 19: Doppelnippel .....	39
Abbildung 20: Holländer .....	39
Abbildung 21: 90°-Bogen mit Innengewinde .....	39
Abbildung 22: 90°-Bogen zum Vorschweißen.....	39
Abbildung 23: T-Stück mit Innengewinde.....	39
Abbildung 24: T-Stück zum Vorschweißen .....	39
Abbildung 25: Reduzierung .....	39
Abbildung 26: Losflansch .....	39
Abbildung 27: Vorschweißbördel .....	39
Abbildung 28: Reduzierstück .....	39
Abbildung 29: Kugelhahn .....	39
Abbildung 30: Panzerschlauch.....	39
Abbildung 31: Abmessungen des Heizflansch [20].....	41

Abbildung 32: Alfa Laval TL6 Plattenwärmetauscher .....	47
Abbildung 33: Alfa Laval M6 Plattenwärmetauscher.....	47
Abbildung 34: Alfa Laval T2 Plattenwärmetauscher .....	47
Abbildung 35: Erweitertes Verfahrensfließbild .....	50
Abbildung 36: Überdruckventil 3 bar absolut [22] .....	51
Abbildung 37: 2-Wege Proportionalventil ¾“ von Bürkert [23] .....	51
Abbildung 38: 2-Wege Proportionalventil 1/8“ von Bürkert [23] .....	51
Abbildung 39: Proportionalvolumenstromregler ¼“ PV34/40 von Aircom [24] .....	52
Abbildung 40: Thermoelement Typ K [22].....	52
Abbildung 41: Levelsensor Endress+Hauser Levelflex FMP40 .....	54
Abbildung 42: Temperaturalarm Endress+Hauser Thermophant TTR31 .....	54
Abbildung 43: Druck-Messer Endress&Hauser Cerabar S PMC71 .....	54
Abbildung 44: Druckalarm Endress&Hauser Ceraphant PTP35.....	54
Abbildung 45: Drucksensor Endress&Hauser Cerabar M PMC45.....	54
Abbildung 46: Levelalarm Endress&Hauser Liquiphant FTL50 .....	54
Abbildung 47: Panzerschlauch.....	56
Abbildung 48: Syphon .....	56
Abbildung 49: R&I Fließbild der Versuchsanlage.....	57
Abbildung 50: WIG-Schweißen [17].....	60
Abbildung 51: Skizze des Flashs .....	63
Abbildung 52: Skizze der Desorberkolonne .....	64
Abbildung 53: Skizze des Desorbersumpftanks.....	65
Abbildung 54: Maximale Vergleichsspannung am Nahtübergang .....	72
Abbildung 55: Spannungsplot bei 1bar Überdruck.....	72
Abbildung 56: Spannungsplot bei 2 bar Überdruck.....	73
Abbildung 57: Spannungsplot des vollständigen Bauteils.....	73
Abbildung 58: Aufstellungsplan Grundriss (Längen in cm) .....	76
Abbildung 59: Installierter Heizflansch .....	78
Abbildung 60: Gerüst, Kolonne und Sumpftank .....	78
Abbildung 61: Kondensator .....	80
Abbildung 62: Flash .....	80
Abbildung 63: Syphon .....	80

---

Abbildung 64: Wärmetauscher mit Anschlüssen.....	81
Abbildung 65: Schmitt-Pumpe (links) und Grundfos-Pumpe (rechts) .....	82
Abbildung 66: Rückkühler .....	82
Abbildung 67 : CO <sub>2</sub> -Rückleitung beim Austritt aus dem Flash .....	84
Abbildung 68: Verzweigungsstelle von S7 (links), S8 (links unten) und S9 (rechts).....	84
Abbildung 69: Kühlwasserverteilung .....	85
Abbildung 70: Leitstand der Versuchsanlage.....	86
Abbildung 71: Schaltschrank mit National Instrument Modulen .....	87
Abbildung 72: Schaltschrank mit Thyristor.....	88
Abbildung 73: Wärmedämmungen.....	89
Abbildung 74: Schaltschrank für P1, P2 und G1    Abbildung 75: Gasanalytik .....	91
Abbildung 76: Benutzeroberfläche der Look-Out-Programmierung .....	92
Abbildung 77: Gaszusammensetzung .....	104
Abbildung 78: Temperaturverläufe an den Desorbermessstellen .....	105
Abbildung 79: Volumenströme .....	106
Abbildung 80: Füllstandsänderungen.....	107
Abbildung 81: Abscheideleistung .....	108

### 7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lösungsenthalpien von CO <sub>2</sub> in MEA [15] .....	22
Tabelle 2: Bezeichnung der Bauteile .....	28
Tabelle 3: Bezeichnung der Ströme .....	29
Tabelle 4: Betriebsdaten des Sprühwäschers .....	31
Tabelle 5: Annahmen zur Anlagenauslegung .....	32
Tabelle 6: Ergebnis der theoretischen Heizleistungsberechnung .....	35
Tabelle 7: Ergebnisse der maximalen Heizleistungsberechnung .....	36
Tabelle 8: Strömungsgeschwindigkeiten und Druckverlust in Rohrleitungen [21] .....	37
Tabelle 9: Rohrleitungsverbindungselemente .....	39
Tabelle 10: Stromtabelle aus der AspenPlus®-Simulation .....	40
Tabelle 11: Stoffwerte von Wasser/Dampf und CO <sub>2</sub> .....	43
Tabelle 12: Behälterdimensionen .....	44
Tabelle 13: Spezifikationen der Wärmetauscher .....	46
Tabelle 14: Sensoren [26] .....	54
Tabelle 15: Auflistung aller Sensoren und Ventile .....	58
Tabelle 16: Werkstoffeigenschaften .....	61
Tabelle 18: Abmessungen für Auslegung .....	62
Tabelle 20: Anschlussliste .....	66
Tabelle 22: Maße der Normrohre .....	67
Tabelle 24: Ergebnisse der statischen Berechnungen .....	70

## 7.4 Abkürzungsverzeichnis

$\varphi$	Phi
$\sigma$	Sigma
$\nu$	Nü
$\beta$	Beta
%	Prozent
a	Jahr
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
d.h.	das heißt
GJ	Gigajoule
h	Stunde
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kmol	Kilomol
kW	Kilowatt
m	Meter
m%	Massenprozent
mm	Millimeter
mol	Mole
N	Newton
s	Sekunde
t	Tonne
vol%	Volumsprozent

# Anhang

## Anhang I: Verbrennung

### Verbrennungsreaktionen der gängigsten Brennstoffe

Constituent	Mol- ecular Formula	Combustion Reactions	Stoichiometric Oxygen and Air Requirements				Flue Gas from Stoichiometric Combustion with Air					
			kg/kg Fuel <sup>a</sup>		m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Fuel		Ulti- mate CO <sub>2</sub> %	Dew Point, <sup>c</sup> °C	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Fuel		kg/kg Fuel	
			O <sub>2</sub>	Air	O <sub>2</sub>	Air			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Carbon (to CO)	C	$C + 0.5O_2 \rightarrow CO$	1.33	5.75	b	b	—	—	—	—	—	—
Carbon (to CO <sub>2</sub> )	C	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	2.66	11.51	b	b	29.30	—	—	—	3.664	—
Carbon monoxide	CO	$CO + 0.5O_2 \rightarrow CO$	0.57	2.47	0.50	2.39	34.70	—	1.0	—	1.571	—
Hydrogen	H <sub>2</sub>	$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	7.94	34.28	0.50	2.39	—	72	—	1.0	—	8.937
Methane	CH <sub>4</sub>	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	3.99	17.24	2.00	9.57	11.73	59	1.0	2.0	2.744	2.246
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	$C_2H_6 + 3.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	3.72	16.09	3.50	16.75	13.18	57	2.0	3.0	2.927	1.798
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	3.63	15.68	5.00	23.95	13.75	55	3.0	4.0	2.994	1.634
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	$C_4H_{10} + 6.5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	3.58	15.47	6.50	31.14	14.05	54	4.0	5.0	3.029	1.550
Alkanes	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	$C_nH_{2n+2} + (1.5n + 0.5)O_2 \rightarrow nCO_2 + (n + 1)H_2O$	—	—	1.5n + 0.5	7.18n + 2.39	—	53	n	n + 1	44.01n	18.01(n + 1)
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	$C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	3.42	14.78	3.00	14.38	15.05	52	2.0	2.0	3.138	1.285
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	$C_3H_6 + 4.5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$	3.42	14.78	4.50	21.53	15.05	52	3.0	3.0	3.138	1.285
Alkenes	C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub>	$C_nH_{2n} + 1.5nO_2 \rightarrow nCO_2 + nH_2O$	3.42	14.78	1.50n	7.18n	15.05	52	n	n	3.138	1.285
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	$C_2H_2 + 2.5O_2 \rightarrow 2CO_2 + H_2O$	3.07	13.27	2.50	11.96	17.53	39	2.0	1.0	3.834	0.692
Alkynes	C <sub>n</sub> H <sub>2m</sub>	$C_nH_{2m} + (n + 0.5m)O_2 \rightarrow nCO_2 + mH_2O$	—	—	n + 0.5m + 2.39m	4.78n	—	—	n	m	22.005n	9.008m
											6.005n + 1.008m	6.005n + 1.008m
									SO <sub>x</sub>	H <sub>2</sub> O	SO <sub>x</sub>	H <sub>2</sub> O
Sulfur (to SO <sub>2</sub> )	S	$S + O_2 \rightarrow SO_2$	1.00	4.31	b	b	—	—	1.0 SO <sub>2</sub>	—	1.998 (SO <sub>2</sub> )	—
Sulfur (to SO <sub>3</sub> )	S	$S + 1.5O_2 \rightarrow SO_3$	1.50	6.47	b	b	—	—	1.0 SO <sub>3</sub>	—	2.497 (SO <sub>3</sub> )	—
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	$H_2S + 1.5O_2 \rightarrow SO_2 + H_2O$	1.41	6.08	1.50	7.18	—	52	1.0 SO <sub>2</sub>	1.0	1.880 (SO <sub>2</sub> )	0.528

## Anhang II: Treibhausgaspotentiale

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency ( $W\ m^{-2}\ ppb^{-1}$ )	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR† (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	See below*	$1.4 \times 10^{-5}$	1	1	1	1
Methane†	CH <sub>4</sub>	12†	$3.7 \times 10^{-4}$	21	72	25	7.6
Nitrous oxide	N <sub>2</sub> O	114	$3.03 \times 10^{-3}$	310	289	298	153
<b>Substances controlled by the Montreal Protocol</b>							
CFC-11	CCl <sub>3</sub> F	45	0.25	3,800	6,730	4,750	1,620
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	100	0.32	8,100	11,000	10,900	5,200
CFC-13	CClF <sub>3</sub>	640	0.25		10,800	14,400	16,400
CFC-113	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	85	0.3	4,800	6,540	6,130	2,700
CFC-114	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	300	0.31		8,040	10,000	8,730
CFC-115	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1,700	0.18		5,310	7,370	9,990
Halon-1301	CBrF <sub>3</sub>	65	0.32	5,400	8,480	7,140	2,760
Halon-1211	CBrClF <sub>2</sub>	16	0.3		4,750	1,890	575
Halon-2402	CBrF <sub>2</sub> CBrF <sub>2</sub>	20	0.33		3,680	1,640	503
Carbon tetrachloride	CCl <sub>4</sub>	26	0.13	1,400	2,700	1,400	435
Methyl bromide	CH <sub>3</sub> Br	0.7	0.01		17	5	1
Methyl chloroform	CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub>	5	0.06		506	146	45
HCFC-22	CHClF <sub>2</sub>	12	0.2	1,500	5,160	1,810	549
HCFC-123	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1.3	0.14	90	273	77	24
HCFC-124	CHClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	5.8	0.22	470	2,070	609	185
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F	9.3	0.14		2,250	725	220
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CClF <sub>2</sub>	17.9	0.2	1,800	5,490	2,310	705
HCFC-225ca	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1.9	0.2		429	122	37
HCFC-225cb	CHClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	5.8	0.32		2,030	595	181
<b>Hydrofluorocarbons</b>							
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	270	0.19	11,700	12,000	14,800	12,200
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	4.9	0.11	650	2,330	675	205
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	29	0.23	2,800	6,350	3,500	1,100
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14	0.16	1,300	3,630	1,430	435
HFC-143a	CH <sub>3</sub> CF <sub>3</sub>	52	0.13	3,800	5,890	4,470	1,590
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	1.4	0.09	140	437	124	38
HFC-227ea	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>3</sub>	34.2	0.26	2,900	5,310	3,220	1,040
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	240	0.26	6,300	8,100	9,810	7,680
HFC-245fa	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.6	0.26		3,380	1030	314
HFC-365mfc	CH <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	8.6	0.21		2,520	794	241
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CHFCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	15.9	0.4	1,300	4,140	1,640	500
<b>Perfluorinated compounds</b>							
Sulphur hexafluoride	SF <sub>6</sub>	3,200	0.52	23,900	16,300	22,800	32,600
Nitrogen trifluoride	NF <sub>3</sub>	740	0.21		12,300	17,200	20,700
PFC-14	CF <sub>4</sub>	50,000	0.10	6,500	5,210	7,390	11,200
PFC-116	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	10,000	0.26	9,200	8,630	12,200	18,200

Industrial Designation or Common Name (years)	Chemical Formula	Lifetime (years)	Radiative Efficiency (W m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	Global Warming Potential for Given Time Horizon			
				SAR† (100-yr)	20-yr	100-yr	500-yr
<b>Perfluorinated compounds (continued)</b>							
PFC-218	C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	2,600	0.26	7,000	6,310	8,830	12,500
PFC-318	c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	3,200	0.32	8,700	7,310	10,300	14,700
PFC-9-1-10	C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	2,600	0.33	7,000	6,330	8,860	12,500
PFC-4-1-12	C <sub>5</sub> F <sub>12</sub>	4,100	0.41		6,510	9,160	13,300
PFC-5-1-14	C <sub>6</sub> F <sub>14</sub>	3,200	0.49	7,400	6,600	9,300	13,300
PFC-9-1-18	C <sub>10</sub> F <sub>18</sub>	>1,000 <sup>d</sup>	0.56		>5,500	>7,500	>9,500
trifluoromethyl sulphur pentafluoride	SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub>	800	0.57		13,200	17,700	21,200
<b>Fluorinated ethers</b>							
HFE-125	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	136	0.44		13,800	14,900	8,490
HFE-134	CHF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	26	0.45		12,200	6,320	1,960
HFE-143a	CH <sub>3</sub> OCF <sub>3</sub>	4.3	0.27		2,630	756	230
HOFE-235da2	CHF <sub>2</sub> OCHClCF <sub>3</sub>	2.6	0.38		1,230	350	106
HFE-245cb2	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	5.1	0.32		2,440	708	215
HFE-245fa2	CHF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	4.9	0.31		2,280	659	200
HFE-254cb2	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	2.6	0.28		1,260	359	109
HFE-347mcc3	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	5.2	0.34		1,960	575	175
HFE-347pc12	CHF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	7.1	0.25		1,900	580	175
HFE-358pcc3	CH <sub>3</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	0.33	0.93		386	110	33
HFE-449el (HFE-7100)	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>	3.8	0.31		1,040	297	90
HFE-569ef2 (HFE-7200)	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	0.77	0.3		207	59	18
HFE-43-10pcc124 (H-Galden 1040x)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OC <sub>2</sub> F <sub>4</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.3	1.37		6,320	1,870	569
HFE-238ca12 (HG-10)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	12.1	0.66		8,000	2,800	860
HFE-338pcc13 (HG-01)	CHF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> OCHF <sub>2</sub>	6.2	0.67		5,100	1,500	460
<b>Perfluoropolyethers</b>							
PFPME	CF <sub>3</sub> OCF(CF <sub>3</sub> )CF <sub>2</sub> OCF <sub>2</sub> OCF <sub>3</sub>	800	0.65		7,620	10,300	12,400
<b>Hydrocarbons and other compounds – Direct Effects</b>							
Dimethylether	CH <sub>3</sub> OCH <sub>3</sub>	0.015	0.02			1	<<1
Methylene chloride	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	0.38	0.03			31	8.7
Methyl chloride	CH <sub>3</sub> Cl	1.0	0.01			45	13

## Anhang III: Mathcad-Berechnungen

### Kolonne

- Kenngrößen:

$$\begin{aligned} \frac{K}{\Delta v} &:= 181 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} & c2 &:= 0 & p &:= 3 = 3 \times 10^{-5} \frac{1}{\text{Pa}} \cdot \text{bar} \\ v &:= 1 = 1 & c1 &:= 0 \\ \frac{S}{\Delta v} &:= 1.5 = 1.5 \end{aligned}$$

- Erforderliche Wanddicke DN200:

$$Da_k := 219.1 \text{ mm}$$

$$sv_k := \frac{Da_k \cdot p}{p + 20 \cdot v \cdot \frac{K}{S}} = 0.272 \text{ mm}$$

$$sv_k = 0.272 \text{ mm}$$

$$\frac{s}{\Delta v} := sv_k + c1 + c2 = 0.272 \text{ mm}$$

#### Tatsächlich gewählte Wandstärke:

$$se_k := 3 \text{ mm}$$

$$Di_k := Da_k - 2 \cdot se_k = 213.1 \text{ mm}$$

Gültigkeitsbereich:

$$\frac{Da_k}{Di_k} = 1.028 \quad \blacksquare < \blacksquare 1.2$$

- Erforderliche Wanddicke 2"-Stutzens

$$Da_2 := 60.3 \text{ mm}$$

$$sv_2 := \frac{Da_2 \cdot p}{p + 20 \cdot v \cdot \frac{K}{S}} = 0.075 \text{ mm}$$

$$sv_2 = 0.075 \text{ mm}$$

$$s_2 := sv_2 + c1 + c2 = 0.075 \text{ mm}$$

Tatsächlich gewählte Wandstärke:

$$se_2 := 3.65 \text{ mm}$$

$$Di_2 := Da_2 - 2 \cdot se_2 = 53 \text{ mm}$$

Gültigkeit:

$$\frac{Da_2}{Di_2} = 1.138 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 1.2$$

- Erforderliche Wanddicke 1"-Stutzens

$$Da_1 := 33.7$$

$$sv_1 := \frac{Da_1 \cdot p}{p + 20 \cdot v \cdot \frac{K}{S}} = 0.042 \text{ mm}$$

$$sv_1 = 0.042 \text{ mm}$$

$$s_1 := sv_1 + c1 + c2 = 0.042 \text{ mm}$$

Gewählte Wandstärke:

$$se_1 := 3.25 \text{ mm}$$

$$Di_1 := Da_1 - 2 \cdot se_1 = 27.2 \text{ mm}$$

$$\frac{Da_1}{Di_1} = 1.239 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 1.2$$

- Ausschnitte im DN200-Grundkörper

1"-Ausschnitt:

$$\frac{sv_1}{se_k} = 0.014$$

va...Faktor zur Berücksichtigung von Verschwächungen durch Ausschnitte

$$\frac{Di_1}{Di_k} = 0.128$$

Aus dem Bild 7c des B9 wird va entnommen:

$$\frac{se_k}{Di_k} = 0.014$$

$$va_1 := 0.61$$

Notwendige Wandstärke:

$$s_{va\_1} := Da_k \cdot \frac{P}{\left(p + v_{a\_1} \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$s_{va\_1} = 0.446 \quad \text{mm}$$

Mittragende Breite des Grundkörpers bzw. Verstärkung b:

$$b_{-1} := [(Di_k + s_{va\_1}) \cdot s_{va\_1}]^{0.5} \quad \text{mm}$$

$$b_{-1} = 9.755 \quad \text{mm}$$

Mindestabstand zum nächsten Ausschnitt: l:

$$l := 2 \cdot b_{-1} \quad \text{wenn } l \text{ größer als } 2b \text{ keine gegenseitige}$$

Beeinflussung

$$l = 19.509$$

Mittragende Stutzenlänge ls:

$$l_{s\_1} := [1.25 \cdot [(Di_{-1} + s_{v\_1}) \cdot s_{v\_1}]]^{0.5}$$

$$l_{s\_1} = 1.194 \quad \text{mm}$$

Stutzenwandstärke:

$$ss := Da_k \cdot \frac{P}{\left(p + v_{a\_1} \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$ss = 0.446 \quad \text{mm}$$

Wandstärke von 3,25 mm ausgeführt

2" Ausschnitt:

$$\frac{sv_2}{se_k} = 0.025$$

$$\frac{Di_2}{Di_k} = 0.249$$

$$\frac{se_k}{Di_k} = 0.014$$

Aus dem Bild 7c des B9 wird  $va$  entnommen:

$$va_2 := 0.45$$

$$sva_2 := Da_k \cdot \frac{p}{\left(p + va_2 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$sva_2 = 0.604 \quad \text{mm}$$

Mittragende Breite des Grundkörpers b:

$$b_2 := [(Di_k + sva_2) \cdot sva_2]^{0.5}$$

$$b_2 = 11.357 \quad \text{mm}$$

Mindestabstand zum nächsten Ausschnitt: l:

$$l := 2 \cdot b_2$$

$$l = 22.715 \quad \text{mm}$$

wenn  $l$  größer als  $2b$  keine gegenseitige  
Beeinflussung

Mittragende Stützenlänge ls:

$$ls_2 := [1.25 \cdot [(Di_2 + sv_2) \cdot sv_2]]^{0.5}$$

$$ls_2 = 2.229 \quad \text{mm}$$

Stützenwandstärke:

$$ss := Da_k \cdot \frac{p}{\left(p + va_2 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

Wandstärke von 3,25 mm ausgeführt

$$ss = 0.604 \quad \text{mm}$$

## Flash

- Erforderliche Wanddicke DN100:

$$\phi_{1\_ke} := 18 \quad Da\_f := 100 \quad \text{mm}$$

$$sv\_f := \frac{Da\_f \cdot p}{p + 20 \cdot v \cdot \frac{K}{S}} = 0.124 \quad \text{mm}$$

$$sv\_f = 0.124 \quad \text{mm}$$

$$\xi_w := sv\_f + c1 + c2 = 0.124 \quad \text{mm}$$

Gewählte Wandstärke:

$$se\_f := 3 \quad \text{mm}$$

$$Di\_f := Da\_f - 2 \cdot se\_f = 94 \quad \text{mm} \quad \frac{Da\_f}{Di\_f} = 1.064 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 1.2$$

- Ausschnitte im DN100-Grundkörper

2"-Ausschnitt:

$$\frac{sv\_2}{se\_f} = 0.025$$

$$\frac{Di\_2}{Di\_f} = 0.564$$

$$\frac{se\_f}{Di\_f} = 0.032$$

Aus dem Bild 7d des B9 wird  $va$  entnommen

$$va\_2 := 0.4$$

$$sva\_2 := Da\_f \cdot \frac{p}{\left( p + va\_2 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S} \right)}$$

$$sva\_2 = 0.31 \quad \text{mm}$$

Mittragende Breite des Grundkörpers b:

$$b\_2 := [(Di\_f + sva\_2) \cdot sva\_2]^{0.5}$$

$$b\_2 = 5.405 \quad \text{mm}$$

Mindestabstand zum nächsten Ausschnitt: l:

$$l_w := 2 \cdot b_2$$

wenn l größer als 2b keine gegenseitige  
Beeinflussung

$$l = 10.811 \quad \text{mm}$$

Mitragende Stutzenlänge ls:

$$l_{s_2} := [1.25 \cdot [(Di_2 + sv_2) \cdot sv_2]]^{0.5}$$

$$l_{s_2} = 2.229 \quad \text{mm}$$

Stutzenwandstärke:

$$s_s := Da_f \cdot \frac{p}{\left(p + va_2 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$s_s = 0.31 \quad \text{mm}$$

Wandstärke von 3,65 mm ausgeführt

- Bestimmung der Kegelwanddicke

$$Di_{ke} := Di_f \quad Di_{ke} = 94 \quad \text{mm}$$

$$sv_{ke} := \frac{\left(p \cdot \frac{Di_{ke}}{\cos(\phi_{1_{ke}})}\right)}{\left(2 \cdot \frac{K}{S} - p\right) \cdot v} = 1.792 \quad \text{mm}$$

$$sv_{ke} = 1.792 \quad \text{mm}$$

$$s_{ke} := sv_{ke} + c1 + c2$$

$$s_{ke} = 1.792$$

Wandstärke von 3 mm ausgeführt

## Sumpftank

- Erforderliche Wanddicke DN600:

$$Da_t := 606 \quad \text{mm}$$

$$sv_t := \frac{Da_t \cdot p}{p + 20 \cdot v \cdot \frac{K}{S}} = 0.752 \quad \text{mm}$$

$$sv_t = 0.752 \quad \text{mm}$$

$$s_t := sv_t + c1 + c2 = 0.752 \quad \text{mm}$$

Gewählte Wandstärke:

$$se_t := 4 \quad \text{mm}$$

$$Di_t := Da_t - 2 \cdot se_t = 598 \quad \text{mm} \quad \frac{Da_t}{Di_t} = 1.013 \quad \blacksquare < \blacksquare \quad 1.2$$

- Ausschnitte im DN600-Grundkörper

1"-Ausschnitt:

$$\frac{sv_1}{se_t} = 0.01 \quad \frac{Di_1}{Di_t} = 0.045 \quad \frac{se_t}{Di_t} = 6.689 \times 10^{-3}$$

Aus dem Bild 7c des B9 wird  $v_a$  entnommen:

$$v_a := 0.75$$

$$sva_1 := Da_t \cdot \frac{p}{\left( p + v_a \cdot 20 \cdot \frac{K}{S} \right)}$$

$$sva_1 = 1.003 \quad \text{mm}$$

Mittragende Breite des Grundkörpers bzw. Verstärkung b:

$$b_{1,1} := [(Di_t + sva_1) \cdot sva_1]^{0.5} \quad \text{mm}$$

$$b_1 = 24.508 \quad \text{mm}$$

Mindestabstand zum nächsten Ausschnitt: l:

$$l_{1,1} := 2 \cdot b_1$$

$$l = 49.017 \quad \text{mm}$$

wenn l größer als 2b keine gegenseitige  
Beeinflussung

Mittragende Stutzenlänge ls:

$$ls_{1,1} := [1.25 \cdot [(Di_1 + sva_1) \cdot sva_1]]^{0.5}$$

$$ls_1 = 5.946 \quad \text{mm}$$

Stutzenwandstärke:

$$ss := Da_k \cdot \frac{p}{\left(p + va_1 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$ss = 0.363 \quad \text{mm}$$

DN200-Ausschnitt:

$$sv_{200} := sv_k \quad Di_{200} := Di_k \quad Da_{200} := Da_k$$

$$\frac{sv_{200}}{se_t} = 0.068 \quad \frac{Di_{200}}{Di_t} = 0.356 \quad \frac{se_t}{Di_t} = 6.689 \times 10^{-3}$$

Aus dem Bild 7c des B9 wird va entnommen:

$$va_{200} := 0.25$$

$$sva_{200} := Da_t \cdot \frac{p}{\left(p + va_{200} \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$sva_{200} = 2.998 \quad \text{mm}$$

Mitragende Breite des Grundkörpers bzw. Verstärkung b:

$$b_1 := [(Di_t + sva_{200}) \cdot sva_{200}]^{0.5} \text{ mm}$$

$$b_1 = 42.45 \text{ mm}$$

Mindestabstand zum nächsten Ausschnitt: l:

$$l := 2 \cdot b_1$$

$$l = 84.9 \text{ mm}$$

wenn l größer als 2b keine gegenseitige  
Beeinflussung

Mitragende Stutzenlänge ls:

$$ls_1 := [1.25 \cdot [(Di_1 + sva_{200}) \cdot sva_{200}]]^{0.5}$$

$$ls_1 = 10.639 \text{ mm}$$

Stutzenwandstärke:

$$ss := Da_k \cdot \frac{p}{\left(p + va_1 \cdot 20 \cdot \frac{K}{S}\right)}$$

$$ss = 0.363 \text{ mm}$$

- Wandstärke Klörperboden mit DN200-Ausschnitt

Annahme sv Klörperboden entspricht Grundwandstärke von 2mm.

$$sv_{kl} := 2 \text{ mm}$$

$$\frac{sv_{kl}}{Da_t} = 3.3 \times 10^{-3} \quad \frac{Di_{200}}{Di_t} = 0.356 \quad se_t = 4 \text{ mm}$$

Berechnungsbeiwert:

$$\beta := 1.9 + \frac{\left(0.933 \cdot \frac{D_{i\_200}}{D_{a\_t}}\right)}{\left(\frac{sv\_kl}{D_{a\_t}}\right)^{0.5}} = 7.611$$

$\beta$  entweder aus Bild 7 in B3 ablesen, oder mit Hilfe der Formel für Klöpperböden mit Ausschnitten berechnen

$$sv\_kl\_1 := \frac{D_{a\_t} \cdot p \cdot \beta}{v \cdot 40 \cdot \frac{K}{S}} = 2.867 \quad \text{mm}$$

$$sv\_kl\_1 = 2.867$$

$$s\_kl := sv\_kl\_1 + c1 + c2$$

$$s\_kl = 2.867 \quad \text{mm}$$

Wandstärke des Klöpperbodens ist tatsächlich 4 mm.