



Alexander Meister, BSc

Planung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Fallfilm-Absorptionsanlage

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Verfahrenstechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dr.techn. Mag.rer.nat., Peter Letonja

Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik

Graz, Januar 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Projektmitarbeiter am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik der Technischen Universität Graz. Im Laufe meines Studiums, auf meinem Weg zum erfolgreichen Abschluss haben mich viele verschiedene Personen begleitet, unterstützt und motiviert. Einigen gilt mein ganz besonderer Dank:

Herrn Mag.rer.nat. Dr. techn. Letonja Peter für die Übernahme der Betreuung, der meiner Kreativität und in der Umsetzung keine Grenzen setzte und mich dabei stets unterstützte. Mit seinem unersetzbaren Wissen, welches er im Zuge seiner langjährigen Tätigkeit am Institut gesammelt hat, stand er mir mit Rat und Tat zur Seite. Trotz so mancher Schwierigkeiten und Rückschläge im Projektverlauf hat er dennoch den Alltag durch seinen humorvollen Charakter lebendig gemacht und zum Weitermachen motiviert.

Dem Institutsleiter Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthäus Siebenhofer, für die Initiative und die Idee zu dieser Themenstellung, die Korrektur der Arbeit und die Übernahme der Zweitbegutachtung. Darüber hinaus unterstützte er mich stets uneingeschränkt mit seinem umfangreichen fachlichen Wissen und war damit von Beginn an bis zur erfolgreichen Fertigstellung maßgeblich beteiligt.

Herrn Fachoberinspektor Rene Fras, der mir bei konstruktiven und fertigungstechnischen Fragen stets mit seinem wertvollen Wissen half und sämtliche notwendigen Sonderanfertigungen für den Aufbau der Anlage fertigte.

Zu guter Letzt allen weiteren Mitarbeitern am Institut, die mich bei dieser Arbeit auf unterschiedliche Weise unterstützten und motivierten.

Danke!

Inhaltsverzeichnis

ABSTRACT	1
KURZFASSUNG	2
1 STAND DER TECHNIK	3
1.1 ABGASKOMPONENTEN	3
1.2 REDUKTION VON SCHWEFELDIOXIDEMISSIONEN	4
1.2.1 <i>Trockene Entschwefelungsverfahren</i>	4
1.2.2 <i>Halbtrockene Entschwefelungsverfahren</i>	5
1.2.3 <i>Nasse Entschwefelungsverfahren</i>	6
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	7
2.1 GRUNDLAGEN DER ABSORPTION	7
2.1.1 <i>Allgemeine Definitionen</i>	7
2.1.2 <i>Gegenüberstellung der Ab-/Desorption und Rektifikation</i>	9
2.1.3 <i>Einteilung der Absorptionsverfahren</i>	10
2.1.4 <i>Absorptionsmittel</i>	13
2.1.5 <i>Absorberbauarten und deren Auswahl</i>	14
2.2 GRUNDLAGEN DES PHASENGLEICHGEWICHTS VON GAS-FLÜSSIG-GEMISCHEN	17
2.2.1 <i>Gaslöslichkeit – Henry’sches Gesetz</i>	18
2.2.2 <i>Berechnung realer Phasengleichgewichte</i>	19
2.3 GRUNDLAGEN DES STOFFAUSTAUSCHES	21
2.3.1 <i>Arten der Stoffübertragung</i>	22
2.3.2 <i>Modelltheorien des Stoffüberganges</i>	28
2.4 BERECHNUNGSMETHODEN FÜR ABSORBER.....	34
2.4.1 <i>Gleichgewichtsmodell</i>	34
2.4.2 <i>Kinetische Stofftransportansätze</i>	35
2.4.3 <i>HTU-NTU-Konzept</i>	36
2.4.4 <i>Reaktionskinetik und Enhancement-Faktor</i>	38
2.5 REAKTIONSBEEINFLUSSTER STOFFAUSTAUSCH.....	39
2.5.1 <i>Kinetische Regime</i>	39
2.5.2 <i>Bedeutung der Hatta-Zahl hinsichtlich kinetischer Regime</i>	45
3 EIGENSCHAFTEN UND STOFFDATEN DER VERWENDETEN STOFFE	46
3.1 GRUNDLEGENDE EIGENSCHAFTEN UND GEFAHRENPOTENZIAL.....	46
3.1.1 <i>Deionisiertes Wasser ... H₂O</i>	46
3.1.2 <i>Natronlauge ... NaOH</i>	46
3.1.3 <i>Luft</i>	47
3.1.4 <i>Schwefeldioxid ... SO₂</i>	47
3.1.5 <i>Natriumsulfit ... Na₂SO₃</i>	48
3.2 STOFFDATEN	48
3.2.1 <i>Kinematische Viskosität</i>	49
3.2.2 <i>Dichte</i>	49
3.2.3 <i>Diffusionskoeffizient</i>	49
3.3 CHEMISMUS DES SYSTEMS SO ₂ – H ₂ O – NaOH.....	49

Inhalt

4	AUSLEGUNG	51
4.1	AUSLEGUNG EINER GEGENSTROMKOLONNE MIT KONTINUIERLICHEM PHASENKONTAKT	51
4.1.1	<i>Kolonnenhöhe</i>	53
4.1.2	<i>Abscheideleistung</i>	54
4.1.3	<i>Stoffaustausch</i>	54
4.2	GASVERSORGUNG.....	55
4.3	MASSENDURCHFLUSSREGLER (MFC).....	56
4.4	LUFTAUFBEREITUNG	58
4.5	ABGASFÜHRUNG.....	59
4.6	MESSGASFÖRDERUNG	61
4.6.1	<i>Messgasfördereinheit</i>	62
4.6.2	<i>Messgasweiche</i>	62
5	AUFBAU DER FALLFILM-ABSORPTIONSANLAGE	65
5.1	FALLFILMKOLONNE.....	67
5.1.1	<i>Geometrie der Kolonne</i>	68
5.2	FLÜSSIGPHASENSEITE.....	70
5.2.1	<i>Pumpe P1</i>	73
5.2.2	<i>Pumpe P2</i>	73
5.3	GASPHASENSEITE	74
5.4	MESSGERÄTE	78
5.4.1	<i>Temperatur</i>	78
5.4.2	<i>Druck</i>	78
5.4.3	<i>pH-Wert</i>	80
5.4.4	<i>Gasanalyse</i>	82
5.5	ANLAGENELEKTRIK	84
5.6	MESSTECHNIK	85
6	MESSDATENERFASSUNG UND VERARBEITUNG	87
6.1	HAUPTPROGRAMMTEIL DER MESSDATENERFASSUNG	88
6.1.1	<i>Grafische Benutzeroberfläche</i>	88
6.1.2	<i>Hauptprogrammteil</i>	90
6.2	UNTERPROGRAMME DER MESSDATENERFASSUNG.....	97
6.2.1	<i>Messdatendatei erstellen</i>	97
6.2.2	<i>RTD-Kalibration</i>	99
6.2.3	<i>Signalkonvertierer</i>	100
6.2.4	<i>Fehlerfilterung</i>	102
6.3	MESSDATENSPEICHERUNG.....	103
7	INBETRIEBNAHME	104
7.1	VERSUCHSREIHEN	104
7.2	ABSCHIEDELEISTUNG	105
7.3	STOFFAUSTAUSCH	106
7.4	BERECHNETE KOLONNENHÖHE	109
8	ZUSAMMENFASSUNG	110

Inhalt

9	VERZEICHNISSE	112
9.1	LITERATURVERZEICHNIS	112
9.2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	114
9.3	TABELLENVERZEICHNIS	117
10	ANHANG	118
10.1	ANGEBOTE.....	118
10.1.1	<i>SO₂ – Luft - Gasgemisch</i>	118
10.1.2	<i>Luftaufbereitung</i>	120
10.1.3	<i>Massendurchflussregler</i>	122
10.1.4	<i>Gasfördereinheit</i>	127
10.2	GERÄTEDATEN.....	129
10.2.1	<i>Messgasfördereinheit SCC-S</i>	129
10.2.2	<i>Gasanalysatormodul Limas 11</i>	132
10.2.3	<i>Temperaturfühler PT1000</i>	135
10.2.4	<i>Drucktransmitter</i>	136
10.2.5	<i>pH-Elektrode</i>	138
10.3	KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN.....	140
10.3.1	<i>Blindflansch für Vorlagebehälter</i>	140
10.3.2	<i>Sieb für statischen Mischer</i>	141
10.3.3	<i>Winkelprofil für MFC-Montage</i>	142
10.3.4	<i>Instrumentenrack</i>	144
10.3.5	<i>Ventiltafel</i>	145
10.3.6	<i>Anschlussadapter für Drucktransmitter</i>	147
10.4	LABVIEW MESSDATENERFASSUNG.....	148
10.4.1	<i>Hauptprogrammsequenz Programminitialisierung</i>	148
10.4.2	<i>Hauptprogrammsequenz Mass Flow Controller verbinden</i>	149
10.4.3	<i>Hauptprogrammsequenz Log-Datei erstellen</i>	151
10.4.4	<i>Unterprogramm Messdatendatei erstellen</i>	152
10.4.5	<i>Unterprogramm RTD-Kalibration</i>	153
10.4.6	<i>Unterprogramm Signalkonvertierer</i>	154
10.4.7	<i>Unterprogramm Fehlerfilterung</i>	155
10.5	MESSDATEN DER VERSUCHSREIHE 1	156
10.6	MESSDATEN DER VERSUCHSREIHE 2	160

Abstract

The aim of this thesis was to design, construct and commission a complete falling film absorption plant. The absorption column consists of overall three concentric glass tubes whereby the biggest tube has an inner diameter of 52 mm. The column has an active height of 2.12 m and an active mass transfer area of 0.2304 m². For the final commissioning the absorption of Sulfur dioxide SO_2 in aqueous Sodium hydroxide $NaOH$ solution was investigated.

The operating conditions of the column were varied during two experimental series, each covering eight different single experiments. With a fixed liquid flow rate of 40 L/h the overall gas flow rate was varied from 1 to 8 Nm³/h, a variable mixture of pressurized air and SO_2 . So the gas flow rate of SO_2 was set to 60 L/h for the first and to 42 L/h for the second run. The purpose of this variation was to examine the influence of different gas flow rate on mass transfer.

The pH-value of the aqueous solution of $NaOH$ was set to 11. Due to the partial pressures dependence of sulfur dioxide from the pH-value in liquid solutions, the partial pressure decreases below 0.1 Pa for pH-values higher than 6.3 and therefore the SO_2 concentration in the liquid phase is approximately zero. Consequently the mass transfer is only dependent on the mass transfer coefficient of the gaseous phase β_g and the mass transfer area. The mass transfer coefficient of the gaseous phase is then equaling the reaction rate constant k . This relationship was investigated in the final commissioning.

The determination of the rate constant is based on an overall balance of the absorption column assuming first order reaction. To determine β_g an empirical relationship for the Sherwood number for trickle films on vertical walls and pipes by *Vauck* was used. For all sixteen experiments the comparison between β_g and k show the same order of magnitude. Within a range of $\pm 15\%$ $k_{apparent}$ and β_g is very comparable.

In a last step the actual height of the falling film column was compared with a calculated height. The calculation is based on the HTU-NTU concept with simplification for highly dilute systems and combined with the model for reaction influenced mass transfer by *Levenspiel*. Thereby the type B regime for fast chemical reaction was used. Finally the comparison showed that the calculated height fits the actual height within a range of $\pm 2,36\%$. Therefore the chosen model seems to be suitable to describe the installed system.

Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Planung, der Aufbau und abschließend die Inbetriebnahme einer Fallfilm - Absorptionsanlage. Im Zuge der Inbetriebnahme wurde die ordnungsgemäße Funktion der Anlage anhand der Absorption von SO_2 in wässriger $NaOH$ - Lösung überprüft. Für die Inbetriebnahme wurden insgesamt zwei Versuchsreihen, zu je acht Einzelversuchen durchgeführt. Die Betriebsbedingungen hinsichtlich des Gasdurchsatzes wurden für alle sechzehn Versuche variiert, um den Einfluss verschiedener Gasvolumenströme auf den Stofftransport zu überprüfen. Das eingeleitete Gas war ein variables Gemisch aus Druckluft und SO_2 . In jeder Versuchsreihe wurde der Gesamtgasdurchsatz zwischen 1 und 8 Nm^3/h und darin der SO_2 - Durchfluss mit 60 L/h für die erste und mit 42 L/h für die zweite Versuchsreihe festgelegt.

Der pH - Wert der wässrigen Phase wurde auf 11 eingestellt, da der Partialdruck von Schwefeldioxid vom pH-Wert der wässrigen Lösung abhängt. Für pH-Werte größer als 6,3 sinkt der Partialdruck unter 0,1 Pa, wodurch die Konzentration von SO_2 in der flüssigen Phase annähernd null ist. Daraus folgt, dass der Stofftransport lediglich vom gaseitigen Stoffübergangskoeffizient β_g und der Stoffaustauschfläche abhängig ist. Zudem muss der Stoffübergangskoeffizient gleich der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k sein. Dieser Zusammenhang zwischen β_g und k wurde im Zuge der Inbetriebnahme überprüft.

Die Bestimmung von k erfolgt durch einen bilanziellen Ansatz um den Absorber für Reaktionen erster Ordnung. Um β_g zu bestimmen, wurde ein empirischer Ansatz für die Sherwood-Zahl für Rieselfilme an vertikalen Wänden und Rohren nach *Vauck* verwendet. Alle 16 Experimente zeigen, dass β_g und k in derselben Größenordnung mit einer Abweichung von $\pm 15\%$ zueinander liegen.

Schlussendlich war die tatsächliche Höhe der Fallfilmkolonne mit der berechneten theoretischen Höhe zu vergleichen. Dazu wurde das HTU-NTU Berechnungsmodell mit Vereinfachungen für verdünnte Systeme verwendet. Erweitert wurde das Konzept mit dem Modell nach *Levenspiel* durch reaktionsbeeinflussten Stofftransport. Das Regime B für schnelle chemische Reaktionen wurde verwendet. Der Vergleich der Höhen zeigte, dass die berechnete Höhe von der tatsächlichen Höhe im Bereich von max. $\pm 2,36\%$ abweicht. Somit zeigte sich, dass das verwendete Modell geeignet ist, um das vorliegende System zu beschreiben.

1 Stand der Technik

1.1 Abgaskomponenten

In Abhängigkeit vom vorangegangenen (Verbrennungs-) Prozess und den eingesetzten Stoffen (Brennstoffen), sowie den verarbeiteten Materialien, gibt es eine immense Anzahl an möglichen gasförmigen Schadstoffen im Abgasstrom. Diese Schadstoffe können nach Stoffgruppen laut Tabelle 1 klassifiziert werden. Durch die signifikant größere Zahl an organischen Schadstoffkomponenten seien hier nur die wichtigsten erwähnt [1].

Tabelle 1: Anorganische und die wichtigsten organischen Abgaskomponenten [1]

Gruppe	Verbindung	Name	Chemische Formel
Anorganisch	Schwefel	Schwefeldioxid	SO_2
		Schwefelwasserstoff	H_2S
		Schwefeltrioxid	SO_3
		Schwefelhalogene	$S_2Cl_2, S_2Br_2, etc.$
		Kohlenstoffdisulfid	CS_2
		Kohlenoxidsulfid	COS
	Stickstoff	Stickstoffmonoxid	NO
		Stickstoffdioxid	NO_2
		Distickstoffmonoxid	N_2O
		Distickstofftrioxid	N_2O_3
		Distickstofftetroxid	N_2O_4
		Salpetrige Säure	HNO_2
		Salpetersäure	HNO_3
	Ammoniak	NH_3	
	Halogene	Halogene	F_2, Cl_2, Br_2, I_2
		Halogenwasserstoffe	HF, HCl, HBr, HI
		Halogenide	$PCl_3, AsCl_3, PbCl_2, SiCl_4, HgCl_2, etc.$
	Kohlenstoff	Kohlenstoffdioxid	CO_2
		Dicyan	CN_2
		Cyanwasserstoff	HCN
		Chlorcyan	$ClCN$
		Phosgen	$COCl_2$
	Wasserstoff	Phosphin	PH_3
		Arsenhydrid	AsH_3
		Antimonhydrid	SbH_3
		Disilan	Si_2H_6
Diboran		B_2H_6	
Selenwasserstoff		H_2Se	
Tellurwasserstoff		H_2Te	
Organisch	Organische Kohlenwasserstoffe	Naphthene, Halogenkohlenwasserstoffe, Aromatische Kohlenwasserstoffe, Paraffine, Alkohole, Ketone, Ester, Ether, Carbonsäuren, Dioxine, Furane, Aldehyde, Phenole, Thiole, Amine, etc.	

Wie bereits in Tabelle 1 ersichtlich ist, kann Schwefel in Abgasströmen in den Formen Schwefeldioxid SO_2 , Schwefeltrioxid SO_3 , Schwefelwasserstoff H_2S , Kohlenstoffdisulfid CS_2 , Kohlenoxidsulfid COS oder in Verbindung mit

Halogenen als S_2Cl_2 oder S_2Br_2 auftreten. Von allen genannten Schwefelverbindungen stellt das Schwefeldioxid das größte Emissionsvolumen dar [1].

Im folgenden Kapitel soll nun auf die Abgasreinigungsverfahren für diesen Schadstoff näher eingegangen werden.

1.2 Reduktion von Schwefeldioxidemissionen

Schwefeldioxid entsteht u.a. im Rahmen der Energiebereitstellung durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe. Neben der Verbrennung fossiler Brennstoffe, entsteht Schwefeldioxid auch bei der Veredelung von Kohle, bei der Erzeugung von Keramiken, oder bei der Verbrennung von Müll. Bei der Herstellung von Zement, Eisenlegierungen, Aluminium, Glas und Glasfasern, sowie Schwefel und Schwefelsäure wird ebenfalls Schwefeldioxid gebildet und freigesetzt [1], [2].

Die Verminderung des Schwefeldioxids kann entweder bereits am Ort der Entstehung erfolgen, wie z.B. bei Verbrennungsprozessen direkt im Brennraum. Andererseits kann die Emissionsminderung auch in einem nachfolgenden Prozessschritt, in Form einer Abscheidung, erzielt werden. Bei den Abscheideverfahren wird zwischen trockenen, halbtrockenen und nassen Verfahren unterschieden [1].

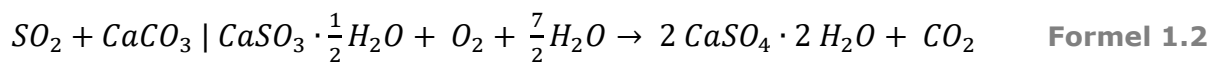
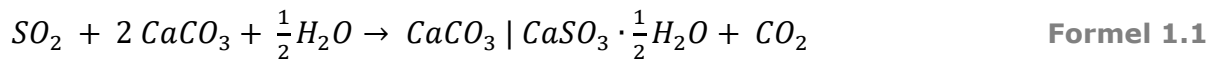
In den nachfolgenden drei Kapiteln werden diese Verfahren kurz beschrieben. Da es den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde, wird auf eine detaillierte und ausführliche Beschreibung verzichtet und auf entsprechende Fachliteratur (vgl. [1]–[4]) verwiesen.

1.2.1 Trockene Entschwefelungsverfahren

Bei den trockenen Entschwefelungsverfahren wird die Abscheidung des SO_2 durch Umsetzung mit einem Adsorptionsmittel durchgeführt. Das bedeutet, das Adsorptionsmittel wird dem Rauchgas als Feststoff zugeführt und die Umsetzung erfolgt als Gas-Feststoffreaktion [3].

Am Beispiel eines Kraftwerks, welches Energie durch Verbrennung fossiler Brennstoffe bereitstellt, sieht die Entschwefelung des Rauchgases häufig folgendermaßen aus: Da das Schwefeldioxid einen sauren Charakter besitzt, werden hierfür basische Adsorbentien, wie z.B. Calciumkarbonat $CaCO_3$, Calciumoxid CaO (Kalk) oder Calciumhydroxid $Ca(OH)_2$ (Kalkmilch)

eingesetzt. Die Abscheidung des sauren SO_2 mit Hilfe des basischen Sorbens erfolgt in zwei (Haupt-) Reaktionen. In der ersten Hauptreaktion (siehe Formel 1.1) wird mit Calciumkarbonat $CaCO_3$ (Kalkstein) primär Calciumsulfit $CaSO_3$ gebildet. In der zweiten Hauptreaktion, siehe Formel 1.2, wird mit Hilfe von zusätzlich eingeblasener Luft das Sulfit in Calciumsulfat (Gips) umgewandelt [1]–[3].



Die trockene Reaktion hat zwar den Vorteil einer einfachen verfahrenstechnischen Umsetzung, da das Rauchgas nicht abgekühlt werden muss, jedoch gestaltet sich eine großtechnische Umsetzung aufgrund des komplexen Reaktionsmechanismus als nicht realisierbar. Lediglich bei hohen stöchiometrischen Überschüssen an Calcium(carbonat) in Wirbelschichtfeuerungen werden ausreichend hohe Entschwefelungsgrade erreicht [3].

1.2.2 Halbtrockene Entschwefelungsverfahren

Halbtrockene auch semitrockene ähneln den trockenen Entschwefelungsverfahren. Bei diesem Verfahren wird das Ab-/Adsorbens jedoch als Suspension mit einer wässrigen Waschflüssigkeit bereitgestellt, welche in das Abgas feinst verteilt eingesprüht wird. Die Tropfengröße liegt bei etwa 100 μm . Die Waschflüssigkeit (meist Wasser) verdampft und kühlt die Gasphase ab. Im Wechselspiel löst sich das Schwefeldioxid in den Tröpfchen, reagiert mit dem Sorptionsmittel. Das Ab-/Adsorptionsprodukt liegt als trockener Staub vor und muss durch einen Elektro- oder Schlauchfilter aus der Abluft abgeschieden werden [2], [3]. Abbildung 1 zeigt eine semitrockene Entschwefelung mittels Sprühabsorber.

Bei diesem Verfahren der Sprühabsorption können signifikant höhere Entschwefelungsgrade (90-95%) erzielt werden. In den großtechnischen Anwendungen haben sich die Waschverfahren mit Gips als Endprodukt als am wirtschaftlichsten erwiesen [3].

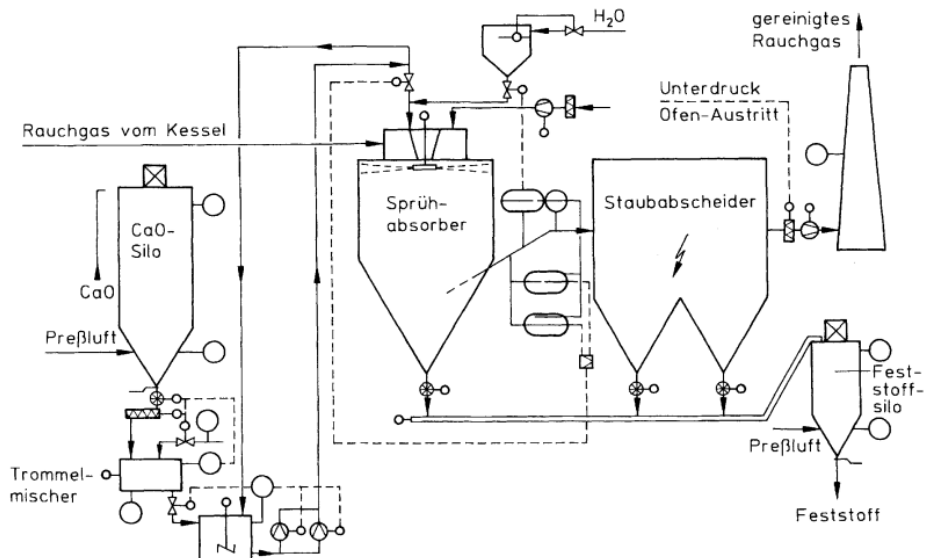


Abbildung 1: Semitrockene Rauchgasreinigung durch Sprühabsorption [2]

1.2.3 Nasse Entschwefelungsverfahren

Bei den nassen Entschwefelungsverfahren wird im Gegensatz zu den semitrockenen das verwendete Lösungsmittel während des Absorptionsvorganges nicht verdunstet.

Eine Abscheidung des Absorptionsproduktes muss durch Koppelung mit weiteren Trennapparaten, wie z.B. Filtration oder einer Abscheidung mittels Hydrozyklon erfolgen.

Ein schematisches Nasswaschverfahren zur Rauchgasentschwefelung einer Müllverbrennungsanlage ist in Abbildung 2 dargestellt.

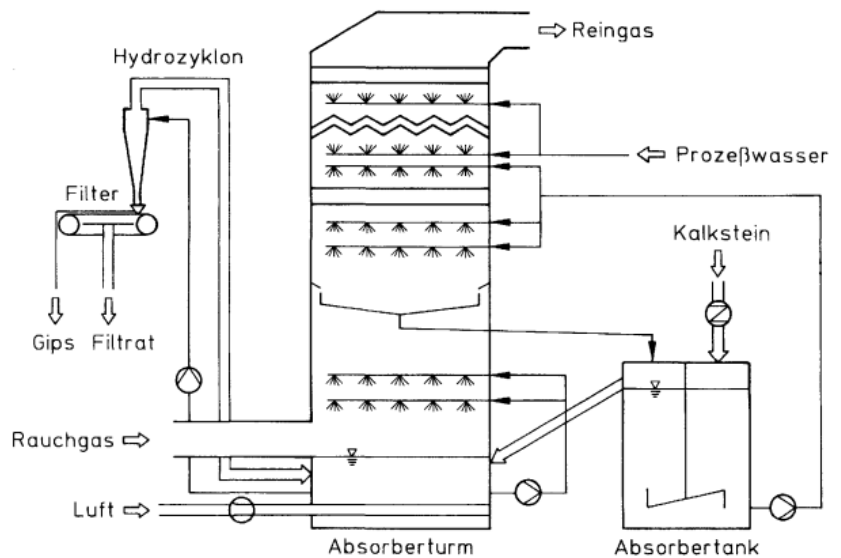


Abbildung 2: Vereinfachtes, schematisches Nasswaschverfahren zur Entschwefelung von Rauchgasen einer Müllverbrennungsanlage [2]

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Absorption

2.1.1 Allgemeine Definitionen

Unter dem Begriff Absorption (alternativ Wäsche) versteht man die Aufnahme und das Lösen von Gasen in einer Flüssigkeit. Die Absorption ist ein thermisches Trennverfahren, welches ein Wasch-, Lösungs- oder Absorptionsmittel als Hilfskomponente verwendet. Gas- und Dampfgemische können mittels Absorption teilweise getrennt werden. Durch den Kontakt zwischen dem Gasmisch und Absorptionsmittel werden eine oder mehrere gewünschte Gaskomponenten, welche im Ausgangsgemisch nur in geringen Mengen vorliegen, möglichst selektiv vom Lösungsmittel aufgenommen. Dadurch wird eine Trennung des Gasmisches erreicht [2].

Die „aufnehmende“ Waschflüssigkeit bzw. Aufnehmerphase wird als Absorbens und im beladenen Zustand als Absorbat bezeichnet. Die zwischen Abgeber- und Aufnehmerphase ausgetauschte gasförmige Komponente wird im ungebundenen Zustand als Absorptiv und im gebundenen Zustand als Absorpt bezeichnet [2].

Die Abscheideleistung (Effizienz) der Absorption ist abhängig von Temperatur und Druck. Bei niedriger Temperatur und erhöhtem Druck wird eine bessere Abscheidung erzielt.

Unter dem Begriff Desorption bzw. Strippen versteht man den Prozess in umgekehrter Richtung, also das Entweichen eines gelösten Gases aus einer Flüssigkeit. Die Abhängigkeit von Temperatur und Druck ist bei der Desorption vice versa gegeben [2], [5], [6].

Um das mit dem aufgenommenen Gas beladene Absorbat als Waschmittel wiederverwenden zu können, wird der Absorptionsprozess meist mit einer Regeneration gekoppelt.

Das Waschmittel durchläuft damit einen Kreislauf, wie er in Abbildung 3 schematisch dargestellt ist.

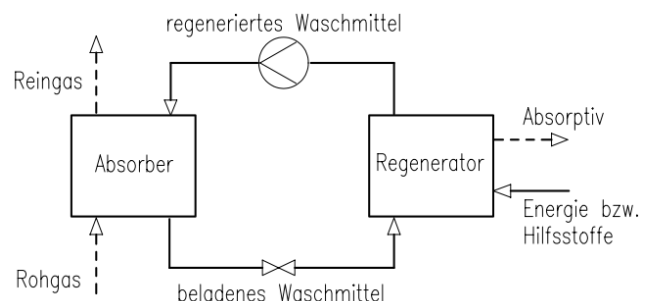


Abbildung 3: Grundlegendes Verfahrensschema eines Absorptionsprozesses [5]

Unter dem Begriff Rohgas versteht man das (noch) unbehandelte Gasgemisch, welches in den Absorber gelangt und das Absorptiv beinhaltet. Als Reingas wird dann das aus dem Absorber austretende Gasgemisch bezeichnet, bei dem die Konzentration des Absorptives signifikant reduziert wurde.

Für die Regeneration des beladenen Absorbens können prinzipiell alle Stofftrennverfahren angewandt werden. Das Drosseln, das Strippen (Desorbieren) mit Inertgasen, die Rektifikation oder auch Kombinationen aus diesen werden am häufigsten verwendet [5].

Eine beispielhafte Kombination aus Drosselung und Rektifikation ist in Abbildung 4 ersichtlich.

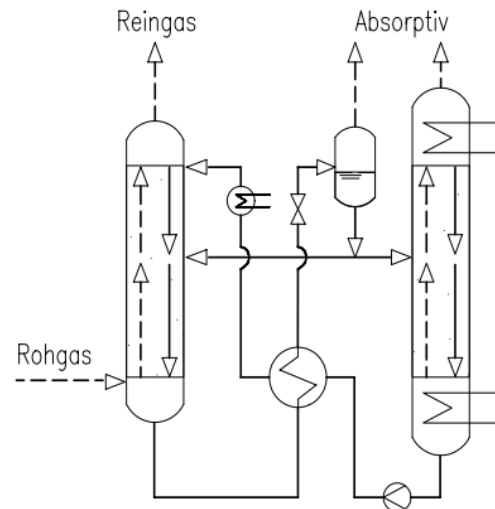


Abbildung 4: Absorptionsprozess mit Regeneration des Waschmittels durch Drosseln (m.o.) und Rektifizieren (re.) [5]

Die Absorption wird hauptsächlich zur Trennung von Gasgemischen und zur Gasreinigung angewandt. Bei der Gasgemischtrennung sind die gelösten Gasgemischkomponenten erwünschte Produkte. Im Gegensatz dazu steht die Gasreinigung. Wie der Begriff erahnen lässt, werden bei der Gasreinigung Gasgemische möglichst weitgehend von unerwünschten Schadstoffen befreit. Bei dieser zweiten Anwendung stellt die Absorption als „nasse Gasreinigung“ (siehe 1.2.3) ein wichtiges Reinigungsverfahren im Bereich des Umweltschutzes dar [2].

Konkrete Anwendungsbeispiele der Absorption sind u.a. die

- Entfernung von CO_2 aus Rauch- und Synthesegasen mittels Druckwasser
- Entfernung von CO_2 aus Synthesegasen mittels wässriger Karbonatlösungen
- Entfernung von SO_2 aus Rauchgasen mittels Kalkmilch
- Entfernung von H_2S aus Synthesegasen mittels Alkanolaminlösungen
- Abtrennung von NH_3 aus einem NH_3 -Luftgemisch durch Wasser
- Absorption nitroser Gase in Wasser bei der Herstellung von Salpetersäure
- Absorption von Chlor bzw. Ozon in Wasser zur Desinfektion
- Rückgewinnung von Lösungsmitteln aus Abgasströmen [2], [6].

2.1.2 Gegenüberstellung der Ab-/Desorption und Rektifikation

Die Ab- bzw. Desorption sind der Rektifikation sehr ähnlich, da in der Kolonne die gleichen grundlegenden Vorgänge ablaufen. Flüssige und gasförmige Phasen werden (im Regelfall) im Gegenstrom zueinander durch den Apparat geführt, während zwischen beiden Phasen ein Stoffaustausch stattfindet.

Anhand der Bedingungen an den Kolonnenenden lässt sich der Unterschied zwischen der Rektifikation und der Ab- bzw. Desorption lokalisieren. Veranschaulicht wird dies durch die Abbildung 5.

Am Kopf der Absorptionskolonne wird die Flüssigkeit \dot{L} ein- und der Gasstrom \dot{G} ausgeleitet. Beide Ströme stehen in keiner Relation zueinander.

Im Gegensatz dazu, ist bei der Rektifikation ein Teil der am Kopf eingeleiteten Flüssigkeit (Rückfluss \dot{L}_R oder üblicherweise \dot{R}) zugleich ein Teil des aus der Kolonne austretenden Dampfes \dot{D} . Dadurch ergibt sich eine gegenseitige Koppelung des Flüssigkeits- und Gasstromes. Dieselbe Verknüpfung findet sich auch unter den Stoffströmen (\dot{B} und \dot{G}) am Sumpf der Kolonne. Die Koppelung bezieht sich einerseits auf die Mengen, andererseits auch auf die Konzentrationen bzw. Zusammensetzung innerhalb der Ströme.

Die Ab- bzw. Desorption stellt somit den allgemeineren Fall einer Gasflüssig-Gegenstromkolonne dar [5].

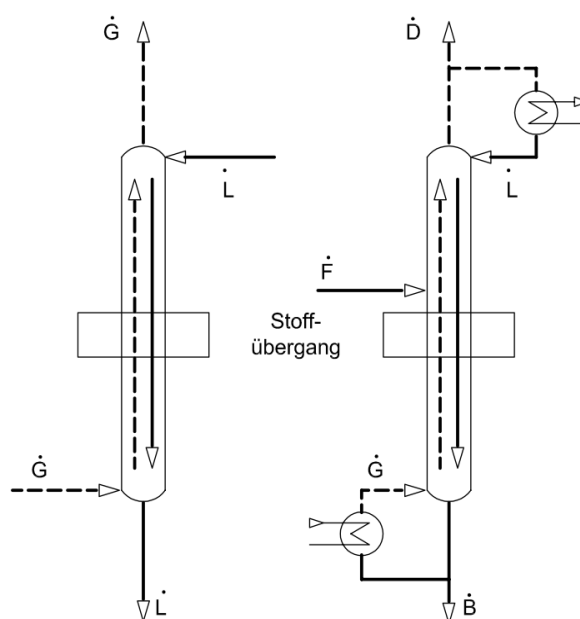


Abbildung 5: Grafische Gegenüberstellung der Absorption (links) und der Rektifikation (rechts) [5]

2.1.3 Einteilung der Absorptionsverfahren

Sämtliche bekannte Absorptionsverfahren können nach den folgenden Gesichtspunkten klassifiziert werden: Die Einteilung erfolgt anhand der

1. Umsetzung der Abscheidung,
2. Art des Phasenkontaktes,
3. Kontinuität des Prozesses und
4. Ausgestaltung der Phasenführung.

2.1.3.1 Einteilung nach der Umsetzung der Abscheidung

Die Abscheidung des Absorptivs kann über zwei verschiedene Arten erfolgen. Entweder kommt es zu einer Abscheidung durch rein physikalische Mechanismen, dann handelt es sich um eine physikalische Absorption. Erfolgt die Umsetzung jedoch durch Zugabe eines oder mehrere Reaktanten zum Lösungsmittel, welche in weiterer Folge mit dem Absorptiv reagieren, spricht man von einer chemischen Absorption.

Physikalische Absorption

Zu der physikalischen Absorption, kurz Physisorption, zählen alle Anwendungen, die ohne chemische Reaktion ablaufen. Eine praktische und zugleich sehr häufige Anwendung ist beispielsweise das Lösen von Sauerstoff in Wasser. In Kläranlagen wird dies in sogenannten Belebungsbecken zur Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen angewandt.

Die Sauerstoff-Anreicherung des Wassers bis zu einer gewünschten Sättigung erfolgt durch entsprechend lange Belüftung.

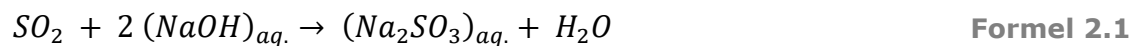
Die chemischen Reaktion während des Absorptionsvorganges stellt den entscheidenden Vorteil gegenüber der Physisorption dar. Die Regenerierung des Absorbats kann relativ einfach beispielsweise durch Desorption realisiert werden.

Die klassische Physisorption findet Anwendung, wenn

- die Behandlung von großen Abgasvolumenströmen mit relativ hoher Beladung des Absorptivs erforderlich sind,
- Schadstoffe schwer sieden,
- Abgas- und Schadstoffbelastung schwanken,
- Staub-, aerosol- und gasförmige Schadstoffe vorliegen,
- hohe Gastromdichten und kurze Verweilzeiten im Absorber gefordert sind,
- eine Rückgewinnung der Absorptive (als Wertstoff) erwünscht ist und
- das Absorptiv eine gute Löslichkeit im Absorbens aufweist [2], [5].

Chemische Absorption

Unter der chemischen Absorption, kurz Chemisorption, versteht man nun all jene Arten, die unter Anwesenheit einer chemischen Reaktion stattfinden. Gleich wie bei der Physisorption wird das Absorptiv nach erfolgtem Stoffaustausch im Lösungsmittel zunächst rein physikalisch gelöst. Im Anschluss erfolgt dann jedoch noch die chemische Reaktion des Absorptivs, welche sowohl irreversibel, als auch reversibel sein kann. Dies wird dadurch erreicht, dass dem Absorbens eine Substanz hinzugefügt wird, welche mit dem Absorptiv reagiert. An dieser Stelle sei wieder das Beispiel der Rauchgasentschwefelung mit Kalkmilch zum Endprodukt Gips erwähnt. Ein weiteres Beispiel der Chemisorption stellt die irreversible SO_2 -Abscheidung in wässriger Natronlauge $NaOH$ dar. Wie in Formel 2.1 ersichtlich ist, wird das SO_2 zu Natriumsulfit Na_2SO_3 umgesetzt [5]:



Durch die Wahl einer geeigneten chemischen Reaktion kann das Absorptiv sehr selektiv absorbiert werden. Im Zusammenhang mit thermischen Trennoperationen bewirken Reaktionen im Allgemeinen eine Beschleunigung des Stofftransportes [7]. Auf das Thema Stofftransport bzw. -austausch wird im Kapitel 2.3 noch näher eingegangen.

Eine wichtige Anforderung an die Reaktion selbst ist, dass diese möglichst schnell abläuft. Je nach angestrebter Reaktion ist zu beachten, dass in Folge des exothermen oder endothermen Charakters, Reaktionswärme prozesstechnisch berücksichtigt werden muss [5].

Nachfolgend seien einige Vor- und Nachteile gegenüber der Physisorption zusammengefasst [5]:

- ⊕ Verringerung der Apparategrößen
- ⊕ Erhöhung der Aufnahmefähigkeit des Absorbens
- ⊕ Absorption auch bei schlechter Löslichkeit des Absorbens wirtschaftlich
- ⊕ Verbesserte Selektivität der Absorption
- ⊕ Stoffübergang kann durch chemische Reaktion beschleunigt werden
- ⊖ Aufwändige Lösungsmittelregeneration
- ⊖ Kenntnisse über die Reaktionskinetik erforderlich
- ⊖ Prozesstechnische Berücksichtigung der Reaktionswärme notwendig

2.1.3.2 Einteilung nach der Art des Phasenkontaktes

Wie bereits unter Allgemeine Definitionen beschrieben, kommt es bei der Ab- bzw. Desorption zu einem Stoffaustausch zwischen gasförmigen und flüssigen Trägerphasen. Diese beiden Phasen werden innerhalb eines Absorptionsapparates in intensiven Kontakt gebracht. Der Phasenkontakt kann grundsätzlich auf drei verschiedenen Arten (lt. Tabelle 2) erfolgen:

Tabelle 2: Drei Arten des Phasenkontaktes bei der Absorption [5], [6]

Art bzw. Regime	Beschreibung	Anwendungsgebiet
<i>Blasenregime</i>	Das Gas wird im Waschmittel dispergiert, während das Waschmittel eine kontinuierliche Phase bildet.	Sollen schwerlösliche Gase vom Waschmittel gelöst werden und/oder der Transportwiderstand des Waschmittels sehr groß sein, wird das Blasenregime angewandt.
<i>Tropfenregime</i>	Das Lösungsmittel wird im Gasstrom in Form von Tropfen dispergiert, das Gas bildet die kontinuierliche Phase.	Leicht lösliche Gase und kurze Verweilzeiten resultieren in einer Anwendung der Waschmittel-Dispergierung (Flüssigseitiger Stofftransportwiderstand vernachlässigbar klein).
<i>Sprudelregime</i>	Der Übergang zwischen den obigen beiden Regimen, die beiden Phasen werden so intensiv bewegt, sodass keine eindeutig dispergierte Phase vorliegt.	Bei hohen Gaslöslichkeiten und stark korrodierenden Waschmitteln kommt das Sprudelregime zum Einsatz.

2.1.3.3 Einteilung nach der Art der Phasenführung

Die gasförmige und flüssige Phase können auf drei verschiedenen Arten zueinander durch den Absorber geführt werden: Im Gleich-, Gegen- oder Kreuzstrom.

Beim Gleichstrom wird die abgebende Gasphase in gleicher Richtung wie die aufnehmende Lösungsphase durch den Apparat geführt. Genau in entgegengesetzter Richtung zueinander werden die beiden Phasen beim Gegenstrom geführt. Die Gasphase strömt aufwärts durch den Apparat, während das Absorbens zum Boden fließt. Bei der Absorption im

Phasenkreuzstrom wird die Gasphase horizontal durch einen oder mehrere Absorber geführt. Das Waschmittel fließt wie beim Gegenstrom abwärts und kommt so mit der kreuzenden Gasphase in Kontakt [2].

Die zuvor beschriebene Unterscheidung hängt jedoch von den betrachteten Systemgrenzen ab. Beispielsweise seien Absorptionskolonnen mit Bodeneinbauten genannt, welche prinzipiell im Gegenstrom betrieben werden. Die Betrachtung eines einzelnen Bodens zeigt jedoch, dass dort die gasförmige und die flüssige Phase einander im Kreuzstrom begegnen [8].

2.1.3.4 Einteilung nach der Kontinuität

Absorptionsapparate können sowohl kontinuierlich, als auch diskontinuierlich betrieben werden.

2.1.4 Absorptionsmittel

Um einen wirtschaftlichen, umweltfreundlichen und vor allem betriebssicheren Prozess gewährleisten zu können, bedarf es auch der entsprechenden Wahl des Absorbens. Folgende Anforderungen werden gestellt [2], [4], [6]:

- Hohe Verfügbarkeit,
- Preislich günstig,
- Gute thermische und chemische Beständigkeit,
- Hohe Selektivität,
- Hohe Löslichkeit in Bezug auf die Absorptive,
- Einfache Regenerierbarkeit,
- Niedriger Dampfdruck des Absorbens (Vermeidung von Verdunstungsverlusten bei Ab- bzw. Desorption),
- Geringe Viskosität,
- Geringe Korrosivität im Hinblick auf die verwendeten Werkstoffe,
- Ungiftig und
- niedriger Schmelzpunkt, nicht zu hoher Siedepunkt, jedoch hoher Flammpunkt.

Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt von Beispielen für gängige Absorptiv/Absorbens-Kombinationen. Bei diesem Ausschnitt wurde das Augenmerk bei den Absorptiven lediglich auf typische Schwefelverbindungen gelegt.

Tabelle 3: Beispiele für Absorptiv/Absorbens-Kombinationen [4]

Anorganische Absorptive	Absorbentien
Schwefelwasserstoff, Kohlenoxidsulfid	Methanol, Wässrige Lösungen von $NaOH$, K_2CO_3 , Ethanolamine
Halogenwasserstoffe (HCl , HF , HBr), Schwefeltrioxid	Wasser
Schwefeldioxid	Wässrige Lösungen von $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, NH_3 , Na_2SO_3 , Na -acetat, Na -citrat, Wässrige Suspens. von MgO , CaO , $CaCO_3$

2.1.5 Absorberbauarten und deren Auswahl

Um eine möglichst große Stoffaustauschfläche zwischen der Gas- und Flüssigphase zu erreichen, gibt es einige Methoden. Damit verbunden steht eine Vielzahl an unterschiedlichen Bauarten von Absorbern zu Verfügung. Eine Beurteilung der relevanten Prozessparameter und eine darauf aufbauende strukturierte Auswahl des bestmöglich geeigneten Typs sind bei der großen Fülle an verschiedenen Ausführungen unerlässlich. Aus diesem Grund werden nach den Arten auch einige Auswahlkriterien behandelt.

Im Nachfolgenden werden die gängigsten Absorberarten nach [2], [4], [6] genannt, deren Aufbau schematisch dargestellt und Einteilungsvarianten dieser vorgestellt.

Eine Möglichkeit, die verschiedenen Bauformen zu kategorisieren, besteht darin, sie anhand der (Kolonnen-) Einbauten zu unterteilen:

Tabelle 4: Einteilung der Absorberarten anhand der Einbauten [2], [4]

Art der Einbauten	Ohne	Feststehend, bewegt	Rotierend
Absorbertyp	Oberflächen-, Sprüh-, Venturi-, Injektor-, Riesel- und Zentrifugal- Absorber	Füllkörper-, oder Bodenkolonnen, Wirbelschichtabsorber, Wirbelstromwäscher	Rotationszerstäuber, Tellerabsorber

Eine weitere Variante der Kategorisierung stellt eine Einteilung aufgrund des Phasenkontaktes bzw. des Regimes dar, wie unter Kapitel 2.1.3.2 beschrieben [6]:

Absorptionsapparate ohne einer eindeutig dispergierten Phase:

Oberflächenabsorber

Fallfilmabsorber

Füllkörperkolonne

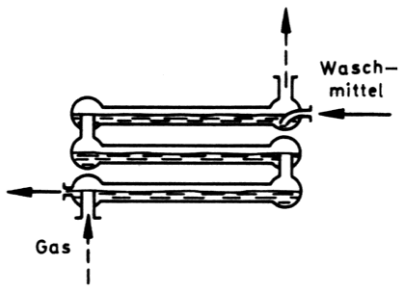


Abbildung 6:
Oberflächenabsorber [6]

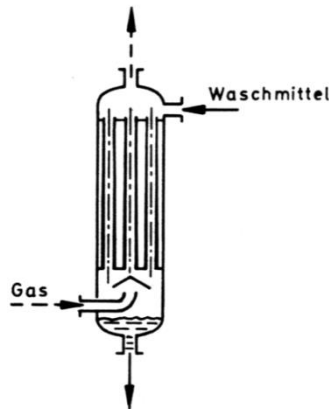


Abbildung 7:
Fallfilmabsorber [6]

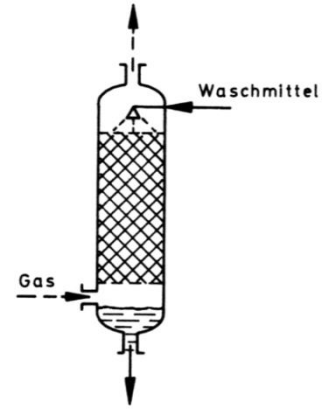


Abbildung 8:
Füllkörperkolonne [6]

Absorptionsapparate mit Dispergierung der Gasphase:

Blasensäule

Bodenkolonne

Strahldüsen-
wäscher

Begaster
Rührkessel

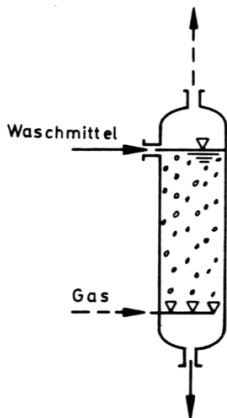


Abbildung 9:
Blasensäule [6]

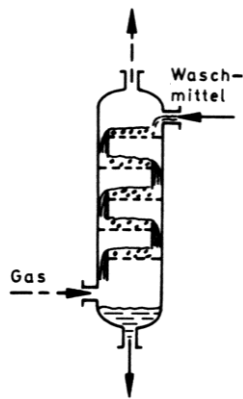


Abbildung 10:
Bodenkolonne [6]

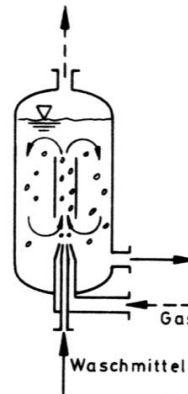


Abbildung 11:
Strahldüsen-
wäscher [6]

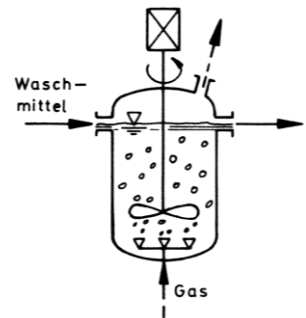


Abbildung 12:
Begaster
Rührkessel [6]

Absorptionsapparate mit Dispergierung der Flüssigphase:

Sprühkolonne

Venturiwäscher

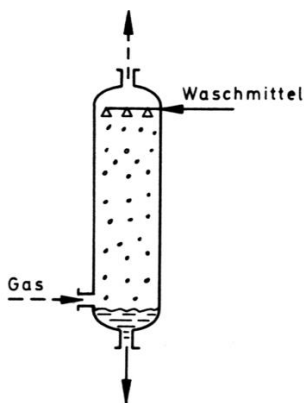


Abbildung 13: Sprühkolonne [6]

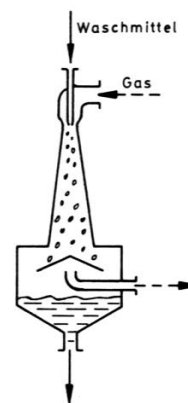


Abbildung 14: Venturiwäscher [6]

Primäres Auswahlkriterium für einen geeigneten Absorbertyp bildet zunächst das Absorptiv/Absorbens-System. Bei guter Löslichkeit und schneller Absorptionskinetik fällt die Wahl auf einen möglichst einfach aufgebauten Absorber. Weitere primäre Entscheidungskriterien sind u.a. das zu reinigende Gas, die zu Verfügung stehende spezifische Austauschfläche, der erlaubte Druckverlust, der spezifische Energieaufwand oder der Lösungsmitteldurchsatz [2], [4].

Oft werden neben der Absorption auch noch weitere Aufgaben gewünscht, die im selben Apparat erfüllt werden sollen, wie z.B. eine Entstaubung oder Kühlung. In solch einem Fall sind weitere Kriterien zu beachten und bei der Wahl des Absorbers schließlich zu berücksichtigen. Stäube können beispielsweise zusätzliche Probleme durch Verkleben, Verlegung, gar Verstopfung oder unerwünschte chemische Reaktionen mit dem Waschmittel verursachen.

Abbildung 15 zeigt beispielhaft einen Entscheidungsbaum mit Berücksichtigung einiger Einflussfaktoren zur Auswahl des geeigneten Absorbers [4].

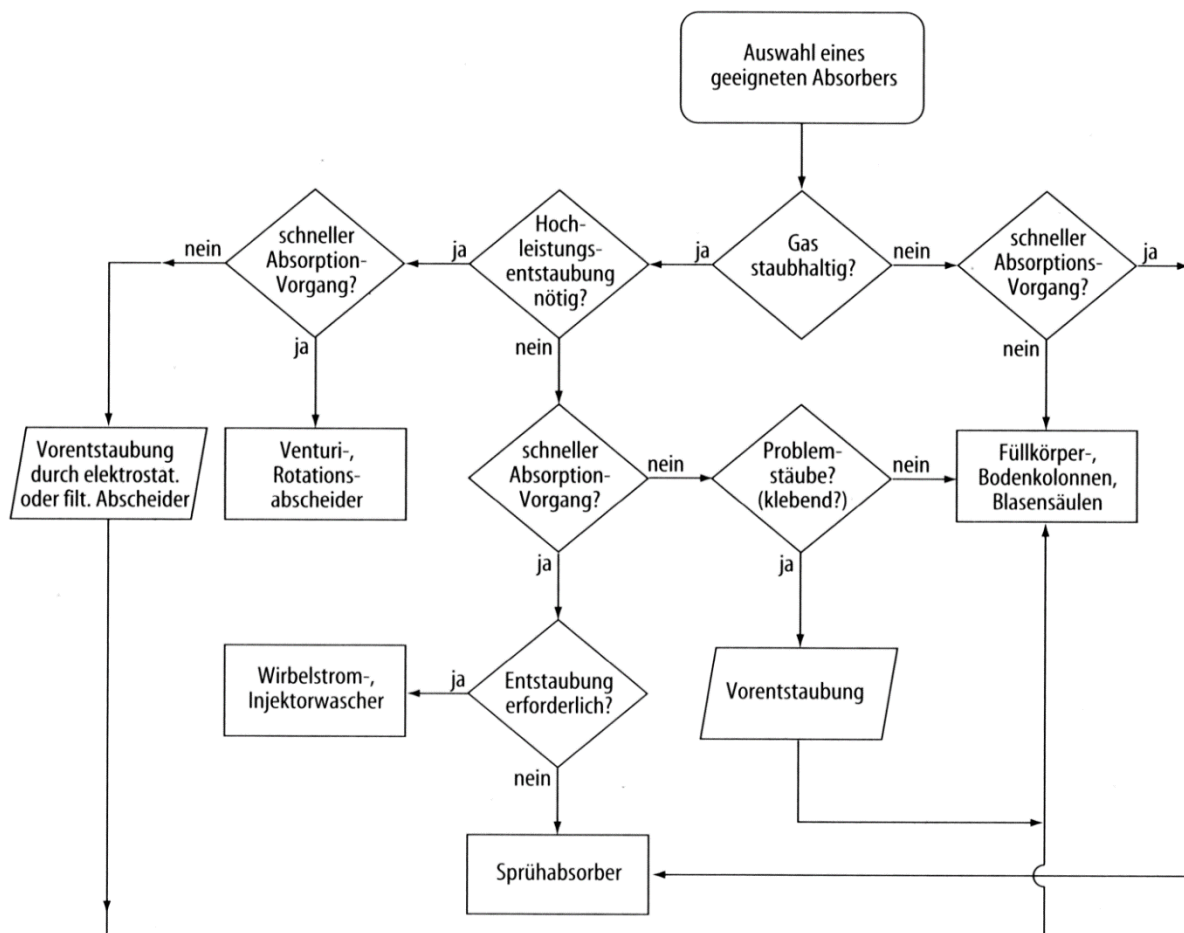


Abbildung 15: Entscheidungsbaum für die Auswahl eines Absorbers [4]

2.2 Grundlagen des Phasengleichgewichts von Gas-Flüssig-Gemischen

Von Phasengleichgewicht spricht man, wenn die innere Energie eines betrachteten Systems ein Minimum aufweist. Das bedeutet, dass sich nach einer bestimmten Zeit die makroskopischen Eigenschaften des Systems nicht mehr ändern. Bei diesem System handelt es sich um ein Gemisch, bestehend aus mehreren Komponenten in mehreren Phasen. Das Augenmerk wird im weiteren Verlauf jedoch auf zweiphasige Systeme beschränkt, da der Inhalt dieser Arbeit eine Absorptionsanlage mit Stoffaustausch zwischen einer gasförmigen und einer flüssigen Phase ist.

Ganz allgemein gelten nach Gibbs für den Gleichgewichtszustand eines Systems folgende Bedingungen:

Gleichheit der Drücke	$p_\alpha = p_\beta = \dots = p_\pi$	Formel 2.2
Gleichheit der Temperaturen	$T_\alpha = T_\beta = \dots = T_\pi$	Formel 2.3
Gleichheit der chem. Potentiale	$\mu_\alpha = \mu_\beta = \dots = \mu_\pi$	Formel 2.4
Gleichheit der Fugazitäten	$f_{i,\alpha} = f_{i,\beta} = \dots = f_{i,\pi}$	Formel 2.5

Die praktische Auswertung der Gleichgewichtsbeziehungen erfolgt über die Fugazitäten, wobei je nach System zwei Methoden zu Verfügung stehen:

Methode A ... Reinstoff im Idealgaszustand ist der Referenzzustand:

Fugazität der Komponente i	$f_i = \varphi_i * y_i * p_{ges}$	Formel 2.6
------------------------------	-----------------------------------	-------------------

Methode B ... Referenz: Standardfugazität f_i^0 ist beliebiger Reinzustand:

Fugazität der Komponente i	$f_i = x_i * \gamma_i * f_i^0$	Formel 2.7
------------------------------	--------------------------------	-------------------

Einen anderen Referenzzustand als Idealgas zu wählen, erfordert die Verfügbarkeit zusätzlicher Modelle (z.B. für den Aktivitätskoeffizienten γ_i) bzw. zusätzlicher Messdaten zur Beschreibung von f_i^0 (z.B. Sättigungsdampfdruck, Henry-Konstante) [9].

Bei idealen Gemischen gelten für jede Komponente das Raoult'sche Gesetz (Formel 2.8), sowie beide Gesetze von Dalton (Formel 2.9 und Formel 2.10):

Gesetz von Raoult	$p_{i,l} = x_i * p_i^S$	Formel 2.8
-------------------	-------------------------	-------------------

	$p_{i,g} = y_i * p_{ges}$	Formel 2.9
--	---------------------------	-------------------

Gesetze von Dalton	$p_{ges} = \sum_i p_i$	Formel 2.10
--------------------	------------------------	--------------------

Verteilungskoeffizient

$$K_i^* = \frac{y_i}{x_i} = \frac{p_i^S}{p_{ges}}$$

Formel 2.11

Das Gas-Flüssig-Gleichgewicht (GLE) kann im Bereich kleiner Konzentrationen ($x_i \ll 1$) durch das Henry-Gesetz beschrieben werden. Das Raoult'sche und Henry'sche Gesetz sind Grenzesetze, wie durch die Abbildung 16 veranschaulicht wird.

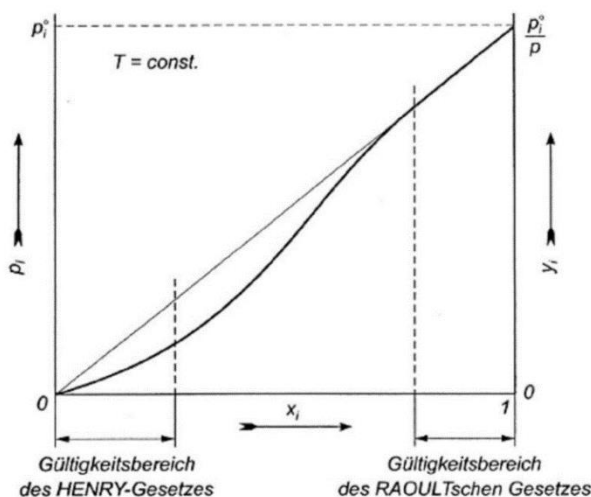


Abbildung 16: Gültigkeitsbereiche des Henry'schen und des Raoult'schen Gesetzes anhand des Zusammenhangs der Partialdrücke und der Flüssigkeitsmolanteile [10]

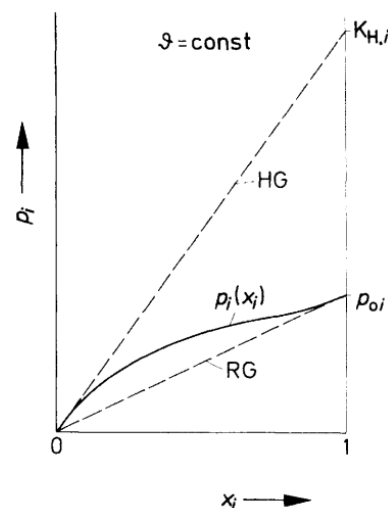


Abbildung 17: Diagramm zur Erläuterung des Henry'schen (HG) und des Raoult'schen (RG) Gesetzes [2]

Wie in Abbildung 17 ersichtlich ist, beschreibt das Henry'sche Gesetz im Bereich $x_i \rightarrow 0$ die Tangente an die reale Partialdruckkurve $p_i(x_i)$. Das Raoult'sche Gesetz liefert hingegen die Asymptote dieser Partialdruckkurve bei $x_i \rightarrow 1$ [2].

2.2.1 Gaslöslichkeit – Henry'sches Gesetz

Dieses Gesetz bildet einen Zusammenhang zwischen den Molanteilen der Komponente i , in der Gasphase y_i und in der Flüssigphase x_i und wird durch Formel 2.19 beschrieben [7]:

Henry-Gesetz

$$p_i = H_{ij} * x_i \text{ bzw. } y_i = \frac{H_{ij}}{p_{ges}} * x_i$$

Formel 2.12

Das Henry-Gesetz gilt nur für den Fall, dass der (Stoffmengen-) Anteil der Komponente i verschwindend gering ist. In der Praxis trifft dies nur für schwer lösliche Gase zu. H_{ij} ist die Henry-Konstante, bzw. auch als Henry-Koeffizient für die Komponente i bezeichnet. Die Henry-Konstante ist druck- und stark temperaturabhängig, jedoch fällt die Druckabhängigkeit im Gegensatz zur starken Temperaturabhängigkeit verhältnismäßig gering aus.

Über experimentelle Gaslöslichkeitsmessungen wird die Temperaturabhängigkeit bestimmt [7].

Außerdem ist die Henry-Konstante nicht nur von den übergehenden Komponenten, sondern auch vom aufnehmenden Lösungsmittel j abhängig. Auf Grund dessen handelt es sich bei der Henry-Konstante um eine Gemischeigenschaft [9].

Anhand einiger praktischer Anwendungsfälle hat sich gezeigt, dass die Physisorption als Trennverfahren nur wirtschaftlich betrieben werden kann, wenn der Henry-Koeffizient Werte der Größenordnung $\frac{H_{ij}}{p_{ges}} < 10 \frac{\text{mol } i}{\text{mol } j}$ erfüllt. Bei der Abluftwäsche beispielsweise würde dies ansonsten bedeuten, dass pro Kubikmeter Abluft mehr als 10 Liter Wasser aufzuarbeiten sind oder als Abwasser anfallen [7].

2.2.2 Berechnung realer Phasengleichgewichte

Da reale Systeme durch nichtideales Verhalten gekennzeichnet sind, genügen die Möglichkeiten zur Beschreibung idealer Zustände und Vorgänge nicht. Es bedarf daher passender Beziehungen, um die realen Phasengleichgewichte so gut wie möglich abzubilden. Dafür wird die zuvor vorgestellte Methode B, nach Formel 2.7, mit Standardfugazität f_i^0 und Aktivitätskoeffizient γ_i angewandt.

Es werden zwei grundlegende Fälle unterschieden: Symmetrische und unsymmetrische Normierung. Die symmetrische Normierung kommt zur Anwendung, wenn der Molanteil der Komponente i gegen eins geht ($x_i \rightarrow 1$). Dies ist jener Bereich, in dem bei Idealverhalten das Raoult'sche Gesetz gilt. Die Fugazität berechnet sich infolgedessen nach Formel 2.13 [9]:

Fugazität bei
symmetrischer
Normierung:

$$f_i(T, p, x_i) = x_i * \gamma_i * f_i^0$$

$$f_i(T, p, x_i) = x_i * \gamma_i * \varphi_i^S * p_i^S * POY_i$$

Formel 2.13

Betrachtet man hingegen den für die Absorption relevanten Bereich - eine Lösung mit unendlicher Verdünnung (Modell der ideal verdünnten Lösung, Molanteil der Komp. i geht gegen Null $x_i \rightarrow 0$) - wird die unsymmetrische Normierung zur Berechnung des Phasengleichgewichts herangezogen.

Der Referenzzustand für die Standardfugazität ist dann die Henry-Konstante:

$$f_i^0 = H_{ij}$$

$$H_{ij} \equiv \lim_{\substack{x_i \rightarrow 0 \\ x_j \rightarrow 1 \\ p \rightarrow p_j^S}} \frac{f_i}{x_i} \quad \text{Formel 2.14}$$

Die Abweichung von der idealen Verdünnung und damit vom Henry'schen Gesetz wird durch den Aktivitätskoeffizienten berücksichtigt. Zusätzlich wird analog zur Poynting-Korrektur POY_i ein Korrekturfaktor eingeführt, da die Henry-Konstante bei $p \rightarrow p_j^S$ definiert ist [9]:

Fugazität bei
unsymmetrischer
Normierung:

$$f_i = x_i * \gamma_i^* * H_{ij} * \exp\left(\int_{p_j^S}^p \left(\frac{\bar{v}_i^\infty}{R * T}\right) dp\right) \quad \text{Formel 2.15}$$

Der Ausdruck \bar{v}_i^∞ steht für das partielle molare Volumen der Komponente i im Lösungsmittel j bei unendlicher Verdünnung.

Abschließend können für die beiden Formulierungen der Fugazität noch einige Vereinfachungen getroffen werden. In Systemen mit moderaten Drücken ($p < 10\text{bar}$) können die beiden Druckkorrektur-Faktoren sowohl für die Gas-, als auch für die Flüssigphase vernachlässigt werden [8]. Geht man davon aus, dass es sich beim Gemisch um eine unendliche Verdünnung hinsichtlich der gelösten Komponente i ($x_i \rightarrow 0$) handelt, werden die Aktivitätskoeffizienten $\gamma_i \approx \gamma_i^\infty$ und $\gamma_i^* \approx 1$. Am Ende resultiert ein wichtiger Zusammenhang der Henry-Konstante mit dem Aktivitätskoeffizienten [9]:

$$H_{ij} = \gamma_i^\infty * \varphi_i^S * p_i^S \quad \text{Formel 2.16}$$

2.3 Grundlagen des Stoffaustausches

Unter dem Begriff Stoffaustausch oder Stoffübertragung versteht man den Transport einer oder mehrerer Komponenten eines Gemisches aus Fluiden oder Feststoffen innerhalb einer Phase, oder über Phasengrenzen hinweg. Findet die Übertragung innerhalb einer Phase bis an die Phasengrenzfläche statt, spricht man von *Stoffübergang*. Unter *Stoffdurchgang* versteht man, wenn der Stoffaustausch über die Phasengrenzfläche hinweg stattfindet. Wie die Wärmeübertragung ist auch der Stofftransport ein typischer Ausgleichsvorgang, daher entsprechen die Begriffe Übergang und Durchgang auch denen der Wärmeübertragung [11].

Triebkraft für den Stoffaustausch sind Konzentrations-, Temperatur- und Druckunterschiede. Am häufigsten sind jedoch Konzentrationsunterschiede maßgebend für diesen Ausgleichsvorgang. Es entsteht somit eine Teilchenverschiebung tendenziell von einem Bereich hoher Konzentration in einen Bereich niedriger Konzentration so lange, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Gleichgewicht in Bezug auf Stoffübertragung ist erreicht, wenn die treibende Kraft, also in unserem Fall die Konzentrationsgradienten, verschwunden ist [11], [12].

Thermische (Trenn-) Verfahren wie die Destillation, Rektifikation, Trocknung fester Stoffe, Extraktion, oder Sorption basieren auf den Vorgängen der Stoffübertragung. Neben den thermischen Verfahren werden auch chemische Reaktionen maßgeblich durch Stoffaustausch bestimmt [11], [12]. In technischen Prozessen findet Wärmeaustausch überwiegend indirekt, d.h. über feste Wände hindurch, statt. Bei Prozessen mit Stoffaustausch hingegen, erfolgt ein Austausch mit wenigen Ausnahmen (z.B. der Umkehrosmose) direkt, da eine feste Wand in der Regel einen unzulässig großen Transportwiderstand darstellt. Der direkte Kontakt mehrerer Phasen im Prozess kann zu komplexen Problemstellungen in Bezug auf die mathematische Beschreibung führen. Am Beispiel einer in einer Flüssigkeit aufsteigenden Gasblase verdeutlicht: Weder ihre Form, deren Größe noch ihre Aufstiegs geschwindigkeit sind bekannt [13].

Für die mathematische Bestimmung der Stoffübertragung sind einige Definitionen und Zusammenhänge in Bezug auf die Zusammensetzung von Gemischen erforderlich, die zunächst erläutert werden:

Konzentration d. Komp. i $c_i = \frac{N_i}{V}$ **Formel 2.17**

Gemischkonzentration $c = \frac{N}{V} = \sum_i c_i$ **Formel 2.18**

Molanteil d. Komponente i $x_i = \frac{N_i}{N} = \frac{c_i}{c}$ **Formel 2.19**

Molbeladung
(Komp. j beladen mit Komp. i) $X_i = \frac{N_i}{N_j}$ **Formel 2.20**

Zusammenhang zwischen
Stoffmenge und Masse $m_i = N_i * MG_i$ **Formel 2.21**

Molmasse des Gemisches $MG = \sum_i x_i * MG_i$ **Formel 2.22**

Massenanteile $w_i = \frac{m_i}{m} = x_i \frac{MG_i}{MG}$ **Formel 2.23**

Ideales Gasgesetz $p * V = N * R * T$ **Formel 2.24**

mit der molaren Gaskonstante R [11] $R = 8,31451 \frac{J}{mol K}$

Ideales Gasgesetz der Komp. i $p_i = c_i * R * T$ **Formel 2.25**

2.3.1 Arten der Stoffübertragung

Physikalisch kann der Stofftransport entweder durch Diffusion, oder durch Konvektion ablaufen. Da es grundsätzlich drei treibende Kräfte für einen Stoffaustausch gibt, wird bei der Diffusion in weiterer Folge zwischen der molekularen Diffusion (konzentrationsbedingt), Thermodiffusion (temperaturbedingt) und der Druckdiffusion (druckbedingt) unterschieden. Für sämtlich weiterfolgende Betrachtung spielt jedoch nur die molekulare Diffusion eine Rolle.

Verglichen mit der Wärmeübertragung entspricht der Mechanismus der molekularen Diffusion dem der Wärmeleitung. Der Stoffaustausch in einem strömenden Fluid, die konvektive Stoffübertragung, entspricht der gleichnamigen konvektiven Wärmeübertragung. Diese beiden sind die einzigen Formen des Stoffaustauschs - eine entsprechende Form wie bei der Wärmeübertragung durch Strahlung existiert nicht [11].

In realen Systemen treten die beiden Mechanismen Diffusion und Konvektion meist in Kombination auf. Während die Diffusion an der Phasengrenzfläche überwiegt, findet die Konvektion dagegen im Kern (oft als Bulk bezeichnet) eines Fluides statt. Da die Diffusion deutlich langsamer abläuft, als die Konvektion, stellt diese den limitierenden Faktor dar und bestimmt damit die Geschwindigkeit des Gesamtvorganges [12].

2.3.1.1 Diffusion

Allgemein betrachtet wird die molekulare Diffusion durch Konzentrationsunterschiede bedingt und kommt durch ungeordnete Wärmebewegung der Teilchen zustande. Bei der Diffusion wandern kleinste Teilchen eines Stoffs durch einen anderen hindurch [11], [12]. Mitte des 19. Jahrhunderts hatte A. Fick herausgefunden, dass sich in einem eindimensionalen Körper der Stofftransport durch Diffusion wie folgt verhält:

- ☑ Proportional zum treibenden Konzentrationsunterschiedes $c_2 - c_1$,
- ☑ Proportional zur Querschnittsfläche A des Körpers (senkrecht zur Bewegungsrichtung) und
- ☑ Umgekehrt proportional zur Länge l des Diffusionsweges

Die Diffusion findet nur in einer Richtung statt. Dieser Zusammenhang ist seither unter dem *ersten Fick'schen Gesetz* bekannt:

1. Fick'sches Gesetz

$$\dot{n}_1 = \frac{dn}{dt} = -D * \frac{(c_2 - c_1)}{l} = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{Formel 2.26}$$

- \dot{n}_1 $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$... Flächenspezifischer Stoffstrom, der durch die Diffusion bedingt ist
- D $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$... Diffusionskoeffizient für Medium 1 und 2, gilt: $D_{1,2} = D_{2,1} = D$
- c_1 $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$... Konzentration auf der einen Seite im Körper bzw. Medium
- c_2 $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$... Konzentration auf der anderen Seite im Körper bzw. Medium
- l $[\text{m}]$... Diffusionsweg
- dc/dx $\left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^4} \right]$... Konzentrationsgefälle im Medium

Durch das negative Vorzeichen in Formel 2.26 wird berücksichtigt, dass die Diffusion entgegen dem Konzentrationsgefälle in Richtung der niedrigeren Konzentration abläuft. Der Diffusionskoeffizient ist ein Maß für die Fähigkeit eines Stoffes, sich aufgrund der molekularen Teilchenbewegung durch einen anderen Stoff hindurch zu bewegen. Abhängig ist er sowohl vom diffundierenden Stoff, als auch vom ruhenden, sowie von den Konzentrationen, der Temperatur und vom Druck [12].

Abbildung 18 zeigt ein einfaches Beispiel für einen Feststoff, aus dem die Komponente A durch ein flüssiges Lösungsmittel B entfernt werden soll. An der Oberfläche des Feststoffs sei die Konzentration der Komponente A gleich $c_{A,0}$, die im Bulk gleich $c_{A,\delta}$. Zudem wird vorausgesetzt, dass die Gemischkonzentration $c = konst.$ ist.

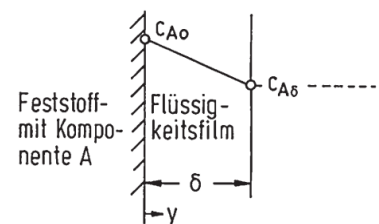


Abbildung 18: Diffusion durch einen ruhenden Flüssigkeitsfilm [11]

Schließlich erhält man für dieses Beispiel, durch Integration der Formel 2.26 den folgenden Stoffstrom infolge von Diffusion:

$$\dot{n}_A = -D * \frac{c_{A,0} - c_{A,\delta}}{\delta} \quad \text{Formel 2.27}$$

Einseitige Diffusion

Wenn ein Stoff durch einen anderen hindurch diffundiert, spricht man von einer einseitigen Diffusion. Dabei entsteht eine Gesamtbewegung des Gemisches in Richtung des diffundierenden Stoffs. Klassische Beispiele für einseitige Diffusion sind das Verdunsten von Wasser in trockener Luft oder die Adsorption eines Stoffs an eine aktive Oberfläche eines Feststoffs [12].

Äquimolare Diffusion

Von einer äquimolaren Diffusion spricht man dagegen, wenn es eine Bewegung in gleichem Ausmaß in die Gegenrichtung gibt. Das bedeutet dass der Stoff A in gleichem Ausmaß in den Stoff B hineindiffundiert, wie umgekehrt Stoff B in den Stoff A ($\dot{n}_A = -\dot{n}_B$). Abbildung 19 veranschaulicht den Unterschied zwischen der einseitigen und äquimolaren Diffusion.

Praktisches Beispiel der äquimolaren Diffusion stellt die Rektifikation dar: Im Idealfall verdampfen auf einer Stufe jederzeit gleich viele Mole des Leichtsieders in die aufsteigende Gasphase, wie Mole der schwerer flüchtigen Komponenten aus der Gasphase kondensieren [12].

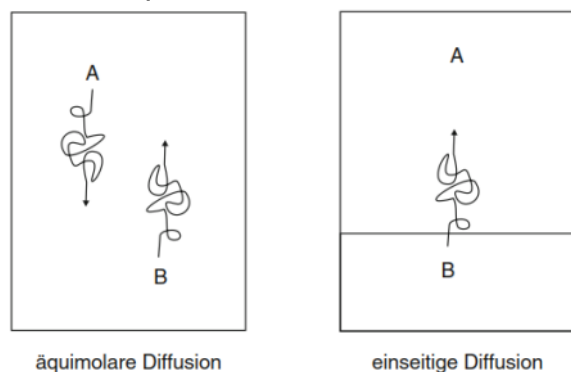


Abbildung 19: Stoffaustausch durch äquimolare und einseitige Diffusion [12]

2.3.1.2 Stoffübergang

Ein Stofftransport durch reine Diffusion setzt voraus, dass das Stoffsystem absolut ruhend und wirbelfrei ist. In verfahrenstechnischen Apparaten findet man fast ausschließlich strömende Medien. Daher tritt in der Praxis die Konvektion neben der Diffusion immer als transportbestimmender Mechanismus auf. Man spricht hier von Stoffübergang. Der Konzentrationsausgleich findet bei der Konvektion auf mikroskopischer und bei der Diffusion auf submikroskopischer Ebene statt [7], [12].

Der Stoffübergang von einem strömenden Fluid an die Oberfläche eines anderen Stoffes oder zwischen zwei bedingt mischbaren strömenden Fluiden ist abhängig von der Art der Strömung und von den Stoffeigenschaften selbst. Diese Strömung kann, wie auch beim Wärmeübergang, entweder von innen oder außen hervorgerufen werden. Wird die Strömung von innen heraus hervorgerufen, spricht man vom Stoffübergang bei *freier*, oder *natürlicher Konvektion*, welche infolge von Dichteunterschieden stattfindet. Diese Dichteunterschiede sind ihrerseits wiederum eine Folge von Konzentrations-, oder Temperaturunterschieden. Im Fall einer von außen aufgeprägten Strömung handelt es sich um einen Stoffübergang bei *erzwungener Konvektion*. Die Strömung und damit in weiterer Folge die Konvektion wird u.a. durch Rühren, Pumpen, etc. erzielt [11], [12].

Analog zur Berechnung des Wärmeüberganges kann auch der (konvektive) Stoffübergang ermittelt und entweder relativ als Stromdichte, oder absolut angegeben werden:

Stoffmengenstromdichte	$\dot{n}_i = \frac{\dot{N}_i}{A} = \beta_i * \Delta c_i$	Formel 2.28
------------------------	--	--------------------

Stoffmengenstrom	$\dot{N}_i = \beta_i * A * \Delta c_i$	Formel 2.29
------------------	--	--------------------

Durch diese Gleichung ist der Stoffübergangskoeffizient β_i mit seiner SI-Einheit $\left[\frac{m^3}{s m^2} = \frac{m}{s} \right]$ definiert und ist ein Maß für den übertragenen Volumenstrom pro Quadratmeter (Austausch-) Fläche. Im Allgemeinen hängt der Stoffübergangskoeffizient von der Art der Strömung (laminar oder turbulent), von den Stoffeigenschaften, von der geometrischen Form des Systems und auch von der Konzentrationsdifferenz Δc ab. Formel 2.30 fasst die einzelnen Abhängigkeiten zusammen [11], [12]:

Stoffübergangskoeffizient	$\beta_i = f(l, u, c, D, \eta, \rho)$	Formel 2.30
---------------------------	---------------------------------------	--------------------

Dimensionslose Kenngrößen

Durch die Vielzahl an Abhängigkeiten des Stoffübergangskoeffizienten, ist es nur in wenigen Fällen möglich, Transportgleichungen exakt lösen zu können. Es wird daher versucht, den Stofftransport messtechnisch zu erfassen und anschließend in Form von dimensionslosen Beziehungen abzubilden. Als Resultat einer Dimensionsanalyse (siehe Buckingham Π -Theorem) werden zwei neue dimensionslose Kenngrößen eingeführt [12].

Schmidt-Zahl

Bei der Schmidt-Zahl handelt es sich um eine reine Stoffgröße. Sie stellt die Fähigkeiten eines Stoffsystems, Strömungsimpulse durch Reibung zu übertragen und Stoffteilchen durch Diffusion zu verschieben gegenüber. Abgebildet wird diese Gegenüberstellung durch das Verhältnis der kinematischen Viskosität ν zum Diffusionskoeffizienten D :

Schmidt-Zahl

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\eta}{\rho * D}$$

Formel 2.31

ν	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$... Kinematische Viskosität des Mediums
η	$[Pa \cdot s]$... Dynamische Viskosität des Mediums
ρ	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$... Dichte des Mediums

Bei Flüssigkeiten liegen die Schmidt-Zahlen deutlich über 1 und nehmen mit höherer Temperatur ab. Bei Gasen hingegen weisen die Schmidt-Zahlen Werte zwischen 0,5 und 2 auf und bleiben bei höheren Temperaturen relativ konstant [12].

Sherwood-Zahl

Die Sherwood-Zahl entspricht dem Verhältnis von tatsächlichem Stofftransport an eine Phasengrenzfläche, zu einem fiktiven Stofftransport, der in der Grenzschicht mit der charakteristischen Länge l aufgrund reiner Diffusion entstehen würde:

Sherwood-Zahl

$$Sh = \frac{\beta * l}{D} = \frac{\dot{n}_{Konvektion}}{\dot{n}_{Diffusion}}$$

Formel 2.32

beziehungsweise

$$Sh = f(Re, Sc)$$

$\dot{n}_{Konvektion}$ $\left[\frac{mol}{s}\right]$... Stofftransport durch Konvektion im realen System

$\dot{n}_{Diffusion}$ $\left[\frac{mol}{s}\right]$... Stofftransport durch Diffusion über die charakt. Länge l

Die Sherwood-Zahl stellt somit eine dimensionslose Kenngröße des konvektiven Stofftransportes dar [12].

2.3.1.3 Stoffdurchgang

Erfolgt eine Betrachtung des Stofftransportes über die Phasengrenze hinweg, spricht man von Stoffdurchgang (analog zum Wärmedurchgang). Der Stofftransportwiderstand setzt sich, wie auch der Wärmedurchgangskoeffizient, aus den Widerständen beiderseits der Phasengrenze zusammen. Die Beschreibung erfolgt in den meisten Fällen auf Basis der Filmtheorie nach Lewis und Whitman. Diese und weitere Theorien werden im Kapitel 2.3.2 noch näher erläutert.

Es wird davon ausgegangen, dass zwei fluide Phasen entlang einer Phasengrenze in Kontakt stehen (siehe Abbildung 20). Die Dicke der Phasengrenzfläche ist infinitesimal, sodass an ihr zwischen den beiden Phasen mit x^0 und y^0 , entsprechend der Verteilung $K = \frac{y^0}{x^0}$, ein Gleichgewicht einstellt. Innerhalb der beiden Grenzschichten (markiert durch strichlierte Linien) finden Diffusion und Konvektion statt, wodurch sich der Stoffübergang für eine Komponente i mit

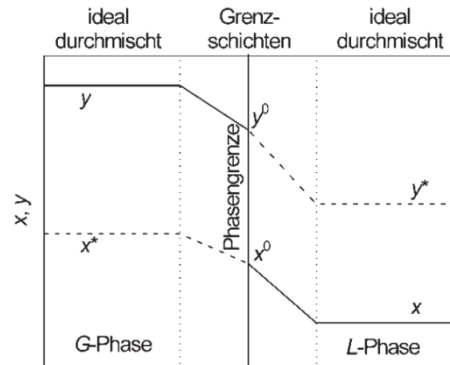


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Konzentrationsprofile an der Phasengrenze der Filmtheorie [7]

$$\dot{n}_i = \beta_G * (y - y^0) = \beta_L * (x^0 - x) \quad \text{Formel 2.33}$$

beschreiben lässt. Weiterführend wird angenommen, dass mit dem Verteilungskoeffizienten ein Zusammenhang zwischen den Bulk- und Gleichgewichtskonzentrationen gebildet werden kann:

$$y^* = K * x \quad \text{und} \quad y = K * x^* \quad \text{Formel 2.34}$$

Der Stoffdurchgangskoeffizient k kann analog zum Stoffübergang (vgl. Formel 2.28) definiert werden:

$$\dot{n}_i = k_G * (y - y^0) = k_L * (x^0 - x) \quad \text{Formel 2.35}$$

Durch Einsetzen von Formel 2.34 in Formel 2.35 (vgl. Formel 2.36) und anschließendes Gleichsetzen (vgl. Formel 2.37) können die kaum messbaren Konzentration an der Phasengrenze (Indizes 0) eliminiert werden:

$$y^0 - y^* = \frac{K * \dot{n}_i}{k_L} \quad \text{Formel 2.36}$$

$$y - y^* = \dot{n}_i * \left(\frac{K}{k_L} + \frac{1}{k_G} \right) \quad \text{Formel 2.37}$$

Für den Ausdruck in der Klammer wird der Gesamtdurchgangskoeffizient K_G eingeführt, sodass folgender Zusammenhang gilt:

$$\frac{1}{K_G} = \left(\frac{K}{k_L} + \frac{1}{k_G} \right) \quad \text{Formel 2.38}$$

Analoge Vorgehensweise erfolgt bei Betrachtung der Flüssigseite. Auf die Herleitung wird an dieser Stelle verzichtet und entsprechend auf die Literatur verwiesen [14]. Der Gesamtdurchgangskoeffizient der Flüssigseite K_L wird durch Formel 2.39 und der gemeinsame Zusammenhang schließlich durch Formel 2.40 beschrieben:

$$\frac{1}{K_L} = \left(\frac{1}{k_L} + \frac{1}{K * k_G} \right) \quad \text{Formel 2.39}$$

$$\frac{1}{K * K_G} = \frac{1}{K_L} \quad \text{Formel 2.40}$$

Abschließend kann der Stoffdurchgang damit folgendermaßen formuliert werden:

$$\dot{n}_i = K_G * (y - y^*) = K_L * (x^* - x) \quad \text{Formel 2.41}$$

2.3.2 Modelltheorien des Stoffüberganges

Um den Stoffübergangskoeffizienten bestimmen zu können, wurden verschiedene Modelle entwickelt, wovon nachfolgend die wichtigsten drei beschrieben werden. Diese wichtigsten drei Theorien sind die Film-, Grenzschicht- und Penetrations- bzw. Oberflächenerneuerungstheorie. Je nach Problemstellung muss entschieden werden, welche dieser Theorien am besten geeignet ist, um den Stoffübergangskoeffizienten zu bestimmen [11].

Unabhängig von der Modelltheorie wird bei allen einheitlich davon ausgegangen, dass der Stoffdurchgang in die folgenden drei wesentlichen Schritte eingeteilt werden kann [12]:

1. Stoffübergang aus dem Bulk des Mediums 1 an die Phasengrenzfläche,
2. Phasentransfer vom Medium 1 ins Medium 2 durch die Grenzschicht (GS) hindurch und
3. Stoffübergang von der Phasengrenzfläche in den Bulk des Mediums 2.

2.3.2.1 Filmtheorie

Die Filmtheorie, oder auch Zweifilmtheorie wurde von Lewis und Whitman 1924 aufgestellt und stellt die einfachste und zugleich die älteste Modellvorstellung dar. Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass sich wie in Abbildung 21 veranschaulicht, zwischen zwei Medien eine Phasen-grenzfläche (rote Linie) befindet. Auf beiden Seiten dieser Grenzfläche

existiert je ein ausgebildeter dünner Film mit der Dicke δ_1 bzw. δ_2 . Die blau strichlierten Linien kennzeichnen die Grenzschichten. Die beiden Filme befinden sich innerhalb des jeweiligen Mediums und repräsentieren Konzentrations-grenzschichten. Ihre Dicken δ_1 bzw. δ_2 sind von den Stoffeigenschaften der beiden Medien, sowie von den Strömungsbedingungen abhängig.

Der Name Filmtheorie entstammt somit der Überlegung, dass beiderseits der Phasengrenz-fläche dünne Filme existieren. Es gilt jedoch zu bedenken, dass es sich bei diesen Grenzschichten lediglich um fiktive Gedankenmodelle handelt, um eine Erfassbarkeit des Stoffdurchganges zu ermöglichen [12].

Kommt es zu einem Stoffaustausch, so erfolgt der Transport der medienwechselnden Komponente innerhalb der Filme rein durch Diffusion. Diese Vorstellung entspricht somit einem zweiseitigen Stoffübergang. Innerhalb der Grenzschichten verlaufen die Konzentrationen linear. Außerhalb der beiden Grenzschichten gibt es in den beiden Medien keine Konzentrationsunterschiede, d.h. die Bulkonzentrationen (Indizes ∞) sind konstant. Die Filmtheorie geht außerdem davon aus, dass an der Phasengrenzfläche stoffliches Gleichgewicht (Indizes $*$) herrscht [12].

Aufgrund der Gleichgewichtsannahme kann jederzeit die Konzentration der einen Phase aus der Konzentration der anderen berechnet werden. Zudem kann der Widerstand des Phasentransfers durch die Phasengrenzfläche hindurch vernachlässigt werden. Grund dafür ist die Annahme, dass der

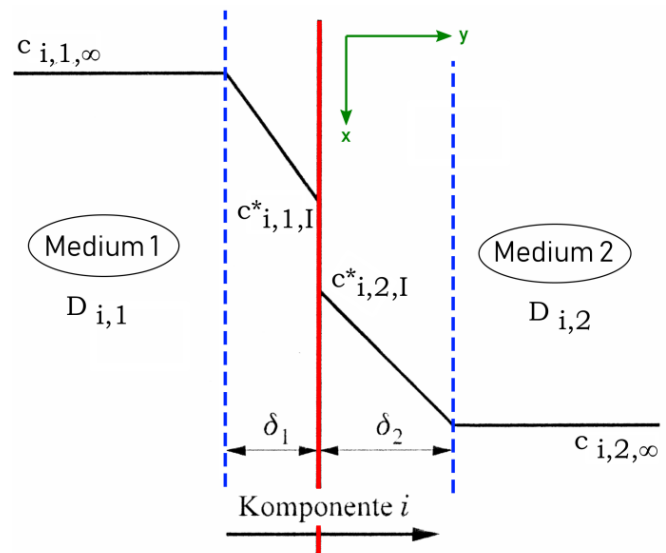


Abbildung 21: Konzentrationsprofil der Filmtheorie nach Lewis und Whitman [15]

Stoffübertritt vom Medium 1 ins Medium 2 im Vergleich zu den Diffusionsvorgängen in den Filmen deutlich schneller erfolgt [12].

Weiters wird angenommen, dass sich die Konzentrationen und Geschwindigkeiten nur in einer Koordinatenrichtung (y-Koordinate in Abbildung 21) und nicht mit der Zeit ändern. Das bedeutet wiederum, dass stationärer Zustand herrscht und die Konzentrationsgrenzschichten voll ausgebildet sind. Die Konsequenz dieser Annahme ist, dass der übertragende Stoffstrom \dot{N}_1 konstant bleibt und das Konzentrationsprofil im Film entlang einer Gerade verläuft. Damit \dot{N}_1 konstant bleibt, muss äquimolare Diffusion ($\dot{n}_A + \dot{n}_B = 0$) stattfinden. Somit ergibt sich mit dem diffusiven Stofftransport (vgl. Formel 2.26) und dem Stoffübergang (vgl. Formel 2.28) ein Zusammenhang (vgl. Formel 2.42 und Formel 2.43). Letztendlich kann eine Beziehung zwischen dem Stoffübergangskoeffizienten β , dem Diffusionskoeffizienten D und der Filmdicke δ hergestellt werden (siehe Formel 2.44):

$$\dot{n}_i = \beta_i * (c^*_{i,I} - c_{i,\infty}) = -D_i \left(\frac{dc}{dy} \right)_{y=0} \quad \text{Formel 2.42}$$

$$\beta_i * (c^*_{i,I} - c_{i,\infty}) = \frac{D_i}{\delta} (c^*_{i,I} - c_{i,\infty}) \quad \text{Formel 2.43}$$

$$\boxed{\beta_i = \frac{D_i}{\delta}} \quad \text{Formel 2.44}$$

Die Filmdicke ist in den meisten Fällen unbekannt, weshalb sich aus dieser Gleichung kein Stoffübergangskoeffizient berechnen lässt. Stoffübergangskoeffizienten können jedoch für in der Praxis häufig vorkommende Fälle aus einschlägiger Fachliteratur entnommen werden, wodurch dann umgekehrt die Konzentrationsfilmdicke anhand der Formel 2.44 abgeschätzt werden kann [7], [13]. Speziell wenn es um den Stofftransport im Zusammenhang mit einer chemischen Reaktion geht, ist dies sehr vorteilhaft. Die Reaktion beschränkt sich zuerst auf das Filmvolumen, da die übergehende Komponente anfangs lediglich dort auftritt. Durch die Kenntnis des Reaktionsvolumens, können in weiterer Folge die Reaktionsströme berechnet werden [13].

Der gaseitig übertragene Stoffstrom kann (Gas verhält sich ideal) durch Kombination der Formel 2.25 mit Formel 2.28, auch als Funktion der Partialdrücke dargestellt werden:

$$\text{Gasseite ...} \quad \dot{n}_{i,g} = \frac{\beta_{i,g}}{R * T} * (p_{i,\infty} - p^*_{i,I}) \quad \text{Formel 2.45}$$

$$\text{Flüssigseite ...} \quad \dot{n}_{i,l} = \beta_{i,l} * (c^*_{i,I} - c_{i,\infty}) \quad \text{Formel 2.46}$$

2.3.2.2 Grenzschichttheorie

Die Grenzschichttheorie stellt eine Erweiterung und Verbesserung der Filmtheorie dar. Die Grundlage der Theorie ist daher dieselbe wie bei der Filmtheorie. Der Stoffübergang erfolgt in einer dünnen Schicht an der Phasengrenzfläche. Im Gegensatz zur Filmtheorie wird jedoch berücksichtigt, dass sich die Konzentrationen und Geschwindigkeiten auch in einer weiteren Koordinatenrichtung ändern können. Innerhalb der Konzentrationsgrenzschicht ist die Änderung des Konzentrationsprofils deutlich größer, als im Vergleich zur Änderung in Richtung der anderen Koordinate. Aufgrund dieser Annahme genügt es, lediglich die Diffusion in Richtung der y -Achse (Abbildung 21) zu berücksichtigen. Analoge Vorgehensweise erfolgt dann beim Geschwindigkeitsprofil, wodurch die Änderung in x -Richtung gegenüber jener in y -Richtung vernachlässigt wird. Die Grenzschichttheorie wird besonders für die Beschreibung von Vorgängen in der Nähe fester überströmter Grenzflächen, z.B. Strömungen an ebenen Platten, herangezogen [11], [13].

Die Differentialgleichungen für das Konzentrationsfeld vereinfachen sich aufgrund dieser Vernachlässigung für die zweite Koordinatenrichtung erheblich, wodurch man Konzentrationsprofile erhält. Aus diesen und der Beziehung nach Formel 2.42 können in weiterer Folge Stoffübergangskoeffizienten berechnet werden. In technischen Anwendungen genügt es meistens mit dem mittleren Stoffübergangskoeffizienten β_m zu rechnen:

$$\beta_m = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L \beta \, dx \quad \text{Formel 2.47}$$

Mittlere Stoffübergangskoeffizienten β_m können aus Gleichungen für erzwungene Strömungen der Form $Sh_m = f(Re, Sc)$, mit der mittleren Sherwood-Zahl ermittelt werden. Funktionen für die mittlere Sherwood-Zahl sind für überströmte Oberflächen gut bekannt (analog zu den Funktionen für die mittlere Nußelt-Zahl bei der Wärmeübertragung) und können aus Fachliteratur, wie z.B. dem VDI-Wärmeatlas [16], entnommen werden. Diese Funktionen weisen stets die folgende Form auf:

$$Sh_m = c * Re^n * Sc^m \quad \text{Formel 2.48}$$

Die Variablen c , n und m sind abhängig von der Form des umströmten Körpers, oder des durchströmten Kanals und von der Art der Strömung, laminar oder turbulent [11].

Das bedeutet wiederum, dass die Konzentration c_A innerhalb der Grenzschicht vom Grenzflächenwert $c_{A,0}$ auf den Wert im Bulk \bar{c}_A abfällt. Bei entsprechend schnell ablaufenden Reaktionen kann \bar{c}_A sogar gegen Null gehen [13].

Higbie zeigte in seiner Theorie, dass sich der Stoffübergangskoeffizient umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Kontaktzeit τ verhält:

$$\beta_m = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{D_{AB}}{\tau}} \quad \text{Formel 2.49}$$

Der Stoffübergangskoeffizient β_m wird über den Zeitraum von $t = 0$ bis zur Zeit $t = \tau$ gemittelt. Die Erfahrung hat gezeigt, dass verlässliche Werte für β_m erhalten werden, wenn die Kontaktzeit τ aus der mittleren Steig- bzw. Sinkgeschwindigkeit w der Blasen oder Tropfen und ihrem Durchmesser d berechnet werden: $\tau = \frac{d}{w}$. Bei gasdurchströmten Füllkörperschüttungen, über die eine Flüssigkeit herabrieselt, gestaltet sich die Bestimmung der Kontaktzeit wesentlich komplizierter [11], [13].

1951 wurde die Oberflächenerneuerungstheorie durch Danckwerts entwickelt, welche einer Erweiterung der Penetrationstheorie entspricht. Bei Higbies Penetrationstheorie wird davon ausgegangen, dass die Kontaktzeit zwischen den Phasen an allen Punkten eines Apparates gleich lang ist. Danckwerts hingegen nahm an, dass in Kontakt tretende Fluidelemente verschiedene Verweilzeiten haben können, die durch ein Verweilzeitspektrum beschrieben werden können. Die Kontaktzeit zwischen den einzelnen Fluidteilchen folgt einer Verteilungsfunktion. Nach Ablauf der Kontaktzeit wird das Fluidelement wieder von der Phasengrenzfläche verdrängt und durch ein anderes ersetzt. Der Stoffaustausch zwischen zwei fluiden Phasen verschiedener in Kontakt tretender Stoffe findet laut dieser Theorie in einzelnen Strömungszellen, gemäß Abbildung 23, ab.

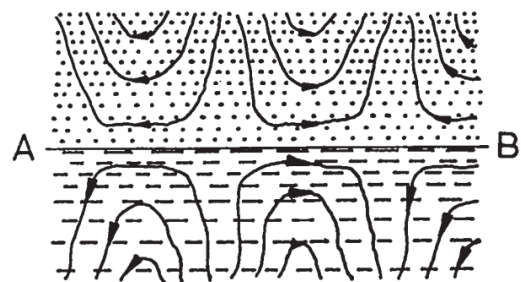


Abbildung 23: Möglicher Verlauf der Stromlinien beim Kontakt zweier Flüssigkeiten oder einer Flüssigkeit mit einem Gas gemäß der Oberflächenerneuerungstheorie [11]

Für die Absorption von Gasen in gerührten Flüssigkeiten konnte die Oberflächenerneuerungstheorie zwar erfolgreich angewandt werden, jedoch sind die Zeitanteile bis zur Oberflächenerneuerung in den meisten Fällen gleichermaßen unbekannt, wie die Kontaktzeit τ bei der Penetrationstheorie. Beide Theorien eignen sich daher lediglich Verständnis für die Stoffaustauschvorgänge zu schaffen. Die Berechnung nach diesen Modellen erweist sich jedoch als nicht praktikabel [11], [13].

2.4 Berechnungsmethoden für Absorber

Verständnis des Stoffaustauschvorganges zwischen Gas- und Flüssigphase bildet die Grundlage für die Berechnung einer Abscheidung reiner Komponenten aus Gemischen.

2.4.1 Gleichgewichtsmodell

Das einfachste und immer noch am weitesten verbreitete Modell für die Beschreibung thermischer Trennoperationen ist das Modell der theoretischen Trennstufe, bzw. auch Gleichgewichtsmodell genannt. Es wurde 1893 von Sorel vorgestellt und trifft für einen (Kolonnen-) Boden folgende Annahmen:

- Thermodynamisches und mechanisches Gleichgewicht der austretenden Stoffströme beider Phasen
- Vollständige Durchmischung beider Phasen
- Sofortiges Erreichen des Phasengleichgewichts
- Kein Mitreißen von Flüssigkeit zum benachbarten Boden

Erfolgt der Trennprozess in Folge einer chemischen Reaktion reaktiv, muss diese durch Gleichungen für das Reaktionsgleichgewicht oder durch Reaktionskinetiken innerhalb der Komponenten- und Energiebilanzen zusätzlich berücksichtigt werden.

Da in der Realität kein vollständiges Phasengleichgewicht erreicht wird, wird bei Bodenkolonnen die Abweichung vom idealen Zustand in Form eines empirischen Wirkungsgrades angegeben. Dieser Wirkungsgrad variiert häufig zwischen +5% und +25%, woran sich erkennen lässt, dass die Anwendung des Gleichgewichtsmodell für die Absorption weniger geeignet ist [7].

Bei Packungskolonnen hingegen werden alle relevanten Einflussfaktoren in einem Parameter, dem HETP-Wert (Height Equivalent to one Theoretical Plate), zusammengefasst. Der HETP-Wert gibt jene Packungshöhe an, die der Trennleistung einer theoretischen Trennstufe entspricht. Abbildung 24 veranschaulicht die Anwendung des Gleichgewichtsmodells.

Aufgrund der Abhängigkeit des HETP-Wertes vom Belastungszustand der Kolonne und dem jeweiligen Stoffsystem ist keine allgemein gültige Anwendung dieses Konzepts möglich. Das Gleichgewichtsmodell dient als Grundlage bei der Auslegung von Chemisorptionsprozessen, wie z.B. für NO_x -Absorption in Siebbodenkolonnen oder Sprühtürmen oder für die CO_2 -Absorption [7].

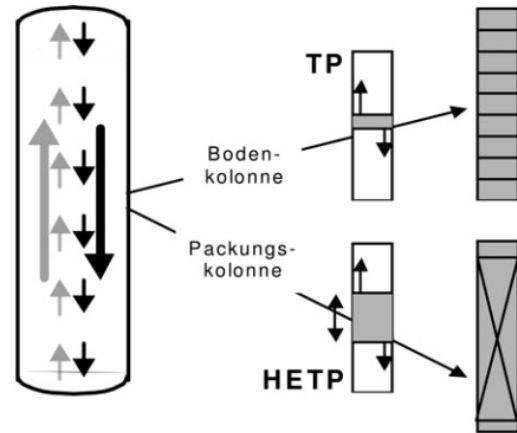


Abbildung 24: Anwendung des theoretischen Trennstufenmodells bei Boden- und Packungskolonnen [7]

2.4.2 Kinetische Stofftransportansätze

Bei den kinetischen Stofftransportansätzen, auch als *Rate-based Approach* bekannt, werden die Stoffaustauschraten von Mehrkomponentensystemen mit gekoppeltem Wärmeaustausch und chemischen Reaktionen direkt in der Modellierung berücksichtigt. Bei diesen Modellen werden die Phasen getrennt voneinander bilanziert. Durch die Bedingungen der Kontinuität und Energieerhaltung an der Phasengrenzfläche können die Bilanzgleichungen miteinander verknüpft werden. Der Stoffübergang an der Grenzfläche zwischen der Flüssig- und Gasphase kann über verschiedene Modelle beschrieben werden, wovon am häufigsten die Film-, Grenzschicht-, Penetrations- und Oberflächenerneuerungstheorie zur Anwendung kommen [7]. Diese Modelle wurden bereits im Kapitel Grundlagen des Stoffaustausches unter 2.3.2 beschrieben.

2.4.3 HTU-NTU-Konzept

Das HTU-NTU-Konzept findet Anwendung bei der Berechnung von thermischen Trennapparaten mit kontinuierlichem Phasenkontakt, wie z.B. Füllkörperkolonnen, Sprühtürmen oder Blasensäulen. Chilton und Colburn entwickelten einen einfachen kinetischen Ansatz, bei dem Übertragungseinheiten (Transfer Units) eingeführt werden. Der Fokus liegt auf der Phasengrenzfläche (Interface). Bei den Transfer Units werden die Anzahl (NTU ... Number of Transfer Units) und die Höhe (HTU ... Height of Transfer Units) erfasst. Die Anzahl der Übertragungseinheiten stellt ein Maß für die Trennschwierigkeit dar [5], [7].

Grundlage des HTU-NTU-Konzepts bildet das Filmmodell. Es wird daher angenommen, dass

- ☑ die Zusammensetzung am Interface $y_{i,I}$ und $x_{i,I}$ im Gleichgewicht ist,
- ☑ die beiden Phasen im Bulk jeweils ideal durchmischt sind,
- ☑ der Stoffaustausch stationär abläuft und
- ☑ die Dicke der Phasengrenzfläche infinitesimal ($K_i^* = \frac{y_i}{x_i}$) ist.

Basis der Berechnung ist die bilanzielle Betrachtung eines differentiellen Höhenabschnitts einer Kolonne, wie in Abbildung 25 schematisch dargestellt ist. Da stationärer Zustand angenommen wird, gilt für die Gesamtbilanz $d\dot{G} = d\dot{L}$ und zudem muss die gas-, sowie die flüssigseitig übertragene Stoffmenge ident sein [14].

Infolgedessen lautet die Komponentenbilanz:

$$\begin{aligned} d\dot{n} &= \dot{G}(y + dy) - \dot{G}y = \dot{G}dy \\ d\dot{n} &= \dot{L}(x + dx) - \dot{L}x = \dot{L}dx \end{aligned} \quad \text{Formel 2.50}$$

Der Stoffdurchgang (vgl. Formel 2.41) in differentieller Form lautet:

$$d\dot{n} = K_G * (y - y^*) dA \quad \text{Formel 2.51}$$

Die Stoffaustauschfläche ist:

$$dA = a * A_s * dz \quad \text{Formel 2.52}$$

Nun werden Formel 2.52 und Formel 2.51 in Formel 2.50 eingesetzt (vgl. Formel 2.53).

Anschließend gelangt man durch Umformung und Integration zur Beschreibung der Kolonnenhöhe H für die Gasphase (siehe Formel 2.55).

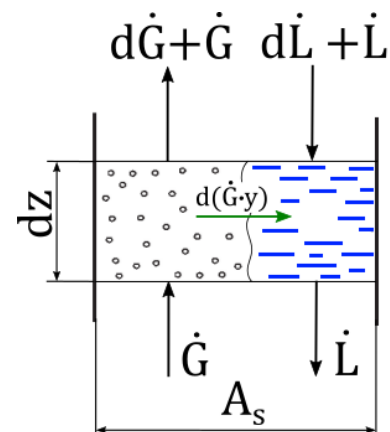


Abbildung 25: Differentielle Massenbilanz in einer Kolonne mit Zweiphasenkontakt

Analoge Vorgehensweise liefert H für die Flüssigphase (siehe Formel 2.56) [14]:

$$\dot{G} dy = K_G * (y - y^*) * a * A_s * dz \quad \text{Formel 2.53}$$

$$\int_0^H dz = \int_{y_\alpha}^{y_\omega} \frac{\dot{G}}{K_G * (y - y^*) * a * A_s} dy \quad \text{Formel 2.54}$$

Kolonnenhöhe
der Gasphase

$$H = \frac{\dot{G}}{K_G * a * A_s} \int_{y_\alpha}^{y_\omega} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad \text{Formel 2.55}$$

Kolonnenhöhe
der Flüssigphase

$$H = \frac{\dot{L}}{K_L * a * A_s} \int_{x_\omega}^{x_\alpha} \frac{dx}{(x^* - x)} \quad \text{Formel 2.56}$$

Aus dem Produkt von Anzahl und Höhe resultiert die für die Trennaufgabe erforderliche Kolonnenhöhe [5], [7]:

$$H = HTU * NTU \quad \text{Formel 2.57}$$

Eine Gegenüberstellung von Formel 2.55 mit Formel 2.57 zeigt, dass es sich beim linken Ausdruck (außerhalb des Integrals) um den HTU-Wert und beim Terminus innerhalb des Integrals um den NTU-Wert handelt:

$$NTU = \int_{y_\alpha}^{y_\omega} \frac{dy}{(y - y^*)} \quad \text{Formel 2.58}$$

Der NTU-Wert ist ein Maß dafür, wie oft die treibende Kraft $(y - y^*)$ im gesamten Trennvorgang von $(y_\alpha - y_\omega)$ vorkommt [14].

Bei Trennoperationen, bei denen der Stofftransport nur in einer Richtung stattfindet, wie es u.a. bei der Absorption oder Extraktion der Fall ist, werden anstelle der Molanteile, die Beladungen X und Y (vgl. Formel 2.20) eingesetzt:

Gasphase

$$H = \frac{\dot{G}}{K_G * a * A_s} \int_{Y_\alpha}^{Y_\omega} \frac{dY}{(Y - Y^*)} \quad \text{Formel 2.59}$$

Flüssigphase

$$H = \frac{\dot{L}}{K_L * a * A_s} \int_{X_\omega}^{X_\alpha} \frac{dX}{(X^* - X)} \quad \text{Formel 2.60}$$

2.4.4 Reaktionskinetik und Enhancement-Faktor

In Kapitel 2.1.3.1, im Abschnitt Chemische Absorption wurde bereits erwähnt, dass der Stofftransport durch die Anwesenheit chemischer Reaktionen beeinflusst wird. Zur Berücksichtigung der stofftransportbeschleunigenden Wirkung von Reaktionen kann das Enhancement-Faktor-Konzept herangezogen werden. Dabei wird der mathematische Ausdruck für den Stoffübergang mit dem Enhancement-Faktor E beaufschlagt:

$$\dot{N}_i = \beta_i * A * \Delta c_i * E_i \quad \text{Formel 2.61}$$

$$E_i = \frac{\text{Stofftransport mit gekoppelter Reaktion}}{\text{physikal. Stofftransp. bei identer Filmdicke und Triebkraft}} \quad \text{Formel 2.62}$$

Dieser Faktor hängt einerseits von der verwendeten Modelltheorie des Stoffübergangs und andererseits von der Art (reversibel bzw. irreversibel) und Ordnung der Reaktion ab. Für die mathematische Beschreibung des Enhancement-Faktors wird sehr häufig auf die dimensionslose Kenngröße für Flüssig-Flüssig- oder Gas-Flüssig-Systeme aus der Reaktionstechnik, die Hatta-Zahl zurückgegriffen. Die Hatta-Zahl Ha setzt die maximale Reaktionsrate einer Komponente im Film zum maximal übergehenden Diffusionsstrom der Komponente ins Verhältnis [7], [17]:

$$Ha = \frac{\text{maximaler Umsatz im Film}}{\text{maximaler diffusiver Stofftransport durch den Film}} \quad \text{Formel 2.63}$$

Die Hatta-Zahl gibt Auskunft darüber, wie schnell oder langsam eine Reaktion in einem Flüssig-Flüssig- oder Gas-Flüssig-System abläuft [17]. Näheres zu dieser Thematik wird direkt im Anschluss in Kapitel 2.5 erläutert.

Auf Basis der Filmtheorie ergibt sich nach Vanswajj und Versteeg [7] der Enhancement-Faktor für irreversible Reaktionen erster und pseudoerster Ordnung beispielsweise zu:

$$E = \frac{Ha}{\tanh(Ha)} \quad \text{Formel 2.64}$$

2.5 Reaktionsbeeinflusster Stoffaustausch

Aus den bisherigen Kapiteln hat sich gezeigt, dass der Vorgang des Stoffaustauschs bei der Physisorption zum einen von den physikalischen Eigenschaften der beteiligten Stoffe und zum anderen auch von den hydrodynamischen Bedingungen an der Phasengrenze beeinflusst wird. Kommt hingegen Chemisorption zur Anwendung, ist der Stoffaustausch zusätzlich auch noch von der ablaufenden Reaktion abhängig. In welcher Art und Weise der Stoffübergang beeinflusst wird, hängt von der Kinetik und weiterführend vom Ort der Reaktion ab. Je nach Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktion gibt es verschiedene Bereiche bzw. Zonen, in denen die Reaktion tatsächlich stattfindet. Die verschiedenen Möglichkeiten, welche sich daraus ergeben, werden als kinetische Regime bezeichnet [17].

Die Reaktionsgeschwindigkeit einer kinetisch kontrollierten, reversiblen, homogenen Reaktion des Typs $\nu_A \cdot A + \nu_B \cdot B \leftrightarrow \nu_P \cdot P + \nu_Q \cdot Q$ wird üblicherweise mit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante für die Hinreaktion k_{hin} (zur Produktseite) über den Arrheniusansatz (vgl Formel 2.65) und für die Rückreaktion $k_{rück}$ (zur Eduktseite) über die Gleichgewichtskonstante K_{eq} (vgl. Formel 2.66) beschrieben [7]:

$$k_{hin} = k_0 * \exp\left(\frac{-E_A}{R * T}\right) \quad \text{Formel 2.65}$$

$$k_{rück} = \frac{k_{hin}}{K_{eq}} \quad \text{Formel 2.66}$$

$$r = k_{hin} * c_A^{\nu_A} * c_B^{\nu_B} - k_{rück} * c_P^{\nu_P} * c_Q^{\nu_Q} \quad \text{Formel 2.67}$$

Simulationsstudien haben gezeigt, dass die Vermessung der kinetischen Parameter der Reaktion besonders präzise erfolgen müssen, da die Abweichungen der errechneten Kolonnenhöhe sonst signifikant sind [7].

2.5.1 Kinetische Regime

Die kinetischen Regime, die hier anschließend vorgestellt werden, gelten gleichermaßen für Reaktionen in Flüssig-Flüssig- und Gas-Flüssig-Systemen. Jedoch werden die Erläuterungen, Notationen, etc. in weiterer Folge aufgrund der Absorption als Inhalt dieser Arbeit rein auf Gas-Flüssig-Reaktionen beschränkt.

Die Grundlage für die Überlegungen zu den kinetischen Regimen bildet neuerlich die Filmtheorie. Ein beliebiges Gas A und eine beliebige Flüssigkeit B werden für die folgenden Betrachtungen herangezogen. Das Gas A sei in Flüssigkeit B löslich, umgekehrt kann B nicht in die Gasphase

übertreten. Aufgrund dessen muss A in die Flüssigphase transportiert werden, bevor es mit B zu einer Reaktion kommen kann. Zudem wird vorausgesetzt, dass die Reaktion zwischen A und B nur in der Flüssigphase stattfinden kann [17]. Diese beispielhafte Überlegung zur Bestimmung der kinetischen Regime wird durch Abbildung 26 veranschaulicht.

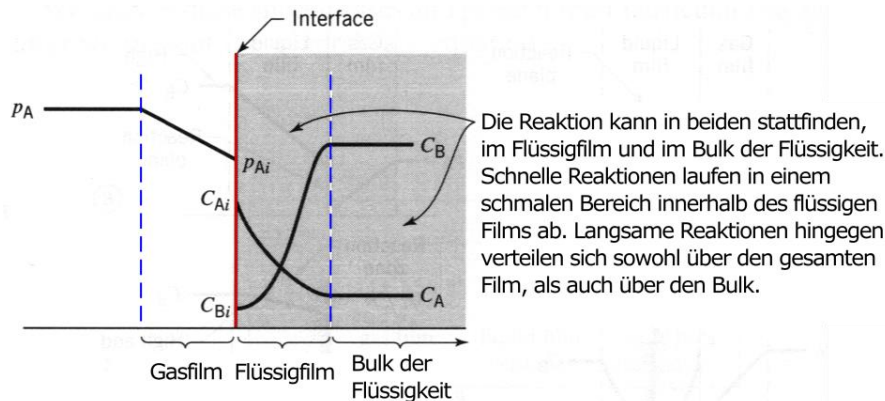


Abbildung 26: Absorption von Gas A in der Flüssigkeit basierend auf der Filmtheorie mit anschließender Reaktion in der Flüssigphase mit B, zur Bestimmung der kinetischen Regime [17]

Die Reaktionsgeschwindigkeit einer Reaktion in einem Volumenelement mit dem Volumen V_r kann in drei verschiedenen Varianten geschrieben werden:

$$-r_A = -\frac{1}{V_l} \frac{dN_A}{dt} \quad -r_A'' = -\frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} \quad -r_A'''' = -\frac{1}{V_r} \frac{dN_A}{dt} \quad \text{Formel 2.68}$$

$$r_A * V_l = r_A'' * S = r_A'''' * V_r$$

V_l ... Volumen der Flüssigkeit innerhalb V_r

V_r ... Volumen des Elements, in dem die Reaktion betrachtet wird

S ... Phasengrenzfläche zwischen Gas- und Flüssigphase

Das Verhältnis aus der Phasengrenzfläche S und dem Reaktionsvolumen V_r bildet den Faktor a :

$$a = \frac{S}{V_r} \quad \text{Formel 2.69}$$

Beim Stofftransport liegen zwei Transportwiderstände in Serie vor, zuerst jener im Gasfilm und danach im Flüssigfilm.

$$r_A'' = \beta_{g,A} * (p_A - p_{A,I}) \quad -r_A'''' = \beta_{g,A} * a * (p_A - p_{A,I}) \quad \text{Formel 2.70}$$

$$r_A'' = \beta_{l,A} * (c_{A,I} - c_A) \quad -r_A'''' = \beta_{l,A} * a * (c_{A,I} - c_A) \quad \text{Formel 2.71}$$

Aus der Kombination von Formel 2.70 und Formel 2.71 mit dem Henry-Gesetz resultiert die Reaktionsgeschwindigkeit für den reinen Stofftransport für jeden beliebigen Punkt innerhalb des Absorbers:

$$-r_A'''' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A}} + \frac{H_{AB}}{\beta_{l,A} * a}} (p_A - H_{AB} * c_A)$$

Formel 2.72

Beim Stofftransport gekoppelt mit einer Reaktion müssen folgende Fragestellungen berücksichtigt werden:

1. Was passiert innerhalb des Films auf der Gasseite?
2. Was passiert auf der Gegenseite im Flüssigfilm?
3. Was passiert im Bulk der Flüssigphase?

Die Reaktionsgeschwindigkeit für den reaktionsgekoppelten Stofftransport, die allgemeine Reaktionsgeschwindigkeit zeigt Formel 2.73. In dieser Gleichung wird nun der Enhancement-Faktor E angewandt:

$$-r_A'''' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A} * a} + \frac{H_{AB}}{\beta_{l,A} * a * E} + \frac{H_{AB}}{k * c_B * f_l}} p_A$$

Formel 2.73

$\frac{1}{\beta_{g,A} * a}$... Widerstand im gaseitigen Film

$\frac{H_{AB}}{\beta_{l,A} * a * E}$... Widerstand im flüssigseitigen Film

$\frac{H_{AB}}{k * c_B * f_l}$... Stofftransportwiderstand im Bulk der Flüssigkeit; mit $f_l = \frac{V_l}{V_r}$

In Abhängigkeit von den Stoffübergangskoeffizienten $\beta_{g,A}$ und $\beta_{l,A}$, dem Konzentrationsverhältnis der Reaktanden $\frac{p_A}{c_B}$ und der Henry-Konstante H_{AB} kann für die Gleichung der Reaktionsgeschwindigkeit zwischen acht Regimen unterschieden werden. Angefangen von der extrem schnellen Reaktion (Stofftransport ist limitierender Faktor), bis hin zur äußerst langsamen Reaktion (Stofftransportwiderstand vernachlässigbar) zeigt die Tabelle 5 die Klassifizierung der acht Regime [17]. Zuvor zeigt Abbildung 27 die zugehörigen Orte und Konzentrationsprofile der Flüssigphasenreaktion.

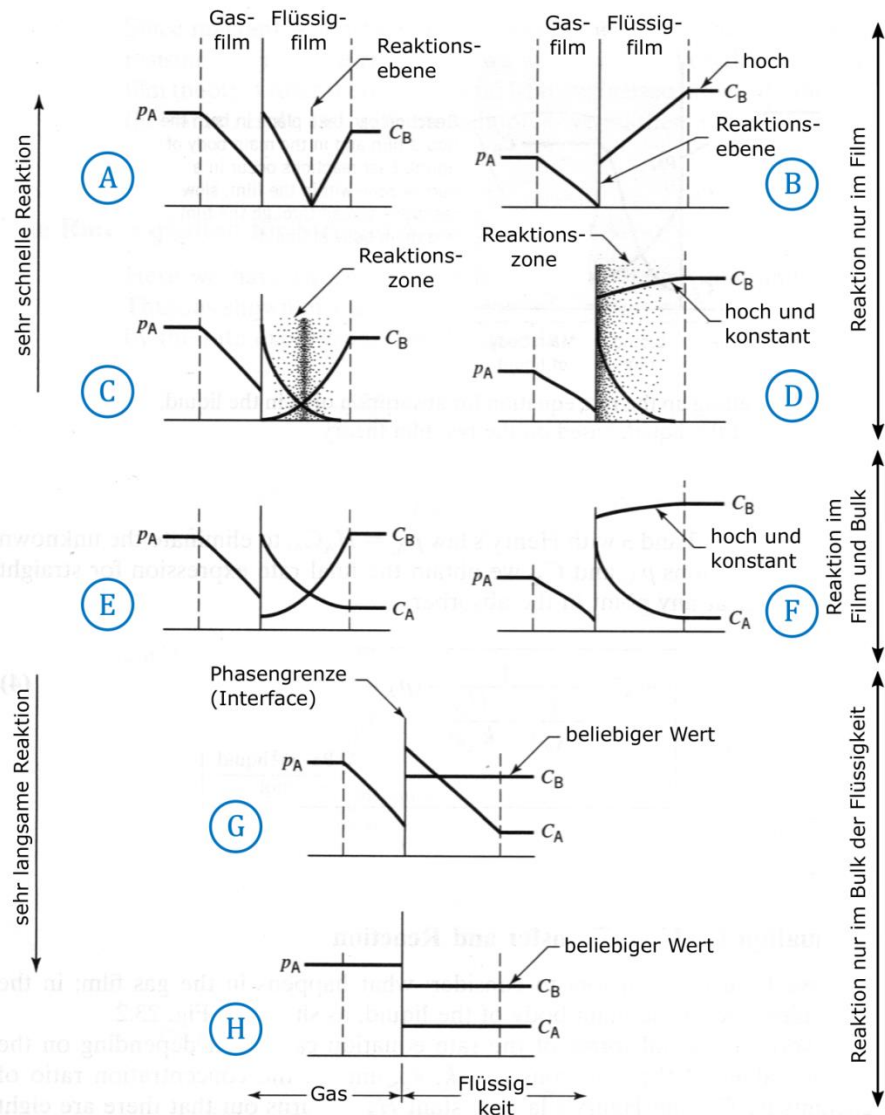


Abbildung 27: Konzentrationsprofile und Reaktionsorte der acht kinetischen Regime bei der Flüssigphasenreaktion $\nu_A \cdot A (\text{vom Gas}) + \nu_B \cdot B (\text{Flüssigkeit}) \rightarrow \nu_P \cdot P (\text{Flüssigkeit})$ über den gesamten Bereich der Reaktionsgeschwindigkeit [17]

Tabelle 5: Verhaltensweise der acht kinetischen Regime [17]

Regime	Verhaltensweise
Ⓐ	Instantane Reaktion, mit geringer Konzentration $c_B \ll$
Ⓑ	Instantane Reaktion, mit hoher Konzentration $c_B \gg$
Ⓒ	Schnelle Reaktion im Flüssigfilm, $c_B \ll$
Ⓓ	Schnelle Reaktion im Flüssigfilm, $c_B \gg$
Ⓔ & Ⓕ	Mittlere Geschwindigkeit, Reaktion findet im Film und Bulk statt
Ⓖ	Langsame Reaktion im Bulk mit Widerstand im Film
Ⓗ	Langsame Reaktion, ohne Stofftransportwiderstand

Nach Levenspiel [17] werden diese acht kinetischen Regime bezüglich Reaktionsgeschwindigkeit und -ort, Stoffübergang und der Einfluss der

Komponentenkonzentration nach folgender Liste ausführlicher charakterisiert. Zu jedem Regime wird auch die entsprechende Gleichung der Reaktions-geschwindigkeit angegeben. Für die detaillierte Herleitung dieser Gleichungen wird indes auf die Literatur verwiesen.

- A** Hinsichtlich des Stoffübergangs handelt es sich um eine augenblickliche (instantane) und irreversible Reaktion. Innerhalb der Grenzschicht existieren A und B an keiner Stelle gleichzeitig. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird stark durch die Diffusionskoeffizienten und den Konzentrationen der Komponenten in den beiden Phasen beeinflusst. Das bedeutet mit zunehmender Konzentration der Flüssigphasenkomponente B verschiebt sich die Reaktionszone immer näher zur Phasengrenzfläche. Bedeutende Einflussgrößen sind die Konzentration der Komponente B und die Größe der Stoffaustauschfläche.

$$-r_A'' = -\frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} = \frac{\frac{\mathcal{D}_{L,B} c_B}{\mathcal{D}_{L,A} v_B} + \frac{p_A}{H_{AB}}}{\frac{1}{H_{AB} * \beta_{g,A}} + \frac{1}{\beta_{l,A}}} \quad \text{Formel 2.74}$$

Da der Stofftransport im Film rein durch Diffusion stattfindet, werden die Stoffübergangskoeffizienten ersetzt:

$$\frac{\beta_{l,A}}{\beta_{l,B}} = \frac{\mathcal{D}_{L,A} / \delta_l}{\mathcal{D}_{L,B} / \delta_l} = \frac{\mathcal{D}_{L,A}}{\mathcal{D}_{L,B}} \quad \text{Formel 2.75}$$

δ_l ... Dicke der flüssigen Grenzschicht

- B** Gleich wie bei Regime A handelt es sich um eine instantane Reaktion. Vergleichsweise ist die Konzentration der Komponente B in der Flüssigphase jedoch sehr groß, weshalb sich die Reaktionsebene direkt an die Phasengrenze verschoben hat. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird lediglich durch den gaseitigen Stoffübergang und die Größe der Stoffaustauschfläche beeinflusst. Eine Konzentrationserhöhung an Komponente B hingegen bewirkt keine Änderung.

$$-r_A'' = -\frac{1}{S} \frac{dN_A}{dt} = \beta_{g,A} * p_A \quad \text{Formel 2.76}$$

Zusätzlich kann ein Kriterium definiert werden, anhand dessen überprüft werden kann, ob Regime A oder B vorliegt:

$$\begin{aligned} \text{wenn } \beta_{g,A} * p_A \geq \beta_{l,B} * \frac{c_B}{v_B}, \text{ dann herrscht Regime A} \\ \text{wenn } \beta_{g,A} * p_A < \beta_{l,B} * \frac{c_B}{v_B}, \text{ dann herrscht Regime B} \end{aligned} \quad \text{Formel 2.77}$$

- Ⓒ Beim Regime C spricht man von einer schnellen Reaktion zweiter Ordnung. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist vergleichsweise schon niedriger als bei Regime A. Die Komponente A gelangt jedoch noch immer nicht in den Bulk der Flüssigkeit, da sie vorher bereits abreagiert. Das bedeutet, dass der Stofftransportwiderstand im Bulk k groß ist, wodurch der dritte Term im Nenner der allgemeinen Reaktionsgeschwindigkeit (Formel 2.73) entfällt. Aufgrund der reduzierten Geschwindigkeit hat sich die Reaktionsebene zu einer Zone ausgeweitet, in welcher die Komponenten A und B gleichzeitig existieren können. Hier wirken sich die Größe der Stoffaustauschfläche, beide Stoffübergangskoeffizienten und die Bulkkonzentration der Komponente B auch auf die Reaktionsrate aus.

$$-r_A'''' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A} * a} + \frac{H_{AB}}{\beta_{l,A} * a * E}} p_A \quad \text{Formel 2.78}$$

- Ⓓ Zu einem Ausbleiben der Einflussnahme des flüssigseitigen Stoffübergangskoeffizienten kommt es, wenn die Konzentration der Komponente B, verglichen mit Regime C, weiter erhöht wird. Infolgedessen kommt es an der Phasengrenzfläche zu einem Überschuss von B, welcher nie vollständig wegagieren kann.

$$-r_A'''' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A} * a} + \frac{H_{AB}}{a * \sqrt{D_{l,A} * k * c_B}}} p_A \quad \text{Formel 2.79}$$

- Ⓔ & Ⓕ In Regime E und F haben die Stofftransport- und die Reaktionsgeschwindigkeit etwa gleiche Größenordnung. Die Komp. A kann nun auch in den Bulk der Flüssigphase diffundieren, weshalb A mit B sowohl im Film, als auch im Bulk reagieren kann. Hier gilt die allg. Reaktionsgeschwindigkeit (Formel 2.73) ohne Vereinfachungen.

- Ⓖ Regime G stellt einen Sonderfall dar, bei dem die Reaktion ausschließlich nur im Bulk der Flüssigkeit stattfindet. Der Stofftransportwiderstand des Flüssigfilms behindert die Komponente A lediglich beim Transport in den Bulk. Die Reaktionsrate vereinfacht sich zu:

$$-r_A'''' = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A} * a} + \frac{H_{AB}}{\beta_{l,A} * a} + \frac{H_{AB}}{k * c_B * f_l}} p_A \quad \text{Formel 2.80}$$

- Ⓗ Das achte Regime repräsentiert die unendlich langsame Reaktion, welche rein durch die chemische Kinetik beeinflusst wird. Der Stofftransport ist vernachlässigbar klein.

$$-r_A'''' = \frac{k * c_B * f_l}{H_{AB}} p_A = k * f_l * c_B * c_A \quad \text{Formel 2.81}$$

2.5.2 Bedeutung der Hatta-Zahl hinsichtlich kinetischer Regime

Bereits im Abschnitt 2.4.4 wurde die Hatta-Zahl als dimensionslose Größe der Reaktionstechnik für Flüssig-Flüssig- und Gas-Flüssig-Systeme erwähnt. Um eine Aussage treffen zu können, wie die Geschwindigkeit einer Reaktion in solchen Systemen eingestuft werden kann, wird die Hatta-Zahl verwendet. Unter der Annahme, dass der Widerstand der Gasphase vernachlässigbar ist, wird die Hatta-Zahl folgendermaßen definiert [17]:

$$Ha = \frac{\text{maximaler Umsatz im Film}}{\text{maximaler diffusiver Stofftransport durch den Film}}$$

Formel 2.82

$$Ha = \frac{k * c_{A,i} * c_B * \delta_l}{\frac{\mathcal{D}_{l,A}}{\delta_l} * c_{A,i}} = \frac{k * c_B * \mathcal{D}_{l,A}}{\beta_{l,A}^2}$$

Anhand der Größenordnung der Hatta-Zahl kann nun eine Aussage über die Geschwindigkeit der Reaktion und infolgedessen über das vorliegende Regime getroffen werden, wie Tabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Charakterisierung der vorliegenden kinetischen Regime anhand der Hatta-Zahl [17]

$Ha > 2$	<input checked="" type="checkbox"/> Die Reaktion findet im Film statt. <input checked="" type="checkbox"/> Die Stoffaustauschfläche ist der limitierende Faktor. <input checked="" type="checkbox"/> Es liegt Regime A, B, C, oder D vor.
$0,02 < Ha < 2$	<input checked="" type="checkbox"/> Die Reaktionsgeschwindigkeit ist moderat. <input checked="" type="checkbox"/> Es liegt Regime E, F, oder G vor.
$Ha < 0,02$	<input checked="" type="checkbox"/> Die Reaktion ist unendlich langsam. <input checked="" type="checkbox"/> Das Flüssigvolumen spielt die entscheidende Rolle. <input checked="" type="checkbox"/> Es liegt Regime H vor.

Diese Charakterisierung gibt in weiterer Folge eine wichtige Auskunft darüber, welche relevanten Kriterien in die Auswahl des Reaktortyps miteinbezogen werden müssen. Wenn die Hatta-Zahl beispielsweise sehr groß ist, ist es erforderlich einen Apparat zu wählen, der eine große Stoffaustauschfläche bereitstellen kann. Die Umsetzung durch Energieeintrag mittels Rühren stellt ein wesentliches Element dar. Bei niedrigen Hatta-Zahlen hingegen liefert Rühren keinerlei Verbesserung, hier besteht lediglich eine Forderung nach einem möglichst großen Flüssigkeitsvolumen [17].

3 Eigenschaften und Stoffdaten der verwendeten Stoffe

Um die richtigen Voraussetzungen für einen sicheren Umgang mit den verwendeten Stoffen bzw. Chemikalien zu erfüllen, ist es wichtig sich im Vorfeld mit deren Eigenschaften auseinander zu setzen. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel zuerst die grundlegenden Eigenschaften und die Gefahrenhinweise der einzelnen Stoffe beschrieben. Im Anschluss folgen die Stoffdaten, welche für diverse Berechnungen oder einzelne Auslegungen benötigt werden.

3.1 Grundlegende Eigenschaften und Gefahrenpotenzial

Unter dem Begriff Eigenschaften wird das prinzipielle Erscheinungsbild des jeweiligen Stoffes und Eigenschaften in Bezug auf Farbe, Geruch oder Geschmack beschrieben. Neben den Grundeigenschaften werden die Gefahren, welche von den Stoffen ausgehen können, entsprechend nach der GHS-Gefahrenstoffkennzeichnung klassifiziert aufgelistet (H-Sätze). Auf eine zusätzliche Auflistung der Sicherheitshinweise (P-Sätze) wird verzichtet und stattdessen auf die entsprechenden Sicherheitsdatenblätter verwiesen. Siehe dazu [18]–[22].

3.1.1 Deionisiertes Wasser ... H_2O

Eigenschaften

Durchsichtig, weitgehend farb-, geruch- und geschmacklos.
Ungiftig (Lebensmittel).

Gefahrenhinweise

Keine.

3.1.2 Natronlauge ... $NaOH$

Hersteller

Carl Roth GmbH + Co KG, Artikelnummer T135

Eigenschaften

Farblose Lösung.

Gefahrenhinweise

- H290 Kann gegenüber Metallen korrosiv sein.
H300 Lebensgefahr bei Verschlucken.
H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.



3.1.3 Luft

Eigenschaften

Farbloses, geruchloses, ungiftiges Gasgemisch.

Zusammensetzung: 78 % Stickstoff N₂,
 21 % Sauerstoff O₂ und
 1 % Verschiedene Edelgase

Gefahrenhinweise

Keine.

3.1.4 Schwefeldioxid ... SO₂

Hersteller

Air Liquide Austria GmbH,

Gasgemisch mit:

10000 Vol-ppm Schwefeldioxid N38 und
Rest Synthetische Luft N50

Eigenschaften

Farbloses, stechend riechendes, giftiges Gas.

Gefahrenhinweise

- H280 Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.
H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augen-schäden.
H331 Giftig bei Einatmen.



3.1.5 Natriumsulfit ... Na_2SO_3

Eigenschaften

Weiß bis schwach gelbliches, geruchloses, kristallines Pulver.

Gefahrenhinweise

Der Stoff ist nicht als gefährlich eingestuft im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008.

3.2 Stoffdaten

In diesem Abschnitt werden die Stoffdaten der vier verwendeten Stoffe tabellarisch in Tabelle 7 angeführt. Sofern es nicht anders angegeben wird, beziehen sich die aufgelisteten Größen auf den folgenden Zustand:

Druck $p^0 = 1,013bar$
 Temperatur $T^0 = 20^\circ C$

Zu den grau hinterlegten Werten liegen separate Berechnungsgleichungen vor, die im Anschluss (siehe Abschnitt 3.2.1 ff.) beschrieben werden.

Tabelle 7: Stoffdaten von Wasser, Natriumhydroxid, Luft und Schwefeldioxid [16], [23]–[25]

Eigenschaft	Symbol	Einheit	H_2O	$NaOH$	<i>Luft</i>	SO_2
Molmasse	M_{G_i}	$\left[\frac{kg}{kmol}\right]$	18,02	40,00	28,96	64,06
Dichte	ρ_i	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	998,00	2130	1,204	2,26
Dampfdruck	p_i^S	[bar]				3,36
Siedepunkt	T_i^B	[°C]	99,974	1390	-194,2	-10,0
Schmelzpunkt	T_i^M	[°C]	0,0	318,4	-210,1	-75,5
Diffusionskoeffizient in Luft	D_{i-Luft}	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	2,19 * 10^{-5}			1,0278 * 10^{-5}
Kinematische Viskosität	ν_i	$\left[\frac{m^2}{s}\right]$	1,003 * 10^{-6}		15,8 * 10^{-6}	

3.2.1 Kinematische Viskosität

Im Rahmen seiner Dissertation hat Martin Vorbach kinematische Viskositäten von Luft für Gastemperaturen zwischen 20 und 25 °C linear gefittet. Mit dieser Gleichung ist eine Umrechnung an die tatsächliche Gaseintrittstemperatur möglich. Die Berechnungsgleichung lautet [26]:

$$\nu_{Luft} = 1,8 * 10^{-7} * T_{g,ein} + 1,18 * 10^{-5} \quad \text{Formel 3.1}$$

3.2.2 Dichte

Analog zur kinematischen Viskosität liegt eine Fitfunktion für die Umrechnung der Dichte von Luft an die tatsächliche Gaseintrittstemperatur vor. Die Berechnungsgleichung ist ein Polynom 3. Grades, zwischen 0 und 40 °C gültig und lautet [26]:

$$\begin{aligned} \rho_{Luft} = & - 8,333 * 10^{-8} * T_{g,ein}^3 \\ & + 1,857 * 10^{-5} * T_{g,ein}^2 \\ & - 4,685 * 10^{-3} * T_{g,ein} \\ & + 1,275 \end{aligned} \quad \text{Formel 3.2}$$

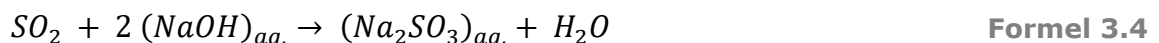
3.2.3 Diffusionskoeffizient

Um neben der kinematischen Viskosität und der Dichte auch den Diffusionskoeffizienten für die tatsächliche Gaseintrittstemperatur ermitteln zu können, gab Martin Vorbach folgende Beziehung [26] an:

$$D_{SO_2-Luft} = D_{SO_2-Luft}^0 \left[\frac{m^2}{s} \right] * \frac{p^0 [mbar]}{p_{g,ein} [mbar]} * \left(\frac{T_{g,ein} [K]}{T^0 [K]} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Formel 3.3}$$

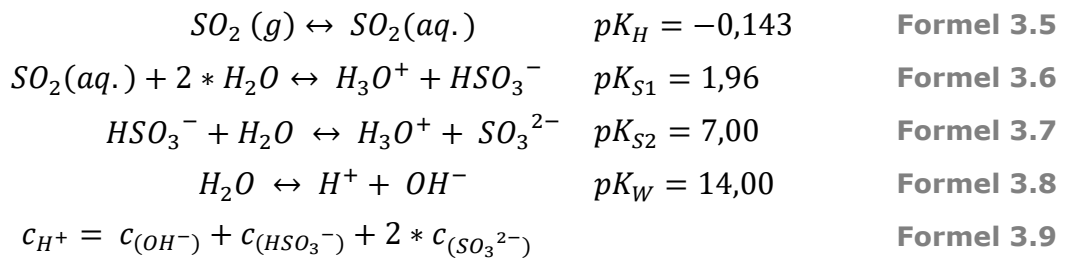
3.3 Chemismus des Systems SO₂ – H₂O – NaOH

Wie Formel 3.4 zeigt, wird das Schwefeldioxid SO₂ mit Natronlauge NaOH zu Natriumsulfit Na₂SO₃ umgesetzt [5]:



Wilhelm Zapfel untersuchte mit Unterstützung von Lehr Markus den Chemismus des Systems SO₂ – H₂O – NaOH im Zuge seiner Dissertation. In seiner Arbeit werden die nachfolgenden Gleichungen für den chemischen Absorptionsmechanismus von SO₂ beschrieben. Aufgrund des Umfangs wird an dieser Stelle auf den Inhalt nur oberflächlich eingegangen und für eine detaillierte Erläuterung auf die Arbeit von Hrn. Zapfel [27] bzw. von Hrn. Lehr [28] verwiesen.

Die Absorption von SO_2 findet nach folgenden Gleichungen statt [27]:



Eine Kombination der obigen Gleichungen liefert den Partialdruck in Abhängigkeit des pH-Wertes (siehe Formel 3.10). Der Partialdruck von SO_2 hängt also maßgeblich vom pH-Wert der Flüssigphase ab [27]:

$$p_{SO_2} = \frac{c_{(H^+)}^3 - K_W * c_{(H^+)}}{2 * K_H * K_{S1} * K_{S2} + K_H * K_{S1} * c_{(H^+)}} \quad \text{Formel 3.10}$$

Diese pH-Wert-Abhängigkeit hat zur Folge, dass der SO_2 - Partialdruck ab pH-Werten über 6,3 kleiner 0,1 Pa ist, wie Abbildung 28 zeigt. Dadurch ist die SO_2 - Konzentration in der flüssigen Phase näherungsweise null:

$$\begin{aligned}
 pH > 6,3 &\rightarrow p_{SO_2} < 0,1 Pa \\
 \text{und damit } c_{SO_2} &\approx 1 ppmv
 \end{aligned}$$

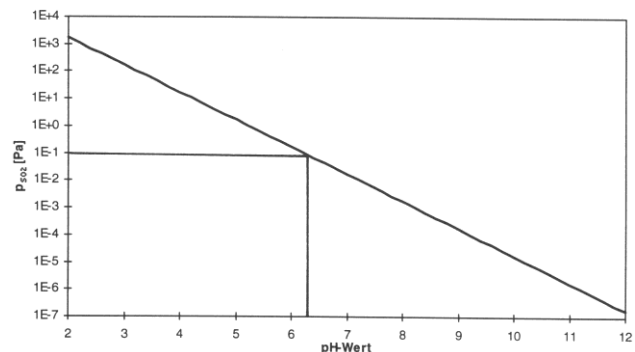


Abbildung 28: Abhängigkeit des SO_2 - Partialdrucks vom pH-Wert [28]

Im Verhältnis zum Stofftransport laufen die fünf Einzelreaktionen (Formel 3.5 bis Formel 3.9) sehr schnell ab. Aufgrund dessen kann man bei pH-Werten über 6,3 von einem Regime des Typs B nach Levenspiel ausgehen. Es findet somit eine instantane Reaktion an der Grenzfläche zwischen Gas- und Flüssigphase statt. Zudem wirkt kein (Stofftransport-) Widerstand in der Flüssigphase [27]. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird lediglich durch den gaseitigen Stoffübergang und von der Größe der Stoffaustauschfläche beeinflusst. Damit gilt:

$$k_g = \beta_{g,A} \quad \text{Formel 3.11}$$

Bezugnehmend auf das HTU-NTU-Konzept errechnet sich somit die Kolonnenhöhe H, in integrierter Form nach Formel 3.12:

$$H_K = \frac{\dot{G}}{\beta_{g,A} * a * A_s * \frac{p}{R * T}} * \ln \left(\frac{y_{i,e}}{y_{i,a}} \right) \quad \text{Formel 3.12}$$

4 Auslegung

4.1 Auslegung einer Gegenstromkolonne mit kontinuierlichem Phasenkontakt

Wie in Kapitel 2.4.3 bereits erwähnt wurde, werden bei Trennapparaten mit einseitigem Stofftransport in der Bilanzierung die Beladungen X, Y anstelle der Molanteile verwendet (siehe Formel 2.59 und Formel 2.60).

Gasbeladung	$Y_A = \frac{p_A}{p_{ges} - p_A}$	Formel 4.1
-------------	-----------------------------------	------------

Flüssigkeitsbeladung	$X_A = \frac{c_A}{c_{ges} - c_A}$	Formel 4.2
----------------------	-----------------------------------	------------

Für verdünnte Systeme ergibt aus den Ableitungen der Beladungen:

$$dY_A = \left(\frac{p_A}{p_{ges} - p_A} \right) = \frac{p_{ges} * dp_A}{(p_{ges} - p_A)^2} \cong \frac{dp_A}{p_{ges}} \quad \text{Formel 4.3}$$

$$dX_A = \left(\frac{c_A}{c_{ges} - c_A} \right) = \frac{c_{ges} * dc_A}{(c_{ges} - c_A)^2} \cong \frac{dc_A}{c_{ges}} \quad \text{Formel 4.4}$$

Aus dem Gesamtgasstrom \dot{G} und dem Gesamtflüssigkeitsstrom \dot{L} werden die inerten Ströme berechnet:

$$\dot{G}_{inert} = \dot{G} \frac{(p_{ges} - p_A)}{p_{ges}} \quad \text{Formel 4.5}$$

$$\dot{L}_{inert} = \dot{L} \frac{(c_{ges} - c_A)}{c_{ges}} \quad \text{Formel 4.6}$$

Unter der Annahme, dass der Stofftransport rein physikalisch stattfindet, kann das Kolonnenvolumen V_K ermittelt werden. Zunächst werden die Bilanz um den Absorber (vgl. Formel 4.33) und die Absorptionsrate (vgl. Formel 4.34) angeschrieben:

$$(\dot{G}_{inert} * dY_A) = (\dot{L}_{inert} * dX_A) = -r_A'''' * dV \quad \text{Formel 4.7}$$

$$-r_A'''' = -r_A'' * a = \beta_{g,A} * a * (p_A - p_{A,I}) = \beta_{l,A} * a * (c_{A,I} - c_A) \quad \text{Formel 4.8}$$

Auf die exakte Herleitung wird im Weiteren aufgrund des Umfangs verzichtet auf die Dissertation von Herrn Martin Vorbach, siehe [26], verwiesen.

Wird der Stoffdurchgang durch die Phasengrenzfläche betrachtet, kann mit den beiden Stoffdurchgangskoeffizienten $K_{A,g}$ und $K_{A,l}$ nach Formel 4.9 das Kolonnenvolumen V_K schließlich nach Formel 4.10 ausgedrückt werden.

$$K_{g,A} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{g,A}} + \frac{H_A}{\beta_{l,A}}} \quad \text{und} \quad K_{l,A} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{l,A}} + \frac{1}{\beta_{g,A} * H_A}} \quad \text{Formel 4.9}$$

Kolonnenvolumen

$$V_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{p_{ges} * a * K_{g,A}} \int_{p_{A,aus}}^{p_{A,ein}} \frac{dp_A}{(p_A - p_A^*)} \quad \text{Formel 4.10}$$

$$V_K = \frac{\dot{L}_{inert}}{c_{ges} * a * K_{l,A}} \int_{c_{A,ein}}^{c_{A,aus}} \frac{dc_A}{(c_A^* - c_A)}$$

Mit: $p_A^* = H_A * c_A \quad \text{und} \quad c_A^* = \frac{p_A}{H_A} \quad \text{Formel 4.11}$

Soll in weiterer Folge nun auch der Stoffaustausch mit schneller chemischer Reaktion in der Berechnung des Kolonnenvolumens berücksichtigt werden, wird wiederum die Absorption der gasförmigen Komponente A (Absorptiv) in einer Flüssigkeit (Absorbens B) mit anschließender Reaktion zweiter Ordnung im Flüssigfilm betrachtet (vgl. Formel 4.12).



Die schnelle Reaktion zweiter Ordnung kann den Regimen A bis D nach Levenspiel entsprechen (siehe Kapitel 2.5.1). Aufgrund dessen gilt für die weitere Auslegung, dass die absorbierte Komponente A nicht in den Bulk der Flüssigphase eindringt. Neuerlich wird die Bilanz um den Absorber mit der Absorptionsrate kombiniert [26]:

$$(\dot{G}_{inert} * dY_A) = -\frac{\dot{L}_{inert} * dX_B}{\nu_B} = -r_A'''' * dV \quad \text{Formel 4.13}$$

$$V_K = \dot{G}_{inert} * \int_{Y_{A,aus}}^{Y_{A,ein}} \frac{dY_A}{-r_A'' * a} = \frac{\dot{L}_{inert}}{\nu_B} * \int_{X_{B,aus}}^{X_{B,ein}} \frac{dX_B}{-r_A'' * a} \quad \text{Formel 4.14}$$

Aus der Bilanz um den Absorber ergeben sich die jeweils unbekanntenen Konzentrationen der Komponenten A und B:

$$\dot{G}_{inert} * (Y_{A,ein} - Y_{A,aus}) = \dot{L}_{inert} * (X_{B,ein} - X_{B,aus}) \quad \text{Formel 4.15}$$

Die Gleichung für die Kolonnenhöhe, sowie die Bilanz um den Absorber können durch die Vereinfachungen für verdünnte Systeme ($y_A < 0,01$, $c_A \ll c_{ges}$, $p_A \ll p_{ges}$, $\dot{G} \cong \dot{G}_{inert}$ und $\dot{L} \cong \dot{L}_{inert}$) schließlich nach Formel 4.16 bzw. Formel 4.17 beschrieben werden.

$$V_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{p_{ges}} * \int_{p_{A,aus}}^{p_{A,ein}} \frac{dp_A}{-r_A'' * a} = \frac{\dot{L}_{inert}}{v_B * c_{ges}} * \int_{c_{B,aus}}^{c_{B,ein}} \frac{dc_B}{-r_A'' * a} \quad \text{Formel 4.16}$$

$$\frac{\dot{G}_{inert}}{p_{ges}} (p_{A,ein} - p_{A,aus}) = \frac{\dot{L}_{inert}}{v_B * c_{ges}} (c_{B,ein} - c_{B,aus}) \quad \text{Formel 4.17}$$

Für die Absorptionsrate $-r_A''$ in Formel 4.33 wird in Abhängigkeit vom geltenden Regime nach Levenspiel (A, B, C, oder D) der entsprechend hergeleitete Ausdruck (siehe Kapitel 2.5.1) eingesetzt. Die Kolonnenhöhe ergibt sich nach Integration wiederum durch die Division des berechneten Kolonnenvolumens durch den Kolonnenquerschnitt [26].

4.1.1 Kolonnenhöhe

Martin Vorbach verglich im Rahmen seiner Dissertation u.a. die Abweichung der errechneten mit der tatsächlichen Kolonnenhöhe. Bei der Berechnung der Kolonnenhöhe wird von einer schnellen Reaktion ausgegangen, was Regime A und B nach Levenspiel entspricht [26]. Wie bereits beim Chemismus des Stoffsystems in Kapitel 3.3 erläutert wurde, kann aufgrund der Reaktionsgeschwindigkeit das Regime B angenommen werden.

Setzt man nun die Absorptionsrate $-r_A'' = \beta_{g,A} * p_A$ (vgl. Formel 2.76) für Regime B in Formel 4.16 ein und ersetzt die Partialdrücke durch die Stoffmengenanteile in der Gasphase, erhält man das Kolonnenvolumen:

$$V_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{p_{ges} * \beta_{g,A} * a} * \int_{y_{SO_2,aus}}^{y_{SO_2,ein}} \frac{dy_i}{y_i} \quad \text{Formel 4.18}$$

Die Division des Kolonnenvolumens durch die freie Querschnittsfläche S_{Kg} der Kolonne liefert schließlich die Kolonnenhöhe:

$$H_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{S_{Kg} * p_{ges} * \beta_{g,A} * a} * \int_{y_{SO_2,aus}}^{y_{SO_2,ein}} \frac{dy_i}{y_i} \quad \text{Formel 4.19}$$

$$H_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{S_{Kg} * p_{ges} * \beta_{g,A} * a} * \ln \left(\frac{y_{SO_2,ein}}{y_{SO_2,aus}} \right) \quad \text{Formel 4.20}$$

4.1.2 Abscheideleistung

Die Abscheideleistung der Kolonne wird durch folgendes Verhältnis ermittelt:

$$A_{SO_2} = \frac{(c_{SO_2, \text{ein}} - c_{SO_2, \text{aus}})}{c_{SO_2, \text{ein}}}$$

Formel 4.21

4.1.3 Stoffaustausch

Im Rahmen der vorangegangenen Arbeiten (wie z.B. von Hrn. Martin Vorbach) wurden verschiedene empirische Sherwood - Beziehungen zur Beschreibung des Stoffaustauschs an der Fallfilmkolonne untersucht. Dabei hat sich für den gaseitigen Stoffaustausch die Sherwood - Beziehung nach *Vauck* als geeignet erwiesen, welche die Absorption in Rieselfilmen an senkrechten Wänden und Rohren beschreibt. [26], [28]. Die empirische Sherwood - Beziehung nach *Vauck* basiert auf dem Potenzansatz der Form $Sh = c * Re^n * Sc^m$ und lautet:

$$Sh_g = 0,023 * Re_g^{0,83} * Sc_g^{0,44}$$

Formel 4.22

Die darin verwendeten dimensionslosen Kennzahlen werden wie folgt beschrieben:

$$Re_g = \frac{w_g * (d_{IR,a} + 2 * a_F)}{v_g}$$

Formel 4.23

$$Sc_g = \frac{v_g}{D_{SO_2-Luft}}$$

Formel 4.24

Die Gasgeschwindigkeit wird über den freien Kolonnenquerschnitt (Definition siehe Abschnitt Geometrie der Kolonne) ermittelt [8]:

$$w_g = \frac{\dot{G}}{S_{Kg}}$$

Formel 4.25

Aus der Definition der Sherwood-Zahl (vgl. Formel 2.32) kann der gaseitige Stoffübergangskoeffizient $\beta_{g,A}$ berechnet werden:

$$\beta_{g,A} = \frac{Sh_g * D_{SO_2-Luft}}{(d_{IR,a} + 2 * a_F)}$$

Formel 4.26

4.2 Gasversorgung

Repräsentativ für einen verunreinigten Abgasstrom soll an der Fallfilmkolonne als zu reinigendes Rohgas ein fix zusammengesetztes Gas verwendet werden. Es wird somit SO_2 entweder als reines Gas, oder in Form eines Gasgemisches mit definierter SO_2 -Konzentration benötigt.

Aufgrund der Toxizität und vor allem wegen der hohen Korrosivität des Schwefeldioxids wird auf ein reines Gas verzichtet. Stattdessen wird ein Gasgemisch mit einer Konzentration von 10.000 *ppm* SO_2 in Luft in Betracht gezogen. Mit Hilfe des Molvolumens idealer Gase und der Molmasse von Schwefeldioxid kann von der Konzentration in ppm auf die Beladung in g pro Normkubikmeter Luft umgerechnet werden. Die Umrechnung kann anhand Formel 4.27 bis Formel 4.32 nachvollzogen werden:

Normzustand	$p = 1013 \text{ hPa} = 1013 \text{ mbar}$ $T = 273,15 \text{ K} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$	Formel 4.27
-------------	--	--------------------

Molvolumen idealer Gase	$MV = 22,4 \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}} = 22,4 \frac{\text{Ndm}^3}{\text{mol}} = 22400 \frac{\text{Ncm}^3}{\text{mol}}$	Formel 4.28
-------------------------	--	--------------------

Konzentration in [ppm]	$1 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ Ncm}^3}{10^6 \text{ Ncm}^3} = \frac{1 \text{ Ncm}^3}{1 \text{ Nm}^3}$	Formel 4.29
------------------------	---	--------------------

	$10.000 \text{ ppm} = \frac{10^4 \text{ Ncm}^3}{10^6 \text{ Ncm}^3} = \frac{10^4 \text{ Ncm}^3 \text{ SO}_2}{1 \text{ Nm}^3 \text{ Luft}}$	Formel 4.30
--	--	--------------------

Stoffmenge	$n = \frac{10^4 \frac{\text{Ncm}^3 \text{ SO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ Luft}}}{22400 \frac{\text{Ncm}^3}{\text{mol}}}$ $n = 0,4464 \frac{\text{mol SO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ Luft}}$	Formel 4.31
------------	---	--------------------

Masse	$m = n * MG$ $= 0,4464 * 64,06$ $m = 28,598 \frac{\text{g SO}_2}{\text{Nm}^3 \text{ Luft}}$	Formel 4.32
-------	---	--------------------

Das betrachtete Gemisch mit 10.000 *ppm* SO_2 in Luft, abgefüllt in einer 50 Liter-Gasflasche, inklusive einem für korrosive Medien geeigneten Druckminderer wurde vom Anbieter *AirLiquide* bezogen. Auf einen *Fremdgasspülblock* für die Spülung des Druckminderers mit Stickstoff wurde aus Kostengründen verzichtet. Stattdessen wurde in der Gasleitung unmittelbar nach dem Druckminderer ein T-Fitting eingebaut. Über den Anschluss dieses T-Stücks konnte nach dem Anlagenbetrieb Stickstoff als Spülgas angeschlossen und damit die Gasleitung gereinigt werden.

4.3 Massendurchflussregler (MFC)

Bei der Durchführung von Absorptionsversuchen ist es für die anschließende Bewertung der Absorptionseffizienzen wichtig, u.a. verschiedene Verhältnisse von Gas- und Flüssigkeitsdurchsätzen, oder auch verschiedene Eingangskonzentrationen des Rohgases zu untersuchen.

Da das Rohgas prinzipiell eine fixe Konzentration aufweist, soll das Rohgas vor dem Einleiten in die Kolonne zusätzlich, jedoch variabel verdünnt werden. Wegen der hohen und günstigen Verfügbarkeit wird dies mittels Luft in Form von Druckluft durchgeführt (näheres dazu wird im Abschnitt 4.4 beschrieben). Um trotz der zusätzlichen Verdünnung möglichst präzise SO_2 -Konzentrationen am Kolonneneinlass als Betriebsparameter vorgeben zu können, wird ein Regelventil benötigt. Bei diesem Regelventil handelt es sich um einen Massendurchflussregler, auch mass flow controller, oder kurz MFC genannt.

Als Ausgangsbasis für die Auslegung und Auswahl eines für die Anforderungen der Absorptionsversuchsanlage geeigneten MFC dienen die Leistungsdaten jenes MFC, der bei der erstmals im Jahre 1995 aufgebauten Anlage verwendet wurde. Die damalige Anlage wurde von Hrn. Zapfel Wilhelm im Rahmen seiner Dissertation errichtet [27]. Auf derselben Anlage führte Herr Kracker-Semler Gunther, im Jahr 2001, im Rahmen seiner Diplomarbeit Absorptionsversuche mit Schwefeldioxid durch [8]. Die Leistungsdaten des damals eingesetzten MFC können der Tabelle 8 entnommen werden:

Tabelle 8: Leistungsdaten des 2001 für Absorptionsversuche mit SO_2 verwendeten MFC [8]

Hersteller	<i>Brooks</i>
Typ	Mass Flow Controller 5850E
Steuergerät (analog)	<i>Brooks 5878</i>
Erforderlicher Vordruck	1,5 bar gauge
Maximaler Betriebsdruck	100 bar
Durchflussbereich	0 bis 50 Normliter / h

Auf Basis dieser Daten erfolgt die Auslegung eines neuen, dem aktuellen Stand der Technik entsprechenden Massendurchflussreglers. Im Zuge der Recherche fällt die engere Auswahl auf zwei Geräte, der beiden Hersteller *Bronkhorst High-Tech B.V.* und *Sierra Instruments*. Diese beiden zur

Auswahl stehenden Geräte sind für den Einsatz mit stark korrosiven Medien, wie z.B. SO_2 , ausgelegt.

Bei einigen anderen Versuchsanlagen der Technikumshalle sind Mass flow controller von *Bronkhorst* bereits in Verwendung. Dadurch stehen Erfahrungswerte und Kenntnisse im Umgang mit den einzelnen Software-Programmen bereits zu Verfügung. Diese beiden doch wesentlichen Faktoren lassen die letztgültige Entscheidung zugunsten des MFC von Bronkhorst fallen. Die Leistungsdaten des gewählten Massendurchflussreglers sind in Tabelle 9 angeführt:

Tabelle 9: Leistungsdaten des gewählten Massendurchflussreglers

Hersteller	<i>Bronkhorst High-Tech B.V</i>
Type	Thermischer Massendurchflussregler
Serie	Low ΔP
Modell	F-201DV-AGD-33-E
Besonderheiten	Geringer Druckverlust Eignung für korrosive Gase Gute Spülbarkeit Geringe Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit und Schmutz Umfangreiche, kostenlose Software, u.a. Programmdateien für die Implementierung in <i>National Instruments</i> LabView inklusive
Regelbereich (kalibriert)	0,02 bis 1 Normliter / min Luft mit 28 g/m ³ SO_2
Genauigkeit	$\pm 1\%$ vom Endwert
Erforderlicher Vordruck	3 bar gauge
Ausgangsdruck	1,5 bar gauge
Maximaler Betriebsdruck	10 bar
Material (mit Medienkontakt)	Edelstahl
Werkstoff der Dichtungen	EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)
Ventilfunktion	Normal geschlossen (N.C.)
Betriebstemperatur	-10 bis +70 C
Analoges Signal (Soll-/Istwert)	0 bis 5 (10) V DC, oder 0 (4) bis 20 mA
Digitale Kommunikation	RS232
Anschlüsse	6mm Klemmringverschraubungen

4.4 Luftaufbereitung

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits beschrieben ist, wird das Gasgemisch aus der Gasflasche vor dem Einleiten in die Kolonne zusätzlich mit Luft in Form von Druckluft verdünnt. Hierfür kommt die Druckluft der Technikumshalle zum Einsatz, welche einen Betriebsdruck von circa 6 bar aufweist. Aus Gründen des Korrosionsschutzes und der Schmierung von Druckluftwerkzeugen ist Druckluft mit Öl in Form von feinstem Nebel versehen. Diese ölversetzte Luft ist für die Absorption ungeeignet, da das Öl im Inneren der Kolonne die Glasoberflächen benetzen und damit die Filmbildung massiv stören würde. Eine Aufbereitung der Druckluft zur Ölabscheidung ist daher erforderlich.

Die Umsetzung erfolgt mit einer Kombination aus einem Filterregelventil, gefolgt von Fein- und Feinstfilter und zuletzt durch einen Aktivkohlefilter der Firma *Festo* (siehe Abbildung 29). Die Dimensionen, Betriebsparameter und Eigenschaften sind in der Tabelle 10 gelistet:

Tabelle 10: Gewählte Komponenten für die Luftaufbereitung aus der Serie MS6 der Firma Festo

	Filterregelventil	Feinfilter	Feinstfilter	Aktivkohlefilter
Bezeichnung	LFR	LFM-B	LFM-A	LFX
Regelbereich	0,3 bis 7 bar	-	-	-
Filtergröße	5 µm	1 µm	0,01 µm	k.A.
Kondensat	Ablass jeweils manuell			
Anschluss	Jeweils G 1/2			



Abbildung 29: Vierstufige Luftaufbereitungseinheit – Kombination aus Filterregelventil, Fein-, Feinst- und Aktivkohlefilter (von links nach rechts)

4.5 Abgasführung

Die Abgasführung beschreibt auf der Seite der Gasphase jenen Anlagenteil, bei dem das gereinigte Gas den Kopf der Fallfilmkolonne verlässt und zur Absaugung der Laboreinhausung geführt wird. Da sich das SO_2 aufgrund seiner höheren Dichte als Luft am Boden sammelt, wird der untere Schacht der Laboreinhausung zur Absaugung verwendet. Die Distanz zwischen dem Auslass am Kopf der Kolonne und dem unteren Absaugschacht beträgt in etwa 8 m und soll durch einen polyamidfaserarmierten PVC-Schlauch geschlossen werden.

Bei der Abgasführung ist es erforderlich sicherstellen zu können, dass der Gasstrom die Kolonne von unten nach oben durchströmt, diese am Kopf verlässt und über den vorgesehenen Schlauch schlussendlich zum Absaugschacht gelangt. Diese Sicherstellung erfolgt durch eine Überprüfung des Gegendrucks, der bei PVC-Schlauchleitung zweier unterschiedlicher Dimensionen (Innendurchmesser 13 mm und 25 mm) wirkt. Für diese Betrachtung wird vom Extremfall, also vom größtmöglichen Gasdurchsatz ausgegangen:

$$\dot{G}_{max} = 17 \frac{m^3}{h} = 0,004722 \frac{m^3}{s} \quad \text{Formel 4.33}$$

$$d_{1,i} = 13mm \quad d_{2,i} = 25mm \quad \text{Formel 4.34}$$

$$A_1 = 1,33 * 10^{-4} m^2 \quad A_2 = 4,91 * 10^{-4} m^2 \quad \text{Formel 4.35}$$

$$\text{Mit } u_i = \frac{\dot{G}_{max}}{A_i} \quad u_{1,max} = 35,58 \frac{m}{s} \quad u_{2,max} = 9,62 \frac{m}{s} \quad \text{Formel 4.36}$$

$$Re = \frac{u * d}{\nu} \quad \text{Formel 4.37}$$

Aus dem Abschnitt Stoffdaten wird der Wert für die kinematische Viskosität für Luft entnommen (Der SO_2 -Anteil wird vernachlässigt):

$$\nu = 15,8 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} \quad \text{Formel 4.38}$$

$$Re_{1,max} = 2,927 * 10^{-4} \quad Re_{2,max} = 1,522 * 10^{-4} \quad \text{Formel 4.39}$$

Mit Wandrauigkeit k [mm] für Werkstoff Glas, Kunststoff aus [29] folgt:

$$k = 0,001 mm \quad \text{Formel 4.40}$$

$$\left(\frac{d}{k}\right)_1 = 1,3 * 10^4 \quad \left(\frac{d}{k}\right)_2 = 2,5 * 10^4 \quad \text{Formel 4.41}$$

Die Rohrreibungszahl λ_i wird anhand der Reynoldszahl und dem Verhältnis $\frac{d}{k}$ aus dem Moody-Diagramm bzw. dem Diagramm von Colebrook-Nikuradse herausgelesen:

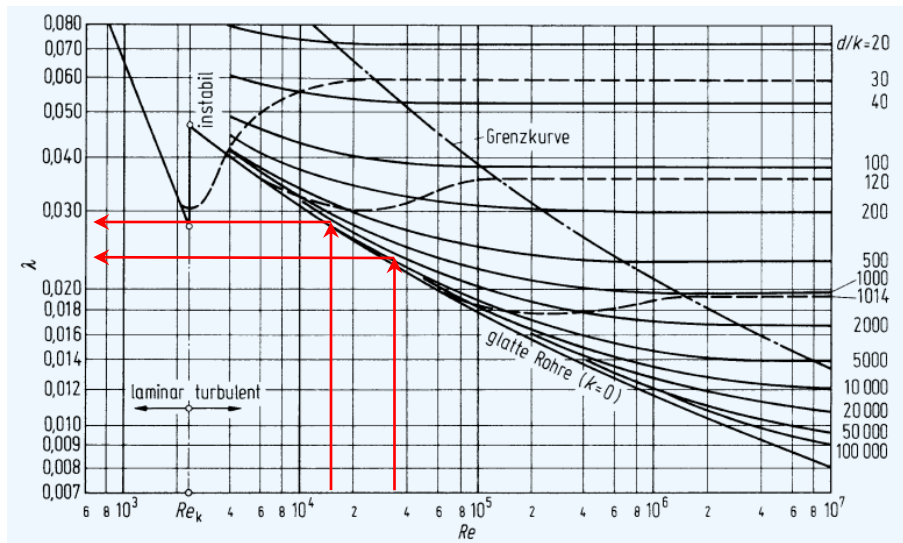


Abbildung 30: Rohrreibungszahl λ nach Colebrook und (gestrichelt) nach Nikuradse [29]

$$\lambda_1 \cong 0,024$$

$$\lambda_2 \cong 0,029$$

Formel 4.42

Die Berechnung des Druckverlustes erfolgt schließlich nach Formel 4.43:

$$\Delta p_i = \rho * \frac{u_i^2}{2} * \lambda_i * \frac{L}{d_i}$$

Formel 4.43

$$\Delta p_1 = 12151 \text{ Pa}$$

$$= 0,1215 \text{ bar}$$

$$\Delta p_2 = 558,23 \text{ Pa}$$

$$= 0,00558 \text{ bar}$$

Formel 4.44

Anhand dieses Vergleichs zeigt sich sehr deutlich der signifikante Unterschied der Reibungsverluste innerhalb einer Rohrleitung aufgrund des verfügbaren Strömungsquerschnittes. Aufgrund des relativ hohen Druckverlustes beim ersten Schlauch (13 mm Innendurchmesser) von rund 120 mbar scheidet dieser für die Abgasleitung aus. Die Folge des hohen Druckverlustes wäre, dass der Gasstrom in der Kolonne den Weg des geringsten Widerstands durchströmen würde. Das bedeutet, der Gasstrom würde vom Kolonneneinlass direkt nach unten, über die Rückflussleitung der Flüssigphase verlaufen, da dort lediglich der hydrostatische Druck der Flüssigphase zu überwinden gilt. Der hydrostatische Druck errechnet sich wie folgt:

$$\Delta p_L = \rho * g * h = 998 * 9,81 * 0,5 \cong 50 \text{ mbar}$$

Formel 4.45

Schließlich wird die Schlauchleitung mit 25 mm Innendurchmesser wegen des geringeren Druckverlustes von rund 5,6 mbar gewählt.

4.6 Messgasförderung

An der Fallfilmkolonne werden drei Entnahmestellen vorgesehen, an denen im Betrieb jeweils die SO_2 -Konzentration gemessen werden kann. Die erste Entnahmestelle befindet sich beim Gas-Eintritt, also am Boden der Kolonne, an der die tatsächliche Rohgaskonzentration gemessen wird. In der Kolonnenmitte befindet sich der zweite Entnahmepunkt, der zum Erfassen eines Absorptionsfortschrittes innerhalb der Kolonne bestimmt ist.

Zur Bestimmung der Reingaskonzentration am Ende des Absorptionsvorganges erfolgt die dritte Entnahme am Austritt, also am Kolonnenkopf.

Für die Analyse der drei entnommenen Gase steht ein Messgerät, *ABB AO2020* (detaillierte Beschreibung der Messgeräte folgt im Kapitel 5.4), mit einem Kanal zu Verfügung. Aus diesem Grund kann eine parallele und gleichzeitige Analyse nicht erfolgen. Stattdessen muss jedes entnommene Gas sequentiell analysiert werden. Es bedarf daher einer „Messgasweiche“, welche es ermöglicht, getrennt Gas an den drei Entnahmestellen entnehmen zu bekommen. Um dem Gasanalysegerät schließlich das zu analysierende Gas, über die Weiche auch kontinuierlich dosiert zuführen zu können, wird zusätzlich noch eine sogenannte Messgasfördereinheit benötigt. Neben der kontinuierlichen Förderung ist die Kühlung des Analysegesetzes die zweite wesentliche Anforderung. Die Kühlung wird in der Messgas-Aufbereitungskette eingesetzt, um feuchtes Messgas soweit abzukühlen, dass es in keinem der folgenden Analysegeräte zu einem Unterschreiten des Taupunkts und damit zu einer Kondensatbildung kommt. Da der Hauptbestandteil des an der Absorptionsanlage eingesetzten Gases Luft ist und diese grundlegend Feuchtigkeit aufweist, ist die Messgaskühlung unerlässlich.

4.6.1 Messgasfördereinheit

Wie schon beim Massendurchflussregler, liefert auch hier die Messgeräte-Bestückung der Absorptionsanlage aus dem Jahr 1995 die Ausgangsbasis für die Recherche einer geeigneten Messgasfördereinheit. Bei der damaligen Anlage kam der Messgaskühler *CGEK 5-Ex* des Herstellers *Mannesmann Hartmann&Braun* zum Einsatz. Mit Hilfe der technischen Daten des Geräts, welche einem alten Listenblatt entnommen werden konnten, stehen eine Auswahl an Anhaltspunkten für die erforderlichen Leistungsdaten zu Verfügung.

Bei der Recherche fällt der Hersteller *Mannesmann Hartmann&Braun* außer Betracht, da das Unternehmen in der Zwischenzeit vom Konzern *ABB* übernommen wurde. Da das Gasanalysegerät *AO2020* bereits von *ABB* stammt, wird auch die Messgasfördereinheit bei *ABB* angefragt. Schließlich wird die *Messgasfördereinheit SCC-S* angeschafft, deren wichtigsten Kenndaten in Tabelle 11 enthalten sind.

Tabelle 11: Technische Daten der angeschafften Messgasfördereinheit SCC-S von ABB

Hersteller	<i>ABB Automation GmbH</i>
Geräteart	Kombination aus Messgaskühler und Messgasfördereinheit
Type	SCC-S
Messgasdruck	0,7 bis 1,05 bar absolut
Messgasdurchfluss	7 bis 70 L / h
Kühlaggregat	Peltier-Kühler
Messgaseintrittstemperatur	+10 bis +50°C
Messgasaustrittstemperatur	+3°C (Standardeinstellung)
Vorlaufzeit	ca. 10 Min.
Kondensataustrag	ca. 300 mL / h

4.6.2 Messgasweiche

Die Messgasweiche wird aus einem 2-Wege und zwei 3-Wege-Hahn, aus dem Sortiment *Bauteile mit GL-Gewinden*, der Firma *Bola* zusammengesetzt. Diese Komponenten werden händisch betätigt und sind aus PTFE gefertigt, wodurch sie universell chemisch beständig sind. Zusätzlich können sie bis zu einem Druck von 6 bar und in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 110 °C eingesetzt werden.

Die Hähne haben ein GL 25-Anschlussgewinde und sind sowohl für 6 mm, als auch für 8 mm Schläuche geeignet. Die Wege zwischen den Entnahmestellen, der Messgasweiche und der Analyse werden mittels PTFE-

Schlauchleitungen verbunden. Gleich wie die Gasleitungen aus Edelstahl, werden die PTFE-Schlauchleitungen mit Durchmesser 6 mm verwendet.

Zur leichteren Bedienbarkeit werden die drei Hähne an eine Blechtafel montiert und entsprechend gekennzeichnet und beschriftet (siehe Abbildung 31). Im Zuge dessen bedarf es der Konstruktion einer solchen Blechtafel, welche sich optimaler Weise unmittelbar beim Gasanalysator befinden sollte. Nach Vermessung der geometrischen Gegebenheiten wird eine Konstruktionszeichnung erstellt, welche in Abbildung 32 dargestellt ist. Das 2 mm dicke Aluminiumblech wird schließlich so ausgeführt, dass es unterhalb des Gasanalysegeräts und der Gasfördereinheit den übrigen Platz am Instrumentenrack einnimmt.

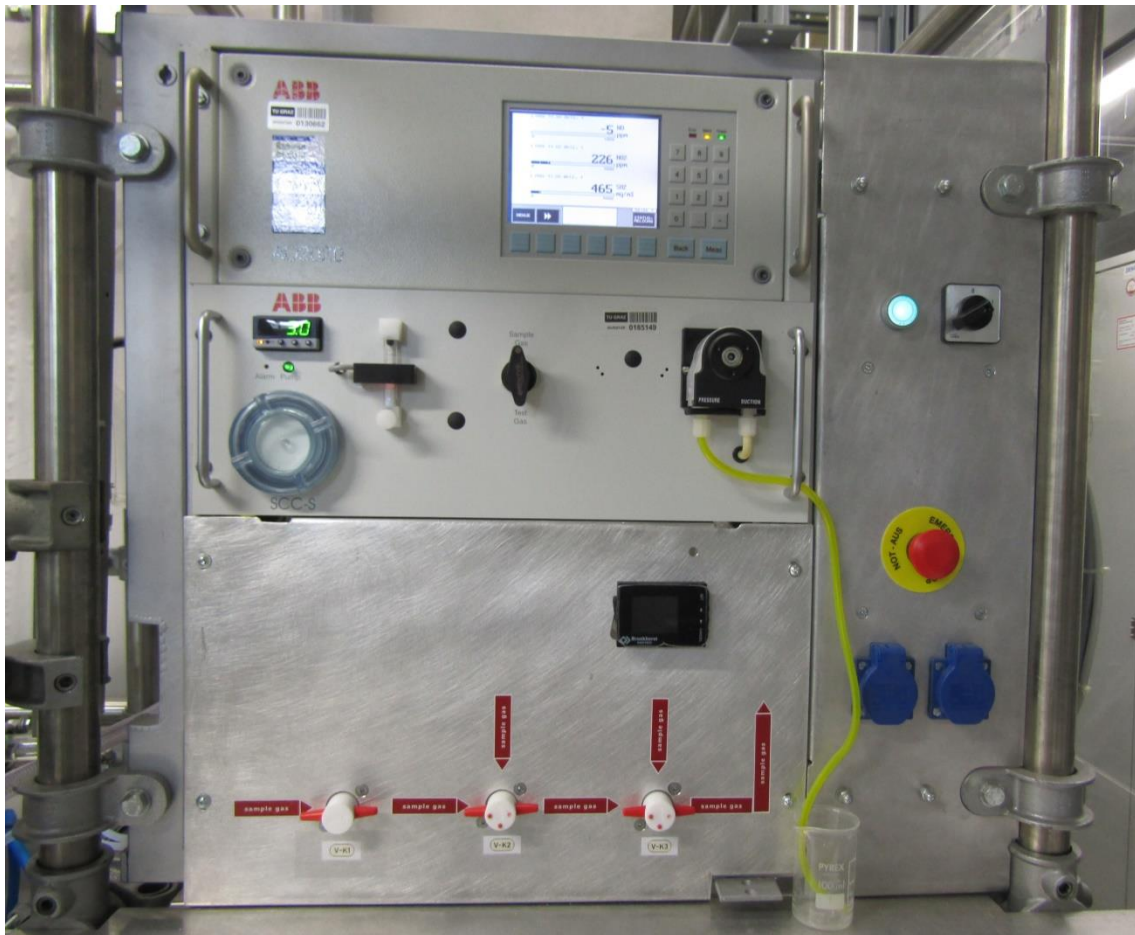


Abbildung 31: Instrumentenrack mit dem Gasanalysegerät (oben), der Messgasfördereinheit (mittig) und der montierten Ventiltafel inklusive Beschriftung (unten). Rechts vom Instrumentenrack befindet sich das Anlagensteuerungspanel.

Auslegung

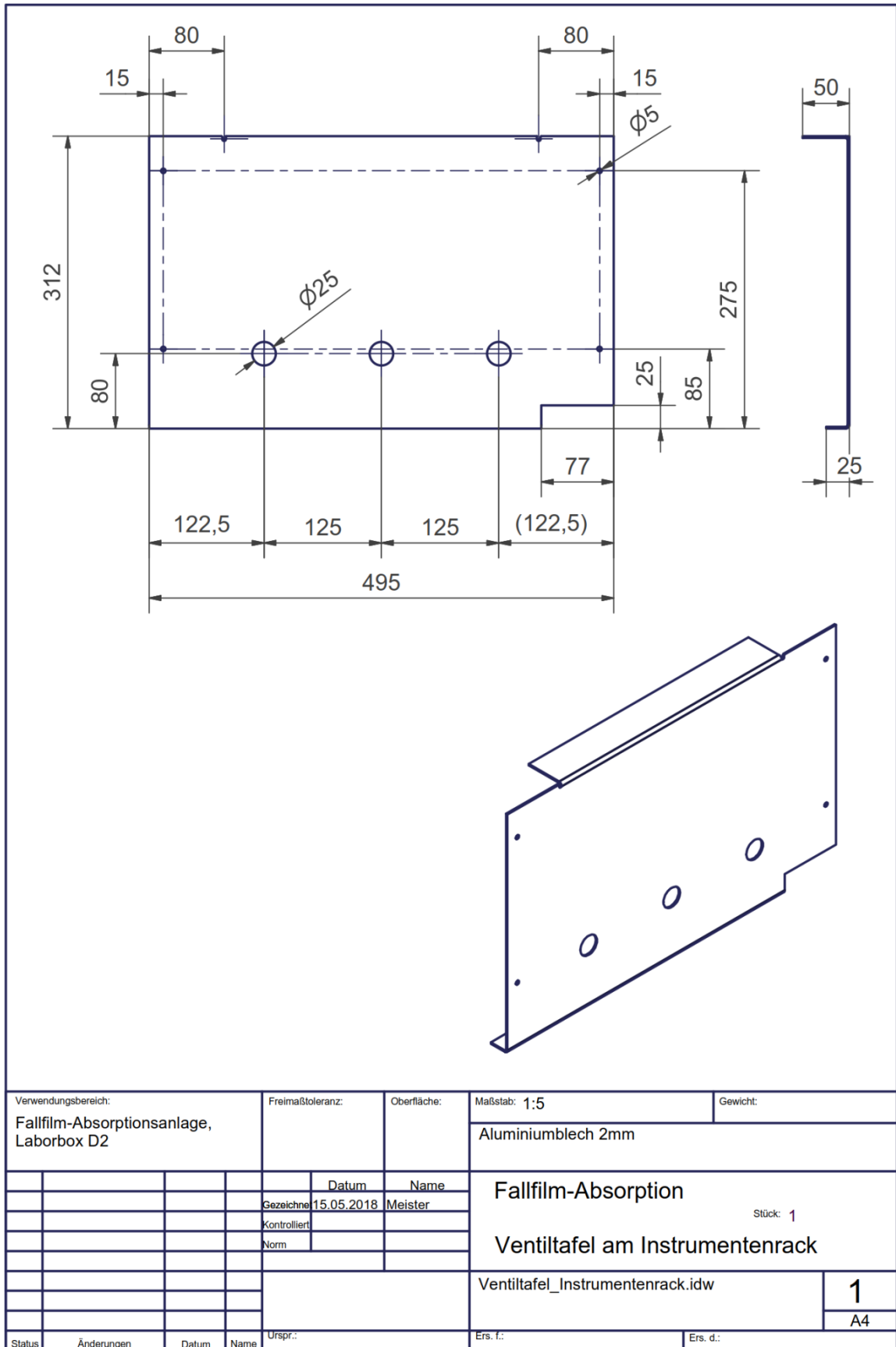


Abbildung 32: Fertigungszeichnung der Ventiltafel zur Montage der Hähne für die Messgasweiche, aus Aluminiumblech mit 2 mm Blechdicke

5 Aufbau der Fallfilm-Absorptionsanlage

Der Aufbau der Fallfilm-Absorptionsanlage erfolgt in der Laborbox D2 der Technikumshalle im Anschluss an die kontinuierliche Rektifikationsanlage. Kernstück der Absorptionsanlage ist die Fallfilmkolonne, welche im folgenden Abschnitt 5.1 genauer erläutert wird. Um die Fallfilmkolonne herum, besteht die Anlage aus funktioneller Sicht aus zwei Teilen – die Seite der Flüssig- (entspricht dem Absorbens) und die Seite der Gasphase (enthält das Absorptiv SO_2). Der Aufbau und die Verknüpfung dieser drei Hauptkomponenten können anhand des Gesamtanlagenschemas in Abbildung 33 nachvollzogen werden. Die Flüssigphasenseite, bzw. die Gasphasenseite werden in weiterer Folge getrennt voneinander betrachtet und in Kapitel 5.2 bzw. 5.3 noch ausführlich beschrieben.

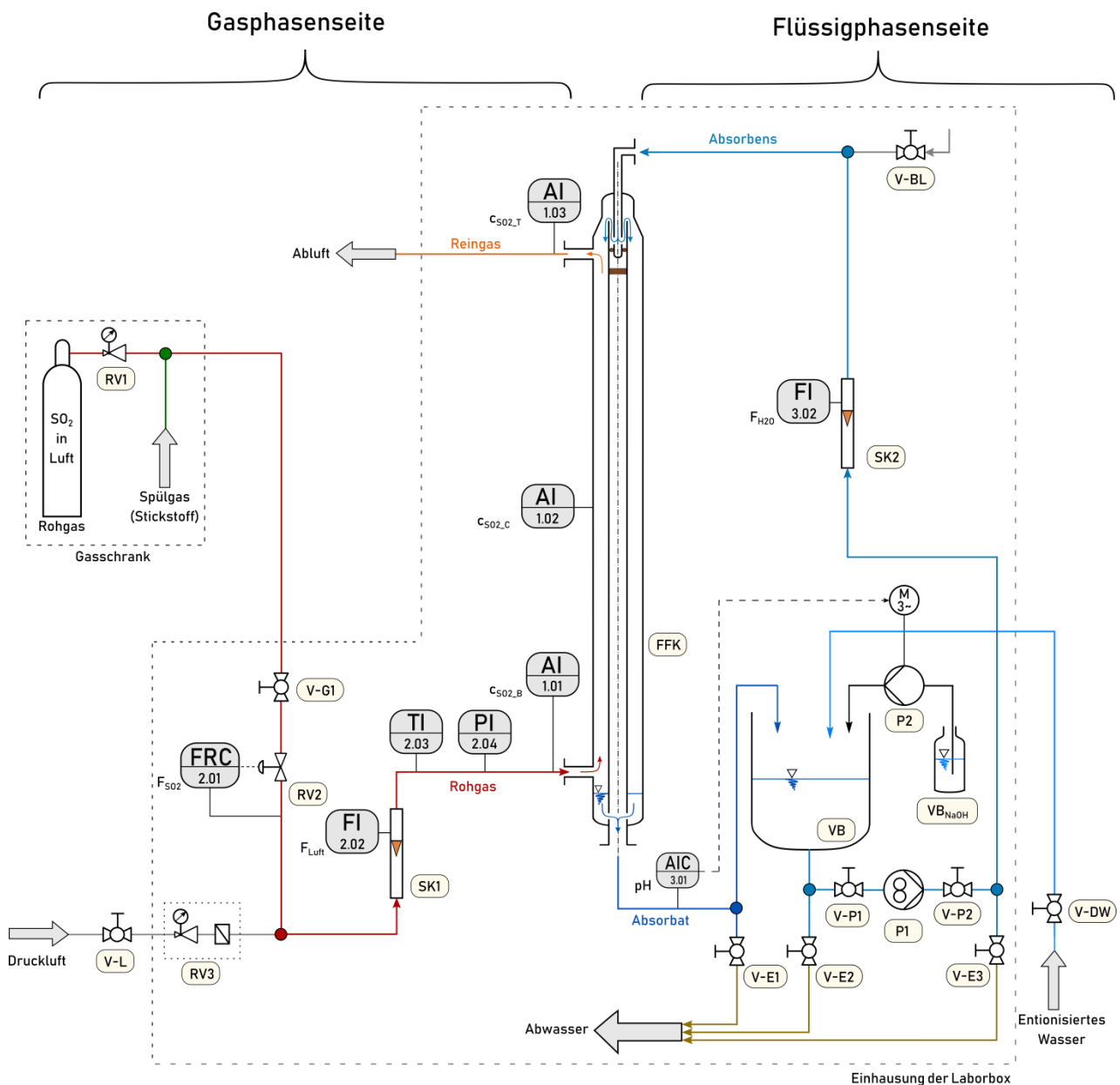


Abbildung 33: Anlagenschema der Fallfilm-Absorptionsanlage



Abbildung 34: Fallfilm-Absorptionsanlage (Ansicht von vorne)

5.1 Fallfilmkolonne

Die Fallfilmabsorptionskolonne setzt sich, wie Abbildung 35 zeigt, im Wesentlichen aus drei konzentrisch angeordneten Glasrohren zusammen – Einleitstutzen (DN 15), Innenrohr (DN 25) und Außenrohr (DN 50).

Das innen verlaufende Rohr der Kolonne wird aus dem Innenrohr und dem Einleitstutzen gebildet. Dazu wird dem Stutzen an der geschlossenen Seite ein O-Ring aufgezogen. Unmittelbar vor diesem Ende befinden sich an der Mantelfläche ringsum Bohrungen für den Flüssigkeitsaustritt (siehe Abbildung 38). Anschließend wird der Stutzen samt O-Ring in das Innenrohr geschoben, wie in Abbildung 36 schematisch dargestellt, bzw. in Abbildung 38 ersichtlich ist. Damit die konzentrische Lage des Einleitstutzens im Inneren des Innenrohrs dauerhaft beibehalten werden kann, wird ein O-Ring benötigt, der den Freiraum zwischen Außendurchmesser des Einleitstutzens und Innendurchmessers des Innenrohrs möglichst vollständig ausfüllt.

Zuvor wird noch eine widerstandsfähige Gummidichtscheibe in das Innenrohr, etwa 3 bis 5 cm unterhalb jener Stelle, wo der Einleitstutzen endet, hineingeschoben. Anhand der Detailansicht der Abbildung 37 kann dies sehr gut nachvollzogen werden. Diese Dichtscheibe verhindert im Betrieb, dass das über den Einleitstutzen eingeleitete Absorbens über die Innenseite des Innenrohrs herabfließen kann. Durch die Dichtscheibe und den O-Ring kommt es schließlich zu dem gewünschten Überlauf des Waschmittels an der Oberkante des Innenrohrs (siehe blaue Pfeile in Abbildung 36, bzw. Detailansicht in Abbildung 37). Infolge des Überlaufs strömt das Absorbens als Fallfilm an der Außenseite des Innenrohrs herab.

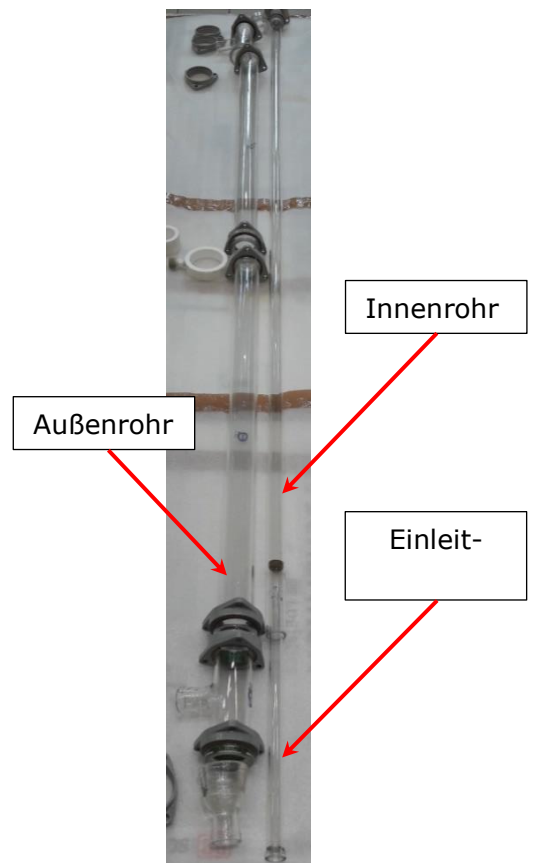


Abbildung 35: Wesentliche Einzelteile der Fallfilmkolonne: Einleitstutzen, Innenrohr und Außenrohr

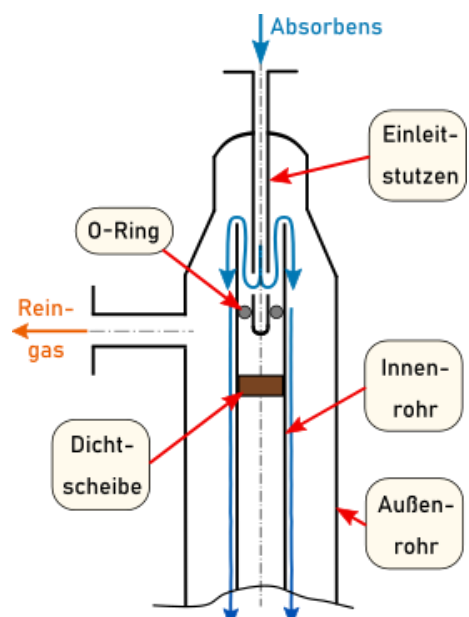


Abbildung 36: Schematische Aufbaudarstellung des Kopfes der Fallfilmkolonne

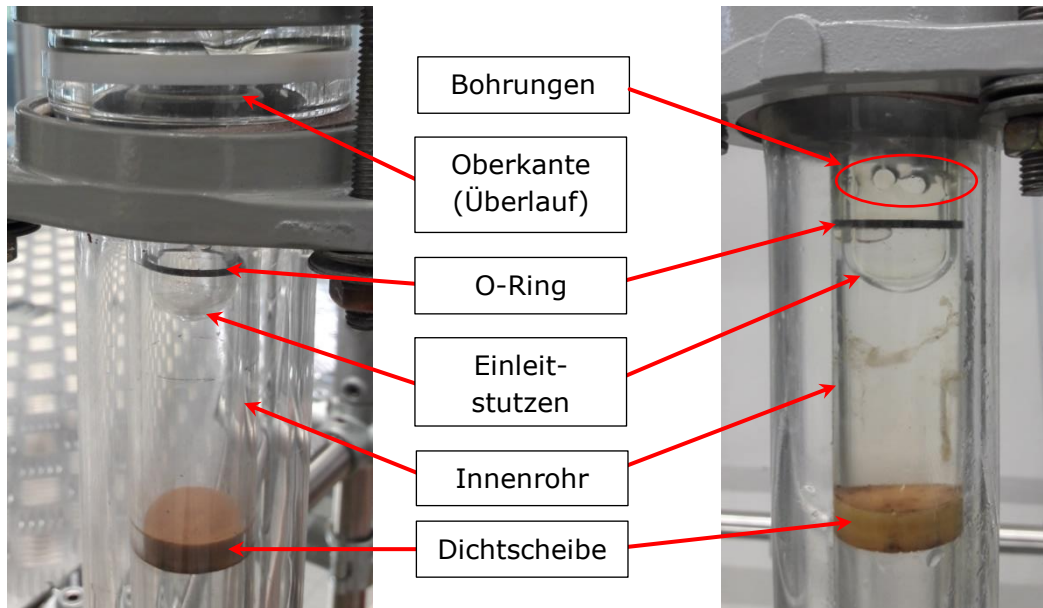


Abbildung 37: Detailansicht der Anordnung des Innenrohrs und des Einleitstutzens mit O-Ring und Dichtscheibe

Abbildung 38: Detailansicht der geschlossenen Seite des Einleitstutzens mit den Bohrungen an der Mantelfläche

Wie bereits in der Abbildung 35 ersichtlich ist, setzt sich das Außenrohr im Gegensatz zum Einleitstutzen und dem Innenrohr aus mehreren Glasrohrkomponenten zusammen. Diese sind im Wesentlichen zwei gerade Glaselemente (DN 50), zwei T-Stücke (DN 50 mit DN 25-Abzweigung) und zwei Reduzierungen (DN 25 auf DN 50). Zwischen den beiden geraden Rohrstücken befindet sich noch ein PTFE-Ring mit einem Anschlussstutzen mit einer GL25 - Verschraubung. Dieser Anschluss wird später für die Konzentrationsmessung an der Kolonnenmitte dienen.

5.1.1 Geometrie der Kolonne

Die für die Auswertung der Messdaten erforderlichen geometrischen Daten der Fallfilmkolonne können der Tabelle 12 entnommen werden. Die einzelnen Abmessungen werden anhand der Abbildung 39 deutlich.

Tabelle 12: Relevante Abmessungen der Fallfilmkolonne

Höhe zwischen Gasein- und auslass	h_{GI0}	2,24 [m]
Höhe zwischen Gaseinlass und Überlauf an der Oberkante des Innenrohrs (entspricht der aktiven Höhe der Kolonne)	h_{K100}	2,12 [m]
Höhe zwischen Gaseinlass und Messgasentnahme in der Kolonnenmitte	h_{K50}	1,02 [m]
Außendurchmesser des Innenrohrs	$d_{IR,a}$	33 [mm]
Innendurchmesser des Außenrohrs	$d_{AR,i}$	52 [mm]

Bei der Ermittlung des Ringspaltes zwischen dem Außen- und Innenrohr, ist es erforderlich die Filmdicke des herabströmenden Fallfilms a_F (vgl. Formel 5.1 nach [12]) zu berücksichtigen.

$$a_F = \sqrt[3]{\frac{3 * v * \dot{L}}{g * b}} \quad \text{Formel 5.1}$$

v $\left[\frac{m^2}{s}\right]$... Kinematische Viskosität

\dot{L} $\left[\frac{m^3}{s}\right]$... Volumenstrom der Flüssigphase

g $\left[\frac{m}{s^2}\right]$... Erdbeschleunigung

b $[m]$... Umfang der benetzten Fläche

Mit Hilfe der Filmdicke kann die Oberfläche des Fallfilms ermittelt werden, welche schließlich für den Stoffaustausch zu Verfügung steht:

$$S_{FF} = (d_i + 2 * a_F) * \pi * h_{K100} \quad \text{Formel 5.2}$$

Aus dem effektiven Ringspalt können wiederum der freie Kolonnenquerschnitt S_{Kg} (vgl. Formel 5.3) und weiterführend das freie Kolonnenvolumen V_{Kg} (vgl. Formel 5.4) berechnet werden.

$$S_{Kg} = \frac{\pi}{4} * [d_a^2 - (d_i + 2 * a_F)^2] \quad \text{Formel 5.3}$$

$$V_{Kg} = S_{Kg} * h_{K100} \quad \text{Formel 5.4}$$

Das Verhältnis der Filmoberfläche in Bezug auf das freie Kolonnenvolumen liefert schließlich die spezifische Stoffaustauschfläche pro Kubikmeter (siehe Formel 5.5). Dieses Verhältnis entspricht daher der spezifischen Stoffaustauschfläche a aus Formel 2.69. Wird die Filmoberfläche hingegen auf die aktive Höhe bezogen, erhält man die spezifische Stoffaustauschfläche pro Meter Kolonnenhöhe nach Formel 5.6.

$$a_{SV} = \frac{S_{FF}}{V_{Kg}} \equiv a = \frac{S}{V_r} \quad \left[\frac{m^2}{m^3}\right] \quad \text{Formel 5.5}$$

$$a_{SH} = \frac{S_{FF}}{h_{K100}} \quad \left[\frac{m^2}{m}\right] \quad \text{Formel 5.6}$$

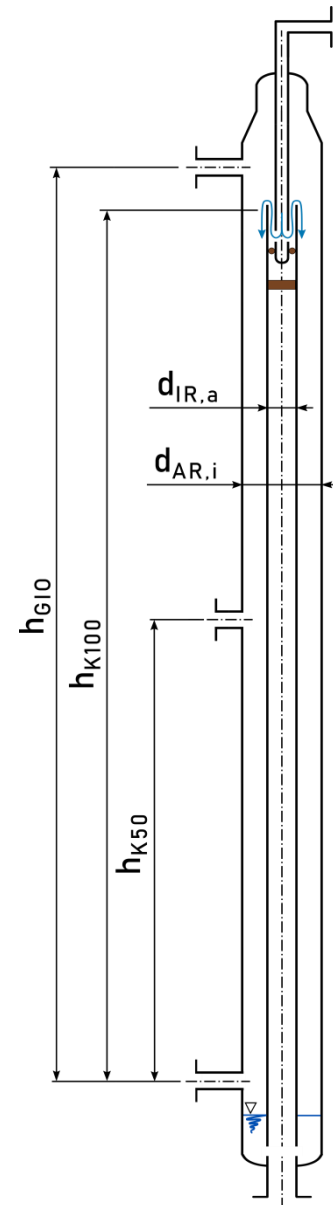


Abbildung 39: Relevante Abmessungen der Fallfilmkolonne

5.2 Flüssigphasenseite

Herzstück der Flüssigphasenseite stellt der 10 L große Vorlagebehälter (*VB*) dar. Der Behälter ist zylindrisch, hat einen Durchmesser von DN 250 mm, ist nach oben offen, ausgeführt mit halbkugelförmigem Boden und zentrischem Auslassstutzen (DN 25 mm) an der Unterseite. Die offene Seite hat einen glatten Glasschliff, welche mit einem eigens angefertigten Blindflansch aus Kunststoff verschlossen wird. Im Blindflansch befinden sich für die diversen Zuleitungen insgesamt drei Bohrungen.

Über den Hahn (*V-DW*) der Laboreinhausungsversorgung wird entionisiertes Wasser in den Vorlagebehälter geleitet, wie Abbildung 40 veranschaulicht. Das entionisierte Wasser stellt den Hauptbestandteil des Absorbens dar. Die Natronlauge wird mit einer Schlauchquetschpumpe (*P2*) aus dem Vorlagegefäß (*VB_{NaOH}*) heraus, durch einen dünnen PVC-Schlauch hindurch in den Vorlagebehälter (*VB*) dosiert. An der Pumpe selbst wird eine Durchflussmenge fix eingestellt und so belassen. Die Stromversorgung von *P2* erfolgt über den pH-Regler (*AIC 3.01*). In Abhängigkeit des gemessenen pH-Wertes wird die Stromversorgung für die Schlauchquetschpumpe zu- oder abgeschaltet. Zu beachten gilt dabei der Ort der pH-Wertmessung: Der pH-Wert wird am Rücklauf der Fallfilmkolonne gemessen und nicht im Vorlagebehälter. Aufgrunddessen ist es wichtig, dass die Zudosierung der Natronlauge nur bei zirkulierendem Wasser erfolgt!

Der Auslass des Vorlagebehälters führt zur tiefer gelegenen (Zahnrad-) Pumpe *P1*, welche die Flüssigkeit zum Kopf der Fallfilmkolonne fördert. Vor und nach der Pumpe ist jeweils eine Absperrarmatur (*V-P1* und *V-P2*) installiert. Da die Zahnradpumpe selbst nur eine prozentuelle Fördermenge anzeigt, kann der Durchfluss mittels Schwebekörperdurchflussmesser *SK2* in Liter pro Stunde abgelesen werden. Danach, auf Kolonnenkopfhöhe angelangt, erfolgt die Einleitung in die Kolonne über das Einleitrohr. Zur Leitungsbelüftung ist an der höchsten Stelle der Zuleitung zusätzlich das Ventil *V-BL* eingebaut.

Wie im vorigen Abschnitt bereits beschrieben ist, gelangt die Flüssigkeit über seitliche Bohrungen im Einleitrohr ins Innenrohr, welches nach unten verschlossen ist. Somit wird sie nach oben und damit über die Oberkante des Innenrohrs zum Überlauf gezwungen. Infolge des Überlaufs bildet sich ein gleichmäßiger Ringfilm aus, der infolge der Schwerkraft nach unten rieselt. Vom Überlauf abwärts bis zur Abzweigung des unteren T-Stücks im

Außenrohr (dort findet der Gaszulauf statt) steht der Fallfilm mit dem entgegengesetzt strömenden Gas in Kontakt.

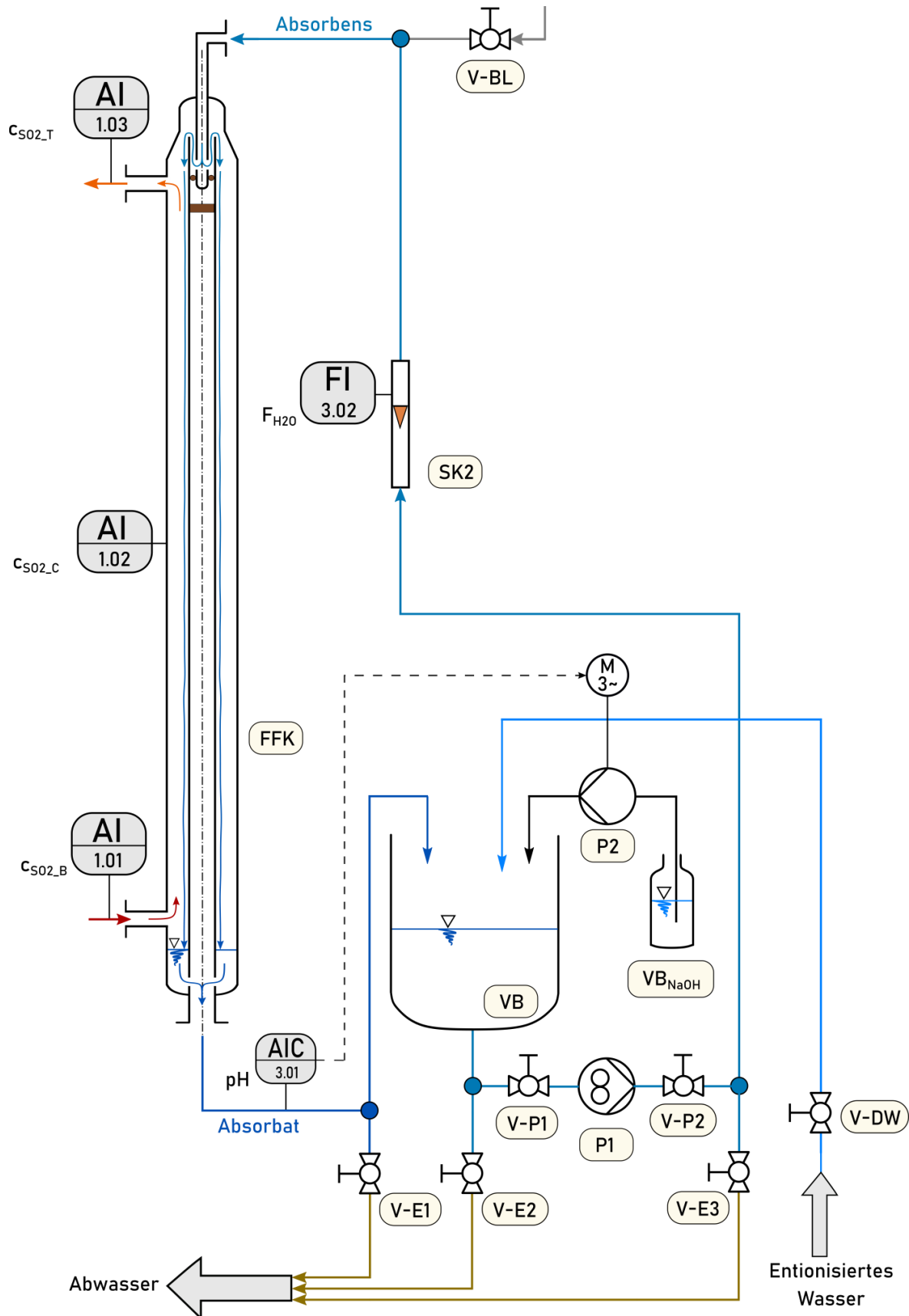


Abbildung 40: Anlagenschema der Flüssigphasenseite

Am Kolonnenboden im Abschnitt unterhalb des Gaszulaufs sammelt sich die herabgerieselte Flüssigkeit. Das Innenrohr hat in diesem Bereich Bohrungen (ähnlich wie beim Einleitrohr am Kopf), über diese die gesammelte Flüssigkeit, wie über einen Abfluss, nach unten aus der Kolonne herausfließen kann. Über eine entsprechende Rückflussleitung erfolgt die Rückführung in den Vorlagebehälter. Wie anfangs erwähnt befindet sich die Messstelle der pH-Wert Messung in dieser Rückflussleitung. Die pH-Elektrode wird hierfür über einen entsprechend großen Glasanschlusstutzen, mit einer GL 25-Verschraubung in den Rückflusstrom eingebracht. Anhand der Abbildung 41 kann man dies sehr gut erkennen.



Abbildung 41: Messstelle der pH-Wert Messung in der Rückflussleitung

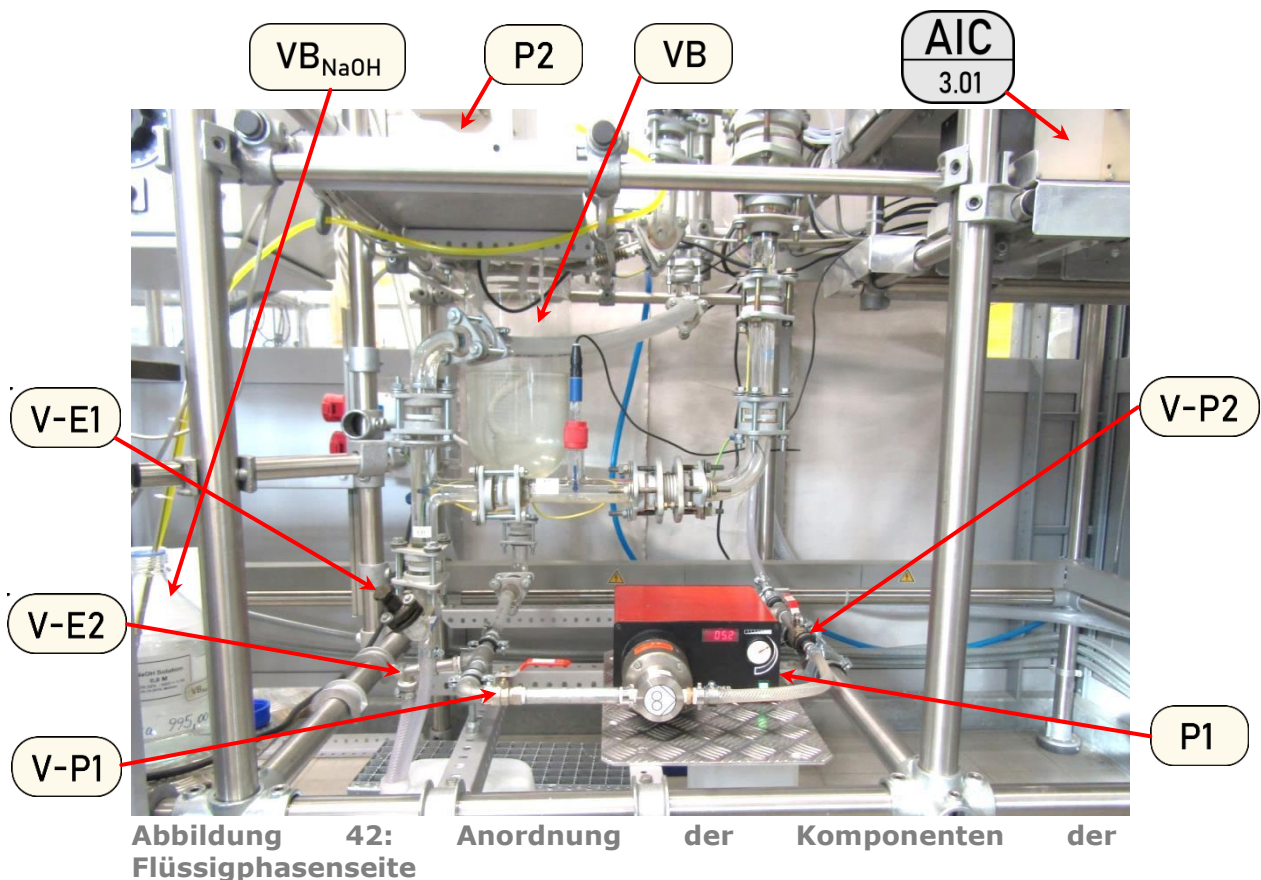


Abbildung 42: Anordnung der Komponenten der Flüssigphasenseite

Zum vollständigen Entleeren der Anlage stehen drei Auslässe zu Verfügung. Über den Hahn $V - E1$ wird die Rückflussleitung und über $V - E2$ der Vorlagebehälter einschließlich der Pumpenzuleitung bis zur Absperrarmatur $V - P1$ entleert. Der dritte Hahn $V - E3$, welcher in Abbildung 42 hinter der Zahnradpumpe ($P1$) liegt, dient zur Entleerung der Druckseite. Diese umfasst die Leitung angefangen vom Absperrhahn $V - P2$, weiter nach oben zur Zuflussleitung am Kolonnenkopf bis zum Anschluss an das Einleitrohr. Das zuvor genannte Ventil am höchsten Punkt ($V - BL$) ist zur Leitungsbelüftung für den Entleerungsfall vorgesehen.

Für die Druckseitenentleerung wird dieser eigene Abfluss über $V - E3$ benötigt, da die Zahnradpumpe nur in eine Richtung fördern kann und aufgrund ihres Aufbaus auch kein Rückfluss im stillstehenden Betrieb möglich ist. Somit kann die Entleerung der Druckseite nicht über den Auslass bei $V - E2$ erfolgen.

5.2.1 Pumpe P1

Tabelle 13: Kenndaten der Pumpe P1

Herstell□□	<i>Verder</i>
Bauart	Zahnradpumpe
Modell	2035 Manual
Saugseite	3/8 Zoll
Druckseit	3/8 Zoll
Förderrichtung	Eine (von links nach rechts)
Drehzahlregelung	Stufenlos über Drehregler wählbar
Anzeige	Förderleistung [%]



Abbildung 43: Zahnradpumpe P1

5.2.2 Pumpe P2

Tabelle 14: Kenndaten der Pumpe P1

Hersteller	<i>Ismatec</i>
Bauart	Schlauchquetschpumpe
Modell	ISM1077A
Förderrichtung	Zwei: von links oder von rechts
Pumpenkopf-Modell	<i>Easy-load Masterflex L/S, Modell 7518-00</i>
Schlauchdimension	1/8 Zoll



Abbildung 44: Schlauchquetschpumpe P2

5.3 Gasphasenseite

Der Verlauf der Gasphase innerhalb der Anlage wird durch Abbildung 45 schematisch veranschaulicht. Wie in Kapitel 4.2 bereits erwähnt, wird ein Schwefeldioxid-Luft-Gemisch repräsentativ für einen „verunreinigten“ Abgasstrom verwendet.

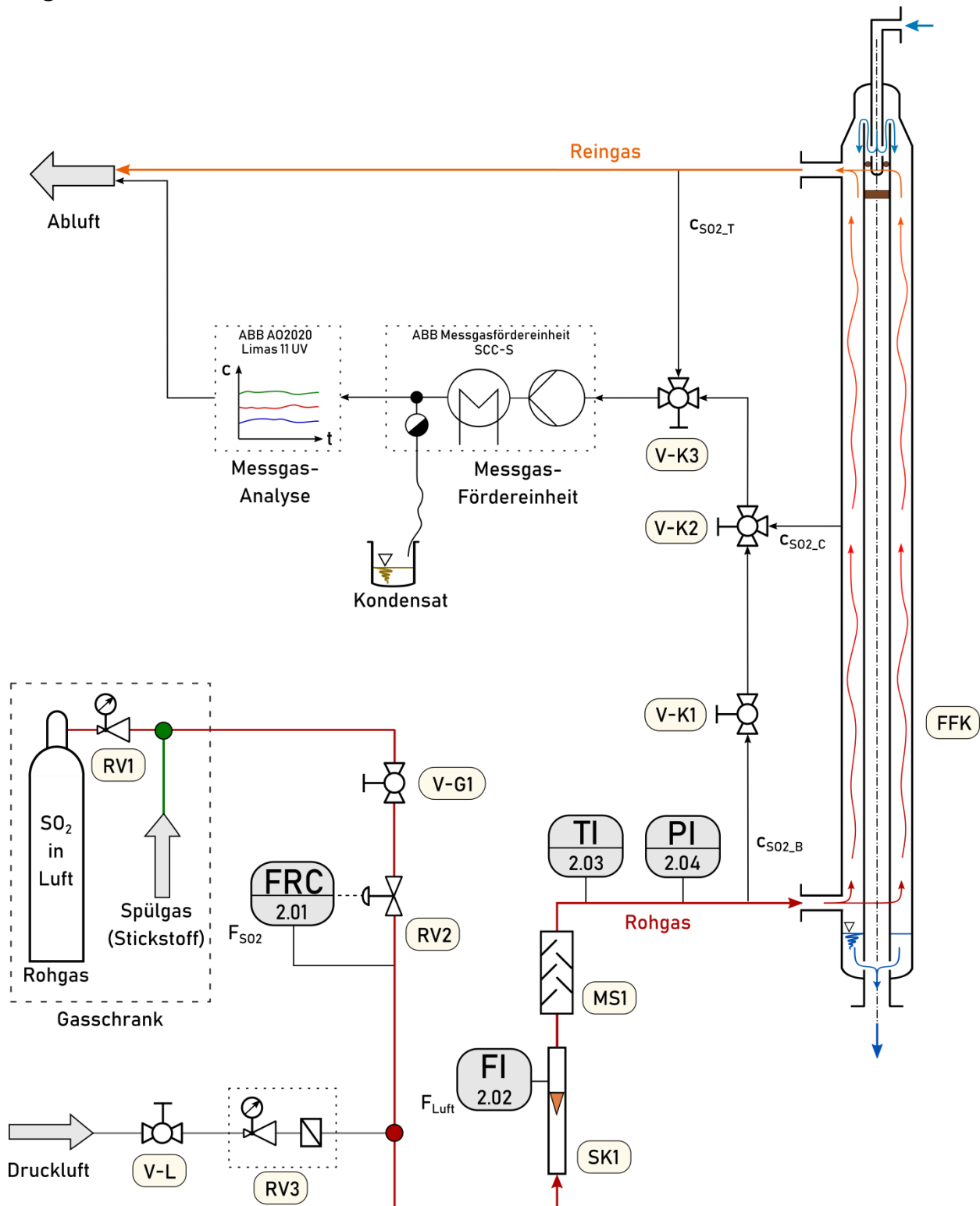


Abbildung 45: Anlagenschema der Gasphase inkl. der Messgasführung

Entsprechend der Sicherheitsvorgaben für die Lagerung von Gasen befindet sich die Flasche mit dem Gasgemisch außerhalb der Laboreinhausung in einem abgesaugten Gasschrank. Dieser Gasschrank befindet sich in unmittelbarer Nähe hinter der Laborbox. Über das Flaschenventil und dem zugehörigen Druckminderer (*RV1*) gelangt das Gas über eine Gasleitung weiter in die Laboreinhausung. Als Sicherheitsvorkehrung zum Unterbrechen des Gaszuflusses ist der Kugelhahn (*V – G1*) installiert. Nach dem Kugelhahn gelangt das Gas zum Massendurchflussregler (*RV2*).

Bevor jedoch das Gasgemisch im unteren Bereich der Fallfilmkolonne eingeleitet werden kann, kommt es noch zur variabel einstellbaren Verdünnung mittels der Druckluft. Diese Druckluft hat, wie bereits erwähnt, einen Betriebsdruck von circa 6 bar und wird der Laboreinhausungsversorgung über den Kugelhahn (*V – L*) entnommen. Für die notwendige Luftaufbereitung gelangt die Druckluft vom Kugelhahn zunächst zur mehrstufigen Filtereinheit mit Regelventil (*RV3*). Mit dem Regelventil kann der Druck und darüber in weiterer Folge der Luftdurchsatz beliebig eingestellt werden.

Nachdem die aufbereitete Druckluft dem SO_2 -Luft-Gemisch zugemischt wurde, durchströmt die Gasmischung den Schwebekörperdurchflussmesser (*SK1*). Durch das Auftriebprinzip kann über die Höhe des Schwebekörpers der Durchfluss des durchströmenden Gases abgelesen werden. Um eine möglichst homogene Vermischung zwischen dem SO_2 -Luft-Gemisch und der Druckluft zu garantieren, folgt dem Schwebekörperdurchflussmesser noch ein statischer Mischer (*MS1*). Dieser Mischer besteht aus einem 125 mm langen Rohrstück (DN°25), ist beidseitig mit PTFE-Sieben abgetrennt und mit 5 mm großen Glasraschigringen gefüllt, wie Abbildung 46 zeigt.

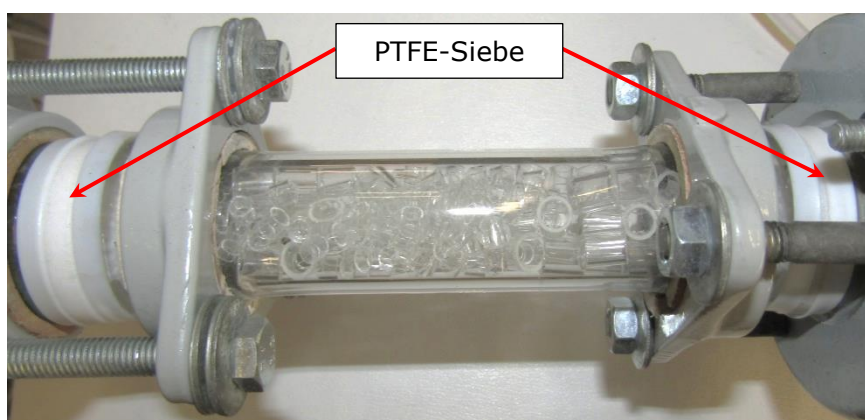


Abbildung 46: Statischer Mischer *MS1* nach dem Schwebekörperdurchflussmesser, zur homogenen Vermischung der Druckluft und des SO_2 -Luft-Gemisches



Abbildung 47: Sieb (Lochscheibe aus PTFE) für den statischen Mischer

Zwischen dem Mischer und dem Kolonneneinlass befinden sich in der Glasrohrleitung noch drei Anschlüsse.

Diese Anschlüsse sind jeweils mit GL18-Gewinde versehen und sind in Abbildung 48 links in der Bildmitte ersichtlich. Die ersten beiden Anschlüsse dienen zur Platzierung des Temperatur- und des Drucksensors. Am dritten Stutzen erfolgt die Messgasentnahme für die anschließende Bestimmung der tatsächlichen Rohgaskonzentration am Kolonneneinlass.

Aufgrund der relativ engen Platzverhältnisse und der beträchtlichen Höhe des Schwebekörperdurchflussmessers werden der stat. Mischer und die Glasrohre mit den drei Anschlussstutzen so angeordnet, dass der Rohgaszufluss in die Kolonne schleifenförmig ausfällt. Dieser schleifenförmige Verlauf des Gasflusses kann in Abbildung 48 nachvollzogen werden.

Im Anschluss tritt das Rohgas unmittelbar über die Abzweigung des unteren T-Stücks im Außenrohr der Kolonne ein. Aufgrund der Druckbedingungen (wie in Kapitel 4.5 beschrieben ist) strömt das Rohgas aufwärts dem auf der Außenseite des Innenrohrs herabfließenden Absorbensfilm entgegen.

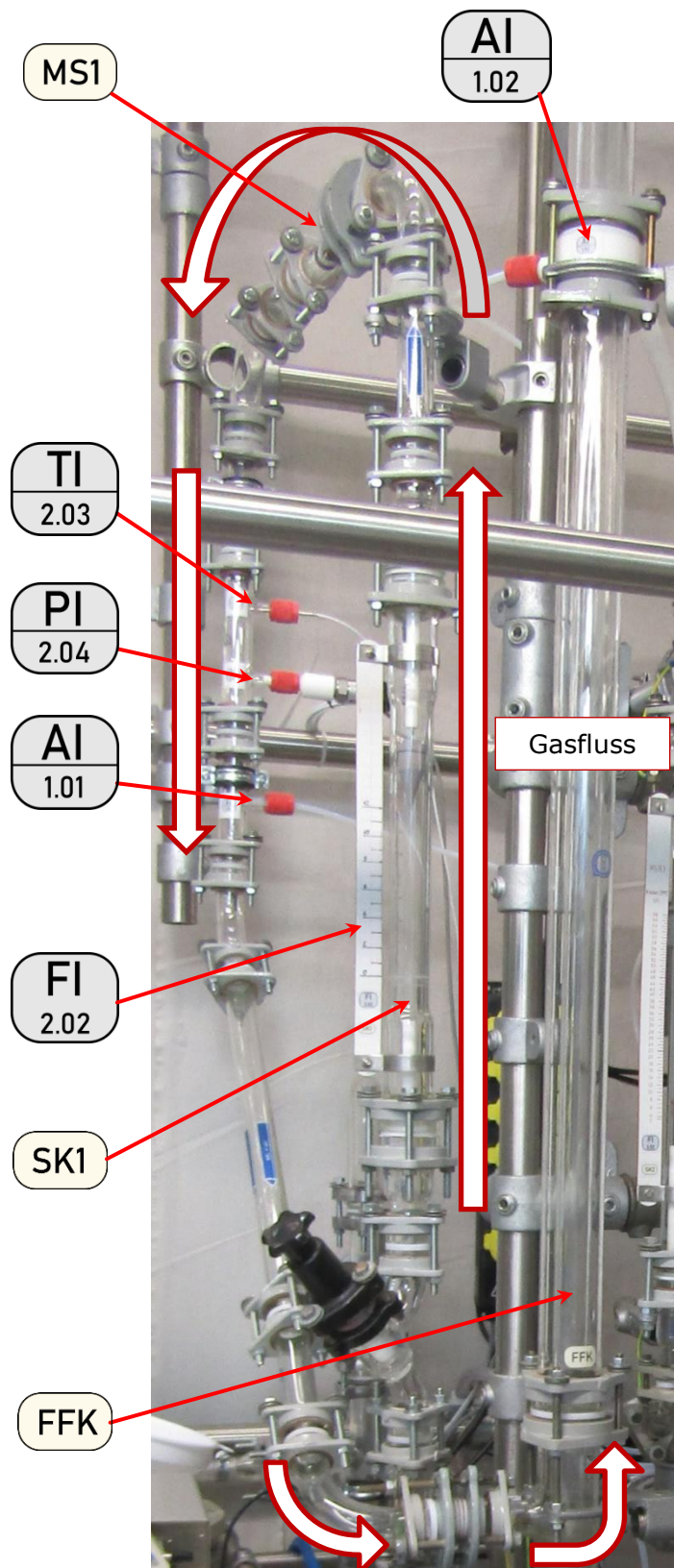


Abbildung 48: Schleifenförmiger Verlauf der Rohgaszuführung

Auf halber Kolonnenhöhe passiert das Gas die zweite Entnahmestelle (AI 1.02). Am Kopf der Fallfilmkolonne endet der Kontakt zum Fallfilm und das gereinigte Gas verlässt die Fallfilmkolonne über die Abzweigung des zweiten T-Stücks (siehe Abbildung 49). Direkt im Anschluss folgt die dritte Gasentnahmestelle (AI 1.03). Die Anschlüsse der zweiten, als auch der dritten Entnahmestelle sind ebenfalls mit GL18 Gewinde ausgeführt.

Schlussendlich wird der gereinigte Gasstrom über den Abgasschlauch zum Boden und abschließend in den unteren Absaugungsschacht geführt.

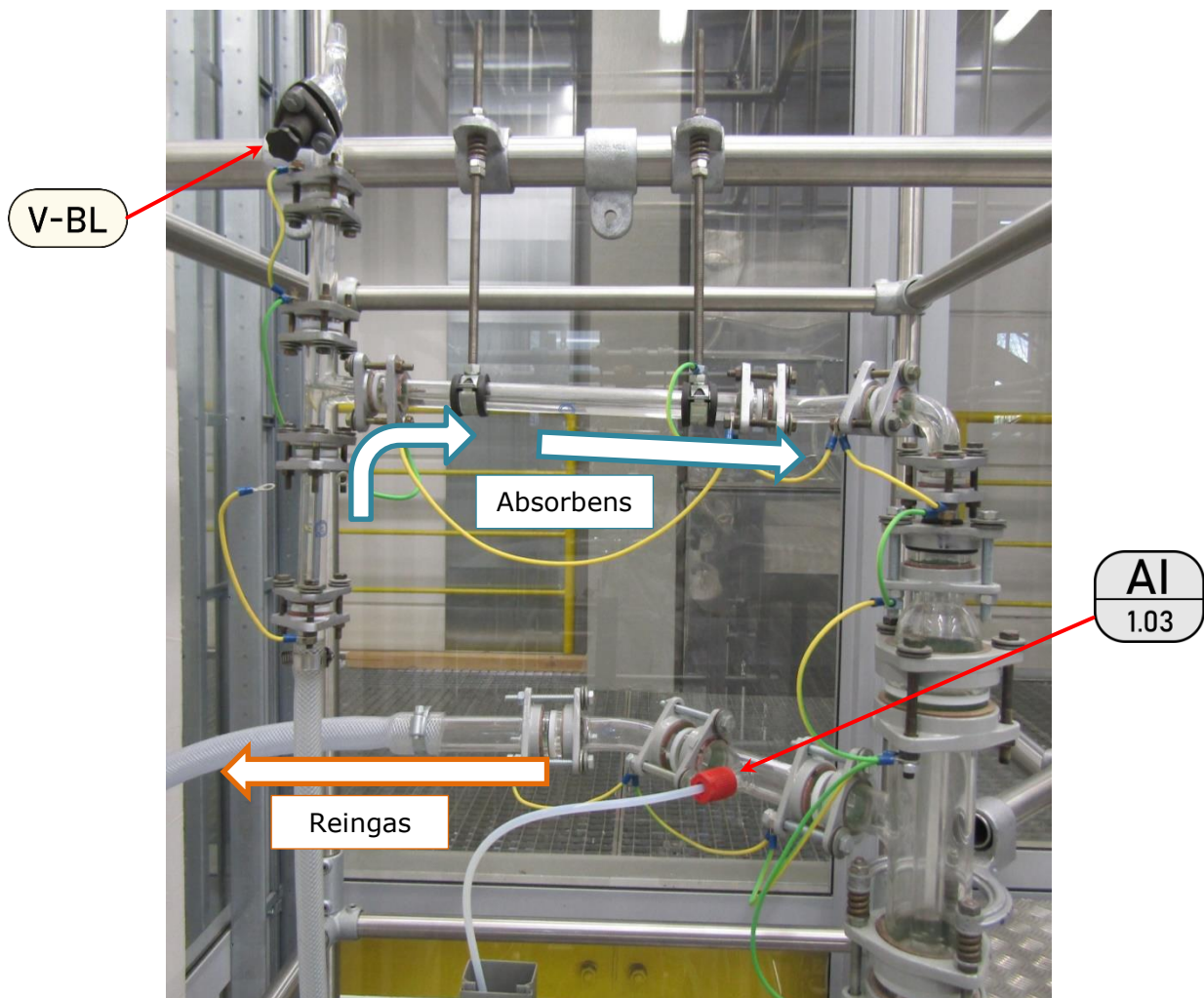


Abbildung 49: Kopf der Fallfilm-Absorptionsanlage: Absorbenszulauf (Bildmitte) mit Belüftungshahn V – BL (links oben) und Reingasleitung (unten)

5.4 Messgeräte

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, welche Messgeräte bei der Fallfilm-Absorptionsanlage zum Einsatz kommen.

5.4.1 Temperatur

Zur Messung der Temperatur wird ein temperaturabhängiger Messwiderstand verwendet. Solche Temperatursensoren ändern ihren elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur. Sie werden daher Resistance Temperature Detector, kurz RTD, genannt. Üblicherweise sind die Widerstände aus Nickel oder Platin gefertigt. Darüber hinaus gibt es auch unterschiedliche Standardwiderstandswerte, die je nach Anwendungsgebiet gewählt werden. So hat beispielsweise ein Pt 100 (Platinwiderstand) einen Normwiderstand von 100 Ω bei der Temperatur von 0 $^{\circ}\text{C}$.

Um über den Messbereich eine bessere Auflösung der gemessenen Temperatur zu erhalten, wird letztlich ein PT1000-Temperaturfühler mit 3-Leiter-Verkabelung gewählt. Die dritte Messleitung dient der Kompensation der Widerstandsänderung infolge der Leiterlänge. Die Kenndaten des PT1000 finden sich in Tabelle 15.

Aufgrund der Korrosivität des SO_2 wird der Temperaturfühler in seiner Ausführung mit Edelstahlhülse und PTFE-isolierten Messleitungen gewählt.

Tabelle 15: Kenndaten des Temperatursensors

Hersteller	<i>Sensorshop24.de</i>
Sensorart	Temperaturfühler
Typ	PT100
Normwert bei 0 $^{\circ}\text{C}$	1000 Ω
Leitungslänge	5 m
Schaltungsart	3-Leiter
Kabelisolierung	PTFE
Durchmesser	4 mm
Hülsenlänge	100 mm
Hülsenwerkstoff	Edelstahl

5.4.2 Druck

Wie bereits der Temperaturfühler, wurde auch ein Drucksensor bei *Sensorshop24.de* angeschafft. Die Auswahl erfolgt primär nach den folgenden drei wesentlichen Kriterien:

- Einsatzbereich: Gase
- Medieneigenschaft: Geeignet für korrosive Medien
- Messbereich: 0 bis 2 bar



Abbildung 50: Drucktransmitter DT1 von *Sensorshop24.de*

Die Wahl fiel schließlich auf den Drucktransmitter DT1 mit keramischer Messzelle, Edelstahlgehäuse und Schutzklasse IP65 (staubdicht und Schutz gegen Strahlwasser). Die detaillierten Kenndaten dieses Sensors können der Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Kenndaten des Drucktransmitters

Hersteller	<i>Sensorshop24.de</i>
Sensorart	Drucksensor
Typ	Drucktransmitter Typ I
Artikelnr.	DT1-I/01/01
Messbereich	0 bis 1,6 bar
Messwert	Relativ
Temperaturfehler Offset	0,03% vom Endwert des MB pro Kelvin
Temperaturfehler Messbereich	0,05% vom Endwert des MB pro Kelvin
Linearität	<1% vom Endwert des MB
Berstdruck	2,5-fache vom Endwert des MB
Nennspannung	24 V DC
Ausgangssignal	4 bis 20 mA
Schaltungsart	2-Leiter
Elektr. Anschluss	DIN EN 175301-803-A Stecker
Anschluss	G ¼" Prozessanschluss
Werkstoffe	Gehäuse aus Cr-Ni-Stahl 1.4305, Dichtung aus Viton und Sensor aus Al ₂ O ₃

Der Drucksensor hat ein ¼-Zoll Außengewinde, der Anschlussstutzen des Glasrohrs jedoch ein GL18-Gewinde (ebenfalls Außengewinde). Es bedarf daher eines speziellen Adapters. Aus diesem Grund erfolgt die Vermessung der geometrischen Gegebenheiten und weiterführend eine Konstruktion eines entsprechenden Adapters. Abbildung 51 zeigt die dreidimensionale Ansicht von links oben des fertig konstruierten Adapters. Als Werkstoff wurde PTFE verwendet. Die vollständige Fertigungszeichnung inklusive aller Abmessungen kann dem Anhang entnommen werden.

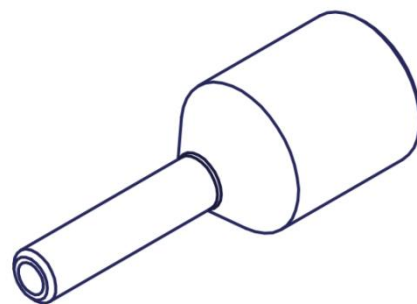


Abbildung 51: Dreidimensionale Ansicht von links oben des konstruierten Drucktransmitter-Adapters

5.4.3 pH-Wert

Der pH-Wert wird mit Hilfe einer universell einsetzbaren *Liq-Glass* pH-Elektrode der Firma *Hamilton Company*, welche für den Laborbetrieb konzipiert ist, gemessen. Die Hülse der Elektrode besteht aus Glas, ist innen mit Kaliumchlorid-Lösung gefüllt und mit einem Diaphragma aus Keramik ausgestattet. Die weiteren Kenndaten können der Tabelle 17 entnommen werden.

Tabelle 17: Kenndaten der pH-Elektrode

Hersteller	<i>Hamilton Company</i>
Sensorart	pH-Elektrode
Typ	<i>Liq-Glass</i>
Modellnr.	238000
Messbereich	pH 0 bis 14
Sensibilität	57 to 59mV
Elektrodenlänge	120 mm
Durchmesser	12 mm
Elektr. Konnektor	S7
Membranform	Kugel
Diaphragma	Keramik
Elektrolyt	KCl
Hülsenwerkstoff	Glas

Von der pH-Elektrode gelangen die elektrischen Signale über ein Kabel zum pH-Regler AIC 3.01, welcher in Abbildung 52 bzw. Abbildung 53 dargestellt ist. Im pH-Regler ermittelt das eingebaute Modul *pH-Meter* (mittleres Modul in Abbildung 52) aus dem elektrischen Signal den pH-Wert und zeigt diesen an der Frontseite an einer mehrfachen 7-Segmentanzeige an. Neben dem pH-Meter-Modul hat der pH-Regler im linken Einschub ein Redox-Meter-Modul und im rechten ein PID-Regler-Modul eingebaut. Das Redox-Meter bleibt bei der Absorptionsanlage jedoch ohne Verwendung.



Abbildung 52: Frontseite des pH-Reglers AIC 3.01

Am PID-Regler kann über einen Kippschalter an der Oberseite zwischen der Sollwert- und der Totzonenvorgabe umgeschaltet werden. Der Wert wird jeweils über einen stufenlosen Drehschalter eingestellt und über eine mehrfache 7-Segmentanzeige angezeigt. Darunter befinden sich noch die Einstellparameter für die Stellgröße des Reglers, womit die Steilheit der Sollwertänderung X_p in [%], die Vorlaufzeit T_V in [s] und die Nachlaufzeit T_N

in [min] eingestellt werden können. Die Vorlaufzeit wird über den roten und die Nachlaufzeit über den grünen Ausgang gesteuert. Diese beiden Ausgänge sind Stromversorgungen in Form von Schutzkontakt-Steckdosen (kurz Schuko) an der Rückseite des pH-Reglers (siehe Abbildung 53). Diese werden entsprechend der Sollwertvorgabe und der jeweiligen Parametereinstellung ein- oder ausgeschaltet. Es gibt zwei Steckdosen, wobei eine über die Vorlaufzeit (rot markiert) und die andere über die Nachlaufzeit (grün markiert) gesteuert werden. An einer der beiden Steckdosen kann die Pumpe *P2* zur Förderung der Natronlauge angeschlossen werden. Für die Fallfilmabsorption wird die Schlauchquetschpumpe über die Nachlaufzeit (ca. 1 Min), d.h. über die grün markierte Steckdose, versorgt.



Abbildung 53: Rückseite des pH-Reglers AIC 3.01

Zusätzlich bietet der pH-Regler an der Rückseite auch noch einen analogen Signal-Ausgang, über den der gemessene pH-Wert mit einem analogen Spannungssignal von 0 bis 10 V ausgegeben wird. Dieser Ausgang wird in weiterer Folge für die Messdatenerfassung mittels LabView (näheres dazu in Kapitel 6) verwendet.

Vor dem Einsatz der Elektrode ist es wichtig, die Elektrode zu kalibrieren. Nur durch eine Kalibration kann sichergestellt werden, dass die Geräteeinstellungen des pH-Reglers richtig konfiguriert sind. Die Kalibration wird über zwei Punkte mit Standard-Pufferlösungen, siehe Tabelle 18 und Tabelle 19, durchgeführt.

Tabelle 18: Kenndaten der ersten Pufferlösung

Hersteller	<i>Carl Roth GmbH + Co. KG</i>
Artikelnr.	P713.1
pH-Wert	<i>pH 7,00 ± 0,02</i>

Tabelle 19: Kenndaten der zweiten Pufferlösung

Hersteller	<i>Hamilton Company</i>
Artikelnr.	238223
pH-Wert	<i>pH 10,01 ± 0,02</i>

5.4.4 Gasanalyse

5.4.4.1 Allgemeine Daten

Unter dem Namen *Advance Optima* bietet die Firma *ABB* ein modular aufgebautes Geräteprogramm für die kontinuierliche Prozessgasanalyse an. Die Serie *AO2000* umfasst die folgenden Module:

- Analysatormodule,
- Pneumatikmodul,
- Elektronikmodul,
- I/O-Module,
- Gehäuse mit Anzeige- und Bedieneinheit und
- Systembus.

Diese verschiedenen Module können individuell zu Analysengeräten und Multianalysator-Systemen zusammengestellt werden. Je nach Anwendungsgebiet und zu analysierendes Gas stehen unterschiedliche Analysatormodule zu Verfügung [30]. Zur Schwefeldioxid-Konzentrationsbestimmung an der Fallfilmabsorptionsanlage wird das Analysatormodul *Limas 11*, in Kombination mit dem Gehäuse inkl. Anzeige- und Bedienelement eingesetzt. Typische Anwendungsgebiete des *Limas 11* sind beispielsweise die Regelung von DeNOx-Anlagen, Aufbereitung von Erdgas, Produktion von Zement, Optimierung von Brennern, oder auch die Abluft- und Reinheitsmessung. Aufgrund der verwendeten Werkstoffe und der dichten Ausführung zeichnet sich das Modul gegenüber brennbaren, toxischen und korrosiven Messgasen aus [30].

5.4.4.2 Messprinzip und Gerätedaten

Beim *Limas 11* handelt es sich um ein Photometer, bei dem das Messprinzip die Spektroskopie elektromagnetischer Wellen ist. Der Spektroskopie bzw. Photometrie liegt das Lambert-Beer'sche Gesetz (siehe Formel 5.7) zugrunde, welche die Intensitätsabschwächung durch eine absorbierende Substanz beschreibt.

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \varepsilon * c * d \quad \text{Formel 5.7}$$

Es wird also die Absorption infraroter (IR), sichtbarer (VIS, visible), oder ultravioletter Strahlung (UV) durch die Schadgase als Messeffekt ausgenutzt. Die Gase nehmen in bestimmten Wellenlängenbereichen (Absorptions-banden) Energie auf. Der Wellenlängenbereich ist charakteristisch für das jeweilige Gas. Die dadurch bedingte

Intensitätsabnahme der Strahlung wird gemessen und gibt Rückschluss auf die Konzentration des absorbierenden Gases [31].

Mit einer eigenen Lampe wird das gewünschte Licht-spektrum erzeugt und durch eine Linse gebündelt. Das gebündelte Licht gelangt anschließend durch eine Küvette hindurch zu einer Photozelle, an der die Lichtintensität gemessen wird. Das zu analysierende Gas strömt ebenfalls durch die Küvette, wie Abbildung 54 zeigt. Je nach Gasbestandteile und deren Konzentration werden nun bestimmte, für die Substanzen charakteristische Wellenlängen absorbiert. Die resultierende Intensitätsabnahme wird von der Photozelle erfasst.

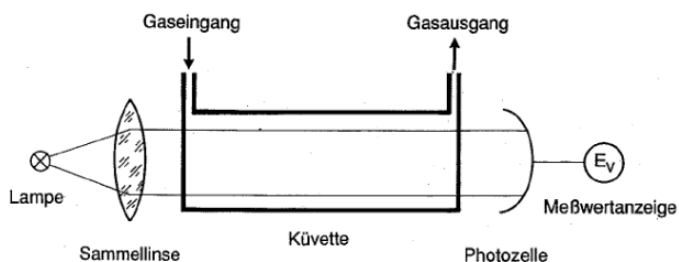


Abbildung 54: Prinzip eines Photometers in der Gasanalyse [31]

Das Analysatormodul *Limas 11* gibt es in drei verschiedenen Ausführungen – *Limas 11 IR* mit Infrarotlichtspektrum, *Limas 11 UV* und *Limas 11 HW* mit ultraviolettem und sichtbarem Lichtspektrum. An der Fallfilmabsorptionsanlage wird das Modul *Limas 11 UV* verwendet. Die technischen Daten dieses Moduls können der Tabelle 20 entnommen werden.

Tabelle 20: Technische Daten des kontinuierlichen Gasanalysators, der Serie AO2000 von ABB [30]

Hersteller	ABB Automation GmbH
Geräteart	Kontinuierlicher Gasanalysator
Serie	AO 2020
Analysemodul	Limas 11 UV
Produktnummer	24911-0-301101010002
Analyseart	Prozessphotometer
Spektralbereich	Ultraviolettes und sichtbares Licht ($\lambda = 200 \dots 600nm$)
Messkomponenten und deren Messbereiche	0 ... 2000 ppm bei NO, 0 ... 1000 ppm bei NO ₂ und 0 ... 4000 mg/m ³ bei SO ₂
Linearitätsabweichung	≤ 1% der Messspanne
Wiederholpräzision	≤ 0,5% der Messspanne
Nachweisgrenze	≤ 1% der Messspanne
Durchfluss	20 ... 100 l/h
Küvette	Standardküvette aus Aluminium
Werkstoff der Gasleitungen	PTFE
Werkstoff der Gasanschlüsse	Edelstahl 1.4571
Gasanschlüsse	1/8 Zoll NPT-Innengewinde

5.5 Anlagenelektrik

Für die elektrische Versorgung und Steuerung der Geräte wurde ein eigener Schaltschrank installiert. Dieser Schaltschrank beinhaltet eine Grundschialtung, welche standardmäßig für elektrische Anlagen verwendet wird. Abbildung 55 zeigt den Schaltplan der elektrischen Versorgung und Anlagensteuerung.

Die Stromversorgung wird über eine fest installierte 400 V-Starkstromleitung, von der Laboreinhausungsversorgung zugeführt. Über den Hauptschalter am Schaltschrank der Absorptionsanlage kann die gesamte Energieversorgung eingeschaltet bzw. unterbrochen werden. Durch eine Selbsthalteschaltung mit Installationsschutz wird die Anlage mit allen Geräten per einmaliges Drücken des Tasters S2 eingeschaltet. Die Kontrollleuchte S2L signalisiert den eingeschalteten Zustand.

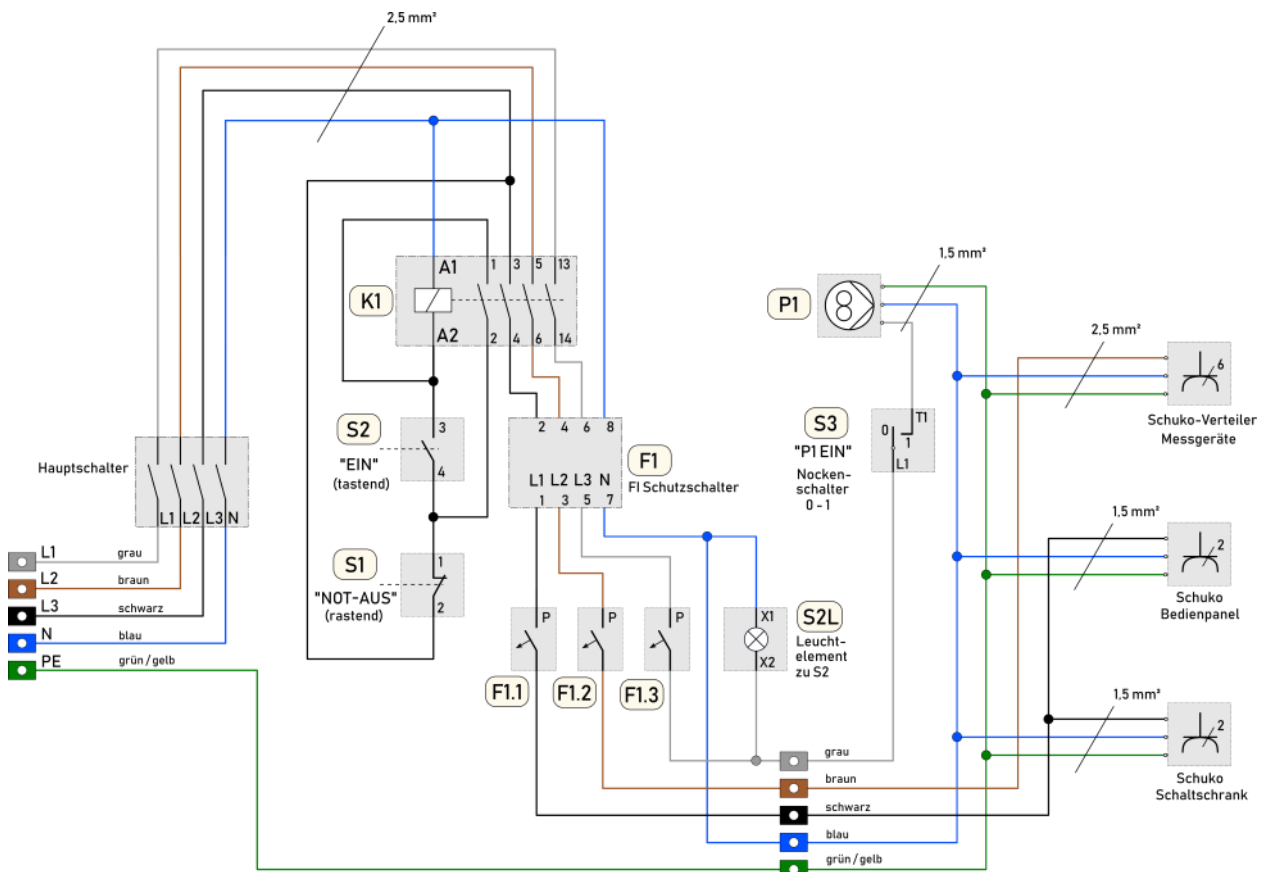


Abbildung 55: Schaltplan der Anlagensteuerung und der elektrischen Versorgung

Ein Betätigen des Not-Aus-Druckknopfs löst die Selbsthaltefunktion des Schaltkreises und unterbricht somit die gesamte Energiezufuhr. Aufgrund der einrastenden Funktion muss dieser nach Betätigung wieder in seinen Nullzustand zurückgesetzt werden. Zur Absicherung sind neben einem FI-

Schutzschalter *F1* auch für jede Phase jeweils Leitungsschutzschalter (*F1.1* bis *F1.3*) installiert.

An der Ausgangsseite wird die Zahnradpumpe *P1* über die erste Phase versorgt. Ein- und ausgeschaltet wird diese über den Nockenschalter *S3*. Am Ende der zweiten Phase wird ein Stromverteiler mit sechs Schuko-Steckdosen für die Messgeräte installiert. Die dritte Phase speist jeweils zwei Schuko-Steckdosen, wobei sich ein Paar direkt an der Schaltschrankseite und das andere Paar am Bedienpanel unterhalb des Not-Aus-Knopfs befinden.

5.6 Messtechnik

In einem zweiten kleineren Schaltschrank, welcher sich auf der Rückseite hinter dem Gasanalysator und der Messgasfördereinheit befindet, wird die gesamte Messtechnik untergebracht. In Abbildung 56 sind die Verkabelung und die einzelnen Anschlussbelegungen einerseits an den NI-Modulen und andererseits am Analogausgang des Gasanalysators dargestellt.

Die Abbildungen der *National Instruments* (NI) Module *9203* und *9219* und des Stromversorgungsteckers des NI Modulschlittens *cDAQ 9174* wurden den jeweiligen Modulanleitungen des Herstellers (siehe [32]–[34]) entnommen und zur besseren Nachvollziehbarkeit in Abbildung 56 verwendet. Die erforderlichen Anschlussbelegungen dieser beiden NI-Module wurden ebenfalls in diesen Modulanleitungen nachgelesen, siehe [33] bzw. [34]. Analog dazu wurden die Anschlussbelegungen des Gasanalysators in der Betriebsanleitung, siehe [35], recherchiert.

Die Stromversorgung für den Modulaufnahmeschlitten *NI cDAQ 9174* und dem DIN-Schienen-Netzteil erfolgt über den eigens vorgesehenen sechsfachen Schukoverteiler. Das DIN-Schienen-Netzteil liefert eine Ausgangsspannung von 24 V DC und speist den Drucktransmitter.

Die übrigen vier Steckdosen werden durch den Massendurchflussregler, den pH-Regler, die Gasfördereinheit und den Gasanalysator belegt.

Aufbau der Fallfilm-Absorptionsanlage

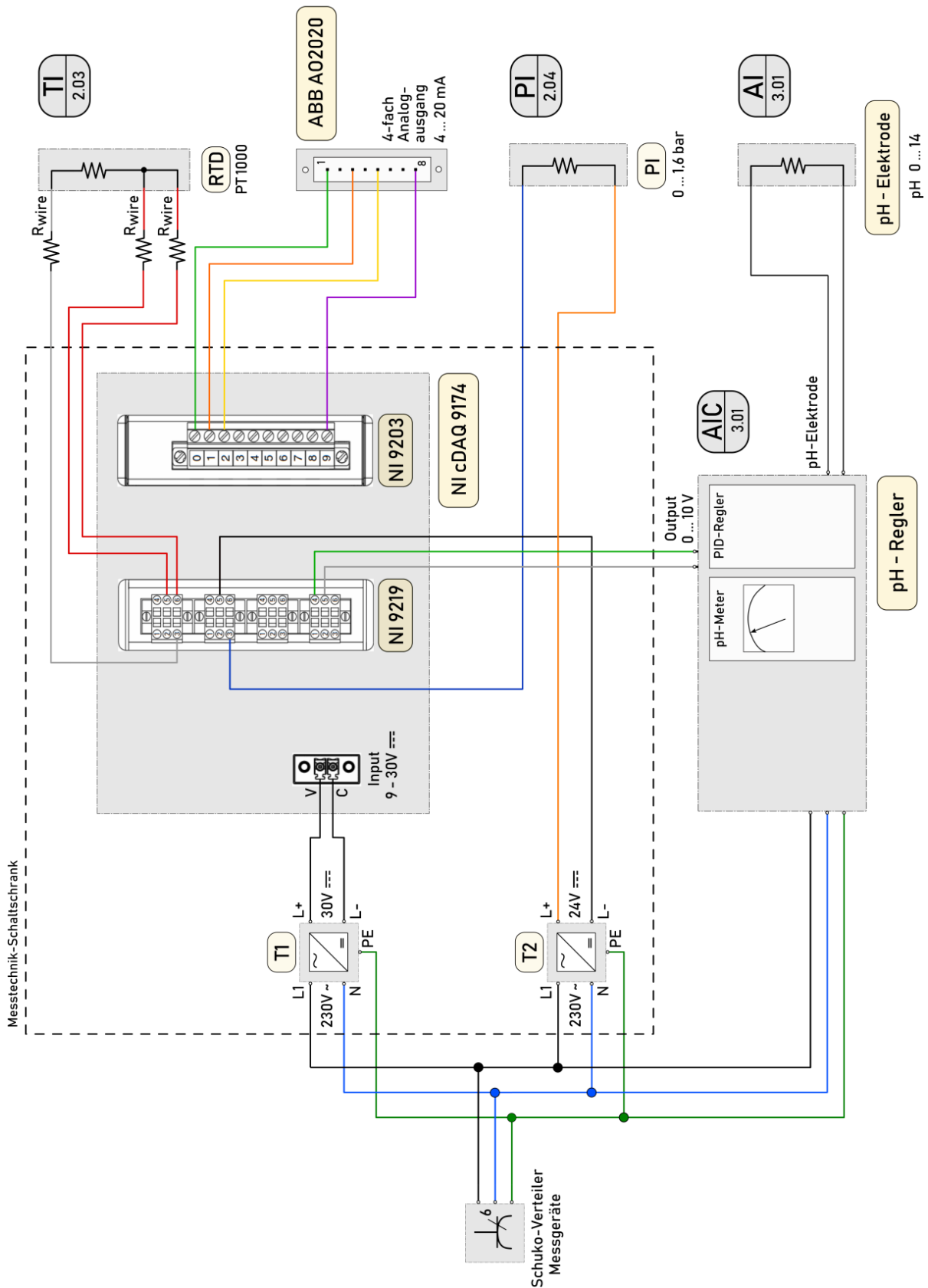


Abbildung 56: Schaltplan der Messtechnik-Komponenten. Die Abbildungen der beiden NI-Module und des Stromversorgungssteckers des NI Modulschlittens wurden den jeweiligen Bedienungsanleitungen (siehe [32]-[34]) entnommen.

6 Messdatenerfassung und Verarbeitung

Um die einzelnen Messwerte an einem angeschlossenen PC erfassen, über eine bestimmte Zeit aufzeichnen, in einem geeigneten Format abspeichern und schließlich für die weitere Auswertung zu Verfügung stellen zu können, wurde ein entsprechendes Programm in *National Instruments LabView* geschrieben. Es handelt sich um eine grafisch aufgebaute Programmiersprache.

Notwendige Funktionen, über die das Programm verfügen soll, sind beispielsweise die simple Bedienbarkeit, die Darstellung der Messwerte in Zeitverlaufsdiagrammen, oder auch die Aufbereitung und Nachvollziehbarkeit der gespeicherten Messdaten in einem gängigen Dateiformat. Darüber hinaus ist es erforderlich Fehlanwendungen durch Benutzer möglichst durch Fehlerbehandlungsroutinen abzufangen, um so etwaige Programmabstürze zu vermeiden.

Das Programm ist in seinem Aufbau so ausgeführt, dass es vom Benutzer in der Höhe gänzlich ohne auf- und abwärtsscrollen erfasst werden kann. Die Programmstruktur wird lediglich in der Breite entwickelt, wodurch es vom Benutzer nur von links beginnend, nach rechts gelesen werden muss. Um zu gewährleisten, dass gewisse Aufgaben, z.B. eine Variableninitialisierung, oder die Verbindung und Konfiguration des MFC, in einer vorgegebenen Reihenfolge abgearbeitet werden, ist die Grundstruktur des Programms eine sogenannte flache Sequenzstruktur. Diese wird in Form eines Filmstreifens dargestellt. Somit wird zu Beginn zuerst eine Initialisierung ausgeführt. Diese wird gefolgt von einer Gerätekonfiguration und anschließend dem Erstellen eines Logfiles, worin später die Messdaten abgespeichert werden. Nach diesen drei Abschnitten wird das eigentliche Programm, das sogenannte Hauptprogramm, ausgeführt. Dieses wird schließlich so lange ausgeführt, bis der Benutzer das Programm beendet.

In den folgenden Abschnitten wird das erstellte *LabView*-Pogramm hauptsächlich anhand zahlreicher Abbildungen dargestellt. Aufgrund der Komplexität der gesamten Programmierung des Messdatenerfassungsprogramms wird auf eine umfassende Beschreibung verzichtet und lediglich der Hauptprogrammteil gezeigt. Zur genauen Interpretation und Nachvollziehbarkeit wird auf entsprechende Fachliteratur zur Programmierung in *LabView* verwiesen. Innerhalb der verschiedenen Code-Abschnitte befinden sich jedoch laufend Anmerkungen, welche in Form von schwarzem Text in hellgelben Rechtecken dargestellt sind. Diese geben Auskunft darüber, welche Funktion die jeweilige Sequenz ausübt.

6.1 Hauptprogrammteil der Messdatenerfassung

6.1.1 Grafische Benutzeroberfläche

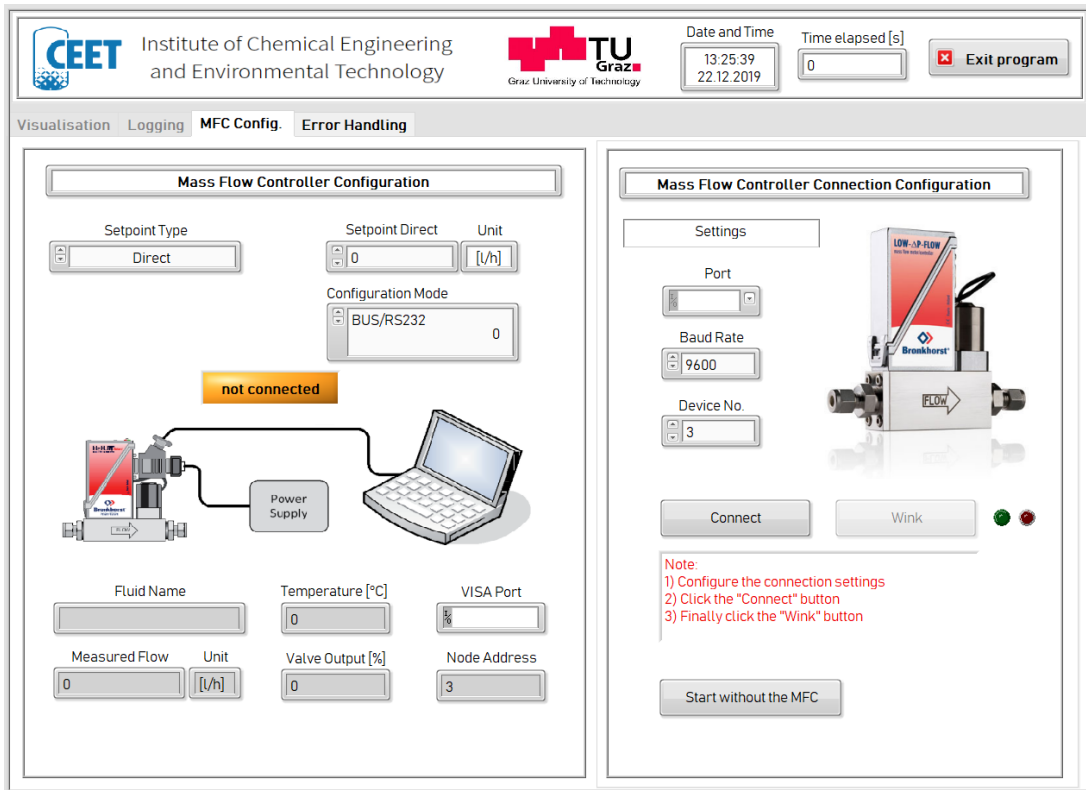


Abbildung 57: Register *MFC Config.* zur Konfiguration des Massendurchflussmessers zu Beginn des Programms

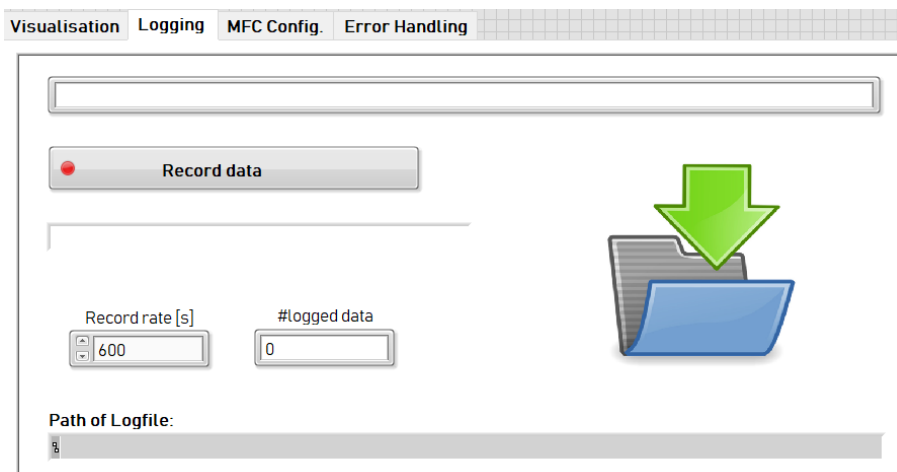


Abbildung 58: Register *Logging*, in welchem der Benutzer die Speicherung der Messdaten mit einstellbarer Speicherrate aktivieren bzw. deaktivieren kann

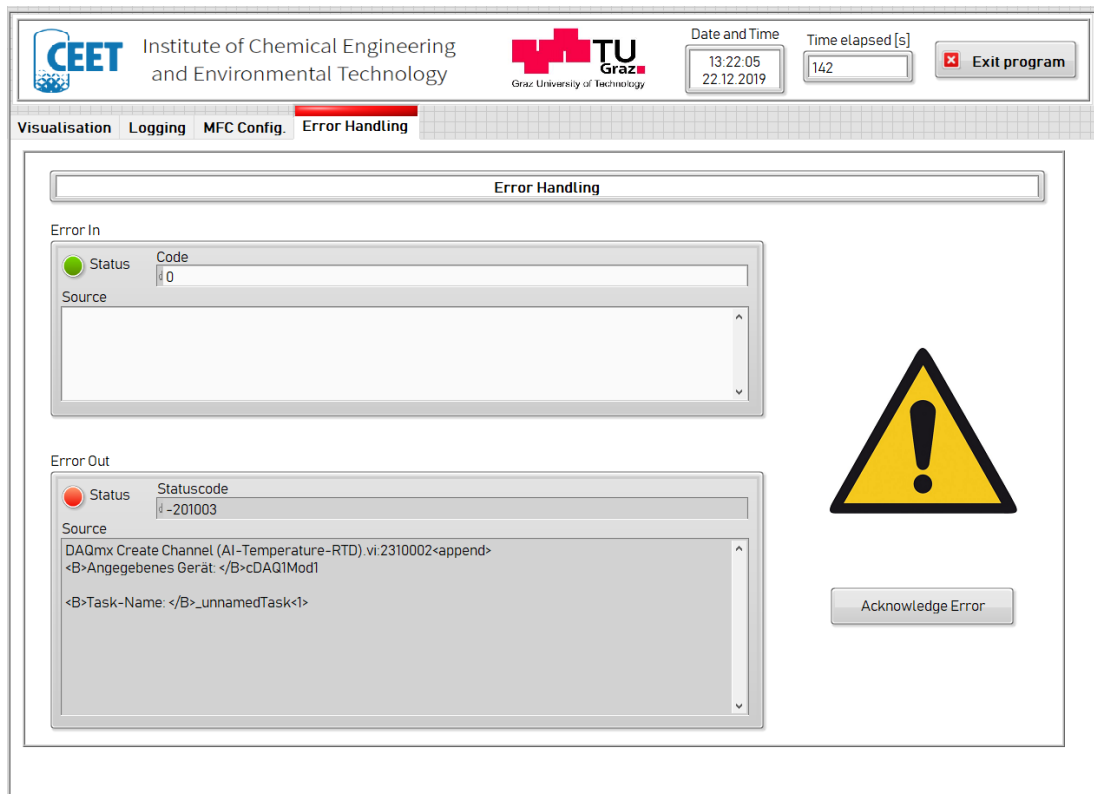


Abbildung 59: Register *Error Handling* bei aufgetretenem Fehler

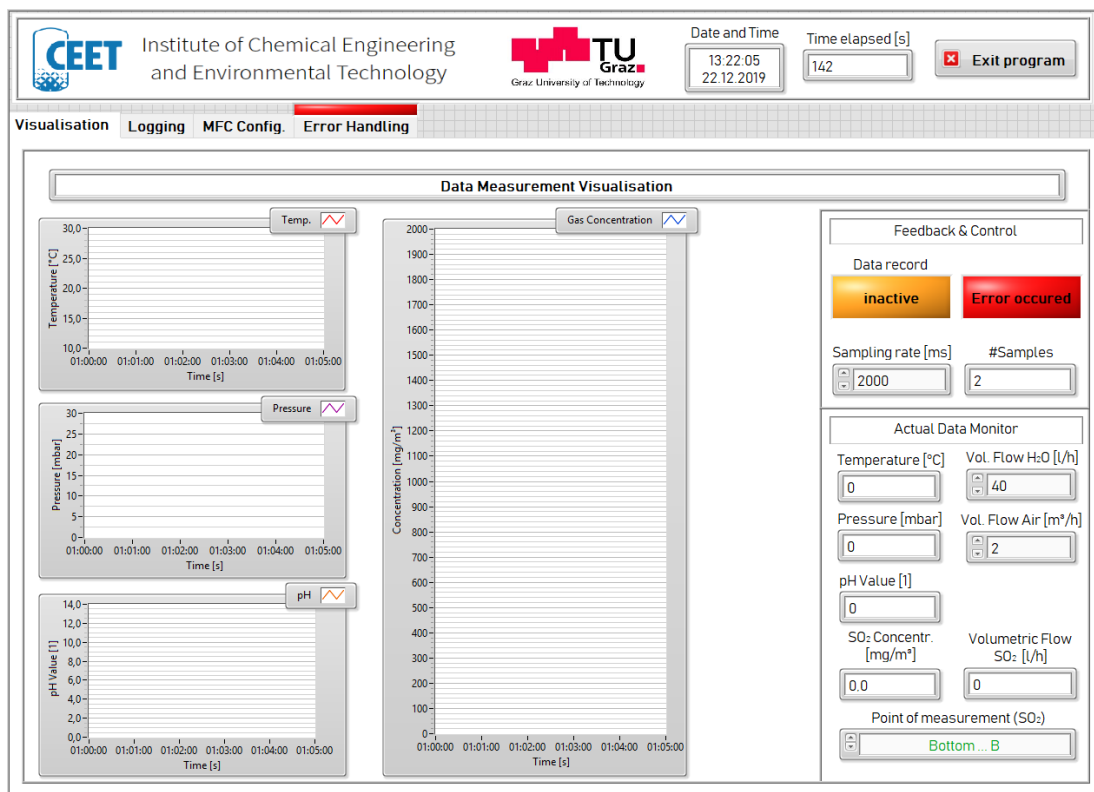
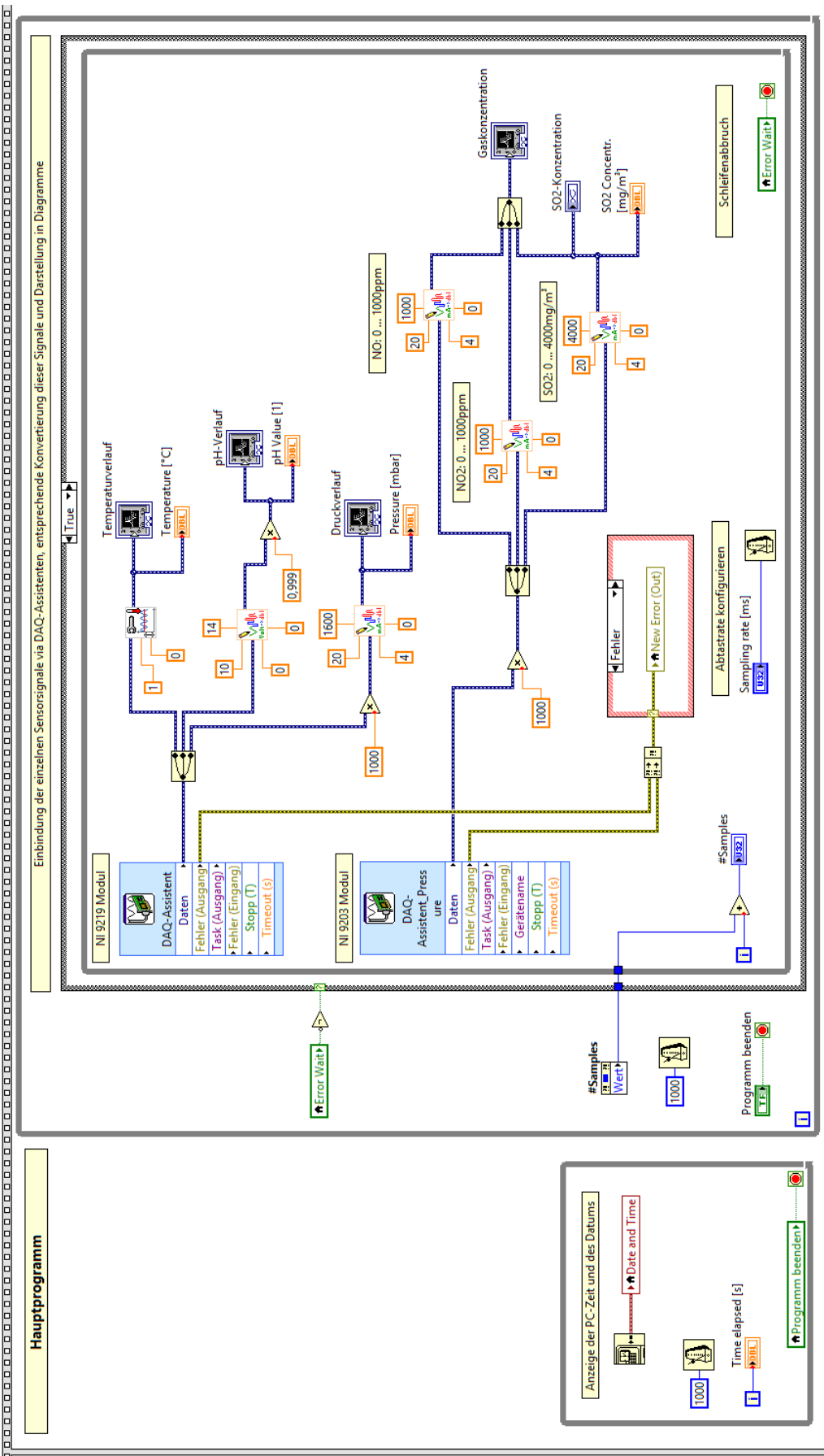
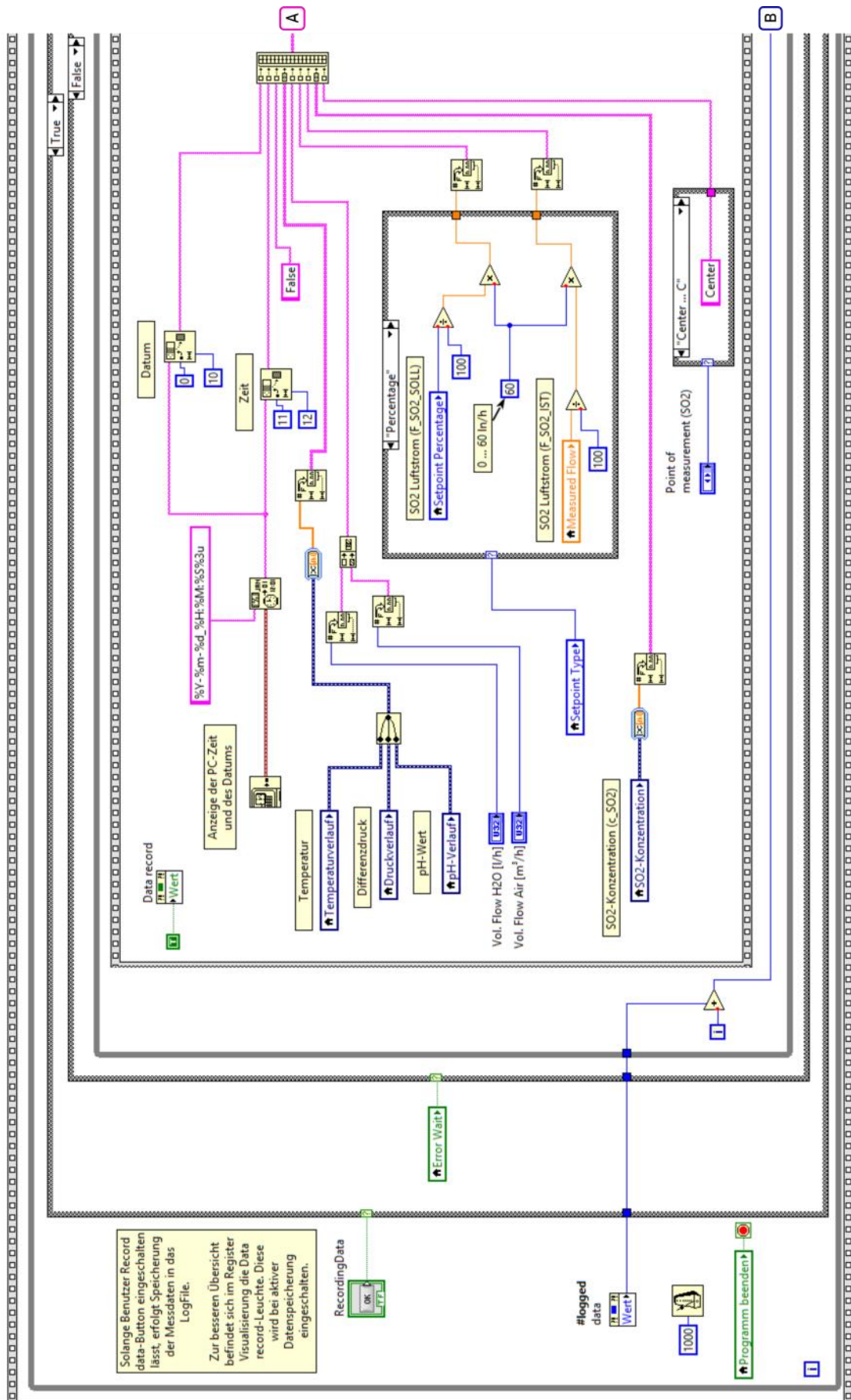
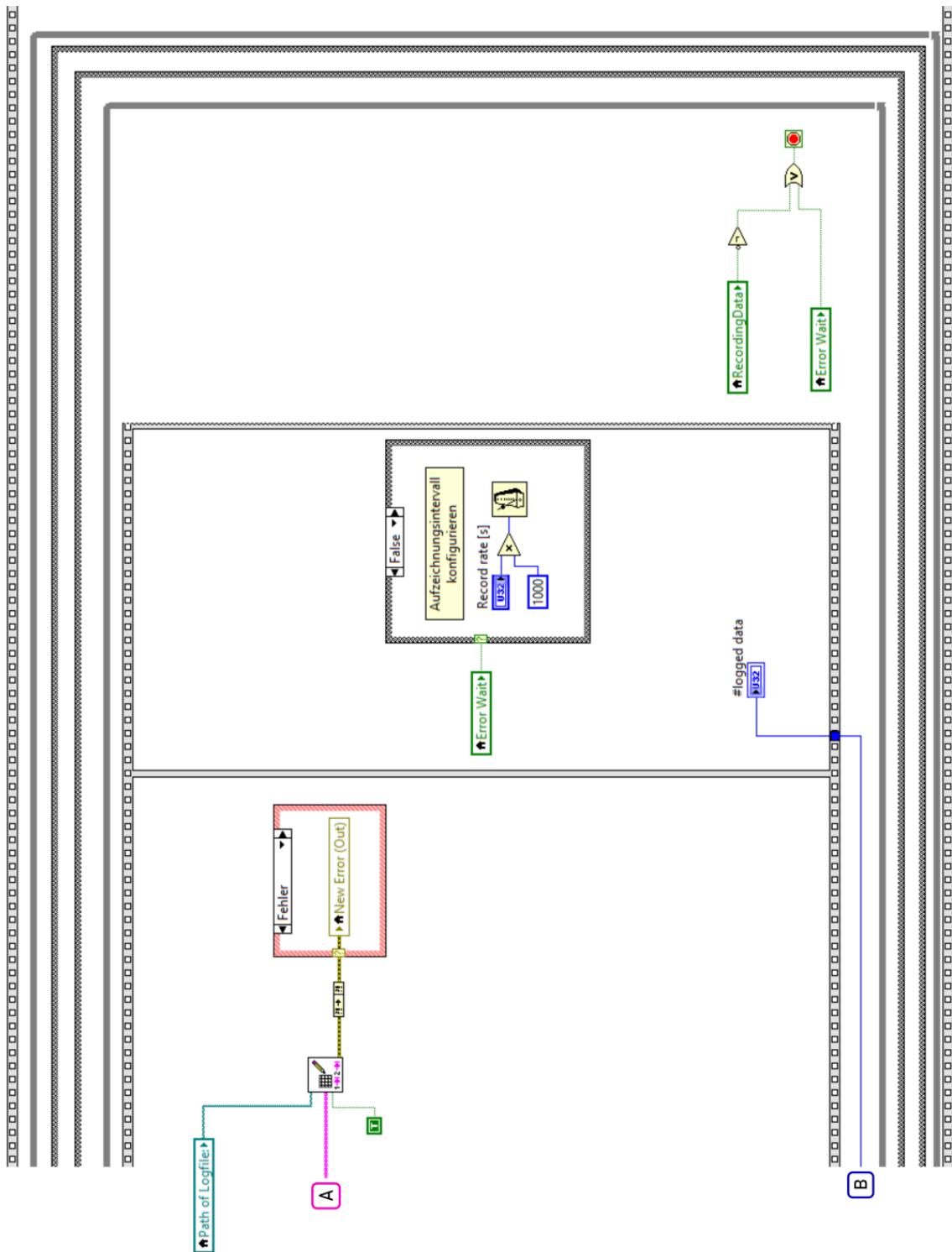


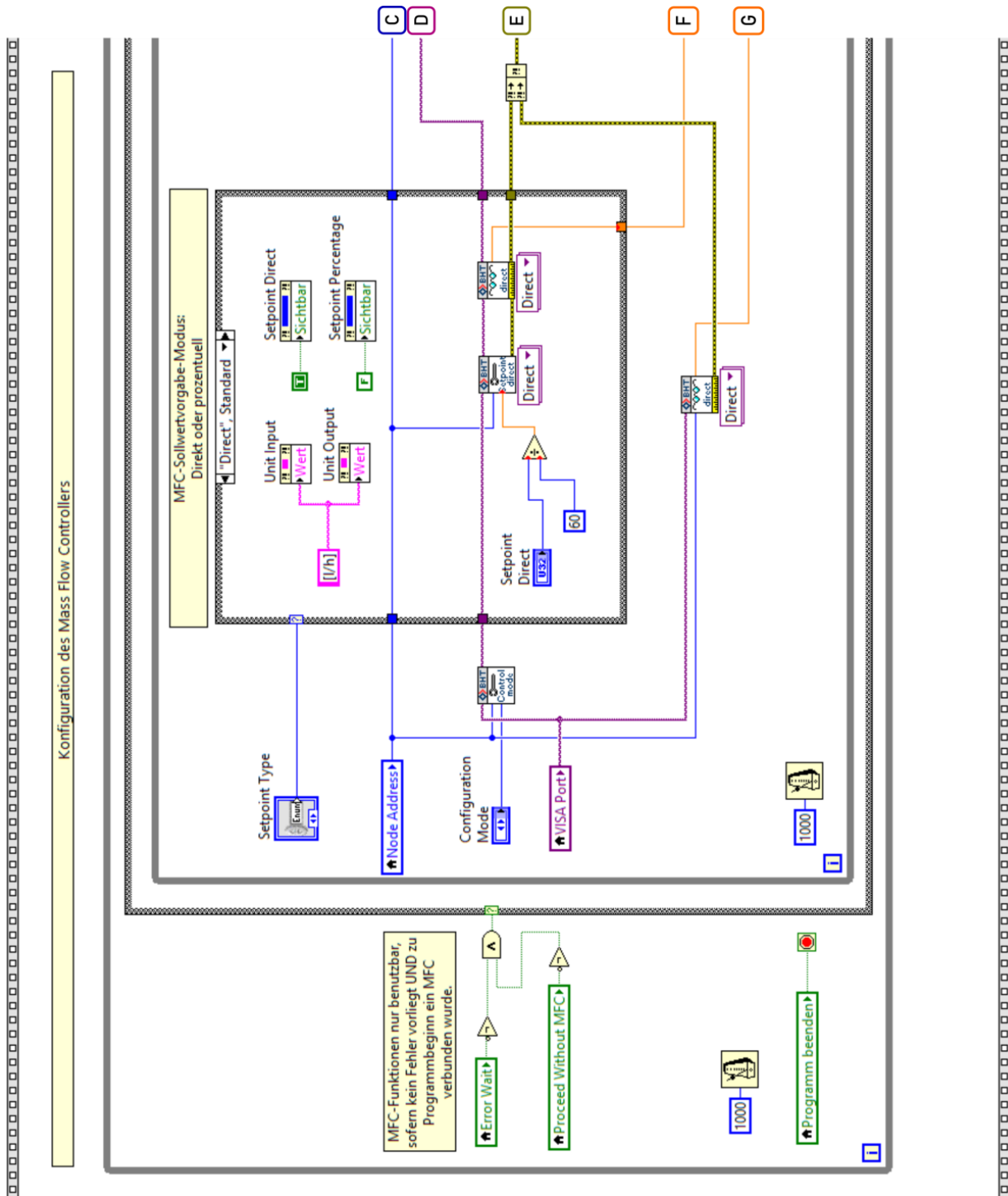
Abbildung 60: Register *Visualisation* mit zeitlichem Verlaufdiagramm, Anzeigen für sämtliche Messwerte und Benutzerinformationen bei einem aufgetretenen Fehler

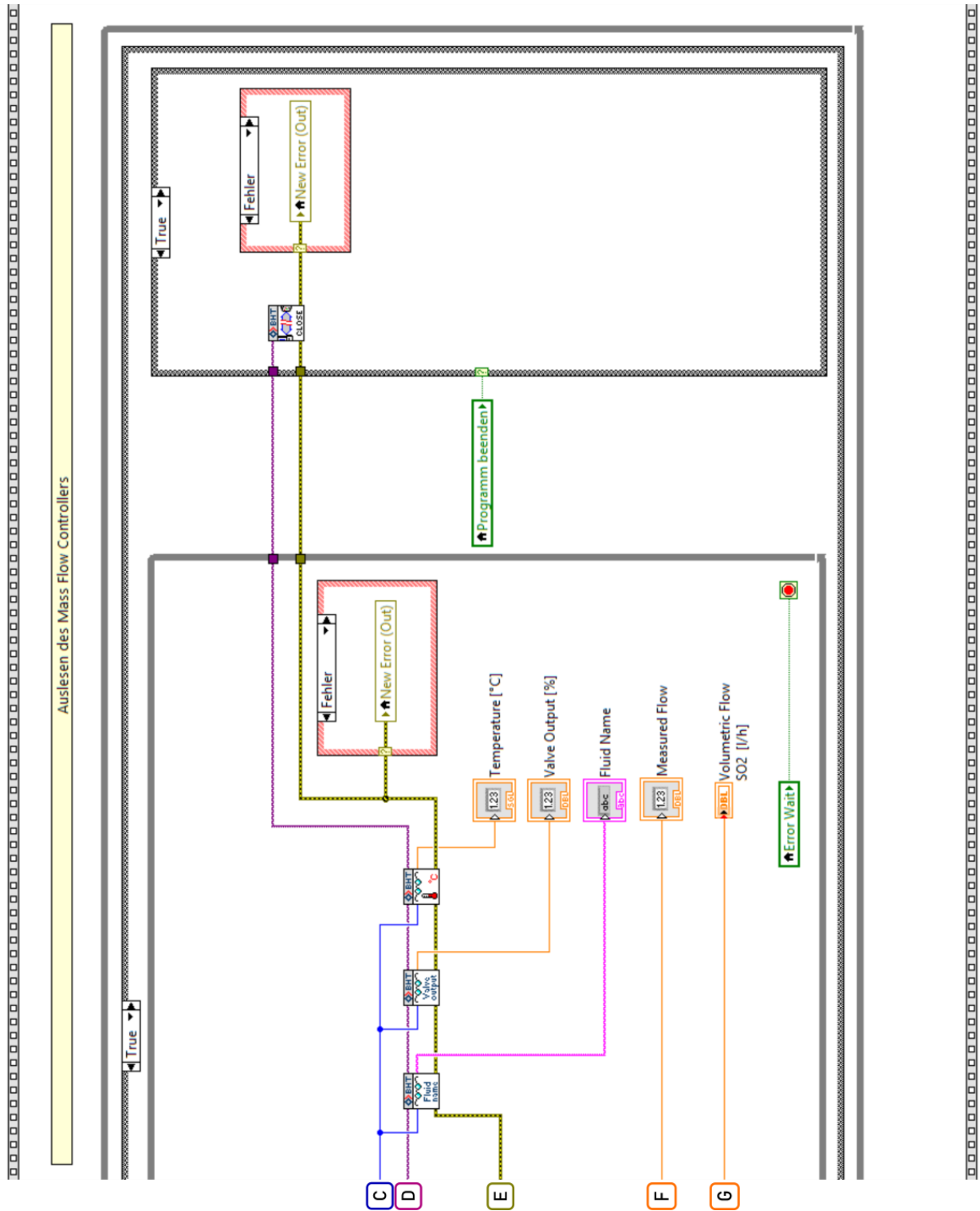
6.1.2 Hauptprogrammteil





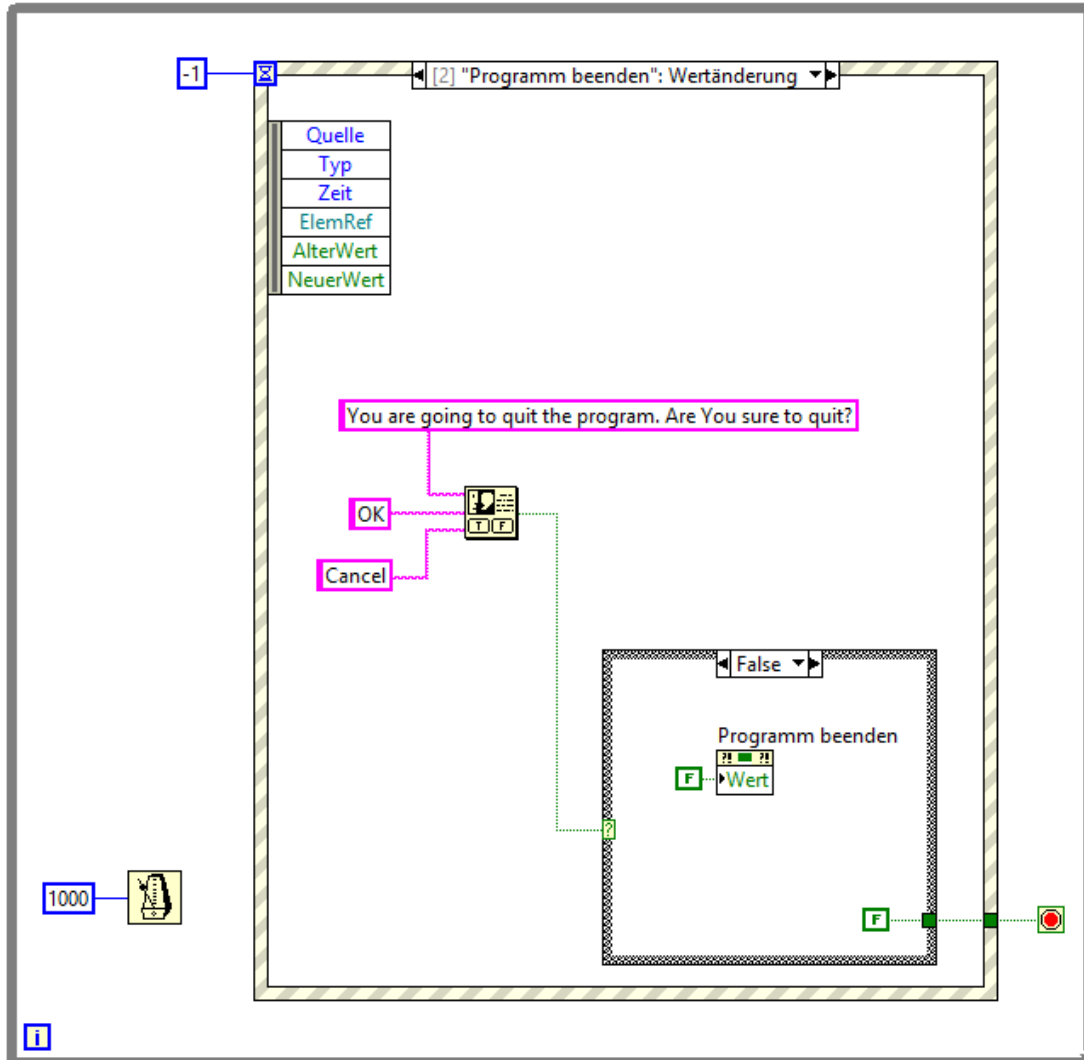


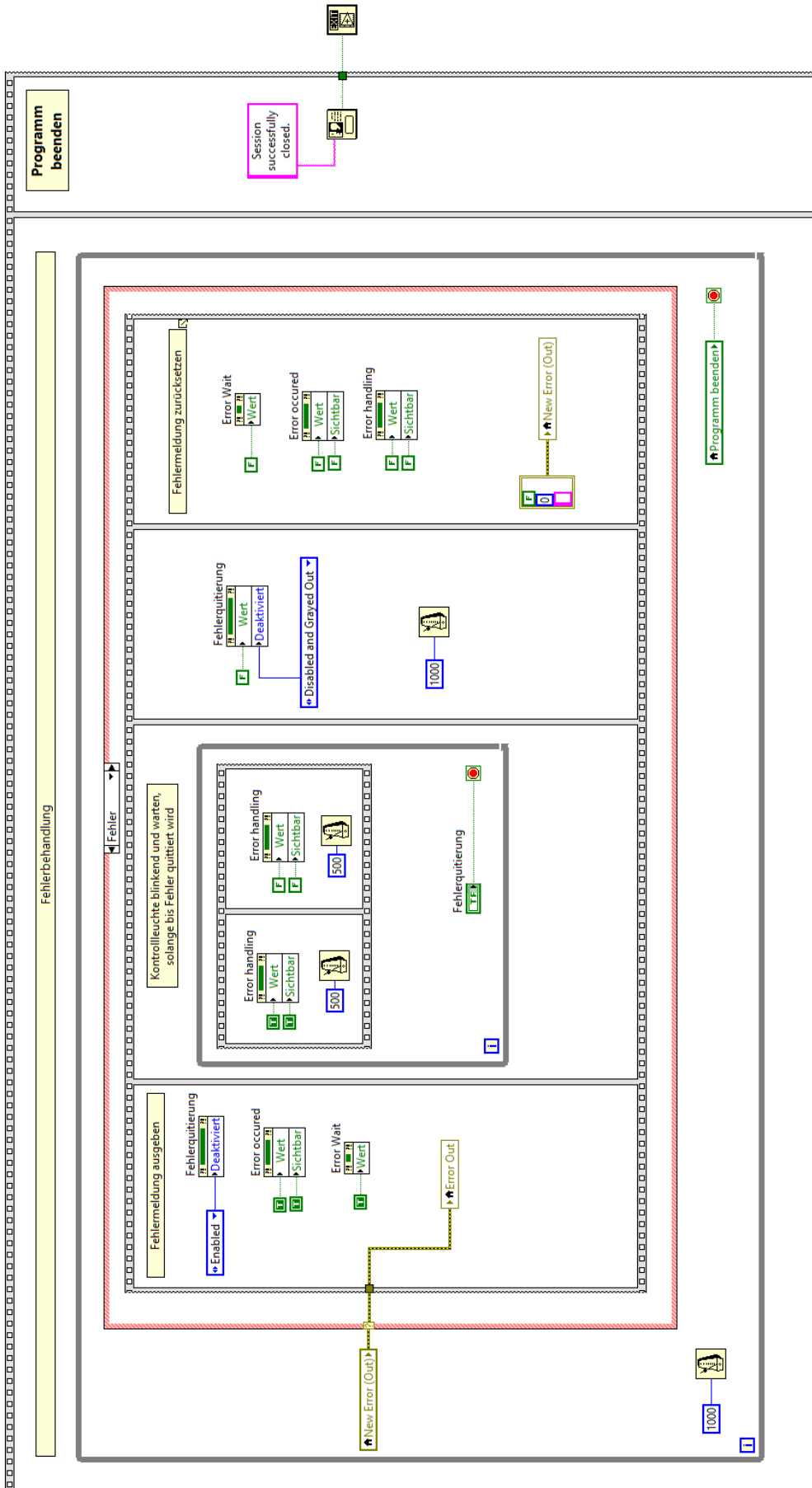






Hauptprogramm-Ablaufsteuerung





6.2 Unterprogramme der Messdatenerfassung

6.2.1 Messdatendatei erstellen

Im Unterprogramm *SubVi_CreateNewLogFile.vi* wird in einem definierten Ordner ein Textdokument mit einem automatischen Dateinamen erstellt. Zuvor erfolgt jeweils eine Überprüfung ob der angegebene Ordner, bzw. ob die angegebene Datei bereits existiert. Sofern die Textdatei noch nicht existiert, wird in der Datei am Anfang eine Standardinformation über den Dateinhalt und die Formate hinterlegt. Nach Fertigstellung wird der Dateipfad als Information an das Hauptprogramm zurückgegeben.

6.2.1.1 Blockdiagramm

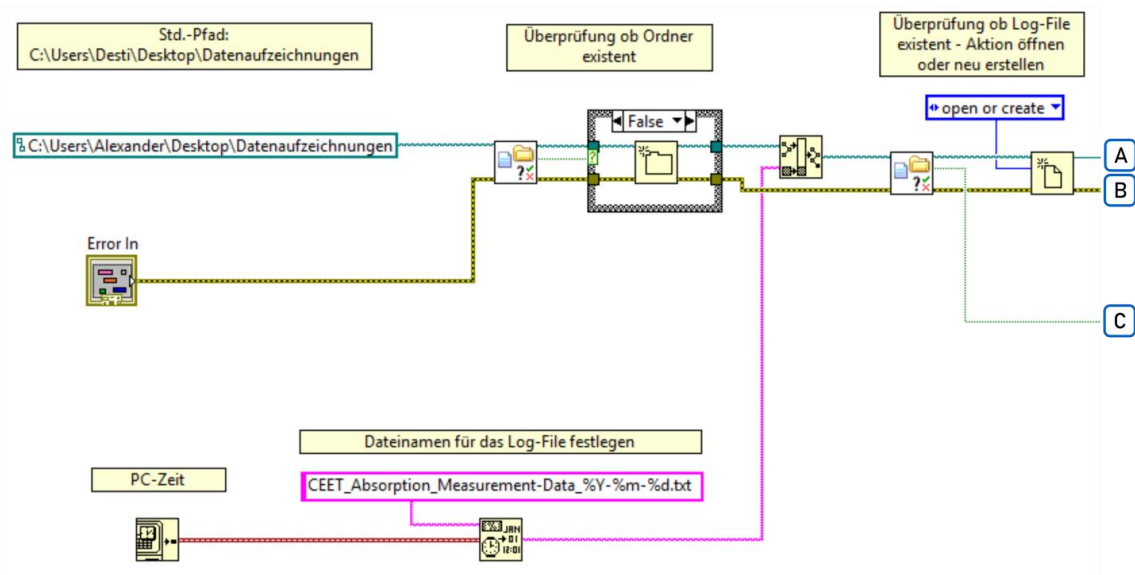


Abbildung 61: Blockdiagramm (Teil 1) des Unterprogramms *SubVi_CreateNewLogFile.vi*

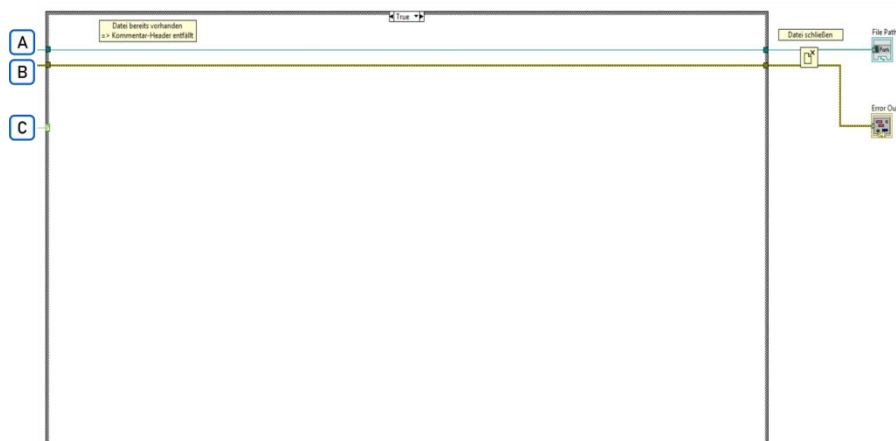


Abbildung 62: Blockdiagramm (Teil 2a - Truecase) des Unterprogramms *SubVi_CreateNewLogFile.vi*

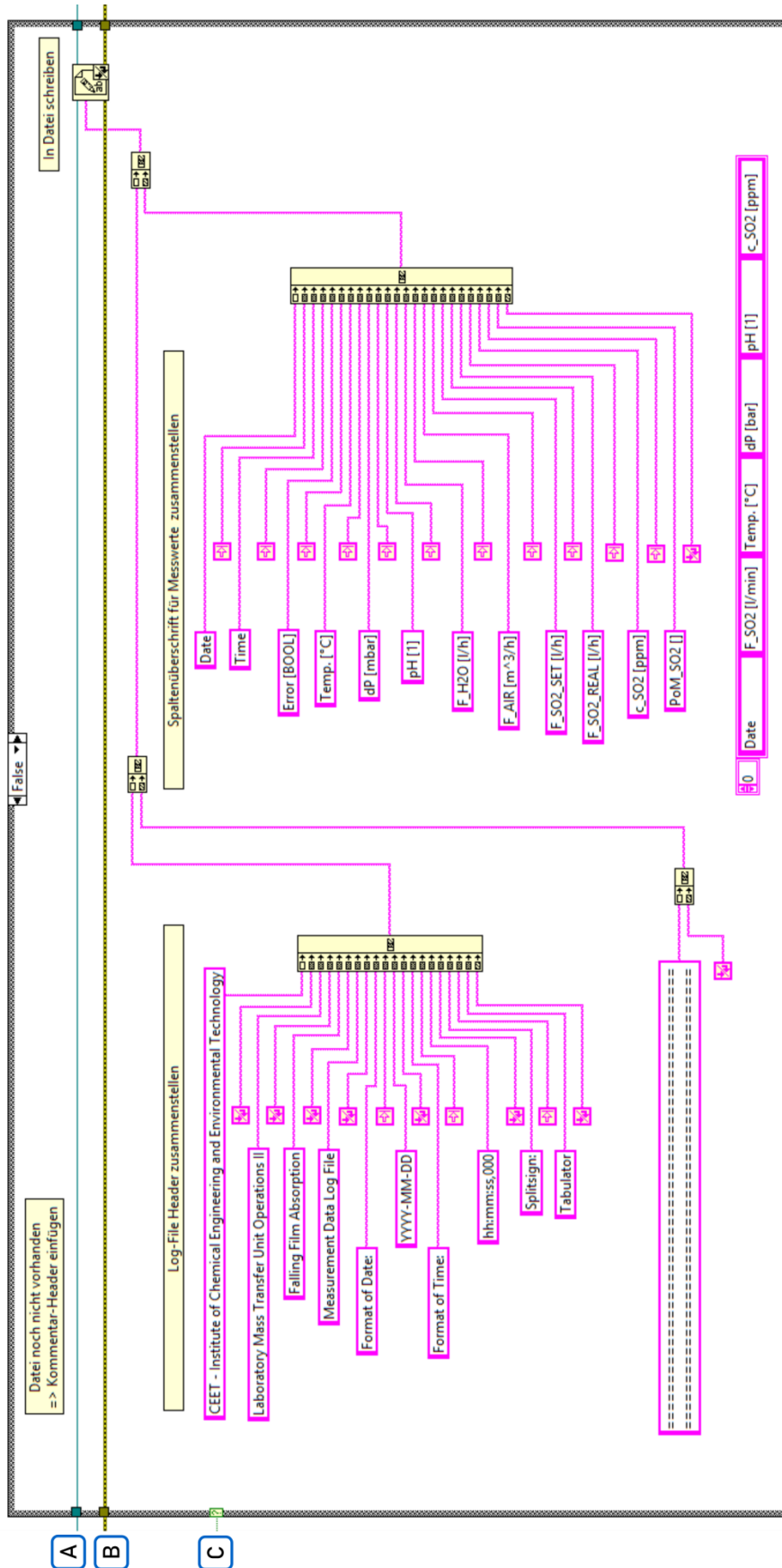


Abbildung 63: Blockdiagramm (Teil 2b - Falsecase) des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi

6.2.2 RTD-Kalibration

Das Unterprogramm SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi dient der standardisierten Kalibration von temperaturabhängigen Messwiderständen (RTD) innerhalb von LabView-Programmen. Der große Vorteil solcher, in Unterprogramme ausgegliederter und standardisierter Abläufe besteht darin, dass die notwendigen Programmsequenzen lediglich einmal implementiert werden müssen. Danach kann auf die Funktion dieses Unterprogramms beliebig oft im Hauptprogramm zugegriffen werden. Eventuelle Abänderungen im Nachhinein werden dadurch immens vereinfacht.

Das Messsignal vom Temperaturfühler, die Steigung der Regressionsgerade und die Nullpunktabweichung (Offset) sind Übergabeparameter an das Unterprogramm. Anhand einer Ein-Punkt-Kalibration im Eisbad kann mit Hilfe des Offsetvalues die Nullpunktabweichung eingestellt und damit eine Nullpunktkalibration durchgeführt werden. Die Steigung der Regressionsgerade wird standardmäßig mit 1 festgelegt. Am Ende wird das korrigierte Messsignal an das Hauptprogramm zurückgegeben.

6.2.2.1 Blockdiagramm

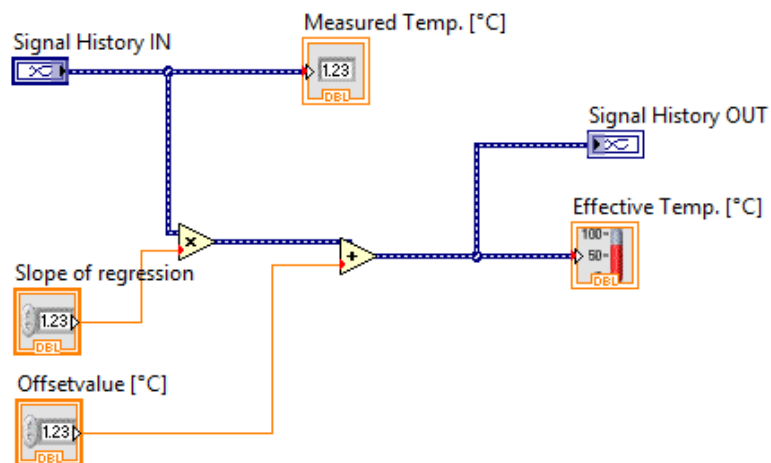


Abbildung 64: Blockdiagramm des Unterprogramms SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi

6.2.3 Signalkonvertierer

Nach der Umwandlung durch den Analog-Digital-Wandler und der Einbindung durch den *DAQ-Assistenten* in *LabView* entspricht der Sensorsignalwert noch dem des physikalischen Signals – dem Strom- oder Spannungssignal. Für jeden Sensor muss daher eine Konvertierung entsprechend dem Messbereich erfolgen.

Die Umrechnung des Signals erfolgt über die Beziehung ähnlicher Dreiecke. Der Zusammenhang dieser ähnlichen Dreiecke ist in Abbildung 65 am Beispiel des Drucktransmitters grafisch dargestellt. Formel 6.1 beschreibt den Zusammenhang schließlich mathematisch. Die umgeformte Berechnung des gesuchten Messwerts, in der Einheit der Messgröße, beschreibt Formel 6.2. Im Fall des Drucktransmitters ist die Einheit der Messgröße mbar.

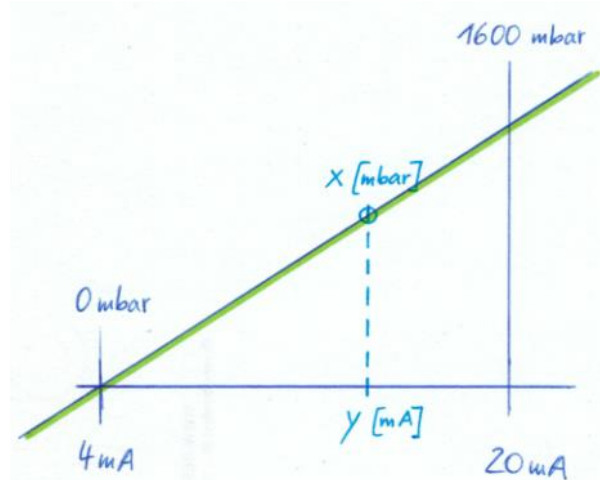


Abbildung 65: Grafische Darstellung der Signaldaten des Drucktransmitters zur Konvertierung

$$\frac{(1600 - 0)}{(20 - 4)} = \frac{(x - 0)}{(y - 4)} \quad \text{Formel 6.1}$$

$$x = 0 + \left[\frac{(1600 - 0)}{(20 - 4)} * (y - 4) \right] \quad \text{Formel 6.2}$$

Dem Unterprogramm *SubVi_Current_Converter.vi* werden vom Hauptprogramm neben dem Signaleingang die untere und obere Grenze des Sensorsignals in mA, sowie die untere und obere Messbereichsgrenze des Sensors übergeben. Das konvertierte Signal wird an das Hauptprogramm zurückgegeben.

Neben dem Strom im Bereich 0 bzw. 4 bis 20 mA als Ausgangssignal der Sensoren, finden auch Spannungssignale (meist 0 bis 5 bzw. 0 bis 10 V) sehr häufig Verwendung. So liefert das eingesetzte pH-Meter beispielsweise eine Spannung zwischen 0 und 10 V als Ausgangssignal. Für die Konvertierung von Spannungssignalen wird das Unterprogramm *SubVi_Voltage_Converter.vi* erstellt. Die Implementierung erfolgt analog zu jener der Stromsignal-Konvertierung.

6.2.3.1 Blockdiagramm

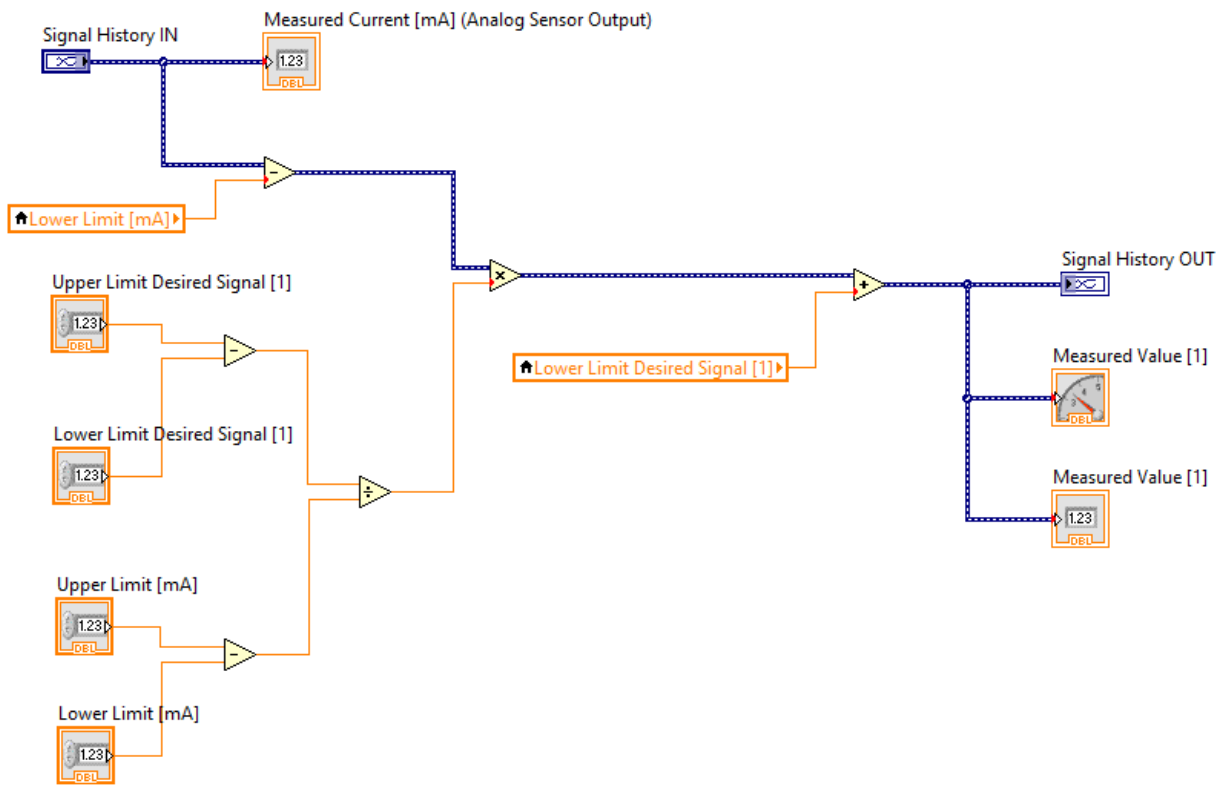


Abbildung 66: Blockdiagramm des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi

6.2.4 Fehlerfilterung

Das vierte Unterprogramm Fehlerfilter dient zur Selektion der verschiedenen Fehlermeldungen in *LabView*. Es ändert sich der Fehlerstatus der jeweiligen Schleife nach jedem Schleifendurchgang, unabhängig ob ein Fehler vorliegt, oder nicht. Grund hierfür ist, da die Abläufe im Hauptprogramm-Teil alle jeweils innerhalb von Schleifen immer wieder erfolgen. Liegt kein Fehler vor, hat der ausgegebene Fehlercode einen Wert größer Null. Im Fall eines tatsächlichen Fehlers, ist der Wert des Fehlercodes negativ. Damit das Programm angehalten und der vorliegende Fehler vom Benutzer quittiert wird, werden die Fehler nur auf tatsächliche Fehler gefiltert. Alle übrigen Wertänderungen werden verworfen.

6.2.4.1 Blockdiagramm

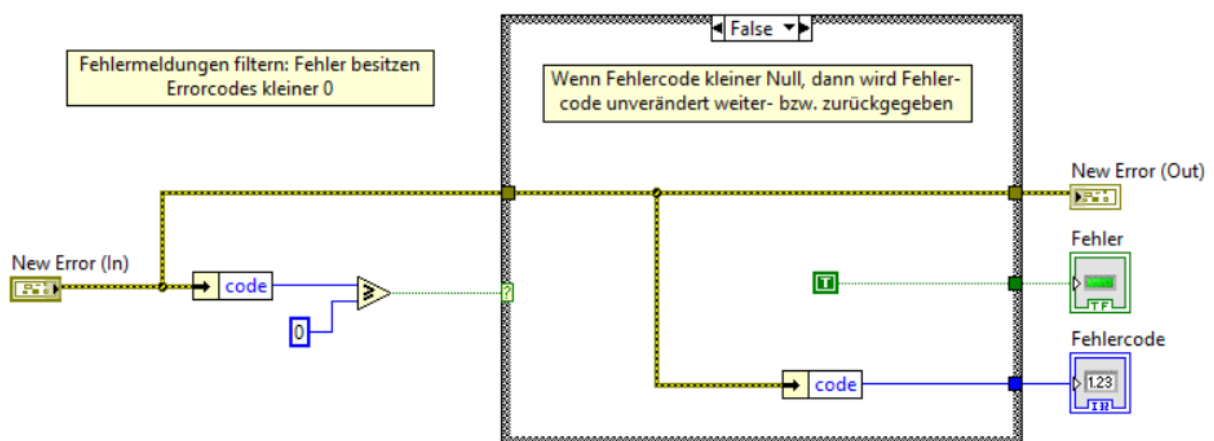


Abbildung 67: Blockdiagramm des Unterprogramms *SubVi_Fehlerfilter.vi*

Ergibt die Abfrage $code \geq 0$ ein logisches TRUE, gibt es keinen Fehler, weshalb die Konstante False an das Boole'sche Anzeigeelement *Fehler* und eine leere Fehlerkonstante an das Fehlerausgabeelement *New Error (Out)* zurückgegeben wird.

6.3 Messdatenspeicherung

Sofern der Benutzer im Register *Logging* den Button *Record data* (siehe Abbildung 58) gedrückt hat, werden die erfassten Messdaten im erstellten Logfile gespeichert. Die verschiedenen Messdaten werden in jener Reihenfolge in die Datei geschrieben, wie es im Unterprogramm *Messdatendatei erstellen* (siehe Kapitel 6.2.1) definiert wurde. Abbildung 68 zeigt die Messdatendatei, nachdem die Datenaufzeichnung, bzw. das Programm beendet wurde.

Date	Time	Error [B00L]	Temp. [°C]	dP [mbar]	pH [1]	F_H2O [1/h]	F_AIR [m³/h]	F_SO2_SET [1/h]	F_SO2_REAL [1/h]	c_SO2 [ppm]	PoM_SO2 []
2019-12-17	13:23:01,000	False	20,772494	1,606584	11,830901	40,000006,000000	60,000000	0,999931	312,643799	Bottom	
2019-12-17	13:23:11,001	False	20,772335	1,574099	11,829696	40,000006,000000	60,000000	0,999997	311,414377	Bottom	
2019-12-17	13:23:21,001	False	20,773846	1,579762	11,828931	40,000007,000000	60,000000	1,000008	312,643799	Bottom	
2019-12-17	13:23:31,000	False	20,773925	1,581550	11,828248	40,000007,000000	60,000000	0,999938	269,859896	Bottom	
2019-12-17	13:23:41,001	False	20,774005	1,603007	11,827315	40,000007,000000	60,000000	0,999955	268,630474	Bottom	
2019-12-17	13:23:51,001	False	20,773766	1,611650	11,828631	40,000007,000000	60,000000	0,999957	268,876358	Bottom	
2019-12-17	13:24:01,001	False	20,773687	1,596749	11,826087	40,000007,000000	60,000000	0,999995	269,941858	Bottom	
2019-12-17	13:24:11,000	False	20,775754	1,628339	11,824774	40,000008,000000	60,000000	0,999992	262,073554	Bottom	
2019-12-17	13:24:21,001	False	20,774244	1,618207	11,824704	40,000008,000000	60,000000	0,999988	236,829412	Bottom	
2019-12-17	13:24:31,001	False	20,774323	1,602709	11,823639	40,000008,000000	60,000000	0,999821	237,485104	Bottom	
2019-12-17	13:24:41,001	False	20,774804	1,578868	11,823229	40,000008,000000	60,000000	0,999994	236,419604	Bottom	
2019-12-17	13:24:51,001	False	20,773448	1,563966	11,822083	40,000008,000000	60,000000	0,999961	236,255681	Bottom	
2019-12-17	13:25:01,002	False	20,772414	1,588106	11,821883	40,000008,000000	60,000000	1,000000	236,501566	Bottom	
2019-12-17	13:25:11,000	False	20,773846	1,599431	11,821398	40,000008,000000	60,000000	1,000056	236,747450	Bottom	
2019-12-17	13:25:21,001	False	20,773528	1,598835	11,820145	40,000008,000000	60,000000	0,999933	236,091758	Bottom	
2019-12-17	13:25:31,001	False	20,773130	1,630724	11,818935	40,000008,000000	60,000000	0,999924	236,091758	Bottom	
2019-12-17	13:25:41,000	False	20,773528	1,675129	11,818097	40,000008,000000	60,000000	1,000020	236,009797	Bottom	
2019-12-17	13:25:51,001	False	20,773528	1,589000	11,817349	40,000008,000000	60,000000	0,999989	235,845874	Bottom	
2019-12-17	13:26:01,000	False	20,773766	1,588702	11,815298	40,000008,000000	60,000000	0,999959	236,501566	Bottom	
2019-12-17	13:26:11,001	False	20,773607	1,607478	11,814383	40,000008,000000	60,000000	1,000021	236,501566	Bottom	
2019-12-17	13:26:21,000	False	20,773687	1,615524	11,812748	40,000008,000000	60,000000	0,999949	235,845874	Bottom	
2019-12-17	13:26:31,001	False	20,774804	1,605988	11,812482	40,000008,000000	60,000000	0,999953	236,091758	Bottom	
2019-12-17	13:26:41,000	False	20,773369	1,618803	11,811350	40,000008,000000	60,000000	1,000013	235,763912	Top	
2019-12-17	13:26:51,001	False	20,772971	1,621783	11,811517	40,000008,000000	60,000000	0,999913	139,049342	Top	
2019-12-17	13:27:01,001	False	20,773687	1,587212	11,809972	40,000008,000000	60,000000	1,000000	104,297666	Top	
2019-12-17	13:27:11,000	False	20,773051	1,529396	11,808686	40,000008,000000	60,000000	0,999960	100,691360	Top	
2019-12-17	13:27:21,000	False	20,773925	1,583338	11,809639	40,000008,000000	60,000000	1,000052	99,216053	Top	
2019-12-17	13:27:31,000	False	20,773687	1,617999	11,806560	40,000008,000000	60,000000	1,000059	98,068592	Top	
2019-12-17	13:27:41,000	False	20,774005	1,593769	11,804997	40,000008,000000	60,000000	0,999958	97,822708	Top	
2019-12-17	13:27:51,001	False	20,774562	1,693308	11,804082	40,000008,000000	60,000000	1,000012	97,986631	Top	
2019-12-17	13:28:01,001	False	20,774800	1,628339	11,802781	40,000008,000000	60,000000	0,999967	97,412900	Top	
2019-12-17	13:28:11,000	False	20,774482	1,641750	11,801308	40,000008,000000	60,000000	1,000002	97,986631	Top	
2019-12-17	13:28:21,000	False	20,774323	1,629830	11,800193	40,000008,000000	60,000000	1,000017	96,921131	Top	
2019-12-17	13:28:31,000	False	20,773687	1,666188	11,798620	40,000008,000000	60,000000	0,999875	97,248977	Top	
2019-12-17	13:28:41,000	False	20,773528	1,636088	11,797762	40,000008,000000	60,000000	1,000223	97,576823	Top	
2019-12-17	13:28:51,000	False	20,771460	1,541913	11,796597	40,000008,000000	60,000000	0,999988	97,003093	Top	
2019-12-17	13:29:01,000	False	20,771142	1,556814	11,796799	40,000008,000000	60,000000	0,999686	97,003093	Top	

Abbildung 68: Messdatendatei nach Beendigung der Datenaufzeichnung

Am Beginn der Datei stehen zunächst allgemeine Informationen über den Dateinhalt geschrieben. Nach diesem Kopf folgen dann die einzelnen Messwerte. Zusätzlich zur gemessenen Schwefeldioxid-Konzentration gibt es noch die Spalte *PoM_SO2*. Diese Spalte gibt Auskunft darüber, welcher der drei Messgasentnahmestellen die gemessene Gaskonzentration zugeordnet werden muss.

Für eine weiterführende Bearbeitung und Auswertung der Messdaten, kann dieses Textdokument in *MS Excel* importiert werden. Zur Trennung der einzelnen Werte sind Tabulatoren enthalten.

7 Inbetriebnahme

Abschließend bedarf es der Durchführung einiger Versuche, anhand derer die ordnungsgemäße Funktion der Anlage festgestellt werden kann. In den folgenden Kapiteln erfolgt die Auswertung der Messdaten, welche im Zuge der Inbetriebnahme-/Abnahmeversuche gewonnen wurden. Für die Auswertung kommen jene Beziehungen zur Anwendung, welche in den Kapiteln 3.3, 4.1 und 5.1.1 hergeleitet und beschrieben wurden.

7.1 Versuchsreihen

Im Zuge der Anlageninbetriebnahme werden insgesamt zwei verschiedene Versuchsreihen, zu je acht Versuchen, durchgeführt. Der Volumenstrom der Flüssigphase wird für beide Versuchsreihen einheitlich mit 40 Liter pro Stunde gewählt.

Die Gasphase wird bei den acht Einzelversuchen, innerhalb der ersten Versuchsreihe mit einem Gesamtgasdurchsatz zwischen 1 und 8 Normkubikmeter pro Stunde variiert. Diese Variation wird für die zweite Versuchsreihe ident übernommen. Die Unterscheidung der beiden Versuchsreihen findet sich beim Gasdurchsatz des Gasmisches $F_{V,MFC,ges}$ welcher über den Massendurchflussregler geregelt wird. In der ersten Versuchsreihe wird dieser Durchsatz konstant mit 100% Förderleistung festgelegt. Dies entspricht 60 Litern pro Stunde SO₂ - Luft - Gemisch (siehe auch Tabelle 21). Die zweite Versuchsreihe wird mit einem Durchsatz von 70 % Förderleistung, also mit 42 Litern pro Stunde durchgeführt (siehe auch Tabelle 22).

Tabelle 21: Parameter der ersten Versuchsreihe

V.nr.	\dot{G} [Nm ³ /h]
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
Weitere Parameter:	
\dot{L}	40 [l/h]
$F_{V,MFC,ges}$	60 [l/h]

Tabelle 22: Parameter der zweiten Versuchsreihe

V.nr.	\dot{G} [Nm ³ /h]
9	1
10	2
11	3
12	4
13	5
14	6
15	7
16	8
Weitere Parameter:	
\dot{L}	40 [l/h]
$F_{V,MFC,ges}$	42 [l/h]

7.2 Abscheideleistung

Nach der Formel 4.21 erfolgt die Ermittlung der erzielten Abscheideleistung der Absorptionsanlage. Die Ergebnisse können der Tabelle 23 und Tabelle 24 entnommen werden.

Tabelle 23: Abscheideleistung der Fallfilmabsorptionsanlage als Resultat der Versuchsreihe 1

V.nr.	$c_{SO_2,B}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	$c_{SO_2,T}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	A_{SO_2} [%]
1	1765,41	283,12	84
2	916,51	252,89	72
3	617,60	213,24	65
4	464,80	183,86	60
5	373,44	158,56	58
6	312,03	136,17	56
7	269,33	115,01	57
8	236,37	97,50	59

Tabelle 24: Abscheideleistung der Fallfilmabsorptionsanlage als Resultat der Versuchsreihe 2

V.nr.	$c_{SO_2,B}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	$c_{SO_2,T}$ [$\frac{mg}{Nm^3}$]	A_{SO_2} [%]
9	1238,90	203,21	84
10	636,35	187,22	71
11	429,64	149,34	65
12	302,68	132,98	59
13	258,69	114,93	56
14	220,38	100,23	55
15	186,94	83,01	56
16	167,50	71,23	57

Abbildung 69 zeigt die Verläufe der Abscheideleistung innerhalb der beiden Versuchsreihen, dargestellt über die Gasgeschwindigkeit w_g .

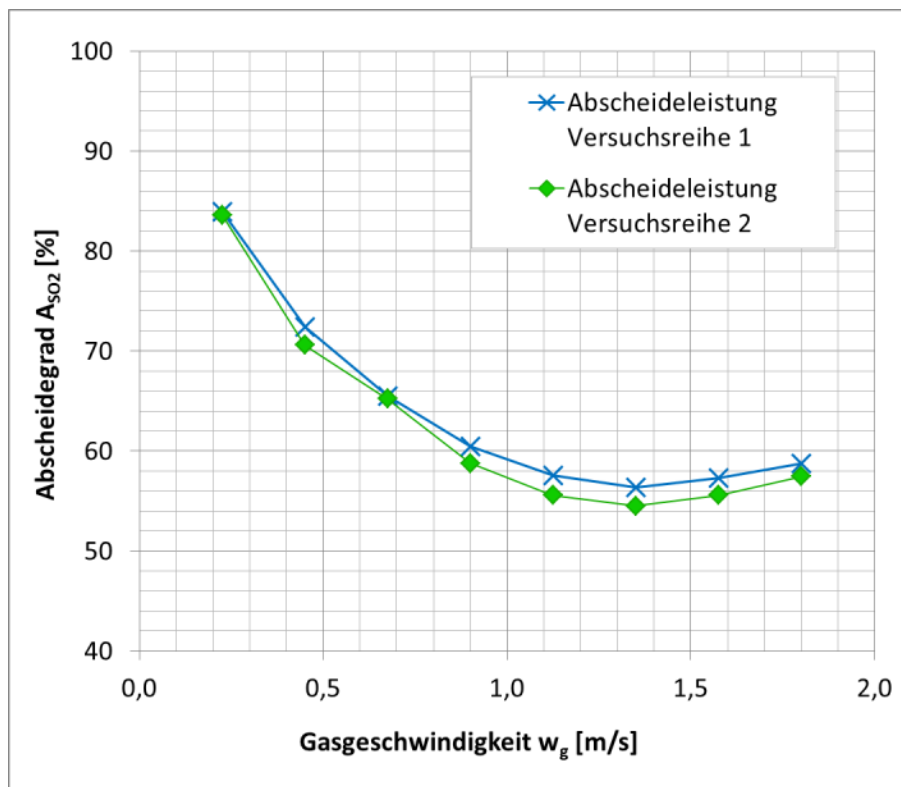


Abbildung 69: Prozentuelle Abscheideleistung für beide Versuchsreihen in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit w_g

Beide Verläufe lassen unabhängig voneinander sehr klar erkennen, dass die Abscheideleistung mit zunehmender Geschwindigkeit der Gasphase signifikant abnimmt. Dies geschieht aufgrund der Tatsache, dass der Stofftransport des SO_2 aus der Gas- in die Flüssigphase einer bestimmten Verweilzeit bedarf und damit den Trennvorgang limitiert. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit der Gasphase steht dem System weniger Zeit für den Stoffaustausch und damit letztendlich für die Abscheidung des Schwefeldioxids zu Verfügung.

Werden beide Versuchsreihen miteinander verglichen, kann bei der zweiten Reihe über den gesamten Verlauf eine annähernd stetig geringere Abscheidung festgestellt werden. Die Erklärung hierfür liegt in der stärkeren Verdünnung, wodurch in der gleichen Gesamtgasmenge weniger Schwefeldioxid-Moleküle vorhanden sind. Infolge der geringeren Konzentration sind die Stofftransportwege etwas länger. Dadurch kann in derselben Zeit weniger SO_2 absorbiert werden, als bei den äquivalenten Einzelversuchen der ersten Versuchsreihe.

7.3 Stoffaustausch

Anhand einer Bilanz um den Absorber (siehe Formel 7.1) soll eine Beziehung zur Ermittlung der (Reaktions-) Geschwindigkeitskonstante gefunden werden. Wie in Kapitel 3.3 bereits festgestellt, müssen im Fall des Typ B Regimes nach Levenspiel die Geschwindigkeitskonstante k und der gaseitige Stoffübergangskoeffizient $\beta_{g,A}$ ident sein. Der Stoffübergangskoeffizient wird über die empirische Sherwood – Beziehung nach *Vauck* (vgl. Formel 4.22 und Formel 4.26) ermittelt.

Die Beziehung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstante nach Formel 7.10 wird nach folgenden Gesichtspunkten hergeleitet:

$$F_{A,o} = F_A + dF_A - r_A'' * dA \quad \text{Formel 7.1}$$

$$dF_A = r_A'' * dA \quad \text{Formel 7.2}$$

$$- r_A'' = k * (C - C^*), \text{ wobei } C^* \sim 0 \quad \text{Formel 7.3}$$

$$F_A = F_V * C_A \quad \text{Formel 7.4}$$

$$dF_A = F_V * dC \quad \text{Formel 7.5}$$

$$\int_0^H dA = \int \frac{dF_A}{r_A''} = F_V * \int_{C_{A,0}}^{C_A} \frac{dC}{k * C} \quad \text{Formel 7.6}$$

$$\text{mit: } A = d * \pi * H \quad \text{Formel 7.7}$$

$$\int_0^H dh = \frac{F_V}{(d_{IR,a} + 2 * a_F) * \pi * k} \int_{C_{A,0}}^{C_A} \frac{dC}{C} \quad \text{Formel 7.8}$$

$$H = \frac{F_V}{(d_{IR,a} + 2 * a_F) * \pi * k} \ln\left(\frac{C_{A,0}}{C_A}\right) \quad \text{Formel 7.9}$$

$$k = \frac{F_V}{(d_{IR,a} + 2 * a_F) * \pi * H} \ln\left(\frac{C_{A,0}}{C_A}\right) \quad \text{Formel 7.10}$$

Angewandt auf die erhobenen Messdaten werden die Resultate erzielt, welche der Tabelle 25 für die erste Versuchsreihe und der Tabelle 26 für die zweite Versuchsreihe entnommen werden können:

Tabelle 25: Stoffübergangskoeffizient und Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Versuchsreihe 1

V.nr.	\dot{G} [Nm ³ /h]	w_g [m/s]	β_g [m/s]	k [m/s]	Abweichung [%]
1	1	0,225	0,001516	0,002206	45,6%
2	2	0,450	0,002695	0,003104	15,2%
3	3	0,675	0,003773	0,003846	1,9%
4	4	0,900	0,004790	0,004472	-6,6%
5	5	1,125	0,005765	0,005163	-10,4%
6	6	1,350	0,006707	0,005997	-10,6%
7	7	1,575	0,007622	0,007180	-5,8%
8	8	1,800	0,008516	0,008540	0,3%

Tabelle 26: Stoffübergangskoeffizient und (Reaktions-) Geschwindigkeitskonstante der Versuchsreihe 2

V.nr.	\dot{G} [Nm ³ /h]	w_g [m/s]	β_g [m/s]	k [m/s]	Abweichung [%]
9	1	0,225	0,001515	0,002179	43,8%
10	2	0,450	0,002693	0,002950	9,5%
11	3	0,675	0,003771	0,003822	1,3%
12	4	0,900	0,004788	0,004275	-10,7%
13	5	1,125	0,005762	0,004890	-15,1%
14	6	1,350	0,006704	0,005699	-15,0%
15	7	1,575	0,007619	0,006850	-10,1%
16	8	1,800	0,008513	0,008246	-3,1%

Die jeweils letzte Spalte gibt an, wie weit die (Reaktionsgeschwindigkeits-) Konstante (Anmerkung: eigentlich experimentell unter Annahme eines Zeitgesetzes erster Ordnung experimentell ermittelte Geschwindigkeitskonstante) prozentuell vom Stoffübergangskoeffizienten abweicht.

In der Abbildung 70 werden die Resultate der Tabelle 25 und der Tabelle 26 in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit in einem Diagramm gemeinsam gegenübergestellt.

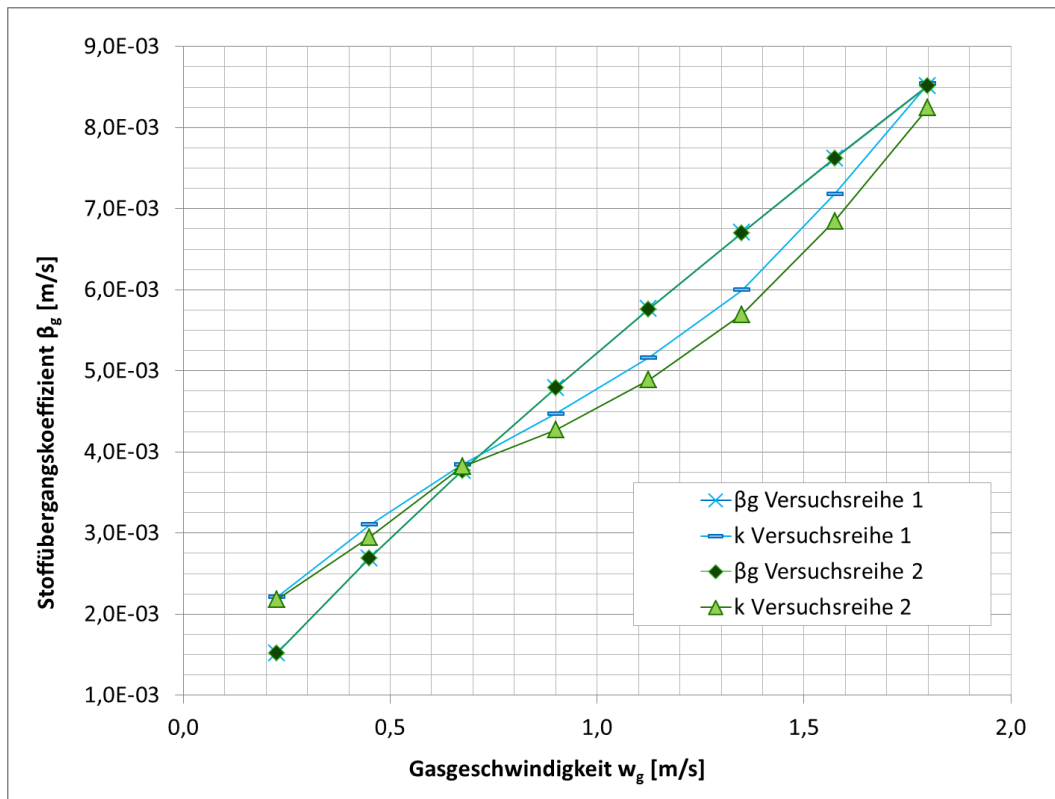


Abbildung 70: Stoffübergangskoeffizienten β_g und (Reaktions-) Geschwindigkeitskonstanten k in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit w_g

Die Verläufe von β_g veranschaulichen sehr gut den Einfluss der Gasgeschwindigkeit auf den Stoffübergang. Im Gegensatz zur Abscheideleistung bewirkt eine Geschwindigkeitszunahme des durchströmenden Gases eine Steigerung des Stoffübergangs.

Des Weiteren lässt sich im Diagramm die jeweilige Abweichung zwischen Geschwindigkeitskonstante und Stoffübergangskoeffizienten deutlich erkennen. Die prozentuelle Abweichung liegt für beide Versuchsreihen, mit Ausnahme der Versuche 1 und 9, bei max. $\pm 15\%$.

Außerdem kann bei den Werten des Stoffübergangskoeffizienten beider Versuchsreihen auch auf eine hohe erzielte Wiederholgenauigkeit geschlossen werden.

7.4 Berechnete Kolonnenhöhe

Aus den erhobenen Messdaten werden zunächst die Stoffmengenanteile des Schwefeldioxids am Eintritt (Bottom) und am Austritt (Top) berechnet. Die gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten stehen bereits aus dem vorigen Kapitel zu Verfügung. Die geometrischen Kenngrößen, welche noch für die Berechnung der Kolonnenhöhe fehlen, werden nach den Definitionen in Kapitel 5.1.1 berechnet. Deren Werte sind für beide Versuchsreihen in Tabelle 27 aufgelistet.

Tabelle 27: Geometrische Kenngrößen zur Berechnung der Kolonnenhöhe für beide Versuchsreihen

Versuchsreihe			1	2
Filmdicke	a_F	[m]	0,000799	0,0008
Freier Kolonnenquerschnitt	S_{Kg}	[m ²]	0,0011836	0,00118351
Stoffaustauschfläche	S_{FF}	[m ²]	0,230425	0,23042496
Spezifische Stoffaustauschfläche	a_{SV}	$\left[\frac{m^2}{m^3}\right]$	91,8302	91,8377

Die Berechnung der Kolonnenhöhe erfolgt abschließend nach Formel 4.20. Für jeden einzelnen der acht Versuche pro Versuchsreihe errechnet sich ein eigener Wert für die Höhe der Kolonne. Die durchschnittliche Kolonnenhöhe wird schließlich durch das arithmetische Mittel der acht Einzelwerte gebildet. Tabelle 28 enthält schließlich die Ergebnisse:

Tabelle 28: Berechnete durchschnittliche Kolonnenhöhen beider Versuchsreihen und deren absolute Abweichung von der tatsächlichen Kolonnenhöhe

Versuchsreihe			1	2
Durchschnittliche Kolonnenhöhe	H_K	[m]	2,17	2,09
Abs. Abweichung von der tats. Höhe	$ \Delta H $	[%]	2,36	1,42

Wie im Kapitel 5.1.1 bereits beschrieben, beträgt die aktive Höhe der Absorptionskolonne h_{K100} 2,12 m. Der direkte Vergleich der tatsächlichen aktiven Kolonnenhöhe mit den beiden berechneten Höhen von 2,17 m bzw. 2,09 m zeigen eine sehr gute Übereinstimmung, bei relativ geringer Abweichung. Dadurch wird gezeigt, dass die Berechnungsgleichung für die Ermittlung der Kolonnenhöhe auf die in Betrieb genommene Absorptionsanlage anwendbar ist.

8 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Planung, Auslegung, der Aufbau und abschließend die Inbetriebnahme/Abnahme einer kompletten Fallfilm - Absorptionsanlage. Das Design der Anlage wurde so gewählt, dass Betriebsparameter, wie z.B. der Gasphasen- und Flüssigphasenvolumenstrom beliebig variiert werden können, um so die Einflüsse auf den Stoffaustausch und damit letztendlich auf die Abscheideleistung untersuchen zu können. Es können die Durchsätze der Gasphase zwischen 0 und 12 Nm³/h und die der Flüssigphase zwischen 0 und 60 L/h stufenlos eingestellt werden. Zusätzlich wurde die Anlage so aufgebaut, dass das verwendete Gas, welches eine festgelegte Konzentration aufweist, vor der Einleitung in die Absorptionskolonne mit Druckluft verdünnt werden kann. Damit kann die Konzentration des Rohgases schließlich auch beliebig eingestellt werden.

Im Zuge der Inbetriebnahme wurde die ordnungsgemäße Funktion der Anlage anhand der Absorption von SO₂ in wässriger NaOH - Lösung bei konstantem pH-Wert (pH 11) überprüft. Für die Inbetriebnahme wurden insgesamt zwei Versuchsreihen, zu je acht Einzelversuchen durchgeführt. Die Betriebsbedingungen hinsichtlich des Gasdurchsatzes wurden für alle sechzehn Versuche variiert, um den Einfluss verschiedener Gasvolumenströme auf den Stofftransport zu überprüfen. Das eingeleitete Gas ist ein variables Gemisch aus Druckluft und SO₂. So wurde in jeder Versuchsreihe der Gesamtdurchsatz zwischen 1 und 8 Nm³/h und darin der SO₂ - Durchfluss mit 60 L/h für die erste und mit 42 L/h für die zweite Versuchsreihe festgelegt.

Der pH - Wert der wässrigen Phase wurde auf 11 eingestellt, da der Partialdruck von Schwefeldioxid vom pH-Wert der wässrigen Lösung abhängt. Für pH Werte größer als 6,3 sinkt der Partialdruck von SO₂ im gas/flüssig Gleichgewicht unter 0,1 Pa, wodurch die Konzentration von SO₂ in der flüssigen Phase annähernd null gesetzt werden kann. Daraus folgt, dass der Stofftransport lediglich vom gaseitigen Stoffübergangskoeffizient β_g und der Stoffaustauschfläche abhängig ist. Zudem muss der Stoffübergangskoeffizient gleich der experimentell ermittelten Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k für ein Zeitgesetz 1. Ordnung sein. Dieser Zusammenhang zwischen β_g und k wurde im Zuge der Inbetriebnahme überprüft.

Die Bestimmung von k erfolgte durch einen bilanziellen Ansatz um den Absorber für Reaktionen erster Ordnung. Um β_g zu bestimmen, wurde ein empirischer Ansatz für die Sherwood-Zahl für Rieselfilme an vertikalen Wänden und Rohren nach *Vauck* verwendet. Alle 16 Experimente zeigen, dass β_g und k in derselben Größenordnung mit einer Abweichung von $\pm 15\%$ zueinander liegen.

Neben dem gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten und der (experimentell ermittelten) Geschwindigkeitskonstante wird auch die Abscheideleistung für die Funktionsüberprüfung im Zuge der Anlageninbetriebnahme ermittelt. Anhand der Ergebnisse aller Versuche kann sehr deutlich festgestellt werden, dass die Abscheideleistung (erwartungsgemäß) zwar abnimmt, wenn der Gasdurchsatz zunimmt. Damit nimmt die Gasgeschwindigkeit zu, wodurch die Verweilzeit verringert wird. Die Versuche zeigen jedoch auch sehr eindrucksvoll einen mit der Gasgeschwindigkeit zunehmenden Phänomenalkoeffizienten, woraus man sehr schnell schließen kann, dass bei den durchgeführten Versuchen der Stofftransport in der Gasphase limitierend war.

Zudem wurde eine Berechnungsgleichung für die Ermittlung der Kolonnenhöhe entwickelt, welche auf dem HTU-NTU-Konzept basiert und für den reaktionsbeeinflussten Stoffaustausch mit dem kinetischen Regime des Typs B nach *Levenspiel* kombiniert wurde. Durch den Vergleich der tatsächlichen Kolonnenhöhe mit den daraus berechneten Kolonnenhöhen konnte sehr deutlich gezeigt werden, dass die entwickelte Berechnungsgleichung die Fallfilmabsorptionsanlage sehr gut abbildet.

Zusammenfassend kann mit den Ergebnissen der Inbetriebnahme die ordnungsgemäße Funktion der aufgebauten Fallfilm-Absorptionsanlage bestätigt werden.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] M. Schultes, *Abgasreinigung*. Ludwigshafen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [2] K. Sattler, *Thermische Trennverfahren Grundlagen, Auslegung, Apparate*, 3. Auflage. Wiley VCH, 2001.
- [3] K. Strauss, *Kraftwerkstechnik zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen*, 7. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [4] K. Görner and K. Hübner, *Gasreinigung und Luftreinhaltung*. Essen: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.
- [5] A. Mersmann, M. Kind, and J. Stichlmair, *Thermische Verfahrenstechnik Grundlagen und Methoden*, 2., wesent., vol. 2. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005.
- [6] E.-U. Schlünder and F. Thurner, *Destillation, Absorption, Extraktion*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1986.
- [7] R. Goedecke, *Fluid-Verfahrenstechnik Grundlagen, Methodik, Technik, Praxis*. Hanau: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [8] G. Kracker-Semler, "Chemische Absorption von SO₂ in wäßriger H₂SO₄/H₂O₂ - Lösung in einer Fallfilmkolonne," Technische Universität Graz, 2001.
- [9] T. Wallek, "Vorlesungsunterlagen zur Vorlesung Chemische Thermodynamik I," Graz, 2015.
- [10] K. Johannes, "Vorlesungsunterlagen zur Vorlesung Stoffübertragung," Graz, 2014.
- [11] H. D. Baehr and K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 9., aktual. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016.
- [12] D. S. Christen, *Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik - Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure*, 2. bearbei. Zürich: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [13] M. Kraume, *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik - Grundlagen und apparative Umsetzungen*, 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- [14] A. Pfennig, E. Aksamija, and H. Noll, "Skriptum zur Vorlesung Thermische Trennverfahren," Graz, 2013.
- [15] M. Pflügl and A. Rentz, *Stoffaustausch*, 5., korrig. Graz: Technische Universität Graz, Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik und Anlagentechnik, 2001.
- [16] S. Kabelac, M. Kind, H. Martin, D. Mewes, K. Schaber, and P. Stephan, *VDI-Wärmeatlas*, 11. Auflage, 11., bearb. Düsseldorf: Springer Vieweg Verlag, 2013.
- [17] O. Levenspiel, *Chemical Reaction Engineering*, Third edit. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [18] Walter Schmidt Chemie GmbH, "Sicherheitsdatenblatt gemäß 1907/2006/EG, Artikel 31, für destilliertes Wasser," Berlin, 2017.
- [19] Carl Roth GmbH + Co KG, "Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung

- (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) für Natronlauge," CAS-Nr. 1310-73-2, 2019.
- [20] Linde Gas GmbH, "Sicherheitsdatenblatt Luft, verdichtet," SDS Nr.: 000010022047, 2017.
- [21] Air Liquide Deutschland GmbH, "Sicherheitsdatenblatt gemäß RL 1907/2006/EG (REACH) für Schwefeldioxid," 2016.
- [22] Merck KGaA, "Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 für Natriumsulfit," Darmstadt, 2018.
- [23] R. H. Perry and D. W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, 8th editio. The MacGraw-Hill Companies, Inc., 2007.
- [24] B. E. Poling, J. M. Prausnitz, and J. P. O'Connell, *The Properties of Gases and Liquids*, 5th editio. Mc Graw Hill Companies, Inc., 2001.
- [25] G. Kracker-Semler, "Katalytische und Photokatalytische Beschleunigung der Reaktivabsorption von Sauerstoff - Experimentelle Untersuchung und Modellierung," Technische Universität Graz, 2004.
- [26] M. Vorbach, "Grundlagen und Modellierung der Absorption mit chemischer Reaktion," Technische Universität Graz, 2001.
- [27] Zapfel Wilhelm, "Grundlagen der reduzierenden Absorption von Stickstoffoxiden," Technische Universität Graz, 1996.
- [28] M. Lehr, "Experimentelle Untersuchung der physikalischen Absorption in einer Fallfilmkolonne mit konzentrischem Ringspalt," Technische Universität Graz, 1996.
- [29] K.-H. Grote and J. Feldhusen, *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [30] ABB Automation GmbH, "Datenblatt Advance Optima AO2000 Serie Kontinuierliche Gasanalysatoren Modelle AO2020, AO2040," 2012.
- [31] Institut für analytische Chemie und Lebensmittelchemie, Materialien;, Institut für chemische Technologie von Materialien;, and I. für E. und Feinstrukturforschung, "Skriptum zur Laborübung Grundlagen der angewandten Analytik VT," 2016.
- [32] National Instruments Corporation, "NI cDAQ 9174 Specifications," Austin, Texas, 2013.
- [33] National Instruments Corporation, "Getting Started Guide NI 9203," Austin, Texas, 2015.
- [34] National Instruments Corporation, "Getting Started Guide NI 9219," Austin, Texas, 2016.
- [35] ABB Automation GmbH, "Betriebsanleitung AO2000 Kontinuierliche Gasanalysatoren," Frankfurt am Main, 2018.

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Semitrockene Rauchgasreinigung durch Sprühabsorption [2]	6
Abbildung 2: Vereinfachtes, schematisches Nasswaschverfahren zur Entschwefelung von Rauchgasen einer Müllverbrennungsanlage [2]	6
Abbildung 3: Grundlegendes Verfahrensschema eines Absorptionsprozesses [5]	7
Abbildung 4: Absorptionsprozess mit Regeneration des Waschmittels durch Drosseln (m.o.) und Rektifizieren (re.) [5]	8
Abbildung 5: Grafische Gegenüberstellung der Absorption (links) und der Rektifikation (rechts) [5]	9
Abbildung 6: Oberflächenabsorber [6]	15
Abbildung 7: Fallfilmabsorber [6]	15
Abbildung 8: Füllkörperkolonne [6]	15
Abbildung 9: Blasensäule [6]	15
Abbildung 10: Bodenkolonne [6]	15
Abbildung 11: Strahldüsenwäscher [6]	15
Abbildung 12: Begaster Rührkessel [6]	15
Abbildung 13: Sprühkolonne [6]	15
Abbildung 14: Venturiwäscher [6]	15
Abbildung 15: Entscheidungsbaum für die Auswahl eines Absorbers [4]	16
Abbildung 16: Gültigkeitsbereiche des Henry'schen und des Raoult'schen Gesetzes anhand des Zusammenhangs der Partialdrücke und der Flüssigkeitsmolanteile [10]	18
Abbildung 17: Diagramm zur Erläuterung des Henry'schen (HG) und des Raoult'schen (RG) Gesetzes [2]	18
Abbildung 18: Diffusion durch einen ruhenden Flüssigkeitsfilm [11]	23
Abbildung 19: Stoffaustausch durch äquimolare und einseitige Diffusion [12]	24
Abbildung 20: Schematische Darstellung der Konzentrationsprofile an der Phasengrenze der Filmtheorie [7]	27
Abbildung 21: Konzentrationsprofil der Filmtheorie nach Lewis und Whitman [15]	29
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Stoffaustauschs laut der Penetrationstheorie [13]	32
Abbildung 23: Möglicher Verlauf der Stromlinien beim Kontakt zweier Flüssigkeiten oder einer Flüssigkeit mit einem Gas gemäß der Oberflächenerneuerungstheorie [11]	33
Abbildung 24: Anwendung des theoretischen Trennstufenmodells bei Boden- und Packungskolonnen [7]	35
Abbildung 25: Differenzielle Massenbilanz in einer Kolonne mit Zweiphasen- kontakt	36
Abbildung 26: Absorption von Gas A in der Flüssigkeit basierend auf der Filmtheorie mit anschließender Reaktion in der Flüssigphase mit B, zur Bestimmung der kinetischen Regime [17]	40
Abbildung 27: Konzentrationsprofile und Reaktionsorte der acht kinetischen Regime bei der Flüssigphasenreaktion $\nu_A \cdot A \text{ vom Gas} + \nu_B \cdot B \text{ Flüssigkeit} \rightarrow$ $\nu_P \cdot P \text{ (Flüssigkeit)}$ über den gesamten Bereich der Reaktionsgeschwindigkeit [17]	42
Abbildung 28: Abhängigkeit des SO_2 - Partialdrucks vom pH-Wert [28]	50
Abbildung 29: Vierstufige Luftaufbereitungseinheit – Kombination aus Filterregelventil, Fein-, Feinst- und Aktivkohlefilter (von links nach rechts)	58

Abbildung 30: Rohrreibungszahl λ nach Colebrook und (gestrichelt) nach Nikuradse [29].....	60
Abbildung 31: Instrumentenrack mit dem Gasanalysegerät (oben), der Messgasfördereinheit (mittig) und der montierten Ventiltafel inklusive Beschriftung (unten). Rechts vom Instrumentenrack befindet sich das Anlagensteuerungspanel.....	63
Abbildung 32: Fertigungszeichnung der Ventiltafel zur Montage der Hähne für die Messgasweiche, aus Aluminiumblech mit 2 mm Blechdicke	64
Abbildung 33: Anlagenschema der Fallfilm-Absorptionsanlage.....	65
Abbildung 34: Fallfilm-Absorptionsanlage (Ansicht von vorne).....	66
Abbildung 35: Wesentliche Einzelteile der Fallfilm-kolonne: Einleitstutzen, Innenrohr und Außenrohr	67
Abbildung 36: Schematische Aufbaudarstellung des Kopfes der Fallfilmkolonne	67
Abbildung 37: Detailansicht der Anordnung des Innenrohrs und des Einleitstutzens mit O-Ring und Dichtscheibe.....	68
Abbildung 38: Detailansicht der geschlossenen Seite des Einleit-stutzens mit den Bohrungen an der Mantelfläche	68
Abbildung 39: Relevante Abmessungen der Fall-filmkolonne	69
Abbildung 40: Anlagenschema der Flüssigphasenseite.....	71
Abbildung 41: Messstelle der pH-Wert Messung in der Rückfluss-leitung.....	72
Abbildung 42: Anordnung der Komponenten der Flüssigphasenseite	72
Abbildung 43: Zahnradpumpe P1.....	73
Abbildung 44: Schlauchquetschpumpe P2	73
Abbildung 45: Anlagenschema der Gasphase inkl. der Messgasführung	74
Abbildung 46: Statischer Mischer MS1 nach dem Schwebekörperdurchflussmesser, zur homogenen Vermischung der Druckluft und des SO2 -Luft-Gemisches.....	75
Abbildung 47: Sieb (Lochscheibe aus PTFE) für den statischen Mischer.....	75
Abbildung 48: Schleifenförmiger Verlauf der Rohgaszuführung	76
Abbildung 49: Kopf der Fallfilm-Absorptionsanlage: Absorbenszulauf (Bildmitte) mit Belüftungshahn V – BL (links oben) und Reingasleitung (unten)	77
Abbildung 50: Drucktransmitter DT1 von <i>Sensorshop24.de</i>	78
Abbildung 51: Dreidimensionale Ansicht von links oben des konstruierten Drucktransmitter-Adapters	79
Abbildung 52: Frontseite des pH-Reglers AIC 3.01	80
Abbildung 53: Rückseite des pH-Reglers AIC 3.01	81
Abbildung 54: Prinzip eines Photometers in der Gasanalyse [31]	83
Abbildung 55: Schaltplan der Anlagensteuerung und der elektrischen Versorgung	84
Abbildung 56: Schaltplan der Messtechnik-Komponenten. Die Abbildungen der beiden NI-Module und des Stromversorgungsteckers des NI Modulschlittens wurden den jeweiligen Bedienungsanleitungen (siehe [32]–[34]) entnommen.....	86
Abbildung 57: Register <i>MFC Config.</i> zur Konfiguration des Massendurchflussmessers zu Beginn des Programms	88
Abbildung 58: Register <i>Logging</i> , in welchem der Benutzer die Speicherung der Messdaten mit einstellbarer Speicherrate aktivieren bzw. deaktivieren kann	88
Abbildung 59: Register <i>Error Handling</i> bei aufgetretenem Fehler	89
Abbildung 60: Register <i>Visualisation</i> mit zeitlichem Verlaufsdiagramm, Anzeigen für sämtliche Messwerte und Benutzerinformationen bei einem aufgetretenen Fehler	89

Abbildung 61: Blockdiagramm (Teil 1) des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi.....	97
Abbildung 62: Blockdiagramm (Teil 2a - Truecase) des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi.....	97
Abbildung 63: Blockdiagramm (Teil 2b - Falsecase) des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi.....	98
Abbildung 64: Blockdiagramm des Unterprogramms	99
Abbildung 65: Grafische Darstellung der Signaldaten des Drucktransmitters zur Konvertierung	100
Abbildung 66: Blockdiagramm des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi	101
Abbildung 67: Blockdiagramm des Unterprogramms <i>SubVi_Fehlerfilter.vi</i>	102
Abbildung 68: Messdatendatei nach Beendigung der Datenaufzeichnung	103
Abbildung 69: Prozentuelle Abscheideleistung für beide Versuchsreihen in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit w_g	105
Abbildung 70: Stoffübergangskoeffizienten βg und (Reaktions-) Geschwindigkeitskonstanten k in Abhängigkeit von der Gasgeschwindigkeit w_g	108
Abbildung 71: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi.....	152
Abbildung 72: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi.....	152
Abbildung 73: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi.....	153
Abbildung 74: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi.....	153
Abbildung 75: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi	154
Abbildung 76: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi	154
Abbildung 77: Anschlussfeld des Unterprogramms <i>SubVi_Fehlerfilter.vi</i>	155
Abbildung 78: Frontpanel des Unterprogramms <i>SubVi_Fehlerfilter.vi</i>	155

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anorganische und die wichtigsten organischen Abgaskomponenten [1]	3
Tabelle 2: Drei Arten des Phasenkontaktes bei der Absorption [5], [6]	12
Tabelle 3: Beispiele für Absorptiv/Absorbens-Kombinationen [4]	14
Tabelle 4: Einteilung der Absorberarten anhand der Einbauten [2], [4]	14
Tabelle 5: Verhaltensweise der acht kinetischen Regime [17].....	42
Tabelle 6: Charakterisierung der vorliegenden kinetischen Regime anhand der Hatta-Zahl [17]	45
Tabelle 7: Stoffdaten von Wasser, Natriumhydroxid, Luft und Schwefeldioxid [16], [23]–[25]	48
Tabelle 8: Leistungsdaten des 2001 für Absorptionsversuche mit SO ₂ verwendeten MFC [8].....	56
Tabelle 9: Leistungsdaten des gewählten Massendurchflussreglers	57
Tabelle 10: Gewählte Komponenten für die Luftaufbereitung aus der Serie MS6 der Firma <i>Festo</i>	58
Tabelle 11: Technische Daten der angeschafften <i>Messgasfördereinheit SCC-S</i> von <i>ABB</i>	62
Tabelle 12: Relevante Abmessungen der Fallfilmkolonne	68
Tabelle 13: Kenndaten der Pumpe P1	73
Tabelle 14: Kenndaten der Pumpe P1	73
Tabelle 15: Kenndaten des Temperatursensors	78
Tabelle 16: Kenndaten des Drucktransmitters	79
Tabelle 17: Kenndaten der pH-Elektrode	80
Tabelle 18: Kenndaten der ersten Pufferlösung	81
Tabelle 19: Kenndaten der zweiten Pufferlösung.....	81
Tabelle 20: Technische Daten des kontinuierlichen Gasanalysators, der Serie AO2000 von <i>ABB</i> [30]	83
Tabelle 21: Parameter der ersten Versuchsreihe.....	104
Tabelle 22: Parameter der zweiten Versuchsreihe	104
Tabelle 23: Abscheideleistung der Fallfilmabsorptionsanlage als Resultat der Versuchsreihe 1.....	105
Tabelle 24: Abscheideleistung der Fallfilmabsorptionsanlage als Resultat der Versuchsreihe 2.....	105
Tabelle 25: Stoffübergangskoeffizient und Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Versuchsreihe 1	107
Tabelle 26: Stoffübergangskoeffizient und Reaktionsgeschwindigkeitskonstante der Versuchsreihe 2	107
Tabelle 27: Geometrische Kenngrößen zur Berechnung der Kolonnenhöhe für beide Versuchsreihen	109
Tabelle 28: Berechnete durchschnittliche Kolonnenhöhen beider Versuchsreihen und deren absolute Abweichung von der tatsächlichen Kolonnenhöhe	109

10 Anhang

10.1 Angebote

10.1.1 SO₂ – Luft - Gasmisch



AIR LIQUIDE AUSTRIA GmbH, Köglerweg 50, 8042 Graz-Messendorf

TU Graz
Institut für chemische Verfahrenstechnik
Herr Alexander Meister
Inffeldgasse 25c
8010 Graz

E-Mail: alexander.meister@student.tugraz.at

AIR LIQUIDE AUSTRIA GmbH
A-8042 Graz-Messendorf, Köglerweg 50
Telefon: +43/(0)810 242 427
Telefax: +43/(0)316/46 91-122
Email: technik.at@airliquide.com

Ihr Zeichen / Ihre Kundennummer:
Ihre Kunden Nr.: 519933

Unser Zeichen:
MSG/ds/Angebot

Tel. DW
136

Fax DW
127

Datum:
3. April 2017

Angebot MSG 306835

Sehr geehrter Herr Meister,

wir danken für Ihre Anfrage und haben gerne nachfolgendes Angebot für Sie ausgearbeitet.

Pos. 1) 1 Stk. Gasmisch, abgefüllt in eine 50 Liter Leihflasche

Zusammensetzung:

10000 Vol-ppm	Schwefeldioxid N38
Rest	Synthetische Luft N50
Herstellgenauigkeit:	+/- 5 % rel.
Analysengenauigkeit:	+/- 2 % rel.
Ventilart:	Prüfgas Edelstahl
Flaschenart:	Alu Prüfgas
Fülldruck bei 15°C:	105 bar
Stabilität:	12 Monate, mit Zertifikat und Anhänger
Lieferzeit:	ca. 5-6 Wochen, ab schriftlicher Auftragserteilung
AL-SAP:	2316 3286-10

Sondernettopreis je Fl. Flg. EUR 289,64

Die Dienstleistungen wie Miete der Leihflaschen und die Zustellung werden gemäß den derzeit gültigen Sonderkonditionen verrechnet.

Pos. 2) 1 Stk. Druckminderer

Flaschendruckminderer 2-stufig
Material: Edelstahl
Regelbereich: bis 3 bar; mit Fremdgasspülblock
inkl. Ganzmetallschlauch zur Fremdgasspülung mit Stickstoff (ohne Stickstoffregler)
Lieferzeit: ca. 3 Wochen ab Bestelleingang
Art.Nr. 900.000.000 Sonderpreis je Stück EUR 2.772,00



Pos. 3) Alternative Druckminderer (nicht empfehlenswert)

Druckminderer HD.S 200-8-5 mit Manometer ohne Spülvorrichtung Lieferzeit innerhalb 1 Woche ab Bestelleingang Artikel Nr. 4.221.622.547	Sonderpreis je Stück	EUR	761,36
Verpackung klein Art.Nr. 801.000.011		EUR	5,60
Versandspesen Tarif 1 Art.Nr. 802.300.012		EUR	5,80

Bemerkung:

Giftige Gase sind in Sicherheitsflaschenschränken aufzubewahren. In diesen Schränken ist die Entnahme über Entspannungsstationen zu empfehlen. Spülleitung und Sicherheitsventil sind so ins Freie zu führen, sodass weder Personen noch die Umwelt gefährdet sind.

<u>Angebotsgültigkeit:</u>	3 Monate
<u>Lieferzeit:</u>	wie angeführt
<u>Zahlung:</u>	3% innerhalb von 30 Tagen, 60 Tage netto Kasse

Es gelten unsere allgemeinen Verkaufs- und Lieferbedingungen, die wir Ihnen auf Wunsch gerne nachreichen.

Die angegebenen Preise verstehen sich exkl. 20 % MwSt., ab Vertriebsstelle Schwechat.

Bei Fragen steht Ihnen Herr Markus Schlögl gerne zur Verfügung. Sie erreichen ihn unter der Telefonnummer: 0316/4691-136 oder via email: markus.schloegl@airliquide.com

Ihre diesbezügliche Bestellung richten Sie bitte mit Angabe der **Angebots Nr. MSG 306835** an unser Kunden Service-Center, die Faxnummer lautet: 0316/4691-122 oder via email: technik.at@airliquide.com.

Wir beraten Sie gerne und freuen uns auf Ihren Anruf!

Mit freundlichen Grüßen

AIR LIQUIDE AUSTRIA GmbH
Research & Analysis

Thomas Plhak
Verkaufsleitung




Markus Schlögl
Kundenmanager

10.1.2 Luftaufbereitung







Bitte beachten Sie, dass Mengen auf Standard-Liefereinheiten gerundet wurden.

Kundennummer	Ihre Referenz	Angebotsnummer	Datum	Seite
60035284	per Email	2061011572	22.09.2016	2 von 5

Bezeichnung	Materialnummer	Einzelpreis	Menge Stück/Meter	Gesamtpreis EUR
<p>Filter-Regelventil</p>  <p>Position 10 MS6-LFR-1/2-D6-CRM-AS Maximaler Ausgangsdruck 7 bar, 5 µm-Filter, mit Manometer, abschließbarer Reglerkopf, Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb, manueller Kondensatablass, Durchflussrichtung von links nach rechts. Standard MS 6 6 Filterregelventil LFR Innengewinde G1/2 1/2 0,3 ... 7 bar D6 5 µm C Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb R manuell M Mit Zubehör abschließbar AS HS: 84811005 Ursprungsland: HU Gewicht: 1.046 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	529176	63,79	1	63,79
<p>Feinfilter</p>  <p>Position 20 MS6-LFM-1/2-BRM 1 µm-Filter, Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb, manueller Kondensatablass, Durchflussrichtung von links nach rechts. Standard MS 6 6 Fein- und Feinfilter LFM Innengewinde G1/2 1/2 1 µm B Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb R manuell M HS: 84213920 Ursprungsland: HU Gewicht: 734 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	529659	74,05	1	74,05
<p>FEINSTILT.-SET</p>  <p>Position 30 MS6-LFM-1/2-ARM Standard MS 6 6 Fein- und Feinfilter LFM Innengewinde G1/2 1/2 0,01 µm A Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb R manuell M HS: 84213920 Ursprungsland: HU Gewicht: 604,062 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	529739	122,96	1	122,96

Anhang

<p>Aktivkohlefilter</p>  <p><small>📄 📏 📐 🔍</small></p>	<p>Position 40 MS6-LFX-1/2-R Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb, Durchflussrichtung von links nach rechts. Standard 6 Aktivkohlefilter Innengewinde G1/2 Kunststoffschale mit Kunststoffschutzkorb HS: 84213920 Ursprungsland: HU Gewicht: 738 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	<p>529679</p>	<p>74,05</p>	<p>1</p>	<p>74,05</p>
<p>Modulverbinder</p>  <p><small>📄 📏 📐 🔍</small></p>	<p>Position 50 MS6-MV HS: 73269098 Ursprungsland: HU Gewicht: 54,091 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	<p>532799</p>	<p>5,26</p>	<p>1</p>	<p>5,26</p>
<p>Befestigungswinkel</p>  <p><small>📄 📏 📐 🔍</small></p>	<p>Position 60 MS6-WP HS: 76169990 Ursprungsland: HU Gewicht: 187,200 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	<p>532195</p>	<p>11,24</p>	<p>2</p>	<p>22,48</p>
<p>Schlauchtülle</p>  <p><small>📄 📏 📐 🔍</small></p>	<p>Position 70 N-1/2-P-9 mit Dichtring. HS: 76169990 Ursprungsland: IN Gewicht: 45,300 G Lieferzeit: 2-3 Tage</p>	<p>3610</p>	<p>7,38</p>	<p>3</p>	<p>22,14</p>
<p>Summe Nettopreis</p>			<p>EUR</p>	<p>384,73</p>	

10.1.3 Massendurchflussregler

10.1.3.1 MFC des Herstellers Bronkhorst

— hl-trading gmbh —

hl-trading gmbh • Rochusgasse 4 • A 5020 Salzburg

TU Graz Institut für Chemische
Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Herrn Alexander Meister
Infeldgasse 25 C/II
8010 Graz
Österreich

ANGEBOT

Nummer : **42181159**
Datum : 17.04.2018
Ihre Anfrage : Telefonat mit Hrn. Hlafka
unsere Lief.-Nr. : 30004106
Ihre UID-Nr. : ATU57477929
Ihre Kundenr. : 20506
Techn.Bearbeitung : Harald Hlafka
Kfm.Bearbeitung : F. Waldmann/M. Hlafka

Wir danken für Ihre Anfrage und bieten freibleibend aufgrund unserer Verkaufsbedingungen an:

Pos.	Bezeichnung	Stk.	Einzelpreis	Gesamt
01	F-201DV-AGD-33-E BRONKHORST® Thermischer Massendurchflussregler Serie LowΔP, Ausführung in Schutzklasse IP-40 Ursprung: Niederlande / Stat. Warennummer: 90261081 Gewicht/Stk.: ca. 0,6 kg / Garantie: 36 Monate ab Lieferdatum Kalibrierung / Betriebsparameter: Regelbereich = 0,02 - 1 l/min Luft mit max. 28 g/m ³ SO ₂ P1 = 3 barü / P2 = 1,5 barü / T = 20 °C inkl. 3-Punkt-Kalibrierzertifikat Genauigkeit: ±1 % vom Endwert (unter Einhaltung der angegebenen Betriebsbedingungen) Betriebsspannung: +15 - 24 Vdc / Schnittstelle: RS-232 Soll/Istwertsignal: 4 - 20 mA aktiv Voreinstellung (factory preset) = analog Anschlüsse: 6 mm Klemmringverschraubungen Ventulfunktion: normal geschlossen (N.C.) Dichtungen: EPDM	1,00	1.475,00	1.475,00
02	BRIGHT B2 BRONKHORST® Digitales Anzeige/Steuermodul Ausführung in Schutzklasse: IP-40 inkl. Montageset mit 80 cm Kabel Ursprung: Niederlande / Stat. Warennummer: 90261081 Gewicht/Stk.: ca. 0,4 kg / Garantie: 36 Monate ab Lieferdatum Display: 1,8" Color-TFT, Betriebsspannung +15 - 24 Vdc kommuniziert über RS-232 mit dem MFM/MFC Sollwert, Zählfunktion + Alarmgrenzwert über Tastatur wählbar.	1,00	376,00	376,00
			Übertrag:	1.851,00

* Im Einzelpreis der Position enthalten

hl-trading gmbh • Rochusgasse 4 • A 5020 Salzburg • www.hl-trading.at
Tel: +43-662-43 94 84 • Fax: +43-662-43 92 23 • e-mail: sales@hl-trading.at
Geschäftsführung: Harald Hlafka, Martina Hlafka • FN 250535i, LG Salzburg

Bankverbindung: Volksbank Salzburg • BLZ 45 010 • Kto.Nr. 122 1357
IBAN AT05 4501 0000 0122 1357 • BIC VBOEATWWSAL
UID-Nr. ATU58095812 • ARA Lizenz-Nr. 6132

———— hl-trading gmbh ————

ANGEBOT

Nummer : 42181159
 Datum : 17.04.2018
 Seite : 2

Pos.	Bezeichnung	Stk.	Einzelpreis	Gesamt
			Übertrag:	1.851,00
03	PIPS-EL (Plug-in PS Sub-D9) BRONKHORST® Steckernetzteil mit Anschlusskabel Ausführung in Schutzklasse: IP-40 Ursprung: Niederlande / Stat. Warennummer: 90261081 Gewicht/Stk.: ca. 0,3 kg / Garantie: 36 Monate ab Lieferdatum Primär: 100 - 240 Vac Sekundär: +15 Vdc / 0,5 A (max. 7,5 W)	1,00	90,00	90,00
04	7.03.366 Splitadapter-Kabel, IP-40 , Länge 3 m RS-232 Kabel mit Splitadapter für analog I/O und Spannungsversorgung. Ursprung: Niederlande / Stat. Warennummer: 90261081 Gewicht/Stk.: ca. 0,3 kg / Garantie: 36 Monate ab Lieferdatum	1,00	91,00	91,00
05	9.09.122 RS-232 zu USB 2.0 Konverter Ursprung: Niederlande / Stat. Warennummer: 90261081 Gewicht/Stk.: ca. 0,1 kg / Garantie: 36 Monate ab Lieferdatum	1,00	33,00	33,00

Übertrag: 2.065,00

* Im Einzelpreis der Position enthalten

hl-trading gmbh • Rochusgasse 4 • A 5020 Salzburg • www.hl-trading.at
 Tel: +43-662-43 94 84 • Fax: +43-662-43 92 23 • e-mail: sales@hl-trading.at
 Geschäftsführung: Harald Hlafka, Martina Hlafka • FN 250535i, LG Salzburg

Bankverbindung: Volksbank Salzburg • BLZ 45 010 • Kto.Nr. 122 1357
 IBAN AT05 4501 0000 0122 1357 • BIC VBOEATWWSAL
 UID-Nr. ATU58095812 • ARA Lizenz-Nr. 6132

— hl-trading gmbh —

ANGEBOT

Nummer : 42181159
Datum : 17.04.2018
Seite : 3

Pos.	Bezeichnung	Stk.	Einzelpreis	Gesamt
			Übertrag:	2.065,00
	5 % Sonderrabatt			-103,25
			Netto-Betrag	€ 1.961,75
			+20,00 % MwSt.	€ 392,35
			Gesamtbetrag	€ 2.354,10

Lieferadresse:

TU Graz Institut für Chemische
Verfahrenstechnik und Umwelttechnik
Infeldgasse 25 C/II
8010 Graz
Österreich
0316-873-7461 = Sekr.

Rechnungsadresse:

TU Graz
Finanzen und Rechnungswesen
Rechbauerstrasse 12
8010 Graz
Österreich

Lieferzeit: ca. 7 Wochen nach Auftragsingang und Vorliegen aller technischen Angaben.

Lieferart: frei Haus innerhalb Österreich

Zahlungsbedingungen: fällig ab Rechnungsdatum,
innerhalb von 14 Tagen mit 2% Skonto,
innerhalb von 30 Tagen rein netto.

Bindefrist: 30 Tage nach Angebotsdatum

Mit freundlichen Grüßen

— hl-trading gmbh —

* Im Einzelpreis der Position enthalten

hl-trading gmbh • Rochusgasse 4 • A 5020 Salzburg • www.hl-trading.at
Tel: +43-662-43 94 84 • Fax: +43-662-43 92 23 • e-mail: sales@hl-trading.at
Geschäftsführung: Harald Hlafka, Martina Hlafka • FN 250535i, LG Salzburg

Bankverbindung: Volksbank Salzburg • BLZ 45 010 • Kto.Nr. 122 1357
IBAN AT05 4501 0000 0122 1357 • BIC VBOEATWWSAL
UID-Nr. ATU58095812 • ARA Lizenz-Nr. 6132

10.1.3.2 MFC des Herstellers Sierra Instruments

weiss automations systeme



Datum:	9. Apr 2018	Seite:	1 von 2
An:	Technische Universität Graz Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik Inffeldgasse 25C 8010 Graz Österreich	Fax:	
		Tel:	
		Email:	
zu Hd.:	Herr Alexander Meister	Ihre Ref.Nr.:	per e-mail / Hr. Meister
Von:	Ing. Hermann Zeymer	Unsere Ref.Nr.:	18AH3654-1 ANGEBOT

Sehr geehrter Herr Meister,

Wir bedanken uns für Ihre Anfrage und bieten auf deren Basis und unserem Telefonat wie folgt an:

Technische Daten

Medium:	Luft	Druck: Vor:	3,6 bar
	Luft 98%, SO ₂ 2%	Nach:	1,5 bar
Durchfluss:	2 NI/min	Temperatur:	20°C
Ausrichtung:	horizontal		

Pos.1.) 1 Stk SIERRA MassFlowController
Type C100L-RD-10-OV1-SK1-PV2-V1-S4-C0-GS-100-T8F(EU)
 Massedurchflusscontroller nach thermischen Messprinzip (Bypass Laminar-System)
 mit Remote/Pilotmodul (3m Kabel)
 Material: 316
 Dichtungen: Körper Viton; Solenoid Ventil Sitz: Kalrez
 Regelung mit direkt angesteuerten Solenoid-Ventil,
 Genauigkeit +/- 1%, Wiederholbarkeit +/- 0,25% des Messbereichs
 max. Durchfluss 50 NI/min; kalibriert auf 2 NI/min
 Anschlüsse: 6 mm Kompressionsverschraubung
 Ausgabesignal: 4 – 20 mA über D15 Schnittstelle,
 Eingabesignal/Set-Point: analog 4 – 20 mA D15 Schnittstelle oder über Pilotmodul
 digitale Kommunikation optional
 Stromversorgung 24 VDC, mit 220 Volt mit Netzgerät 100-T10F(EU) fly leads
 Dial-A-Gas Technologie (10 Gase vorprogrammiert), 1 vorprogrammiertes Gas (Argon)
 mit Luft/SO₂ Mischung substituiert
 Inkl. Software und Dokumentation bestehend aus
 Kalibrierungszertifikat, CE Zertifikat (Serie) und Manual
 Weitere Angaben siehe beiliegende techn. Dokumentation

Preis pro Stk.	EUR	2.224,00	gesamt	EUR	2.224,00
----------------	-----	----------	--------	-----	----------


Pos.2.) Transport & Verpackung

Preis pro Stk.	EUR	24,00	gesamt	EUR	24,00
----------------	-----	-------	--------	-----	-------

Weiss Automations Systeme Ges.m.b.H
 1230 Vienna, Scheffeneegg. 4/1, Austria
 UID Nr.: ATU 183 36101
 FN 71.927a

-- 1 --

Tel.: +43 (0) 1 865 06 89
 Fax.: +43 (0) 1 865 06 89 15
 Email.: was@was.at
www.was.at

weiss automations systeme 

Preiserstellung: in EUR, excl. MWSt.
Zahlung: 30 Tage netto
Lieferzeit: ca- 4 – 6 Wochen
Gültigkeit des Offerts: 60 Tage
Unsere UID Nr.: ATU 18336101

Wir hoffen, dass unser Angebot Ihren Vorstellungen entspricht und würden uns freuen Ihren Auftrag zu erhalten, für Fragen stehen wir selbstverständlich gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen



Weiss Automations Systeme GmbH
Ing. Hermann Zeymer

Weiss Automations Systeme Ges.m.b.H
1230 Vienna, Scheffenebergg. 4/1, Austria
UID Nr.: ATU 183 36101
FN 71.927a

-- 2 --

Tel.: +43 (0) 1 865 06 89
Fax.: +43 (0) 1 865 06 89 15
Email.: was@was.at
www.was.at

10.1.4 Gasfördereinheit

ABB AG · Clemens-Holzmeister-Straße 4 · 1109 Wien

Technische Universität Graz
Rechnungswesen und Finanzen
Rechbauerstraße 12
8010 GRAZ
ÖSTERREICH

Versandanschrift:

Technische Universität Graz
Institut für Chemische Verfahrenstechnik
und Umwelttechnik
z.H. AG Siebenhofer/Letonja
Inffeldgasse25C/EG
8010 GRAZ
ÖSTERREICH

Angebot

Angebot Nr. 220579686/3001
Datum: 08.09.2016
Kundennr.: 843612600

Vertriebsbeauftragter: Manfred Panhans

Abt.: ATABB/PA
Tel.: +43 316 6075 6811
Fax.: +43 316 6075 6820
E-Mail: manfred.panhans@at.abb.com

Sachbearbeiter: Brigitta Gradauer

Abt.: ATABB/PA
Tel.: +43 732 7650 6412
Fax.: +43 0732/7650 6418
E-Mail: brigitta.gradauer@at.abb.com

Techn.Sachb.: Markus Hochpöchler

Abt.: ATABB/PA
Tel.: +43 732 7650 6425
Fax.: +43 732 7650 6418
E-Mail: markus.hochpoechler@at.abb.com

Ihre Anfrage:**SAP-BNr.: 4500083033**

vom: 07.09.2016
Tel.: 0316 8730
Fax.: 0316 8736562-

Integrierter Bestandteil des Angebotes sind die AGB der ABB AG Wien im Anhang.
Sollten abgestimmte Bedingungen mit ABB AG bestehen, so kommen diese vorrangig zur Anwendung.

Angebotsgültigkeit: von 08.09.2016 bis 06.12.2016

Lieferzeit: ca. 6 Wochen

Angebotsbasis:

Gem. Besprechung zwischen Frau Bettina Koch und Herrn Manfred Panhans vom 07.09.2016.

Aufgabenstellung:

Erstellung eines Angebotes über eine Gasaufbereitungseinheit vom Typ SCC-S.

Lieferausschlüsse:

Alle Lieferungen und Leistungen, die nicht ausdrücklich in unserem Angebot angeführt sind, sind in diesem und dem von uns angebotenen Preis nicht enthalten.

Zentrale:
ABB AG
Clemens-Holzmeister-Straße 4
Business Park Vienna
A-1109 Wien
Tel +43(0) 1 601 09-0
Fax +43(0) 1 601 09-8910

Bundesländer-Büros:
A-4020 Linz, Industriezeile 42
Tel.(0732)7650-0,Fax(0732)7650-6492
A-6020 Innsbruck, Klostersgasse 11
Tel.(0512)5329-0,Fax(0512)63 25-12
A-8051 Graz, Exerzierplatzstraße 95
Tel.(0316) 60 75-0,Fax (0316) 60 75-6820



A-5071 Wals bei Sbg., Lagerhausstraße 30
Tel.(0662)850150-0,Fax(0662)850150-6519
A-9020 Klagenfurt,Brown-Boveri-Straße 2
Tel.(0463)42542-0,Fax(0463)42 5 44
ABB Robotertechnik:
A-2351 Wr. Neudorf, Brown-Boveri-Str. 1
Tel.(01) 60109-3996,Fax (01) 60109-8301

Deutsche Bank AG, Frankfurt
BIC/SWIFT: DEUTDEFFXXX
UID Nr. ATU14757903
Handelsgericht Wien FN 57678x
DVR:0053988
Von uns gel. Verpackungen sind
lizenz. ARA-Lizenz N 5994
IBAN DE24500700100850713900

Angebot
Nr. 220579686 vom 08.09.2016

Seite 2 / 5

Pos.	Artikel Nr. Menge	Bezeichnung	Preis / Preiseinheit	Wert
10	W	SCC-S Gasfördereinheit SCC-S <u>19" Ausführung mit folgenden Einbauten:</u> - 1 Kondensatwächter - 1 Messgasförderpumpe - 1 Strömungswächter mit Nadelventil - 1 3-Wege Prüfgashahn, manuell - mit Peltierkühler und Kondensatpumpe Spannungsversorgung: 230V 50 Hz		
	1 ST		3.339,00 EUR / 1 ST	3.339,00 EUR
	Rabatt Netto %		12,000- %	400,68- EUR
			2.938,32 EUR / 1 ST	2.938,32 EUR
Stat. Waren-Nr.: 11111111 Ursprungsland: Österreich				

Summe Zu-/Abschläge Positionen 400,68-
Gesamtbetrag 2.938,32 EUR
 zzgl. der jeweils gültigen MwSt.

Lieferbedingungen: DAP, Graz**Zahlungsbedingungen:** 30 Tage netto

Wir behalten uns vor, die Zahlungskonditionen erneut zu verhandeln, sofern ein begründeter Zweifel an der Zahlungsfähigkeit oder Kreditwürdigkeit des Auftraggebers vorliegt.

ABB AG
 PAA-Process Automation
 Analytical Measurements
 A-4020 Linz, Industriezelle 42
 Tel. 0732/765040, Fax DW 6418

Zentrale:
 ABB AG
 Clemens-Holzmeister-Straße 4
 Business Park Vienna
 A-1109 Wien
 Tel. +43(0) 1 601 09-0
 Fax +43(0) 1 601 09-8910

Bundesländer-Büros:
 A-4020 Linz, Industriezelle 42
 Tel. (0732)7650-0, Fax (0732)7650-6492
 A-6020 Innsbruck, Klostersgasse 11
 Tel. (0512)5325-0, Fax (0512)53 25-12
 A-8051 Graz, Exerzierplatzstraße 95
 Tel. (0316) 60 75-0, Fax (0316) 60 75-6820



A-5071 Wals bei Sbg., Lagerhausstraße 30
 Tel. (0662)850150-0, Fax (0662)850150-6519
 A-9020 Klagenfurt, Brown-Boven-Straße 2
 Tel. (0463)42542-0, Fax (0463)42 5 44
 ABB Robotertechnik:
 A-2351 Wr. Neudorf, Brown-Boveri-Str. 1
 Tel. (01) 60109-3996, Fax (01) 60109-8301

Deutsche Bank AG, Frankfurt
 BIC/SWIFT: DEUTDEFFXXX
 UID Nr. ATU14757903
 Handelsgericht Wien FN 57678x
 DVR:0053988
 Von uns gel. Verpackungen sind
 lizenziert. ARA-Lizenz N 5984
 IBAN DE24500700100850713900

10.2 Gerätedaten

10.2.1 Messgasfördereinheit SCC-S

Quelle: ABB Homepage, Downloads für SCC-C

<https://new.abb.com/products/measurement-products/de/analytische-messtechnik/kontinuierliche-gasanalysatoren/kontinuierliche-gasanalyse-messgasaufbereitung/scc-c>

Datenblatt – Systemkomponenten für die Messgasaufbereitung

<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=DS%2fSCC-DE&LanguageCode=de&DocumentPartId=&Action=Launch>

Messgasfördereinheit SCC-S



- **Prozessbewährte Baugruppen**
 - Membranpumpe zur Gasförderung
 - Membranfilter/Kondensatwächter
 - Durchflusswächter mit Nadelventil
 - Kugelhahn/Magnetventile zur Prüfgasaufschaltung
 - Peltier-Kühler mit Kondensatpumpe
- Ideal für den Einsatz in einfachen Prozessen (nichtkorrosives Messgas)
- Einfache Installation und Anschlusstechnik
- Gehäuseausführung für 19-Zoll-Gestellmontage und Wandmontage (4 HE, IP20)
- Preisgünstige Systemlösung zusammen mit Gasanalysatoren der EasyLine-Serie

Messgaseintrittsbedingungen

Messgasdruck

$p_{abs} = 70$ bis 105 kPa (0,7 bis 1,05 bar)

Messgasdurchfluss

Gasweg: 7 bis 70 l/h

Bypass: 15 bis 150 l/h (nicht in Versionen mit Peltier-Kühler)

Messgaseintrittstemperatur

10 bis 50 °C

Messgaseintrittstaupunkt

Versionen mit Peltier-Kühler: max. 50 °C (bei max. 25 °C Umgebungstemperatur)

Versionen ohne Peltier-Kühler: Der Taupunkt des Messgases muss um mindestens 5 °C niedriger als die niedrigste Umgebungstemperatur im gesamten Messgasweg sein.

Betriebsdaten

Vorlaufzeit

Versionen mit Peltier-Kühler: ca. 10 Minuten

Versionen ohne Peltier-Kühler: sofort einsatzbereit

Dichtigkeit

5×10^{-6} hPa l/s

Durchflussanzeige und -einstellung

Schwebekörper-Durchflussmesser mit Nadelventil (metallfrei)

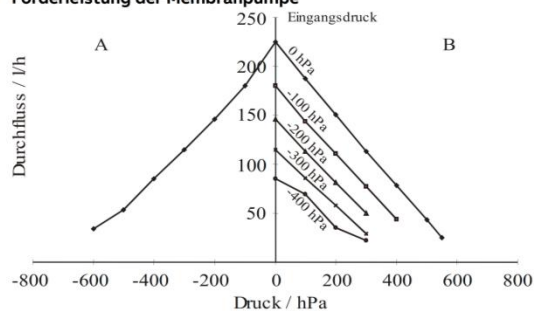
Austrittstaupunkt (Versionen mit Peltier-Kühler)

3 °C

Kondensataustrag (Versionen mit Peltier-Kühler)

Schlauchpumpe: Förderleistung ca. 300 ml/h bei 5 U/min, Druckfestigkeit $p_{abs} = 50$ bis 150 kPa (0,5 bis 1,5 bar), Schlauchmaterial TPE, Schlauchlebensdauer ca. 5 Monate, Leistungsaufnahme 3,5 VA, Gewicht ca. 0,6 kg

Förderleistung der Membranpumpe



A Eingang: Unterdruck, Ausgang: Atmosphärendruck

B Eingang: gemäß Diagramm, Ausgang: Überdruck

Anzeige und Statussignalisierung

Temperaturregelung und -anzeige (Versionen mit Peltier-Kühler)

Temperaturregler mit Ziffernanzeige der Kühlertemperatur in °C; Sollwert werkseitig auf 3 °C eingestellt, kann vor Ort geändert werden.

Statussignalisierung

Summenstatussignal der Kondensat-, Durchfluss- und Kühlerüberwachung; Potentialfreier Wechsler, Kontaktbelastung 24 V DC/AC, 1 A. Statusanzeige der Kondensatüberwachung: Rote LED auf der Frontplatte

Applikation: Peltier-Kühler für Verbrennungsabgase

Applikation 1

SO₂ 0 bis 75 mg/m³, NO 0 bis 100 mg/m³, Messung mit Uras26

Messgaseintrittstaupunkt am Kühlereingang	Umgebungstemperatur	Durchfluss 30 l/h	60 l/h	90 l/h
30 °C	10 °C	X	X	X
	20 °C	X	X	-
	30 °C	X	X	-
	40 °C	-	-	-
50 °C	10 °C	X	X	X
	20 °C	X	X	-
	30 °C	X	-	-
	40 °C	-	-	-

X: zulässig, -: nicht zulässig

Applikation 2

SO₂ 0 bis 400 mg/m³, NO 0 bis 100 mg/m³, Messung mit Uras26 (auch für CO, CO₂ und O₂)

Messgaseintrittstaupunkt am Kühlereingang	Umgebungstemperatur	Durchfluss 30 l/h	60 l/h	90 l/h
30 °C	10 °C	X	X	X
	20 °C	X	X	X
	30 °C	X	X	X
	40 °C	X	X	X
50 °C	10 °C	X	X	X
	20 °C	X	X	X
	30 °C	X	X	X
	40 °C	X	X	X

Konstruktion

Bauform

19-Zoll-Gehäuse (4 HE) für Gestell- und Wandmontage

Montage

Gestellmontage auf Tragschienen, Wandmontage mit vormontierten Befestigungswinkeln am Gehäuse. Die Gas- und Elektroanschlüsse befinden sich bei Gestellmontage auf der Gehäuserückseite und bei Wandmontage auf der Gehäuseoberseite. Sie können vor Ort ummontiert werden. Wandabstände bei Einbau beachten: Seitenwände links und rechts mindestens 35 mm, Rückwand mindestens 25 mm. Bei Version mit Peltier-Kühler ist zu Geräten mit Wärmeentwicklung mindestens 1 HE Abstand einzuhalten. Gerätegeneigung max. 5°.

Gehäusewerkstoff und -farbe

Stahlblech, verzinkt, basaltgrau (RAL 7012), Frontplatte lichtgrau (RAL 7035)

Gehäuseschutzart

IP20 nach EN 60529

Abmessungen

siehe Seite 16

Gewicht

ca. 17 kg

Werkstoffe der medienberührten Teile

Glas, Glasfaser, EPDM, ETFE, FPM, PP, PPH, PVC, PVDF, TPE

Gasanschlüsse

Messgaseingang

PVDF-Winkelverschraubung für Schlauch 6 x 4 x 1 mm

Prüfgaseingänge

PPH-Verschraubung für Schlauch 6 x 4 x 1 mm

Gasausgänge

PPH-Verschraubung für Schlauch 6 x 4 x 1 mm

Elektrische Anschlüsse

Energieversorgung

Kaltgeräteeinbaustecker (Kabel mit Schutzkontaktstecker, Länge 2 m, im Lieferumfang enthalten)

Statussignal (Standard) und externe Magnetventile (Option)

8-polige Steckerleiste (siehe Anschlussbild, Gegenstecker im Lieferumfang enthalten)

Umgebungsbedingungen

Umgebungstemperatur

Betrieb: 10 bis 40 °C,
Lagerung und Transport: -25 bis 60 °C

Relative Luftfeuchte

≤ 75 % im Jahresmittel, seltene und leichte Betauung zulässig,
≤ 90 % an 30 Tagen im Jahr

Energieversorgung

Eingangsspannung

230 V AC ± 10 %, 50 Hz oder 115 V AC ± 10 %, 60 Hz

Leistungsaufnahme im Betrieb

230 V AC, 50 Hz, max. 300 VA

Geräteabsicherung

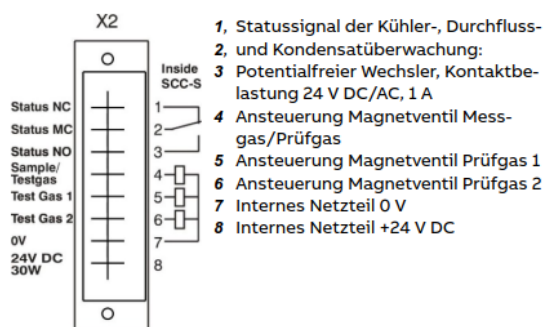
Feinsicherung, 3,15 A träge

Optionen

Internes Netzteil/Leistungsstufe

Zur Ansteuerung von max. 3 internen oder externen Magnetventilen, Betriebsspannung 24 V DC, Leistung max. 30 VA, Feinsicherung 3 A

Anschlussbild



- 1, Statussignal der Kühler-, Durchfluss- und Kondensatüberwachung;
- 2, Potentialfreier Wechsler, Kontaktbelastung 24 V DC/AC, 1 A
- 3, Ansteuerung Magnetventil Messgas/Prüfgas
- 4, Ansteuerung Magnetventil Prüfgas 1
- 5, Ansteuerung Magnetventil Prüfgas 2
- 6, Internes Netzteil 0 V
- 7, Internes Netzteil +24 V DC
- 8

Das Anschlussbild zeigt die interne Verdrahtung der Messgasfordereinheit.

Das eingebaute Netzteil kann auch zur Versorgung von externen Magnetventilen verwendet werden: Klemme 7 = 0 V, Klemme 8 = +24 V, maximale Leistung 30 VA bei 24 V DC.

Sicherheit

Prüfung nach EN 61010-1

Schutzklasse

I

Überspannungskategorie/Verschmutzungsgrad

II/2

Sichere Trennung

Galvanische Trennung der Energieversorgung 115/230 V AC von den übrigen Stromkreisen durch verstärkte oder doppelte Isolation. Funktionskleinspannung (PELV) auf der Niederspannungsseite

Elektromagnetische Verträglichkeit

Prüfung nach EN 61326-1

Störaussendung

Klasse B

Störfestigkeit

Industrielle Umgebung

Mechanische Beanspruchung

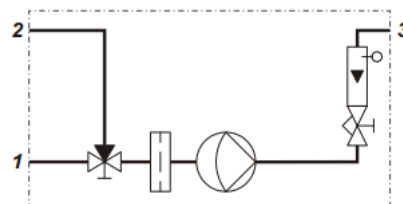
Prüfung nach EN 60068-2-27 und EN 60068-2-6

Betrieb

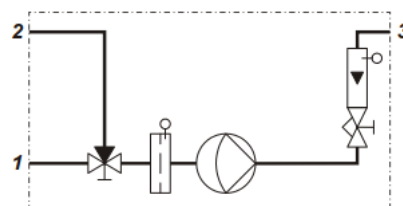
Schwingen: 1 g / ±0,08 mm / 10 bis 150 Hz, 3 x 2 Zyklen

Pneumatikpläne

Version 1 Bestellnummer 23236-0-X11000XX0000



Version 2 Bestellnummer 23236-0-X21000XX0000



... Messgasfördereinheit SCC-S

Magnetventile für interne Prüfgasaufschaltung

3/2-Wege Magnetventil: 1 Stück, zur Umschaltung Messgas-Prüfgas, Typ Klappankerventil, Werkstoffe PVDF und FPM, Energieversorgung 24 V DC, Ansteuerung über einen Digitalausgang des Gasanalysators oder einer SPS.

2/2-Wege Magnetventil: max. 2 Stück, zur Prüfgasaufschaltung, Typ Wippenventil mit Trennmembrane, Werkstoffe PPH und FPM, Energieversorgung 24 V DC, Ansteuerung über einen Digitalausgang des Gasanalysators oder einer SPS.

Kondensataustrag für externen Kühler

Schlauchpumpe: Förderleistung ca. 300 ml/h bei 5 U/min, Druckfestigkeit $p_{abs} = 50$ bis 150 kPa (0,5 bis 1,5 bar), Schlauchmaterial TPE, Schlauchlebensdauer ca. 5 Monate, Leistungsaufnahme 3,5 VA, Gewicht ca. 0,6 kg

Zertifizierungen

IECEE CB Scheme – Sicherheit

Die Messgasfördereinheit SCC-S ist zertifiziert gemäß dem „IEC system for mutual recognition of test certificates for electrical equipment“. Sie stimmt überein mit der Norm IEC 61010-1 (3rd Edition).

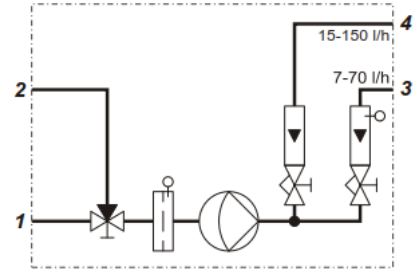
Zertifikat-Nr. SI-6537

CSA – Sicherheit

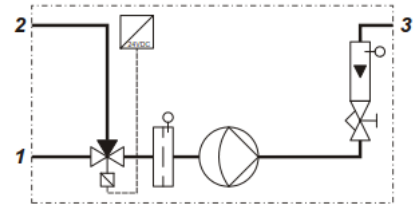
Die Messgasfördereinheit SCC-S ist zertifiziert für den Einsatz in „General Purpose“-Umgebungen. Sie stimmt überein mit den Normen CAN/CSA-C22.2 No. 61010-1-04 und UL Std. No. 61010-1 (2nd Edition).

Zertifikat-Nr. 2504652

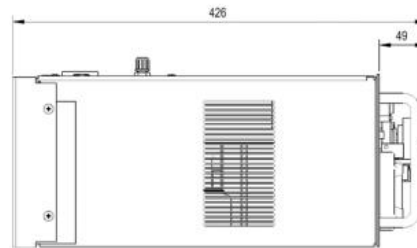
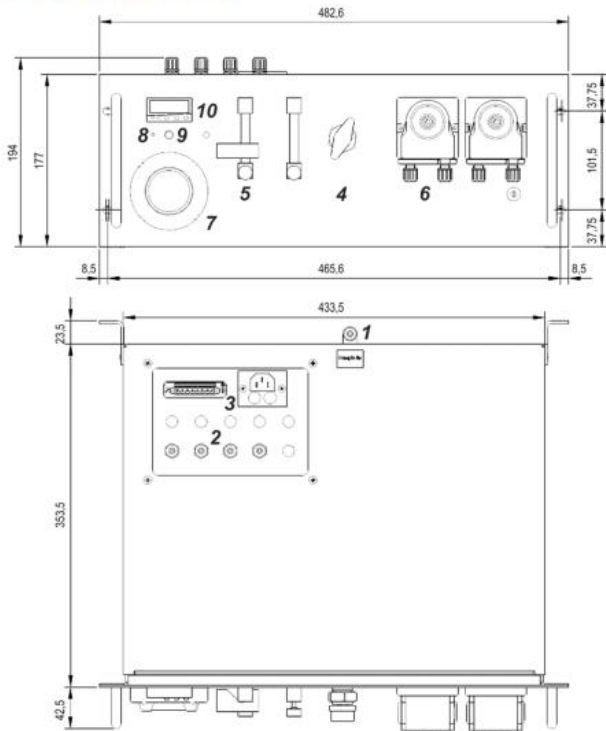
Version 3 Bestellnummer 23236-0-X31000XX0000



Version 4 Bestellnummer 23236-0-X22000XX0000



Abmessungen (in mm)



- 1 Messgaseingang
- 2 Messgasausgang, Bypassausgang und Prüfgaswege über Kugelhahn oder Magnetventil
- 3 Energieversorgungsanschluss und elektrische Anschlüsse für Statussignal, Magnetventilsteuerung und 24 V DC
- 4 Kugelhahn für Prüfgasaufgabe
- 5 Durchflusswächter mit Nadelventil
(Option: Zweiter Durchflusswächter für Bypass)
- 6 Schlauchpumpe
(Option: Zweite Schlauchpumpe für externen Kühler)
- 7 Membranfilter oder Kondensatwächter
- 8 LED-Anzeige Kondensatalarm, rot
- 9 Pumpenschalter
- 10 Temperaturregler für Kühler

Anmerkung: Die Abbildung zeigt Optionen. Umfang und Ausstattung der Bestellausführung können davon abweichen.

10.2.2 Gasanalysatormodul Limas 11

Prozessphotometer-Analysatormodul Limas11

Messprinzip und Anwendung

Gasfilter-Korrelation oder Wellenlängenvergleich im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich $\lambda = 200 \dots 600 \text{ nm}$ (Limas11 UV) sowie im infraroten Spektralbereich $\lambda = 2,5 \dots 10 \mu\text{m}$ (Limas11 IR).

Photometer zur Messung von 1 bis 4 Messkomponenten

Für die Messung in korrosiven, toxischen und brennbaren Gasen stehen Messküvetten aus unterschiedlichen Materialien zur Verfügung (siehe Seite 8).

Messkomponenten und Messbereiche

Das Analysatormodul Limas11 hat pro Messkomponente einen physikalischen Messbereich. Aus dem physikalischen Messbereich können – gemäß Bestellung – kleinere Messbereiche elektronisch abgeleitet werden. Der kleinste Messbereich ist der Messbereich 1.

Messkomponente	Kleinster Messbereich Klasse 1	Kleinster Messbereich Klasse 2	Gasgruppe ¹⁾
Limas11 UV:			
NO ²⁾	0... 50 ppm	0... 10 ppm	A
SO ₂	0... 150 ppm	0... 25 ppm	A
NO ₂	0... 250 ppm	0... 50 ppm	B
NH ₃	0... 100 ppm	0... 30 ppm	B
H ₂ S	0... 50 ppm	0... 25 ppm	B
Cl ₂	0... 250 ppm	0... 100 ppm	D
CS ₂	0... 100 ppm	0... 50 ppm	C
COS	0... 500 ppm	0... 250 ppm	C
Limas11 IR:			
CO	0...1000 ppm	0... 500 ppm	A
CO ₂	0... 300 ppm	0... 150 ppm	A
HCl	0...5000 ppm	0...2500 ppm	D
CH ₄	0...2000 ppm	0...1000 ppm	A
C ₂ H ₂	0...2500 ppm	0...1250 ppm	B
C ₂ H ₄	0...3000 ppm	0...1500 ppm	B
C ₂ H ₆	0... 500 ppm	0... 250 ppm	B
C ₃ H ₆	0...1000 ppm	0... 500 ppm	B
C ₃ H ₈	0... 300 ppm	0... 150 ppm	B
C ₄ H ₁₀	0... 500 ppm	0... 250 ppm	B

1) siehe Preisinformation

2) Für die Selektivierung auf die Messkomponente NO wird die UV-RAS-Methode (UV-Resonanzabsorption) angewendet.

Weitere Messkomponenten auf Anfrage.

Anzahl der Messbereiche

1...4 Messbereiche pro Messkomponente

Größte Messbereiche

0...100 Vol.-% oder 0 Vol.-%...Sättigung oder 0 Vol.-%...UEG
Messbereiche innerhalb von Zündgrenzen können nicht ausgeführt werden.

Messbereichsverhältnis

Messbereiche frei einstellbar innerhalb des Messbereichsverhältnisses 1:20 bezogen auf den werksseitig vorgegebenen Bezugsmessbereich

Messbereiche mit unterdrücktem Nullpunkt

Elektronische Unterdrückung des Nullpunktes,
Unterdrückungsverhältnis max. 1: 10

Stabilität

Die folgenden Daten gelten unter der Bedingung, dass alle Einflussgrößen (z. B. Durchfluss, Temperatur und Luftdruck) konstant sind. Sie beziehen sich auf den Messbereich 1 in einem ausgelieferten Analysatormodul.

Linearitätsabweichung

≤ 1 % der Messspanne; Option: Linearisierung gemäß EPA-Spezifikation für Kfz-Abgasmessungen

Wiederholpräzision

≤ 0,5 % der Messspanne

Nullpunktsdrift

≤ 2 % der Messspanne pro Woche; für Messbereiche kleiner als Klasse 1 bis hin zu Klasse 2: ≤ 1,5 % der Messspanne pro Tag (Empfehlung: tägliche automatische Nullpunktkalibrierung)

Empfindlichkeitsdrift

≤ 1 % des Messwertes pro Woche

Ausgangssignalschwankung (2 σ)

Limas11 UV: ≤ 0,5 % der Messspanne bei elektronischer T90-Zeit = 10 s; Limas11 IR: ≤ 0,5 % der Messspanne bei elektronischer T90-Zeit (statisch/dynamisch) = 60/5 s; für Messbereiche kleiner als Klasse 1 bis hin zu Klasse 2: ≤ 1 % der Messspanne

Nachweisgrenze (4 σ)

≤ 1 % der Messspanne; für Messbereiche kleiner als Klasse 1 bis hin zu Klasse 2: ≤ 2 % der Messspanne

Einflüsseffekte

Durchflusseinfluss

Durchfluss im Bereich 20...100 l/h: innerhalb der Nachweisgrenze

Begleitgaseinfluss/Querempfindlichkeit

Für die Auslegung des Analysators ist die Kenntnis der Messgaszusammensetzung erforderlich.
Selektivierungsmaßnahmen zur Verringerung des Begleitgaseinflusseffektes (Optionen): Einbau von Filterküvetten oder interne elektronische Querempfindlichkeits- oder Trägergaskorrektur einer Messkomponente durch die anderen mit dem Limas11 gemessenen Messkomponenten.

Temperatureinfluss

Umgebungstemperatur im zulässigen Bereich,
Thermostatisierung der Messküvette auf +60 °C
– am Nullpunkt: ≤ 1 % der Messspanne pro 10 °C;
für Messbereiche kleiner als Klasse 1 bis hin zu Klasse 2:
≤ 2 % der Messspanne pro 10 °C
– auf die Empfindlichkeit: ≤ 1 % des Messwertes pro 10 °C

Luftdruckeinfluss

– am Nullpunkt: kein Einflusseffekt
– auf die Empfindlichkeit mit Druckkorrektur mittels eingebautem Drucksensor: ≤ 0,2 % des Messwertes pro 1 % Luftdruckänderung
Der Drucksensor befindet sich im Messgasweg, wenn die internen Gasleitungen als Schläuche ausgeführt sind.
Der Anschluss des Drucksensors ist über einen Schlauch nach außen geführt, wenn die internen Gasleitungen als Rohre ausgeführt sind.
Arbeitsbereich des Drucksensors: $p_{\text{abs}} = 600 \dots 1250 \text{ hPa}$

Energieversorgungseinfluss

24 V DC ± 5 %: ≤ 0,2 % der Messspanne

Prozessphotometer-Analysatormodul Limas11

Dynamisches Verhalten

Anwärmzeit
ca. 2,5 h

T_{90} -Zeit

$T_{90} = 4$ s bei Messküvettenlänge = 262 mm und Messgasdurchfluss = 60 l/h ohne Signaldämpfung (Tiefpassfilter).
Tiefpass-Zeitkonstante einstellbar im Bereich 0...60 s.

Kalibrierung

Nullpunktkalibrierung
mit Inertgas, z. B. Stickstoff, oder mit messkomponentenfreier Umgebungsluft

Endpunktkalibrierung
mit gasgefüllten Kalibrierküvetten (Option) oder mit Prüfgas. Es wird empfohlen, die Sollwerte der Kalibrierküvetten einmal jährlich zu überprüfen.

Bei der Kalibrierung eines Mehrkomponentenanalysators mit Prüfgasen sind mögliche elektronische Querempfindlichkeits- und/oder Trägergaskorrekturen ausgeschaltet. Deshalb dürfen korrigierte Messkomponenten nur mit einem Prüfgas kalibriert werden, das jeweils aus der Messkomponente und einem Inertgas, z. B. Stickstoff, besteht.

Messgaseingangsbedingungen

Temperatur

Der Taupunkt des Messgases muss um mindestens 5 °C niedriger als die niedrigste Umgebungstemperatur im gesamten Messgasweg sein. Andernfalls ist ein Messgaskühler oder ein Kondensatabscheider erforderlich.

Eingangsdruck

$p_a = 2 \dots 500$ hPa (Maximaldruck siehe Seite 8)
Bei geringerem Druck ist eine Messgaspumpe und bei höherem Druck ist ein Druckminderer erforderlich.

Ausgangsdruck

Atmosphärendruck

Durchfluss

20...100 l/h

Korrosive, toxische und brennbare Gase

siehe Seite 8

Spülgas

siehe Seite 8

Gasanschlüsse

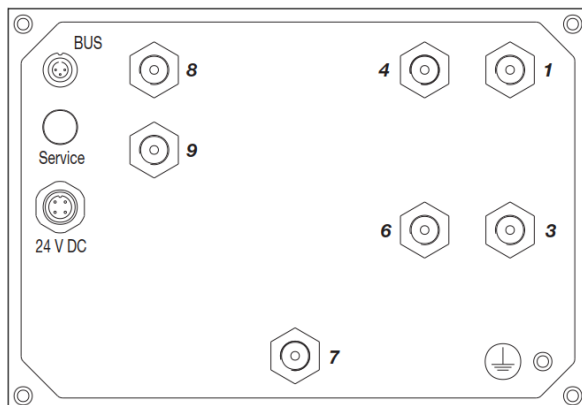
siehe Seite 9

Werkstoffe der medienberührten Teile

siehe Seite 8

Gasanschlüsse

Limas11: Standardküvette mit FPM- oder PTFE-Schläuchen, Quarzküvette mit FPM-Schläuchen, Mittelanschlussküvette aus Aluminium oder aus Quarz



- 1 Messgaseingang
- 2 Service
- 3 Spülgaseingang Gehäuse ¹⁾
- 4 Messgasausgang
- 5 BUS
- 6 Spülgasausgang Gehäuse ¹⁾
- 7 Drucksensor ²⁾
- 8 Endpunktgaseingang (mit 3 Magnetventilen) ^{1) 3)}
- 9 Nullpunktgaseingang (mit 1 oder 3 Magnetventilen) ^{1) 3)}

1) Option

2) externer Anschluss, nicht bei der Standardküvette mit FPM-Schläuchen

3) nicht bei Ausführung mit PTFE-Schläuchen

Prozessphotometer-Analysatormodul Limas11

Messküvetten

	Standardküvette	Quarzküvette	Sicherheitsküvette
Anwendungsgebiet	Standardanwendungen	korrosive Gase	toxische, korrosive und brennbare Gase
Wellenlängenbereich	200...10000 nm	200...4000 nm	CaF ₂ -Fenster: 200...10000 nm SiO ₂ -Fenster: 200...4000 nm
Beständigkeit ¹⁾			
beständig für die Messung in ...	nichtkorrosiven Gasen	korrosiven Gasen, z. B. Cl ₂ feucht, HCl feucht, H ₂ SO ₄ , SO ₃ , Ozon	korrosiven Gasen, z. B. HCl trocken, COCl ₂ trocken (< 50 ppm H ₂ O)
nicht beständig für die Messung in ...	hochkorrosiven Gasen, z. B. chlorhaltigen Gasen, H ₂ SO ₄ , SO ₃ , Fluorverbindungen	Fluorverbindungen	feuchten chlorhaltigen Gasen, H ₂ SO ₄ , SO ₃ , Fluorverbindungen
Sicherheitsphilosophie			
Toxische Gase	Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit messkomponentenfreier Luft oder mit N ₂	Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit messkomponentenfreier Luft oder mit N ₂	Messküvetten-spülung ²⁾ mit N ₂ oder mit messkomponentenfreier Luft unter Unterdruck mit Durchflussüberwachung; zusätzlich Überwachung auf Messgasspuren möglich
Korrosive Gase	Gasleitungen aus PTFE, Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit messkomponentenfreier Luft oder mit N ₂	Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit messkomponentenfreier Luft oder mit N ₂	Messküvetten-spülung ²⁾ mit N ₂ oder mit messkomponentenfreier Luft unter Überdruck ³⁾ mit Durchflussüberwachung
Brennbare Gase ⁴⁾	Gasleitungen aus Edelstahl, Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit N ₂	Gehäusespülung (≤ 20 l/h) mit N ₂	Messküvetten-spülung ²⁾ mit N ₂
Brennbare Gase Kategorie 3G	-	-	Messküvetten-spülung ²⁾ mit N ₂ unter Überdruck ³⁾ mit Durchflussüberwachung
Dichtigkeit	< 1 x 10 ⁻³ hPa l/s	< 1 x 10 ⁻⁶ hPa l/s	< 1 x 10 ⁻⁶ hPa l/s
Druckfestigkeit			
kontinuierlich	p _e < 500 hPa	p _e < 500 hPa	p _e < 500 hPa
Druckstoß	-	p _{abs} < 300 kPa	p _{abs} < 500 kPa
Werkstoffe der Messküvette			
Küvettenrohr	Aluminium	Quarzglas (SiO ₂)	Edelstahl 1.4571
Fenster	CaF ₂ , geklebt	Quarzglas	CaF ₂ oder SiO ₂ , verschraubt
Dichtung	-	FFKM75	FFKM70
Anschlusstutzen	Edelstahl 1.4571	PFA	Edelstahl 1.4571
Werkstoffe der Gasleitungen	FPM oder PTFE	PFA	Edelstahl 1.4571
Werkstoffe der Gasanschlüsse	Edelstahl 1.4571	PFA	Edelstahl 1.4571
Ausführung der Messgasanschlüsse (Anschlussbilder siehe Seite 9)	Anschlusstutzen mit 1/8-NPT-Innengewinde	Rohre 6/4 mm	Rohre mit 4 mm Außendurchmesser

1) siehe auch Seite 7 „Messgaseingangsbedingungen“

2) Spülvorhang

3) p_e = 7...20 hPa, 15...20 l/h

4) Das Analysatormodul ist geeignet zur Messung von brennbaren Gasen und Dämpfen unter atmosphärischen Bedingungen (p_{abs} ≤ 1,1 bar, Sauerstoffgehalt ≤ 21 Vol.-%). Temperaturklasse: T4. Das Messgas darf im normalen Betrieb nicht explosionsfähig sein; falls es bei Störungen der Messgasversorgung explosionsfähig ist, dann nur selten und kurzzeitig (entsprechend Zone 2). Druck im Messgasweg im normalen Betrieb p_e ≤ 100 hPa; bei Störungen der Messgasversorgung darf der Druck den Maximalwert von p_e = 500 hPa nicht überschreiten. Vor dem Einsatz des Analysatormoduls muss die Korrosionsbeständigkeit für das vorhandene Messgas geprüft werden.

10.2.3 Temperaturfühler PT1000



Datenblatt:

info@sensorshop24.de

Kennlinie

0771/897508-0

PT1000

-50°C	803,10 Ohm
-40°C	842,70 Ohm
-30°C	882,20 Ohm
-20°C	921,60 Ohm
-10°C	960,90 Ohm
0°C	1000,00 Ohm
+10°C	1039,00 Ohm
+20°C	1077,90 Ohm
+25°C	1097,40 Ohm
+30°C	1116,70 Ohm
+40°C	1155,40 Ohm
+50°C	1194,00 Ohm
+60°C	1232,40 Ohm
+70°C	1270,70 Ohm
+80°C	1308,90 Ohm
+90°C	1347,00 Ohm
+100°C	1385,00 Ohm
+110°C	1422,90 Ohm
+120°C	1460,60 Ohm
+130°C	1498,20 Ohm
+140°C	1535,80 Ohm
+150°C	1573,10 Ohm

www.sensorshop24.de

otom Group GmbH
Niederwiesen 7
78199 Bräunlingen

Tel. 0771/897508 - 0
Fax 0771/897508 - 10
www.sensorshop24.de

Stand: 2015, Änderungen vorbehalten und können jederzeit ohne Ankündigung durchgeführt werden!

10.2.4 Drucktransmitter



Datenblatt:

info@sensorshop24.de

Drucktransmitter

0771/897508-0

DT1**Anwendung**

Der Drucktransmitter DT1 mit keramischer Messzelle eignet sich bestens zur Relativdruckmessung nichtaggressiver Medien. Einsatzgebiete finden Sie in der Gebäudeautomation, Industrie, sowie pneumatische und hydraulische Applikationen. Die Standardserie deckt mehrere unterschiedliche Messbereiche (siehe Tabelle) ab, welche durch den Messumformer als standardisiertes Ausgangssignal von 4 ... 20 mA bzw. 0 ... 10 V ausgegeben werden. Zusätzlich können die Sensoren individuell nach kundenspezifischen Anforderungen, wie zum Beispiel mit einer Ausgabe von 0 ... 5 V oder angepassten Anschlusskomponenten gefertigt werden. Das beständige Edelstahlgehäuse ist mit unterschiedlichen Prozessanschlüssen lieferbar und wird durch die Schutzart IP 65 klassifiziert. Obligatorisch wird jeder Lieferung ein Prüfprotokoll des jeweiligen Transmitters beigelegt, optional ist auch ein Werksprüfzeugnis erhältlich.

**Technische Daten**

Allgemein		Typ I	
Sensor	relativ	Ausgang	4...20 mA
Messbereiche	(siehe Tabelle)	Anschluss	2-Leiter
Berstdruck	x 2,5 FS (Fullscale)	Nennspannung	24 VDC
Linearität	< 1% FS	zul. Betriebsspannung	12...30 VDC
Hysterese	< 0,5 % FS	Bürde	Ra[Ω]=(Uv[V]-10V) 0,02 A
Temperaturfehler Offset	0,03% FS/K	Typ U	
Temperaturfehler Messbereich	0,05% FS/K	Ausgang	0...10 V
zul. Einsatztemperatur	0 ... 85°C	Anschluss	3-Leiter
Schutzart	IP 65	Nennspannung	24 VDC
Anschluss	Ventilsteckverbinder DIN EN 175301-803-A M12 Steckverbinder	zul. Betriebsspannung	12...30 VDC
Prozessanschluss	G1/2", G1/4"		
Werkstoffe	Gehäuse 1.4305 Sensor Al ₂ O ₃ Dichtung Viton®		

www.sensorshop24.de

otom Group GmbH
Niederwiesen 7
78199 Bräunlingen

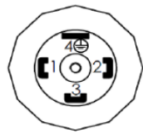
Tel. 0771/897508 - 0
Fax 0771/897508 - 10
www.sensorshop24.de

Stand: 2015, Änderungen vorbehalten und können jederzeit ohne Ankündigung durchgeführt werden!



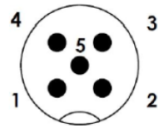
Elektrischer Anschluss

**DIN EN 175301-803-A
Stecker**



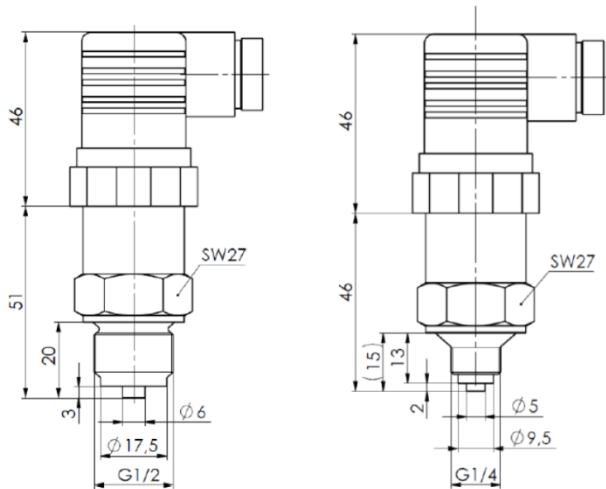
Ausführung 4 ... 20 mA		Ausführung 0 ... 10 V	
Pin	Belegung	Pin	Belegung
1	+Ub	1	+Ub
2	GND	2	GND
3	-	3	Uout
4	-	4	-

M12-Steckverbinder



Ausführung 4 ... 20 mA		Ausführung 0 ... 10 V	
Pin	Belegung	Pin	Belegung
1	+Ub	1	+Ub
2	GND	2	GND
3	-	3	Uout
4	-	4	-

Maßzeichnung



www.sensorshop24.de

otom Group GmbH
Niederwiesen 7
78199 Bräunlingen

Tel. 0771/897508 - 0
Fax 0771/897508 - 10
www.sensorshop24.de

Stand: 2015, Änderungen vorbehalten und können jederzeit ohne Ankündigung durchgeführt werden!

10.2.5 pH-Elektrode

HAMILTON**Liq-Glass**

Specification Sheet (Part/REF # 238000)



A robust, daily use laboratory electrode for titrations with strong acids and bases.

Product Specifications

a-length	120 mm
Electrical Connector	S7
Measurement Principle	Combination electrode; pH potential measured against reference
Measuring Range	pH 0 to 14
Sensitivity	57 to 59 mV / pH at 25 °C
Zero Point	0 ± 20 mV
pH Glass	Hamilton Type HF Glass
pH Glass Resistance	Moderate
Membrane Shape	Spherical
Diaphragm	Ceramic
Number of Diaphragms	1
Electrolyte	3 M KCl
Reference System	Hamilton Everef
Temperature Sensor	No
Minimum Immersion depth	15 mm
Diameter	12 mm
Wetted Parts	Glass

HAMILTON

Visit www.hamiltoncompany.com/support to find a representative in your area or call us:

US: +1-775-525-3000

EU: +40-356-635-055

HAMILTON

1 m, 3 mm Cable S7 / DIN Plug

Specification Sheet (Part/REF # 355174)



High quality cables with a variety of electrical connectors to retrofit with existing pH / ORP monitors.

Product Specifications

Electrical Connector	S7 / DIN
Diameter	3 mm
Length	1 m

Specifications are subject to change without notice
<https://www.hamiltoncompany.com/laboratory-products/sensors/355174>

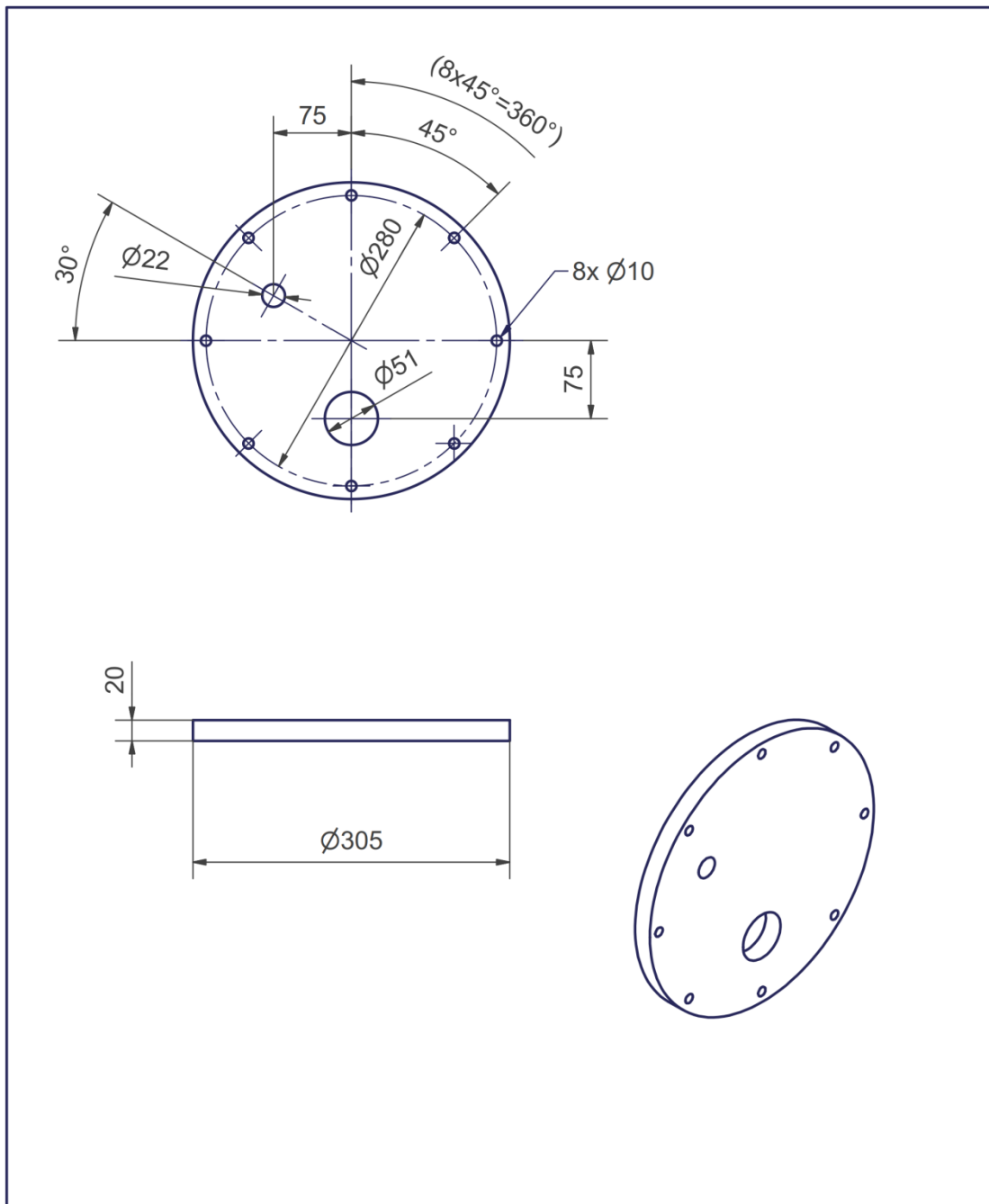
Spec. Version B

HAMILTON

Visit www.hamiltoncompany.com/support to find a representative in your area
or call us:
US: +1-775-525-3000
EU: +40-356-635-055

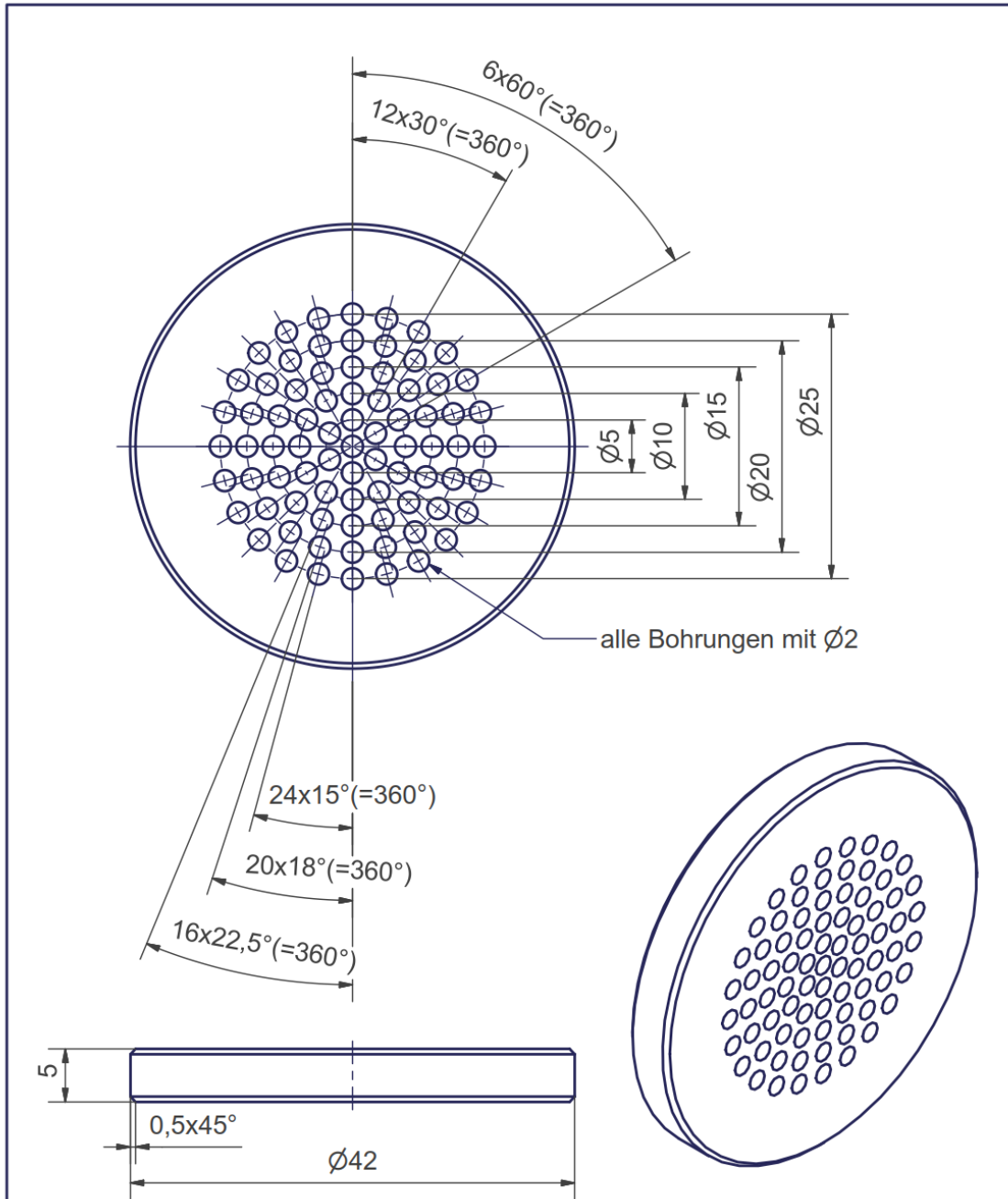
10.3 Konstruktionszeichnungen

10.3.1 Blindflansch für Vorlagebehälter



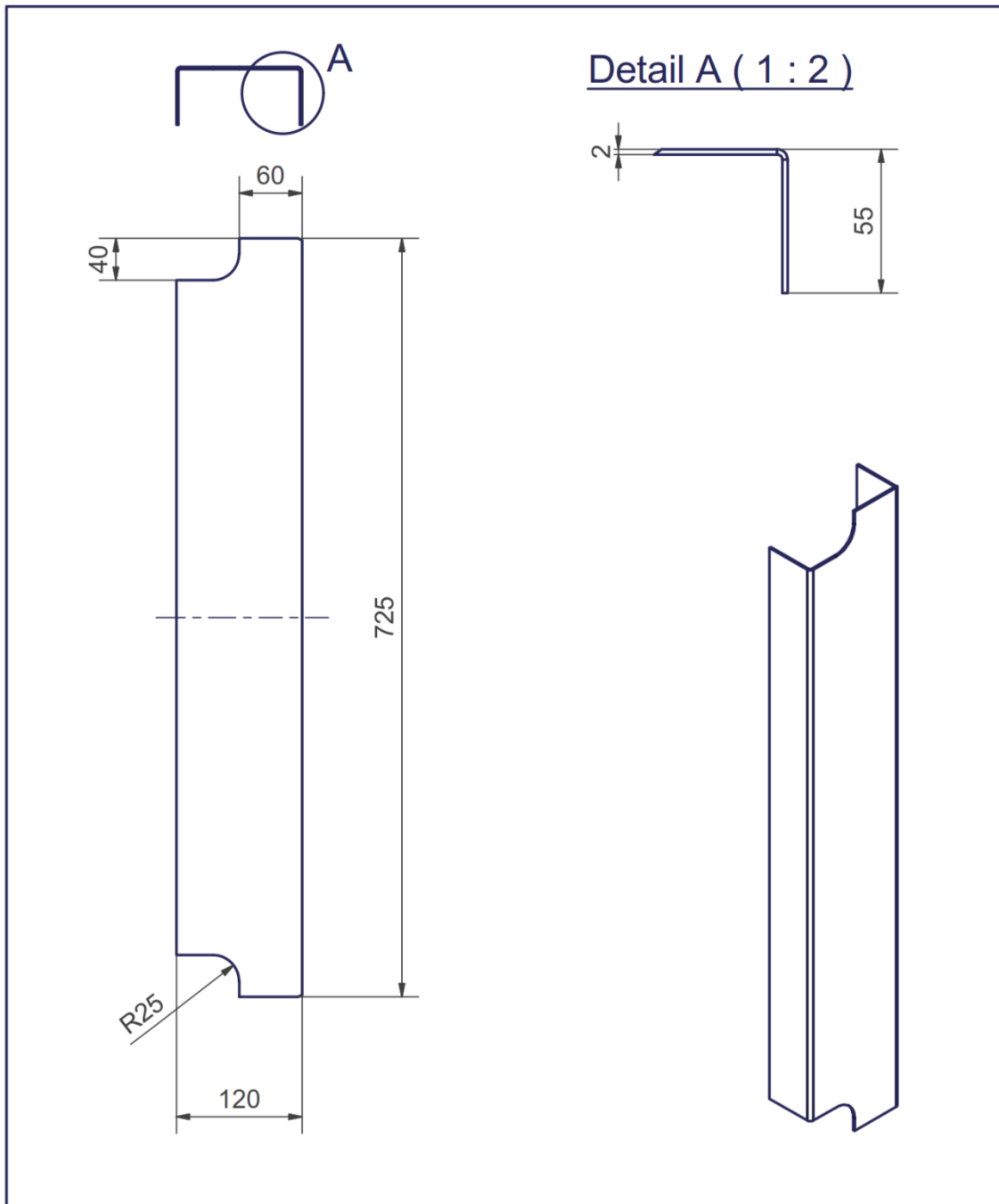
Verwendungsbereich:		Freimaßtoleranz:		Oberfläche:		Maßstab: 1:5		Gewicht:	
						Kunststoff			
		Datum		Name		Absorptionsanlage		Stück:	
		Gezeichnete 25.09.2016		Meister		Blindflansch Vorlagebehälter			
		Kontrolliert				Blindflansch_Vorlagebehälter.idw		1	
		Norm						A4	
		CEET							
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:	Ers. d.:			

10.3.2 Sieb für statischen Mischer

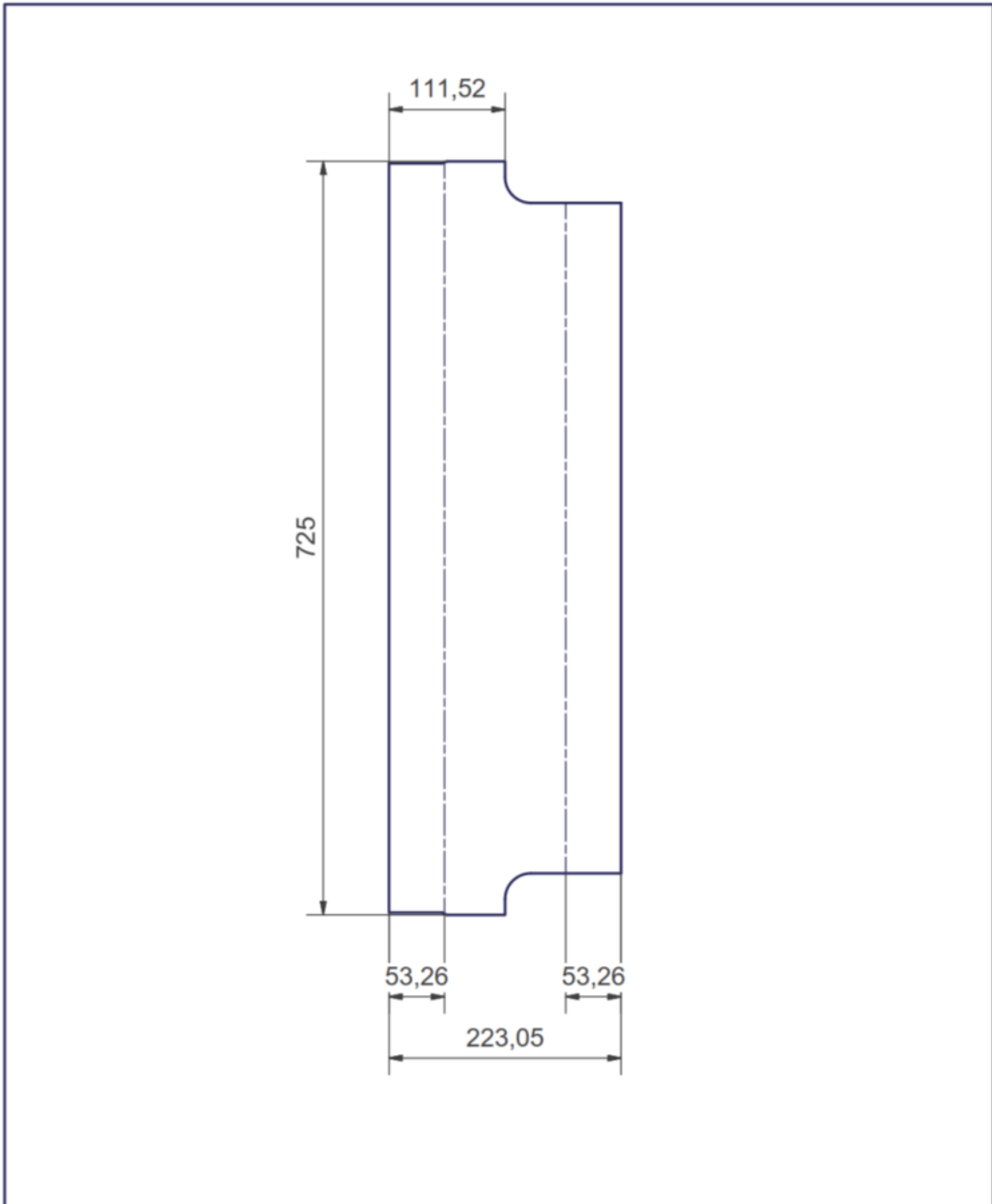


Verwendungsbereich:		Freimaßtoleranz:		Oberfläche:		Maßstab: 2:1		Gewicht:	
						PTFE (Teflon)			
		Datum		Name		Absorptionsanlage		Stück:	
		Gezeichnete 25.09.2016		Meister		Sieb fuer Gasmischstrecke			
		Kontrolliert				Sieb für Gasmischstrecke.idw		1	
		Norm						A4	
		CEET							
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:	Ers. d.:			

10.3.3 Winkelprofil für MFC-Montage

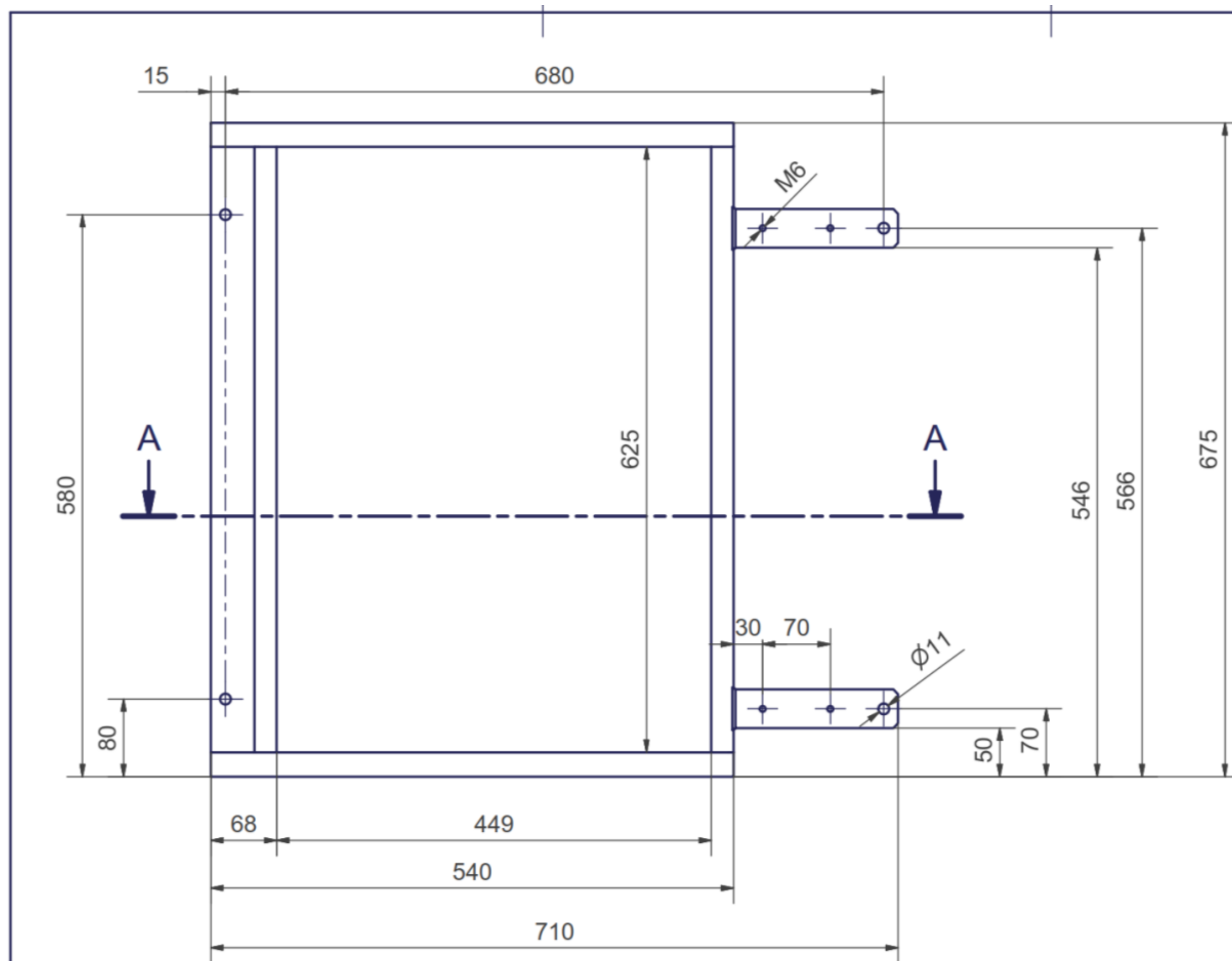


Verwendungsbereich: Fallfilm-Absorptionsanlage, Laborbox D2		Freimaßtoleranz:	Oberfläche:	Maßstab:	Gewicht:	
		Datum	Name	Fallfilm-Absorption Stück: 1 Winkelprofil für MFC Montage		
		Gezeichnet	22.05.2018			Meister
		Kontrolliert				
		Norm				
				Winkelprofil_MFC_Abwicklung.idw	1	
					A4	
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:	
					Ers. d.:	



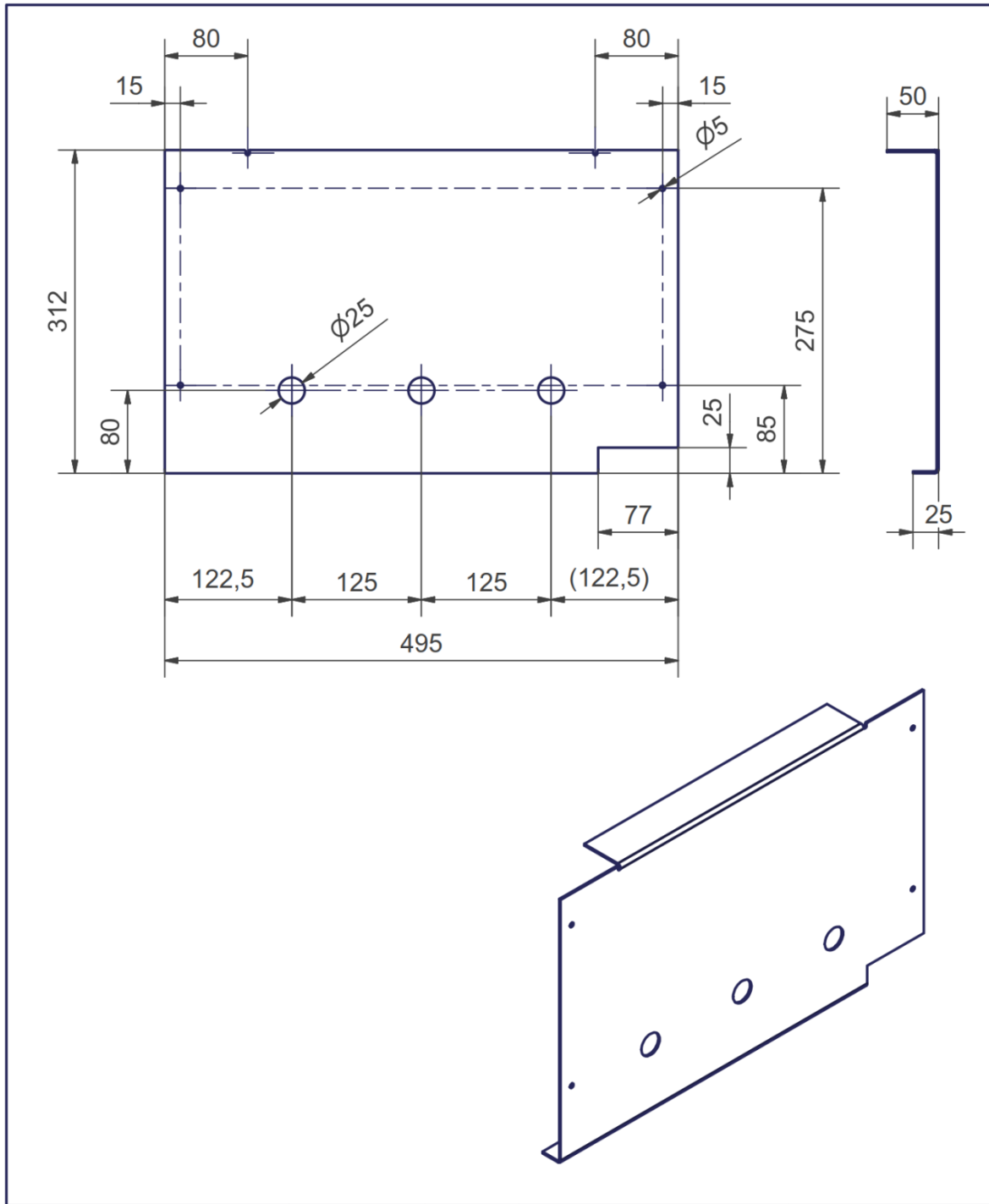
Verwendungsbereich: Fallfilm-Absorptionsanlage, Laborbox D2		Freimaßtoleranz:	Oberfläche:	Maßstab: 1:5	Gewicht:	
				Fallfilm-Absorption Abwicklungszeichnung Stück: 1 Winkelprofil für MFC Montage		
		Datum	Name	Winkelprofil_MFC_Abwicklung.idw		
		Gezeichnet	22.05.2018 Meister			
		Kontrolliert				
		Norm		2 A4		
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:	Ers. d.:

10.3.4 Instrumentenrack

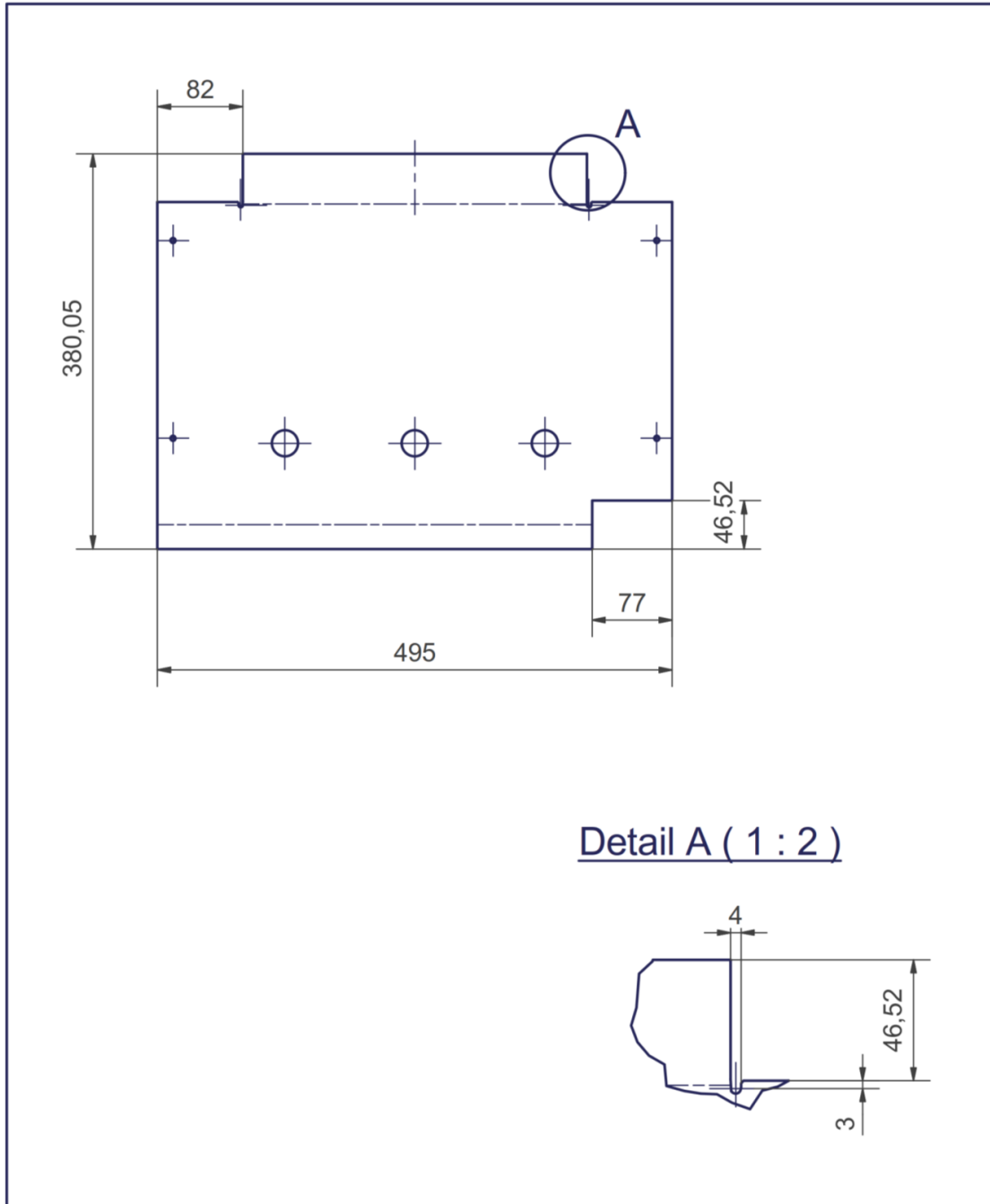


Schnitt A-A (1 : 5)

10.3.5 Ventiltafel



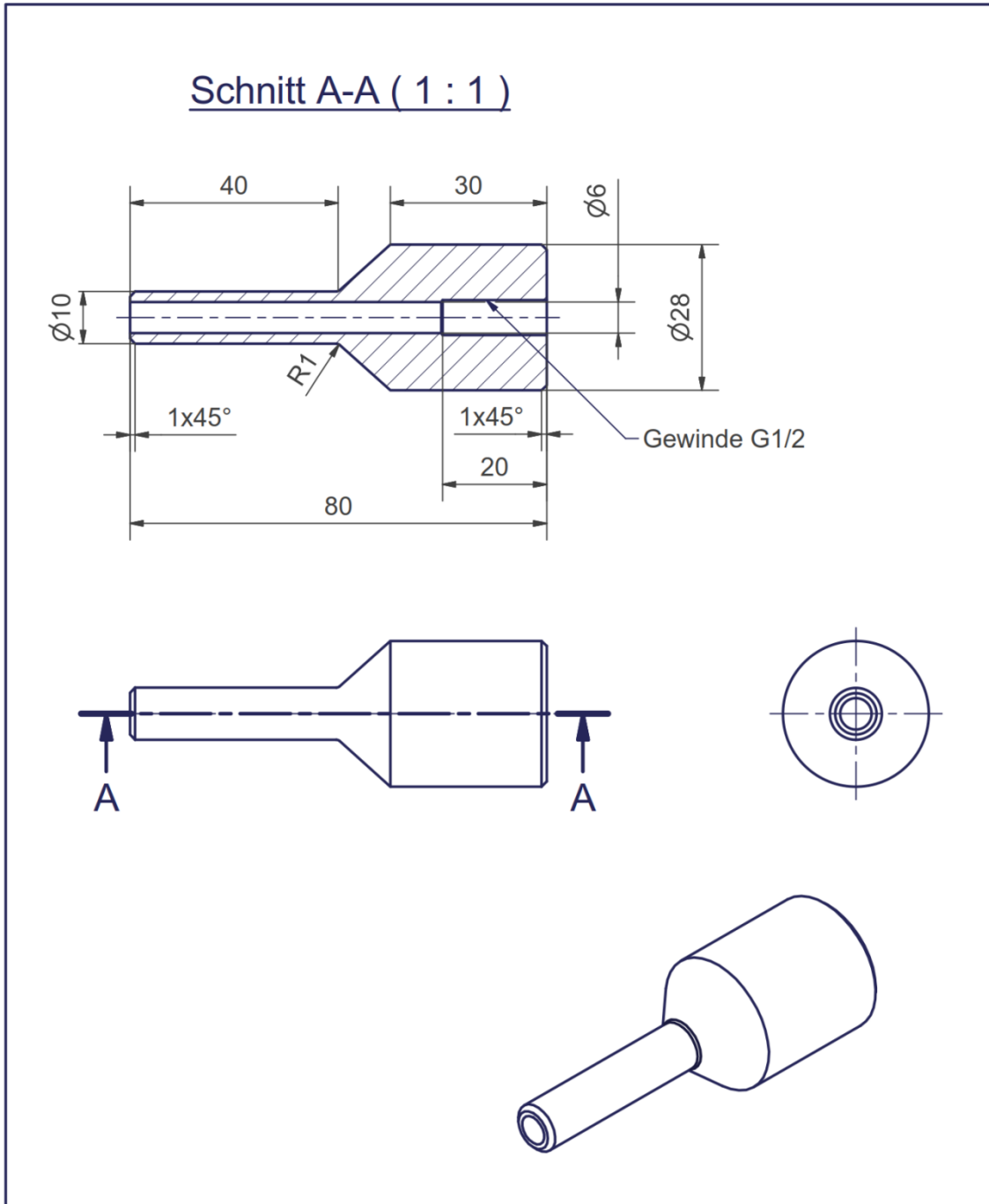
Verwendungsbereich: Fallfilm-Absorptionsanlage, Laborbox D2		Freimaßtoleranz:	Oberfläche:	Maßstab: 1:5	Gewicht:
				Aluminiumblech 2mm	
		Datum	Name	Fallfilm-Absorption	
		Gezeichnet	15.05.2018	Meister	Stück: 1
		Kontrolliert			Ventiltafel am Instrumentenrack
		Norm			Ventiltafel_Instrumentenrack.idw
					1
					A4
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:
					Ers. d.:



Detail A (1 : 2)

Verwendungsbereich:		Freimaßtoleranz:		Oberfläche:		Maßstab: 1:5, (1:2)		Gewicht:		
						Aluminiumblech 2mm				
				Datum	Name	Fallfilm-Absorption				
				Gezeichnet	15.05.2018	Meister	Stück: 1			
				Kontrolliert			Ventiltafel Abwicklungszeichnung			
				Norm			Ventiltafel_Instrumentenrack.idw		2	
									A4	
Status	Anderungen	Datum	Name	Urspr.:		Ers. f.:		Ers. d.:		

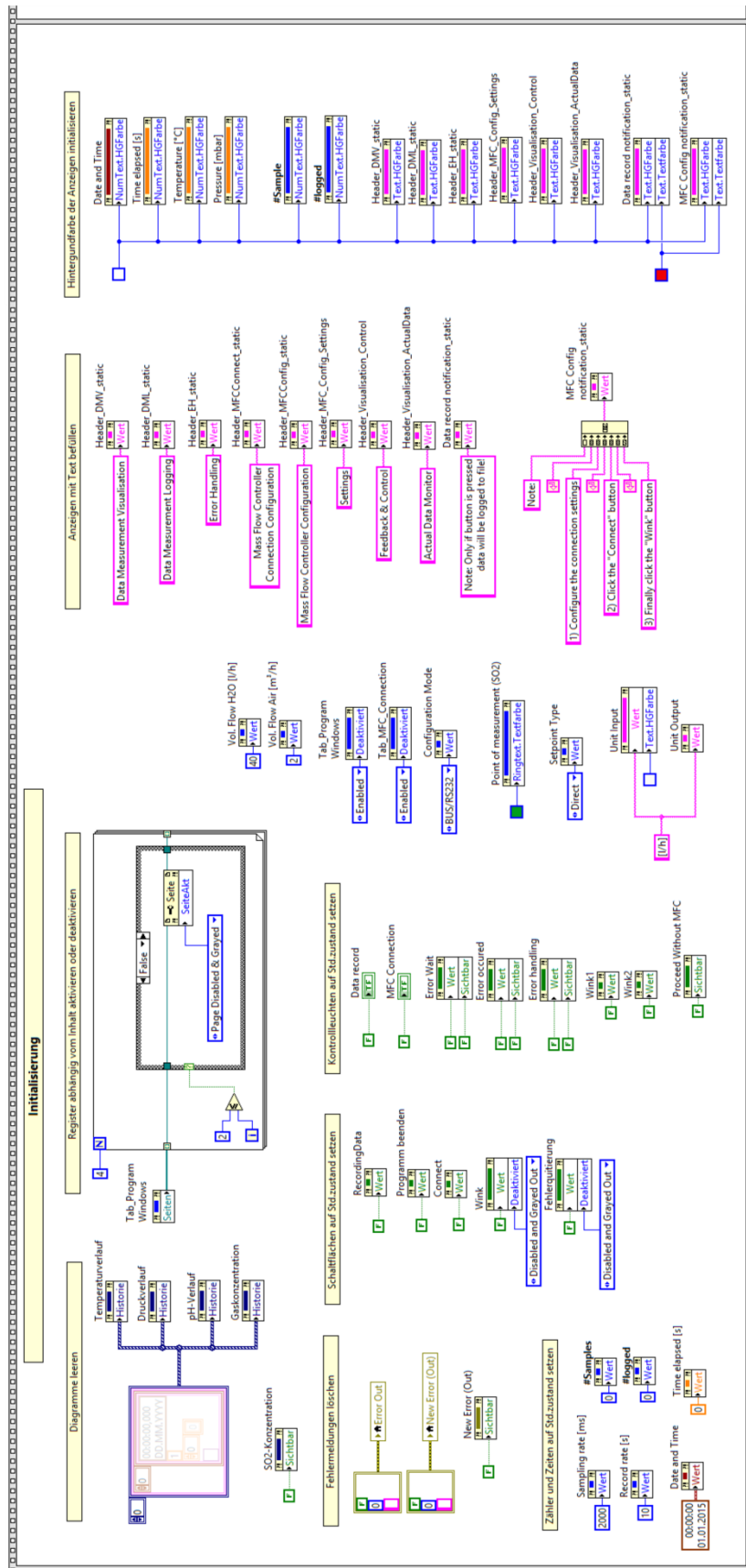
10.3.6 Anschlussadapter für Drucktransmitter

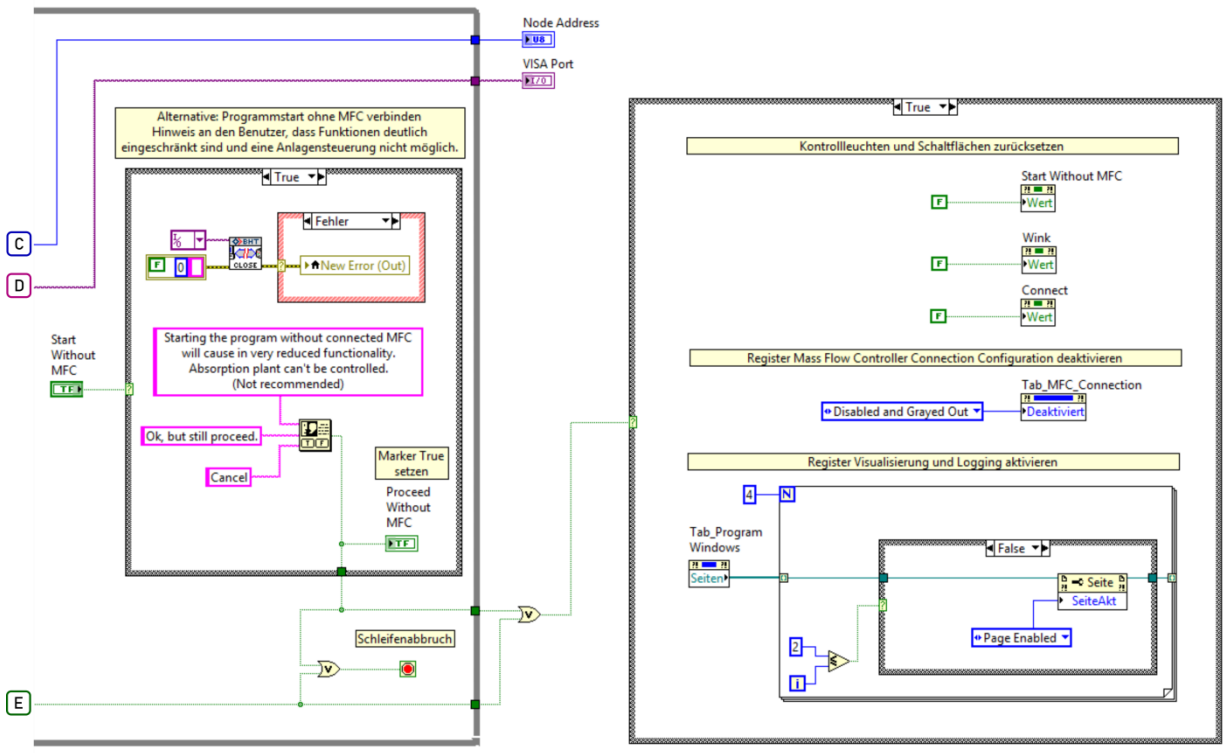
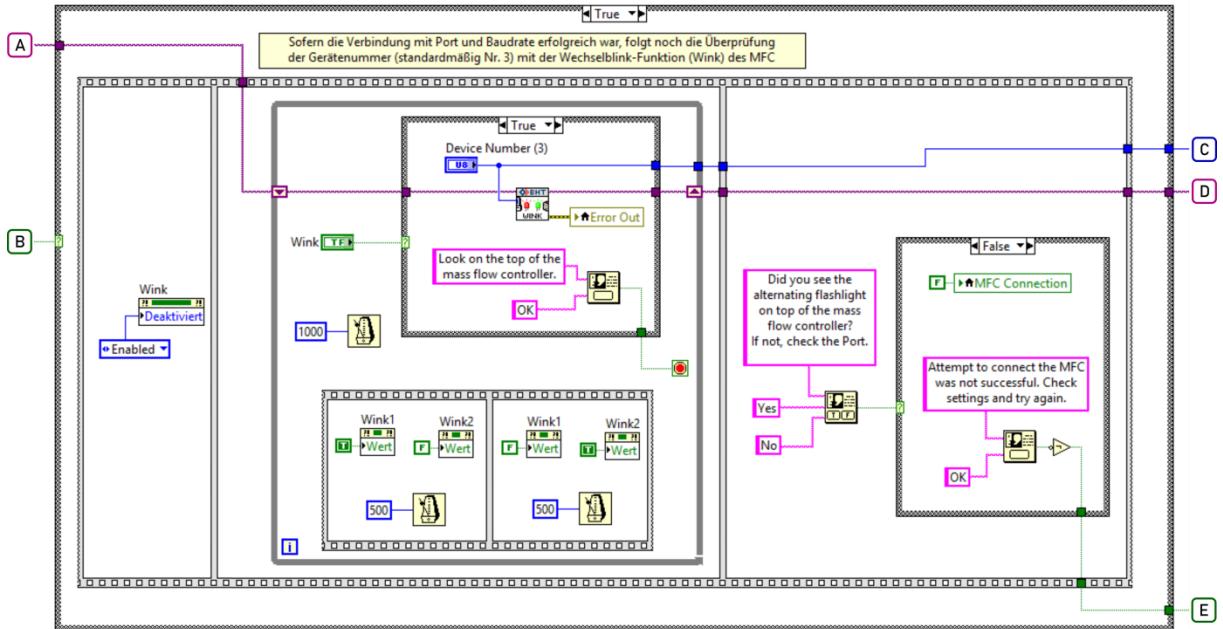


Verwendungsbereich: Fallfilm-Absorptionsanlage, Laborbox D2		Freimaßtoleranz:	Oberfläche:	Maßstab: 1:1	Gewicht:
				PTFE	
		Datum	Name	Fallfilm-Absorption Stück: 1 Anschlussadapter für Drucksensor	
		Gezeichnet	15.05.2018 Meister		
		Kontrolliert			
		Norm			
				Drucktransmitter_Anschlussadapter.idw	1
					A4
Status	Änderungen	Datum	Name	Urspr.:	Ers. f.:
					Ers. d.:

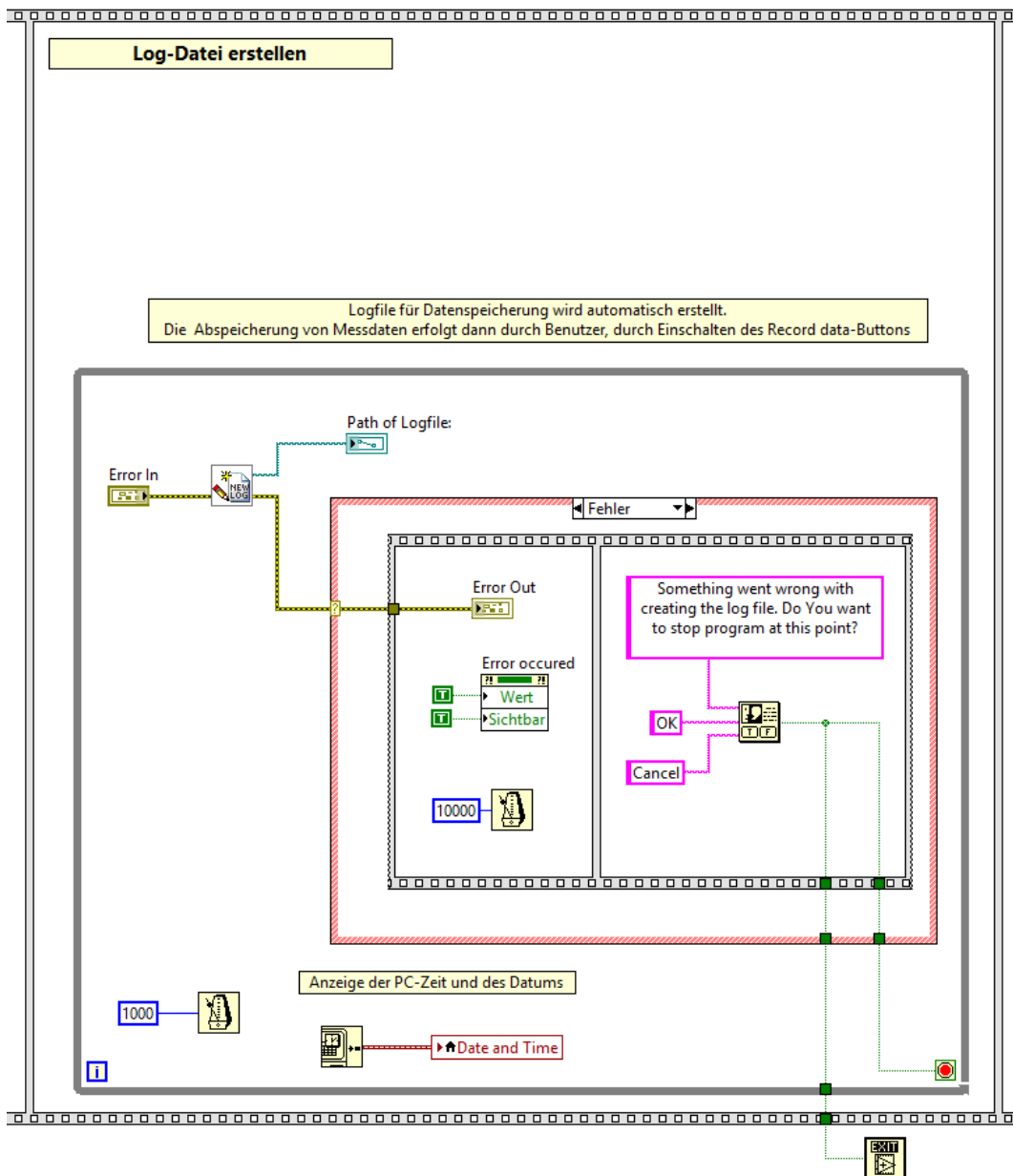
10.4 LabVIEW Messdatenerfassung

10.4.1 Hauptprogrammsequenz Programminitialisierung





10.4.3 Hauptprogrammsequenz Log-Datei erstellen



10.4.4 Unterprogramm Messdatendatei erstellen

10.4.4.1 Unterprogrammssymbol und Anschlussfeld



Abbildung 71: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi

10.4.4.2 Frontpanel

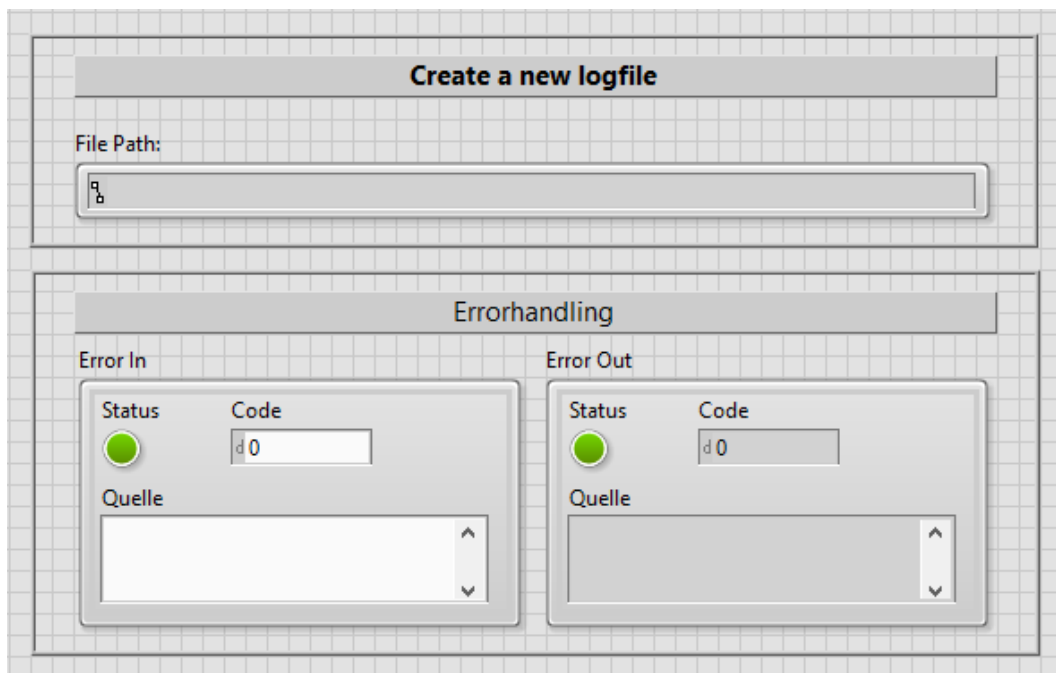


Abbildung 72: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_CreateNewLogFile.vi

10.4.5 Unterprogramm RTD-Kalibration

10.4.5.1 Unterprogrammssymbol und Anschlussfeld

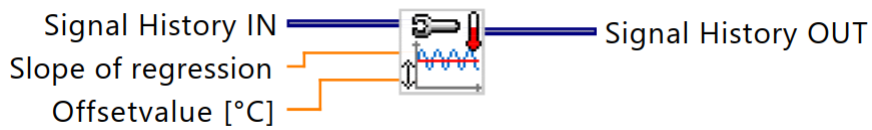


Abbildung 73: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi

10.4.5.2 Frontpanel

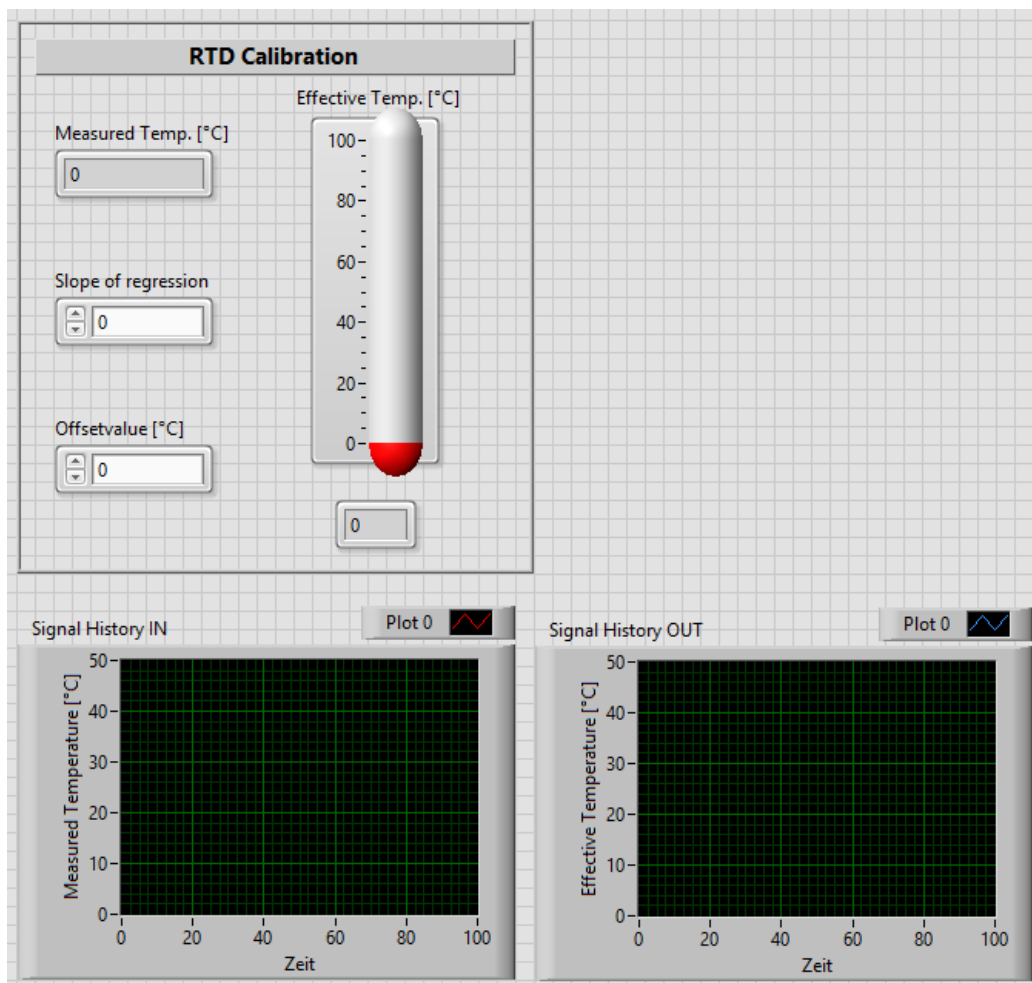


Abbildung 74: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_RTD_SimpleCalibration.vi

10.4.6 Unterprogramm Signalkonvertierer

10.4.6.1 Unterprogrammssymbol und Anschlussfeld

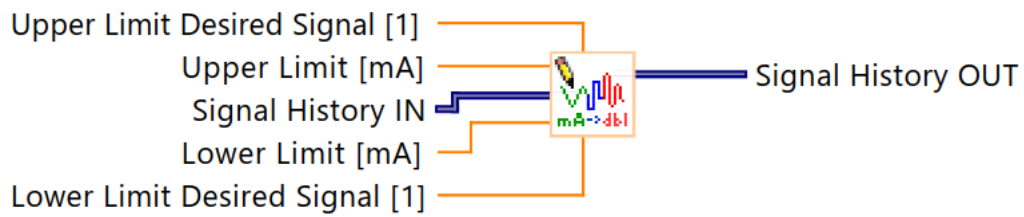


Abbildung 75: Anschlussfeld des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi

10.4.6.2 Frontpanel

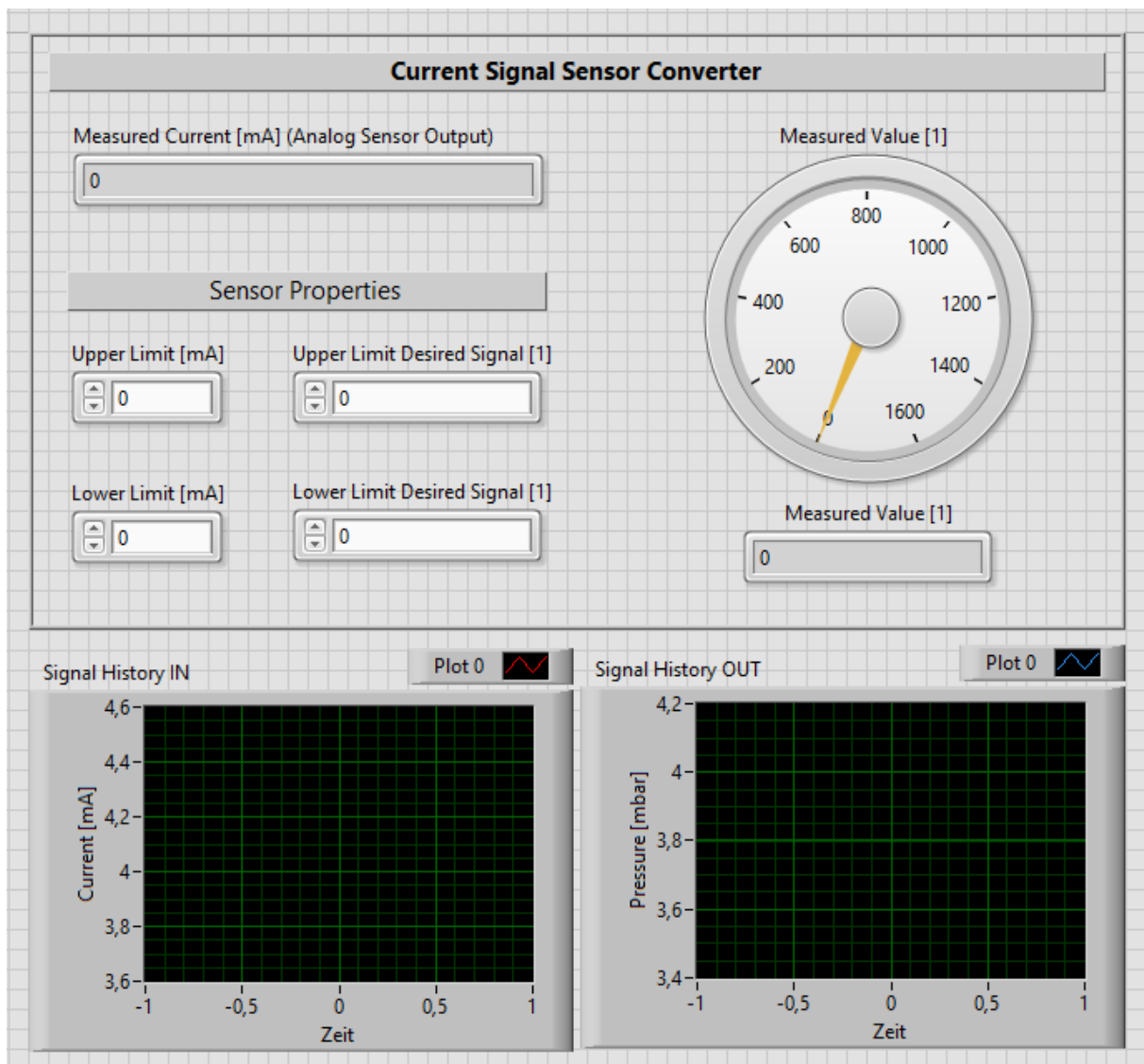


Abbildung 76: Frontpanel des Unterprogramms SubVi_Current_Converter.vi

10.4.7 Unterprogramm Fehlerfilterung

10.4.7.1 Unterprogrammssymbol und Anschlussfeld

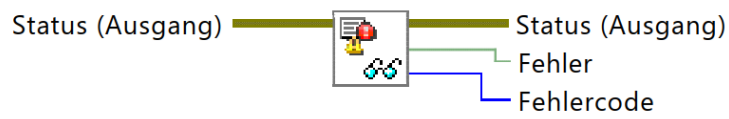


Abbildung 77: Anschlussfeld des Unterprogramms *SubVi_Fehlerfilter.vi*

10.4.7.2 Frontpanel

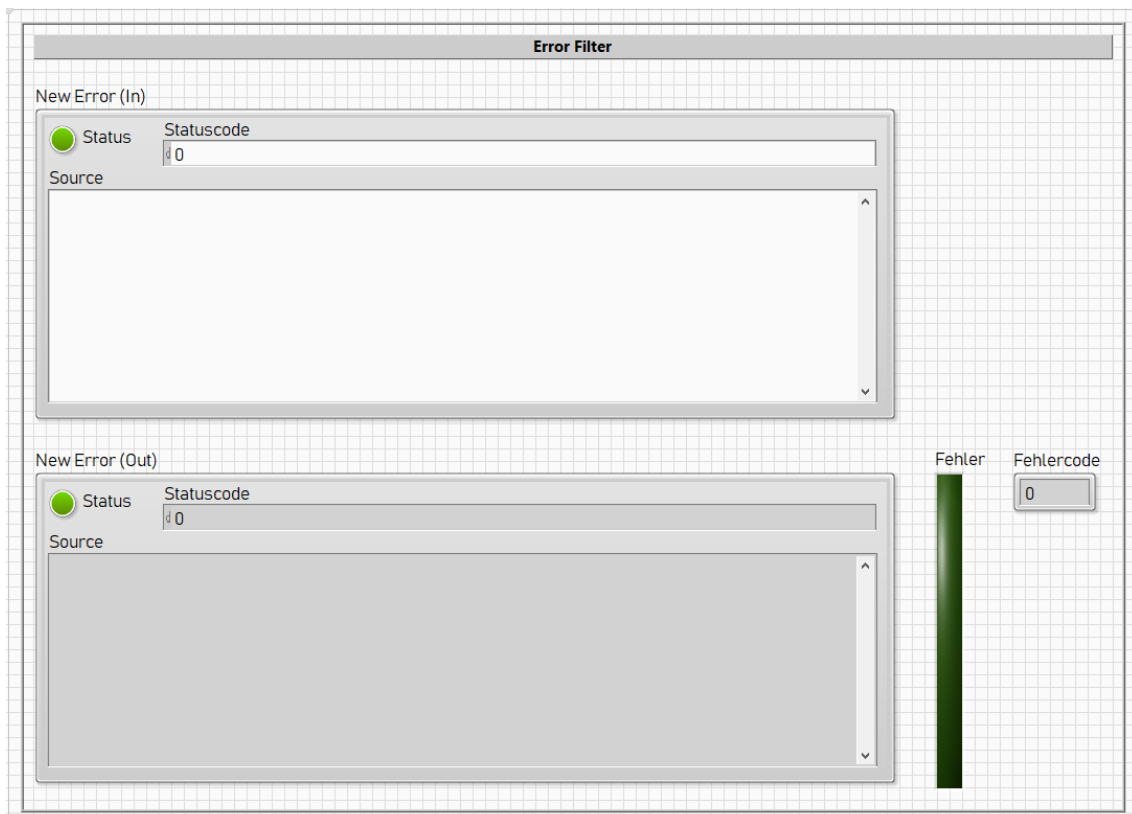


Abbildung 78: Frontpanel des Unterprogramms *SubVi_Fehlerfilter.vi*

10.5 Messdaten der Versuchsreihe 1

$$H_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{S_{kg} * p_{ges} * \beta_{g,A}} * \ln \left(\frac{y_{SO_2, ein}}{y_{SO_2, aus}} \right)$$

$$k = \frac{F_V}{2 * r * \pi * H} * \ln \left(\frac{C_{A,0}}{C_A} \right)$$

Versuchsreihe 1

V.-Nr.	F_H2O [l/h]	G [Nm³/h]	F_V,Druckluft [Nm³/h]	F_V,MFCgas [Nm³/h]	F_V,MFCSO2 [Nm³/h]	F_V,MFCLuft [Nm³/h]	F_V,Luftgas [Nm³/h]	m_V,Luftgas [kg/h]	m_V,SO2 [kg SO2/h]	n_V,Luft [kmol/h]	n_V,SO2 [kmol/h]	n_V,ges [kmol/h]	w_gas [m/s]	Bottom => Top β_g,B<->T [m/s]	k_g<->T [m/s]	Abweich. [%]	H [m]
1	40	0	0	0,06	0,0006	0,0594	0,0594	0,0715	1,72E-03	0,0025	2,68E-05	2,496E-03	0,225	0,001516	0,002206	45,6%	3,04
2	40	1	0,94	0,06	0,0006	0,0594	0,9994	1,2033	1,72E-03	0,0415	2,68E-05	4,158E-02	0,450	0,002695	0,003104	15,2%	2,41
3		2	1,94			1,9994	1,9994	2,4073		0,0831		8,315E-02	0,675	0,003773	0,003846	1,9%	2,13
4		3	2,94			2,9994	2,9994	3,6113		0,1247		1,247E-01	0,900	0,004790	0,004472	-6,6%	1,95
5		4	3,94			3,9994	4,8153	4,8153		0,1663		1,663E-01	1,125	0,005765	0,005163	-10,4%	1,87
6		5	4,94			4,9994	6,0193	6,0193		0,2078		2,079E-01	1,350	0,006707	0,005997	-10,6%	1,87
7		6	5,94			5,9994	7,2233	7,2233		0,2494		2,494E-01	1,575	0,007622	0,007180	-5,8%	1,97
8		7	6,94			6,9994	8,4273	8,4273		0,2910		2,910E-01	1,800	0,008516	0,008540	0,3%	2,10
		8	7,94			7,9994	9,6313	9,6313		0,3326		3,326E-01					

Werte aller 8 Versuche, gemittelt von Boden bis Kopf

V_g [m²/s]	D_SO2-Luft [m²/s]	S_Cg [1]	a_F [m]	S_kg [m²]	S_FF [m²]	a_Sv [m³/m³]	a_Sh [m²/m]	H_k [m]
1,555E-05	1,146E-05	1,357	0,0007987	0,001183609	0,230425	91,8302	0,1087	2,17

$$\rho_{Luft} = -8,333 \cdot 10^{-8} \cdot T_{g,eln}^3 + 1,857 \cdot 10^{-5} \cdot T_{g,eln}^2 - 4,685 \cdot 10^{-3} \cdot T_{g,eln} + 1,275$$

V.-Nr.	F_SO2_SET	PoM_SO2	F_AIR	T_m	dp_m	pH_m	F_SO2_Real_m	c_SO2_m	F_V,Luft,ges,B	P_Luft	m_V,SO2,B	m_V,Luft,ges,B	n_V,SO2,B	n_V,Luft,ges,B	n_V,ges,B
[-]	[l/h]	[Nm³/h]	[°C]	[mbar]	[1]	[l/min]	[mg/Nm³]	[Nm³/h]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg SO₂/h]	[kg/h]	[kmol/h]	[kmol/h]	[kmol/h]
1	60	Bottom	20,74	1,554	7,91	1,00	1765,41	0,9994	1,1851	1,764E-03	1,184	2,754E-05	0,04090	0,04092	0,04092
2			20,76	1,606	11,12	1,00	916,51	1,9994	1,1850	1,832E-03	2,369	2,861E-05	0,08181	0,08184	0,08184
3			20,76	1,569	11,65	1,00	617,60	2,9994	1,1850	1,852E-03	3,554	2,892E-05	0,12273	0,12276	0,12276
4			20,76	1,636	11,83	1,00	464,80	3,9994	1,1850	1,859E-03	4,739	2,902E-05	0,16365	0,16368	0,16368
5			20,77	1,598	11,84	1,00	373,44	4,9994	1,1850	1,867E-03	5,924	2,914E-05	0,20456	0,20459	0,20459
6			20,77	1,582	11,84	1,00	312,03	5,9994	1,1850	1,872E-03	7,109	2,922E-05	0,24548	0,24551	0,24551
7			20,77	1,598	11,83	1,00	269,33	6,9994	1,1849	1,885E-03	8,294	2,943E-05	0,28639	0,28642	0,28642
8			20,77	1,604	11,82	1,00	236,37	7,9994	1,1849	1,891E-03	9,479	2,952E-05	0,32731	0,32734	0,32734
		Mittelwert	20,762	1,593	11,229										

V.-Nr.	F_SO2_SET	PoM_SO2	F_AIR	T_m	dp_m	pH_m	F_SO2_Real_m	c_SO2_m	F_V,Luft,ges,C	P_Luft	m_V,SO2,C	m_V,Luft,ges,C	n_V,SO2,C	n_V,Luft,ges,C	n_V,ges,C
[-]	[l/h]	[Nm³/h]	[°C]	[mbar]	[1]	[l/min]	[mg/Nm³]	[Nm³/h]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/h]	[kg/h]	[kmol/h]	[kmol/h]	[kmol/h]
1	60	Center	20,89	1,629	11,41	1,00	571,34	0,9994	1,1845	5,710E-04	1,184	8,913E-06	0,04088	0,04088	0,04088
2			20,89	1,645	11,38	1,00	494,43	1,9994	1,1845	9,886E-04	2,368	1,543E-05	0,08179	0,08179	0,08179
3			20,88	1,620	11,36	1,00	394,75	2,9994	1,1845	1,184E-03	3,553	1,848E-05	0,12268	0,12270	0,12270
4			20,87	1,605	11,33	1,00	322,42	3,9994	1,1846	1,290E-03	4,737	2,013E-05	0,16359	0,16361	0,16361
5			20,87	1,614	11,30	1,00	266,70	4,9994	1,1846	1,333E-03	5,922	2,081E-05	0,20449	0,20451	0,20451
6			20,87	1,596	11,21	1,00	222,62	5,9994	1,1846	1,336E-03	7,107	2,085E-05	0,24539	0,24542	0,24542
7			20,87	1,615	11,14	1,00	190,93	6,9994	1,1846	1,336E-03	8,291	2,086E-05	0,28630	0,28632	0,28632
8			20,85	1,582	11,06	1,00	163,20	7,9994	1,1846	1,305E-03	9,476	2,038E-05	0,32722	0,32724	0,32724
		Mittelwert	20,874	1,614	11,274										

V.-Nr.	F_SO2_SET	PoM_SO2	F_AIR	T_m	dp_m	pH_m	F_SO2_Real_m	c_SO2_m	F_V,Luft,ges,T	P_Luft	m_V,SO2,T	m_V,Luft,ges,T	n_V,SO2,T	n_V,Luft,ges,T	n_V,ges,T
[-]	[l/h]	[Nm³/h]	[°C]	[mbar]	[1]	[l/min]	[mg/Nm³]	[Nm³/h]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/h]	[kg/h]	[kmol/h]	[kmol/h]	[kmol/h]
1	60	Top	20,87	1,609	11,51	1,00	283,12	0,9994	1,1846	2,830E-04	1,184	4,417E-06	0,04088	0,04088	0,04088
2			20,84	1,597	11,59	1,00	252,89	1,9994	1,1847	5,056E-04	2,369	7,893E-06	0,08179	0,08180	0,08180
3			20,81	1,618	11,65	1,00	213,24	2,9994	1,1848	6,396E-04	3,554	9,984E-06	0,12271	0,12272	0,12272
4			20,80	1,604	11,69	1,00	183,86	3,9994	1,1848	7,353E-04	4,739	1,148E-05	0,16363	0,16364	0,16364
5			20,78	1,614	11,73	1,00	158,56	4,9994	1,1849	7,927E-04	5,924	1,237E-05	0,20455	0,20456	0,20456
6			20,77	1,588	11,76	1,00	136,17	5,9994	1,1849	8,169E-04	7,109	1,275E-05	0,24547	0,24549	0,24549
7			20,77	1,627	11,79	1,00	115,01	6,9994	1,1850	8,050E-04	8,294	1,257E-05	0,28639	0,28641	0,28641
8			20,77	1,621	11,80	1,00	97,50	7,9994	1,1849	7,800E-04	9,479	1,218E-05	0,32731	0,32732	0,32732
		Mittelwert	20,802	1,610	11,692										

$$v_{Luft} = 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot T_{g,eth} + 1,18 \cdot 10^{-5}$$

$$D_{SO_2-Luft} = D_{SO_2-Luft}^0 \cdot \frac{p_{Betr.} [mbar]}{1013 [mbar]} \cdot \left(\frac{T_{Betr.} [K]}{273,15 [K]} \right)^{3/2}$$

V.-Nr.	F_SO2_SET	F_AIR	V_VSO2,B	Y_VLuft,B	P_SO2,B	V_g	D_SO2,luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]	[Nm³/h]	[kmol SO₂/kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m²/s]	[m²/s]	[l]	[l]	[l]	[m/s]
1	60	Bottom	6,730E-04	0,9993270	6,8280E-04	1,5534E-05	1,1453E-05	501,0	1,35628	4,57964	1,516E-03
2			3,495E-04	0,9996505	3,5463E-04	1,5536E-05	1,1453E-05	1001,9	1,35647	8,14057	2,695E-03
3			2,356E-04	0,9997644	2,3899E-04	1,5536E-05	1,1454E-05	1502,8	1,35642	11,39733	3,773E-03
4			1,773E-04	0,9998227	1,7988E-04	1,5536E-05	1,1453E-05	2003,7	1,35653	14,47139	4,791E-03
5			1,424E-04	0,9998576	1,4453E-04	1,5538E-05	1,1454E-05	2504,4	1,35654	17,41473	5,765E-03
6			1,190E-04	0,9998810	1,2076E-04	1,5539E-05	1,1454E-05	3005,0	1,35657	20,25897	6,707E-03
7			1,027E-04	0,9998973	1,0424E-04	1,5539E-05	1,1454E-05	3505,8	1,35662	23,02383	7,623E-03
8			9,017E-05	0,9999098	9,1489E-05	1,5539E-05	1,1454E-05	4006,6	1,35662	25,72247	8,516E-03
Mittelwert											
						1,55372E-05	1,14538E-05		1,3565047		

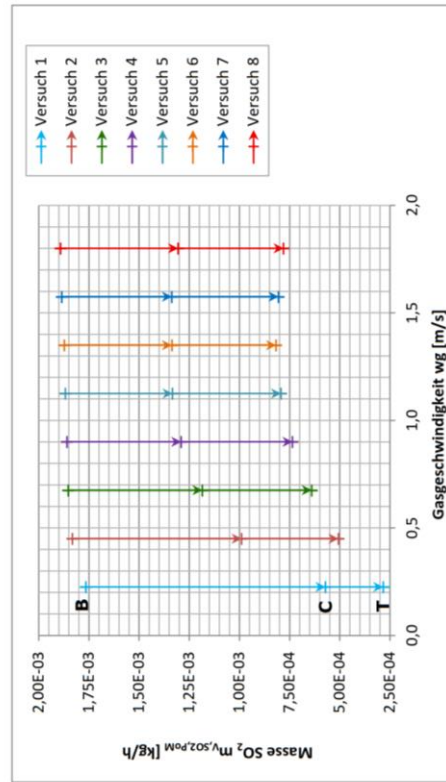
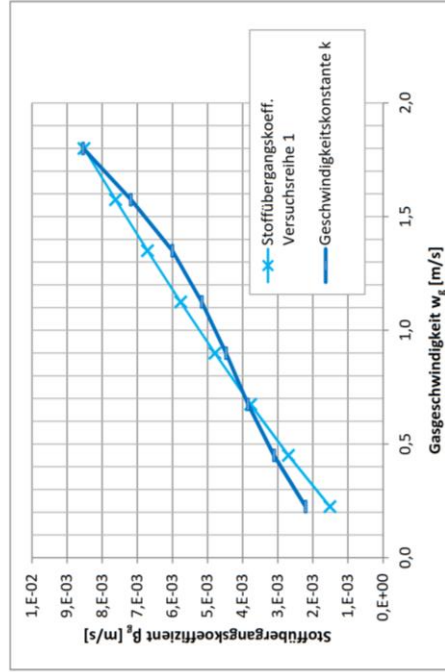
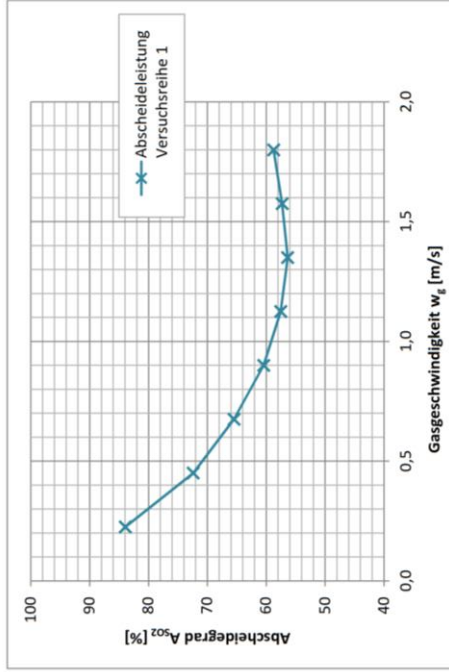
V.-Nr.	F_SO2_SET	PoM_SO2	F_AIR	Y_VSO2,C	Y_VLuft,C	P_SO2,C	V_g	D_SO2,luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]		[Nm³/h]	[kmol SO₂/kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m²/s]	[m²/s]	[l]	[l]	[l]	[m/s]
1	60	Center	2,180E-04	0,9997820	2,2120E-04	1,5560E-05	1,1461E-05	500,1	1,35769	4,57517	1,516E-03	
2			1,887E-04	0,9998113	1,9144E-04	1,5561E-05	1,1461E-05	1000,3	1,35772	8,13323	2,694E-03	
3			1,506E-04	0,9998494	1,5284E-04	1,5559E-05	1,1460E-05	1500,6	1,35759	11,38799	3,772E-03	
4			1,230E-04	0,9998770	1,2483E-04	1,5557E-05	1,1460E-05	2001,0	1,35748	14,46015	4,790E-03	
5			1,018E-04	0,9998982	1,0326E-04	1,5556E-05	1,1460E-05	2501,4	1,35746	17,40284	5,764E-03	
6			8,495E-05	0,9999150	8,6194E-05	1,5556E-05	1,1460E-05	3001,6	1,35745	20,24561	6,706E-03	
7			7,286E-05	0,9999271	7,3926E-05	1,5556E-05	1,1460E-05	3501,9	1,35747	23,00934	7,621E-03	
8			6,227E-05	0,9999377	6,3183E-05	1,5553E-05	1,1459E-05	4003,0	1,35727	25,70887	8,515E-03	
Mittelwert												
						1,55573E-05	1,14601E-05		1,3575147			

V.-Nr.	F_SO2_SET	PoM_SO2	F_AIR	Y_VSO2,T	Y_VLuft,T	P_SO2,T	V_g	D_SO2,luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]		[Nm³/h]	[kmol SO₂/kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m²/s]	[m²/s]	[l]	[l]	[l]	[m/s]
1	60	Top	1,080E-04	0,9998920	1,0962E-04	1,5557E-05	1,1460E-05	500,3	1,35747	4,57579	1,516E-03	
2			9,649E-05	0,9999035	9,7902E-05	1,5551E-05	1,1458E-05	1000,9	1,35717	8,13610	2,695E-03	
3			8,136E-05	0,9999186	8,2546E-05	1,5546E-05	1,1456E-05	1501,8	1,35697	11,39334	3,773E-03	
4			7,015E-05	0,9999299	7,1171E-05	1,5544E-05	1,1456E-05	2002,7	1,35685	14,46704	4,790E-03	
5			6,049E-05	0,9999395	6,1376E-05	1,5541E-05	1,1455E-05	2503,8	1,35673	17,41265	5,765E-03	
6			5,195E-05	0,9999481	5,2707E-05	1,5539E-05	1,1455E-05	3004,9	1,35660	20,25868	6,707E-03	
7			4,388E-05	0,9999561	4,4518E-05	1,5539E-05	1,1454E-05	3505,9	1,35663	23,02457	7,623E-03	
8			3,720E-05	0,9999628	3,7742E-05	1,5539E-05	1,1454E-05	4006,6	1,35664	25,72266	8,516E-03	
Mittelwert												
						1,55444E-05	1,1456E-05		1,3568825			

Versuchsreihe 1

Arithm. Mittelwert
Bottom => Top

V.-Nr.	G [Nm³/h]	W _{Gas} [m/s]	Re _{g,meanB<=>T} [1]	β _{g,meanB<=>T} [m/s]	k _{B<=>T} [m/s]	C _{SO2,B} [mg/Nm³]	C _{SO2,T} [mg/Nm³]	A _{SO2} [%]
1	1	0,225	500,5	0,00152	0,002206	1765,41	283,12	84
2	2	0,450	1001,0	0,00269	0,003104	916,51	252,89	72
3	3	0,675	1501,7	0,00377	0,003846	617,60	213,24	65
4	4	0,900	2002,5	0,00479	0,004472	464,80	183,86	60
5	5	1,125	2503,2	0,00576	0,005163	373,44	158,56	58
6	6	1,350	3003,9	0,00671	0,005997	312,03	136,17	56
7	7	1,575	3504,5	0,00762	0,007180	269,33	115,01	57
8	8	1,800	4005,4	0,00852	0,008540	236,37	97,50	59



10.6 Messdaten der Versuchsreihe 2

$$H_K = \frac{\dot{G}_{inert}}{S_{kg} * p_{ges} * \beta_{g,A} * a_{sv}} * \ln \left(\frac{y_{SO_2,atin}}{y_{SO_2,aus}} \right)$$

$$k = \frac{F_V}{2 * r * \pi * H} * \ln \left(\frac{C_{A,0}}{C_A} \right)$$

Versuchsreihe 2

V.-Nr.	F-H2O [l/h]	G [Nm³/h]	F _{V,dnuckluft} [Nm³/h]	F _{V,MFC,ges} [Nm³/h]	F _{V,MFC,SO2} [Nm³/h]	F _{V,luft,ges} [Nm³/h]	m _{V,luft,ges} [kg/h]	m _{V,SO2} [kg SO ₂ /h]	n _{V,luft} [kmol/h]	n _{V,SO2} [kmol/h]	n _{V,ges} [kmol/h]	W _{Gas} [m/s]	Bottom => Top β _{g,B<=>T} [m/s]	k _{g<=>T} [m/s]	H [m]	
9	40	0	0	0,042	0,00042	0,0416	0,0501	1,20E-03	0,0017	1,88E-05	1,747E-03	0,225	0,001515	0,002179	43,8%	3,00
10	40	1	0,958	0,042	0,00042	0,9996	1,2035	1,20E-03	0,0416	1,88E-05	4,158E-02	0,450	0,002693	0,002950	9,5%	2,29
11		2	1,958			1,9996	2,4075		0,0831		8,315E-02	0,675	0,003771	0,003822	1,3%	2,12
12		3	2,958			2,9996	3,6115		0,1247		1,247E-01	0,900	0,004788	0,004275	-10,7%	1,87
13		4	3,958			3,9996	4,8155		0,1663		1,663E-01	1,125	0,005762	0,004890	-15,1%	1,77
14		5	4,958			4,9996	6,0195		0,2079		2,079E-01	1,350	0,006704	0,005699	-15,0%	1,78
15		6	5,958			5,9996	7,2235		0,2494		2,494E-01	1,575	0,007619	0,006850	-10,1%	1,88
16		7	6,958			6,9996	8,4275		0,2910		2,910E-01	1,800	0,008513	0,008246	-3,1%	2,02
		8	7,958			7,9996	9,6315		0,3326		3,326E-01					

Werte aller 8 Versuche, gemittelt von Boden bis Kopf

V _g [m³/s]	D _{SO2,luft} [m²/s]	S _{Cg} [1]	a _F [m]	S _{kg} [m²]	S _{FF} [m²]	a _{sv} [m²/m³]	a _{gH} [m²/m]	H _k [m]
1,56E-05	1,147E-05	1,360	0,000800	0,001183512	0,230424965	91,8377	0,1087	2,09

$$\rho_{Luft} = -8,333 \cdot 10^{-8} \cdot T_{g,eth}^3 + 1,857 \cdot 10^{-5} \cdot T_{g,eth}^2 - 4,685 \cdot 10^{-3} \cdot T_{g,eth} + 1,275$$

V.-Nr.	F_SO2_SET [l/h]	PoM_SO2	F_AIR [l/h]	T_m [°C]	dp_m [mbar]	pH_m [l]	F_SO2_Real_m [l/min]	c_SO2_m [mg/Nm³]	F_V,Luft,ges,B [Nm³/h]	P_Luft [kg/m³]	m_V,SO2,B [kg/h]	m_V,Luft,ges,B [kg/h]	n_V,SO2,B [kmol/h]	n_V,Luft,ges,B [kmol/h]	n_V,ges,B [kmol/h]
9	42	Bottom	1	21,15	1,592	11,05	0,70	1238,90	0,99958	1,1834	1,238E-03	1,183	1,933E-05	0,04085	0,04087
10			2	21,10	1,579	11,29	0,70	636,35	1,99958	1,1836	1,272E-03	2,367	1,986E-05	0,08172	0,08174
11			3	21,09	1,530	11,34	0,70	429,64	2,99958	1,1837	1,289E-03	3,551	2,012E-05	0,12260	0,12262
12			4	21,14	1,628	11,56	0,70	322,68	3,99958	1,1835	1,291E-03	4,733	2,015E-05	0,16345	0,16347
13			5	21,11	1,628	11,55	0,70	258,69	4,99958	1,1836	1,293E-03	5,917	2,019E-05	0,20433	0,20435
14			6	21,11	1,644	11,54	0,70	220,38	5,99958	1,1836	1,322E-03	7,101	2,064E-05	0,24520	0,24522
15			7	21,07	1,602	11,49	0,70	186,94	6,99958	1,1838	1,308E-03	8,286	2,043E-05	0,28611	0,28613
16			8	21,06	1,592	11,49	0,70	167,50	7,99958	1,1838	1,340E-03	9,470	2,092E-05	0,32700	0,32702
		Mittelwert		21,103	1,600	11,416									

V.-Nr.	F_SO2_SET [l/h]	PoM_SO2	F_AIR [l/h]	T_m [°C]	dp_m [mbar]	pH_m [l]	F_SO2_Real_m [l/min]	c_SO2_m [mg/Nm³]	F_V,Luft,ges,C [Nm³/h]	P_Luft [kg/m³]	m_V,SO2,C [kg/h]	m_V,Luft,ges,C [kg/h]	n_V,SO2,C [kmol/h]	n_V,Luft,ges,C [kmol/h]	n_V,ges,C [kmol/h]
9	42	Center	1	21,14	1,580	11,11	0,70	404,03	0,99958	1,1835	4,039E-04	1,183	6,304E-06	0,04085	0,04085
10			2	21,11	1,635	11,26	0,70	353,98	1,99958	1,1836	7,078E-04	2,367	1,105E-05	0,08172	0,08173
11			3	21,08	1,569	11,37	0,70	274,86	2,99958	1,1837	8,245E-04	3,551	1,287E-05	0,12261	0,12262
12			4	21,13	1,559	11,60	0,70	226,57	3,99958	1,1835	9,062E-04	4,733	1,415E-05	0,16345	0,16346
13			5	21,12	1,615	11,57	0,70	185,88	4,99958	1,1836	9,293E-04	5,917	1,451E-05	0,20433	0,20434
14			6	21,11	1,600	11,53	0,70	160,24	5,99958	1,1836	9,614E-04	7,101	1,501E-05	0,24520	0,24522
15			7	21,08	1,602	11,50	0,70	132,90	6,99958	1,1837	9,302E-04	8,286	1,452E-05	0,28610	0,28612
16			8	21,05	1,623	11,47	0,70	118,35	7,99958	1,1838	9,468E-04	9,470	1,478E-05	0,32701	0,32703
		Mittelwert		21,102	1,598	11,425									

V.-Nr.	F_SO2_SET [l/h]	PoM_SO2	F_AIR [l/h]	T_m [°C]	dp_m [mbar]	pH_m [l]	F_SO2_Real_m [l/min]	c_SO2_m [mg/Nm³]	F_V,Luft,ges,T [Nm³/h]	P_Luft [kg/m³]	m_V,SO2,T [kg/h]	m_V,Luft,ges,T [kg/h]	n_V,SO2,T [kmol/h]	n_V,Luft,ges,T [kmol/h]	n_V,ges,T [kmol/h]
9	42	Top	1	21,14	1,627	11,16	0,70	203,21	0,99958	1,1835	2,031E-04	1,183	3,171E-06	0,04085	0,04085
10			2	21,12	1,631	11,23	0,70	187,22	1,99958	1,1836	3,744E-04	2,367	5,844E-06	0,08172	0,08173
11			3	21,06	1,570	11,40	0,70	149,34	2,99958	1,1838	4,479E-04	3,551	6,993E-06	0,12261	0,12262
12			4	21,14	1,616	11,59	0,70	132,98	3,99958	1,1835	5,319E-04	4,733	8,302E-06	0,16345	0,16346
13			5	21,13	1,610	11,58	0,70	114,93	4,99958	1,1835	5,746E-04	5,917	8,970E-06	0,20432	0,20433
14			6	21,10	1,612	11,52	0,70	100,23	5,99958	1,1836	6,013E-04	7,101	9,387E-06	0,24521	0,24522
15			7	21,09	1,612	11,49	0,70	83,01	6,99958	1,1837	5,811E-04	8,285	9,070E-06	0,28609	0,28610
16			8	21,03	1,602	11,45	0,70	71,23	7,99958	1,1839	5,698E-04	9,471	8,895E-06	0,32702	0,32703
		Mittelwert		21,102	1,610	11,427									

$$v_{Luft} = 1,8 \cdot 10^{-7} \cdot T_{g,eth} + 1,18 \cdot 10^{-5}$$

$$D_{SO_2-Luft} = D_{SO_2-Luft}^0 \cdot \frac{p_{Betr.} [\text{mbar}]}{1013 [\text{mbar}]} \cdot \left(\frac{T_{Betr.} [\text{K}]}{273,15 [\text{K}]} \right)^{3/2}$$

V.-Nr.	F_SO2_SET	F_AIR	Vv_SO2,B	Vv_Luft,B	P_SO2,B	Vl	D_SO2-Luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]	[l/h]	[kmol SO ₂ /kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m ² /s]	[m ² /s]	[1]	[1]	[1]	[m/s]
9	42	Bottom	4,730E-04	0,9995270	4,7995E-04	1,5607E-05	1,1477E-05	498,7	1,35992	4,56726	1,515E-03
10			2,430E-04	0,9997570	2,4653E-04	1,5598E-05	1,1474E-05	997,9	1,35948	8,12179	2,694E-03
11			1,641E-04	0,9998359	1,6645E-04	1,5595E-05	1,1473E-05	1497,1	1,35926	11,37229	3,771E-03
12			1,232E-04	0,9998768	1,2505E-04	1,5605E-05	1,1475E-05	1995,0	1,35984	14,43499	4,788E-03
13			9,880E-05	0,9999012	1,0024E-04	1,5600E-05	1,1474E-05	2494,5	1,35962	17,37503	5,762E-03
14			8,417E-05	0,9999158	8,5398E-05	1,5600E-05	1,1474E-05	2993,5	1,35962	20,21422	6,704E-03
15			7,139E-05	0,9999286	7,2428E-05	1,5592E-05	1,1472E-05	3494,0	1,35921	22,97903	7,619E-03
16			6,396E-05	0,9999360	6,4896E-05	1,5591E-05	1,1471E-05	3993,5	1,35912	25,67369	8,512E-03
		Mittelwert				1,55986E-05	1,14737E-05		1,3595075		

V.-Nr.	F_SO2_SET	F_AIR	Vv_SO2,C	Vv_Luft,C	P_SO2,C	Vl	D_SO2-Luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]	[l/h]	[kmol SO ₂ /kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m ² /s]	[m ² /s]	[1]	[1]	[1]	[m/s]
9	42	Center	1,543E-04	0,9998457	1,5656E-04	1,5606E-05	1,1476E-05	498,7	1,35983	4,56751	1,515E-03
10			1,352E-04	0,9998648	1,3717E-04	1,5600E-05	1,1474E-05	997,8	1,35964	8,12140	2,693E-03
11			1,050E-04	0,9998950	1,0649E-04	1,5594E-05	1,1472E-05	1497,3	1,35923	11,37323	3,771E-03
12			8,654E-05	0,9999135	8,7798E-05	1,5604E-05	1,1476E-05	1995,1	1,35973	14,43476	4,788E-03
13			7,099E-05	0,9999290	7,2032E-05	1,5601E-05	1,1474E-05	2494,4	1,35964	17,37438	5,762E-03
14			6,120E-05	0,9999388	6,2092E-05	1,5599E-05	1,1474E-05	2993,5	1,35954	20,21404	6,704E-03
15			5,075E-05	0,9999492	5,1494E-05	1,5594E-05	1,1472E-05	3493,6	1,35929	22,97765	7,619E-03
16			4,519E-05	0,9999548	4,5855E-05	1,5588E-05	1,1470E-05	3994,2	1,35904	25,67646	8,513E-03
		Mittelwert				1,55983E-05	1,14736E-05		1,3594924		

V.-Nr.	F_SO2_SET	F_AIR	Vv_SO2,T	Vv_Luft,T	P_SO2,T	Vl	D_SO2-Luft	Re_g	Sc_g	Sh_g	β_g
[-]	[l/h]	[l/h]	[kmol SO ₂ /kmol]	[kmol Luft/kmol]	[bar]	[m ² /s]	[m ² /s]	[1]	[1]	[1]	[m/s]
9	42	Top	7,762E-05	0,9999224	7,8752E-05	1,5604E-05	1,1475E-05	498,8	1,35983	4,56781	1,515E-03
10			7,151E-05	0,9999285	7,2553E-05	1,5601E-05	1,1474E-05	997,7	1,35968	8,12115	2,693E-03
11			5,703E-05	0,9999430	5,7857E-05	1,5591E-05	1,1472E-05	1497,6	1,35910	11,37441	3,771E-03
12			5,079E-05	0,9999492	5,1536E-05	1,5604E-05	1,1475E-05	1995,0	1,35981	14,43498	4,788E-03
13			4,390E-05	0,9999561	4,4542E-05	1,5603E-05	1,1475E-05	2494,0	1,35975	17,37283	5,762E-03
14			3,828E-05	0,9999617	3,8839E-05	1,5599E-05	1,1474E-05	2993,6	1,35954	20,21450	6,704E-03
15			3,170E-05	0,9999683	3,2167E-05	1,5597E-05	1,1473E-05	3493,0	1,35944	22,97536	7,619E-03
16			2,720E-05	0,9999728	2,7596E-05	1,5586E-05	1,1470E-05	3994,7	1,35891	25,67819	8,513E-03
		Mittelwert				1,55983E-05	1,14735E-05		1,3595063		

Versuchsreihe 2
Arithm. Mittelwert
Bottom => Top

V.-Nr.	G	W_{Gas}	$Re_{g, \text{mean}B \leftarrow T}$	$\beta_{g, \text{mean}B \leftarrow T}$	$k_{g \leftarrow T}$	$C_{\text{SO}_2, B}$	$C_{\text{SO}_2, T}$	A_{SO_2}
	[Nm ³ /h]	[m/s]	[1]	[m/s]	[m/s]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[%]
9	1	0,225	498,7	0,00152	0,002179	1238,90	203,21	84
10	2	0,450	997,8	0,00269	0,002950	636,35	187,22	71
11	3	0,675	1497,3	0,00377	0,003822	429,64	149,34	65
12	4	0,900	1995,0	0,00479	0,004275	322,68	132,98	59
13	5	1,125	2494,3	0,00576	0,004890	258,69	114,93	56
14	6	1,350	2993,5	0,00670	0,005699	220,38	100,23	55
15	7	1,575	3493,6	0,00762	0,006850	186,94	83,01	56
16	8	1,800	3994,1	0,00851	0,008246	167,50	71,23	57

