



## Diplomarbeit

# Untersuchung des Stoffaustausches bei der SO<sub>2</sub> – Absorption am fallenden Einzeltropfen

erstellt am

**Institut für Verfahrenstechnik des Industriellen Umweltschutzes**

**o.Univ.Prof.Dr.W.L.Kepplinger**

**Peter-Tunner-Strasse 15**

**A - 8700 Leoben**

**Vorgelegt von:**

Jürgen Gronostay

Ringweg 15

9524 St. Magdalen

**Betreuer:**

DI Dr. Christian Weiß

a.o. Prof. DI Dr. J. Draxler

Leoben, April 2003

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen Menschen bedanken, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben. Besonders dankbar bin ich Herrn Dr. Christian Weiß und Herrn a.o. Professor Dr. Josef Draxler für die sehr gute Betreuung und die nachfolgenden Korrekturarbeiten. Herrn Dr. Christian Weiß danke ich besonders, weil er mich auf freundschaftliche Weise betreut hat und mir seine wertvolle Erfahrung auf diesem Gebiet weitergegeben hat. Darüber hinaus danke ich meinen Freunden für das Verständnis für mein Engagement am Projekt, sowie meiner Familie für die Unterstützung und Geduld während meines gesamten Studiums.

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

# 1 Kurzfassungen Deutsch und Englisch

## 1.1 Kurzfassung Deutsch

Im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit wurde eine Versuchsanlage zur Durchführung von Stoffaustauschmessungen an fallenden Einzeltropfen konstruiert und am Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes in Betrieb genommen.

Ziel dieser Arbeit war es, zu zeigen, dass der Stoffaustausch durch Absorption am fallenden Einzeltropfen messtechnisch erfassbar ist. Weiters sollten die Einflussparameter auf den Stoffaustausch, im Hinblick auf die von Seiten der Theorie absehbaren Wirkungen, experimentell überprüft werden.

Die Hauptkomponenten der Versuchsanlage sind die Tropfensäule, der Tropfengenerator und die Absaugtrichterkapillare. Die Tropfenerzeugung im Tropfengenerator erfolgt nach dem Grundprinzip einer mit Druckstößen beaufschlagten Kapillare, wobei die Druckstöße durch eine Pulsgeberschaltung und einem elektromagnetischen Stößel hervorgerufen werden. Die transparente Stoffaustauschsäule besitzt einen Innendurchmesser von 90 mm und eine Aktivhöhe von 2000 mm, wobei sich entlang der Säule vier Messstutzen befinden, welche zur Aufnahme und Fixierung der Absaugtrichterkapillare dienen. Die aktive Messhöhe wurde verändert, um die Kontaktzeit der frei fallenden Einzeltropfen mit der Gasphase variieren zu können. Die aufgefangenen Tropfen wurden in einem Probenahmegefäß gesammelt und der Nassanalytik zugeführt.

Die Gasphase stellte ein Luft-SO<sub>2</sub>-Gemisch dar, wobei der SO<sub>2</sub>-Gehalt je nach Versuchsanordnung zwischen 500 ppm und 3000 ppm variierte. Als Flüssigphase wurde deionisiertes Wasser eingesetzt.

Die SO<sub>2</sub>-Konzentration in der Gasphase wurde mittels einer Online-Gasanalytik NDIR-spektrometrisch bestimmt, die Sulfit-Konzentration, in den Tropfen, iodometrisch erfasst. Diese Messungen gestatten in Kombination mit einer Größenbestimmung der Tropfen eine Bilanzierung des Austauschvorganges im Stoffsystem.

## 1.2 Abstract

The aim of this diploma thesis was the construction of an apparatus for the measurement of mass transfer in a single falling droplet. This apparatus was constructed and tested in the Department for Process Technology and Industrial Environment Protection. A secondary aim was to show that the mass transfer is measurable within the chemisorption experiment. The influencing parameters with regard to the theory were also experimentally checked.

The main components of the apparatus comprised the droplet column, the droplet generator and a collector capillary. The droplets were generated based on the principle of a pressure pulse in a capillary coupled with an electronic plunger. The droplet column consisted of a Plexiglas tube with an inside diameter of 90 mm and an effective height of 2000 mm. Four measuring points containing the respective capillary were built into this column. Using these measurement points the effective height of the column and therefore the contact time of the droplet with the gas phase could be varied. The droplets were collected and chemically analysed.

The gas phase consisted of a SO<sub>2</sub> in air mixture and depending on the test was varied between 500 ppm and 3000 ppm SO<sub>2</sub>. For the liquid phase deionised water was used.

The SO<sub>2</sub> concentration was measured with an online NDIR-spectrometer and the sulphite concentration in the droplet was iodometric determined. These measurements combined with a determination of the droplet size allowed a balance of the mass transfer to be calculated.

---

1	KURZFASSUNGEN DEUTSCH UND ENGLISCH .....	1
1.1	Kurzfassung Deutsch .....	1
1.2	Abstract .....	2
2.	AUSGANGSSITUATION .....	6
3.	ZIELSETZUNG .....	7
4	THEORETISCHE GRUNDLAGEN .....	8
4.1	Das Phasengleichgewicht .....	8
4.2	Die Stoffübertragung .....	8
4.3	Absorption .....	9
4.4	Stoffübergangstheorien .....	10
4.4.1	Die Zwei-Film-Theorie .....	10
4.4.1.1	Gesamtwiderstand auf die Gasseite bezogen .....	11
4.4.1.2	Gesamtwiderstand auf die Flüssigseite bezogen .....	11
4.4.2	Die Penetrationstheorie .....	13
4.4.3	Die Oberflächenerneuerungstheorie .....	14
4.4.4	Die kombinierte Film – Penetrationstheorie .....	14
4.5	Ähnlichkeitstheorie .....	15
4.5.1	Allgemeines .....	15
4.5.2	Arten von Ähnlichkeiten .....	16
4.5.2.1	Geometrische Ähnlichkeit .....	16
4.5.2.2	Physikalische Ähnlichkeit .....	16
4.5.2.3	Partielle Ähnlichkeit .....	16
4.5.3	Vorteile der Ähnlichkeitstheorie .....	16
4.5.4	Wichtige dimensionslose Kennzahlen .....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
4.6.1	Stoffübergang an Kugeln und anderen Körpern .....	19
4.6.2	Stofftransport .....	19
5	BESCHREIBUNG DES STOFFSYSTEMS .....	26
5.1	Wasser .....	26
5.2	Iod .....	28
5.3	Schwefeldioxid .....	30
5.4	Natriumthiosulfat .....	31

---

5.5	Schwefel .....	31
6	BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	34
6.1	Beschreibung der Einzelkomponenten der Anlage .....	34
6.1.1	Aufgabebehälter der Flüssigphase.....	34
6.1.2	Die Präzisionsschlauchpumpe .....	34
6.1.3	Der Tropfengenerator .....	35
6.1.5	Die Absaugtrichterkapillare.....	41
6.1.6	Das Probenahmegefäß mit vorgelegter Iodlösung .....	42
6.1.7	Die Gasanalytik .....	42
6.2	Inbetriebnahme der Anlage.....	45
6.2.1	Vorbereitungen im Labor .....	45
6.2.2	Anfahren der Anlage.....	45
6.2.3	Aufgabe der Gasphase.....	46
6.2.4	Durchführung des Einzelversuches.....	47
6.2.5	Auswertung des Versuches.....	47
6.3	Schematische Darstellung der Versuchsanlage.....	49
7	THEORETISCHE BERECHNUNG DES STOFFDURCHGANGS- KOEFFIZIENTEN .....	50
7.1	Ermittlung der Tropfengröße .....	50
7.2	Berechnung der Tropfengeschwindigkeit.....	52
7.2.1	Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit.....	52
7.2.2	Berechnung über das Diagramm: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynolds-Zahl .....	53
7.2.3	Berechnung über die Formel von Kaskas und Brauer für den Widerstandsbeiwert.....	55
7.3	Berechnung der Tropfenkonzentration und des Stoffaustausches .....	57
7.3.1	Formeln allgemein.....	57
7.3.2	Berechnung des Stoffdurchgangskoeffizienten:.....	57
7.3.3	Berechnung der Kontaktfläche .....	58
7.3.4	Berechnung des Konzentrationsunterschiedes .....	58
7.4	Berechnungsbeispiele für verschiedene Tropfendurchmesser .....	59
7.4.1	Tropfendurchmesser: 2,3 mm .....	59
7.4.2	Tropfendurchmesser: 3,5 mm .....	64

---

8	PARAMETER DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHE .....	70
9	BERECHNUNGEN ZUR AUSWERTUNG DER DURCHGEFÜHRTEN VERSUCHE .....	72
9.1	Allgemeines .....	72
9.1.1	Auswertung der Ergebnisse der einzelnen Messstellen.....	74
9.1.1.1	Gemessene Daten, Einzelversuch 12 (unterste Messstelle = 1900mm)....	74
9.1.1.2	Gemessene Daten, Einzelversuch 2 (oberste Messstelle=400mm).....	77
9.1.1.3	Gemessene Daten, Einzelversuch 3 (oberste Messstelle= 400 mm).....	79
9.1.1.4	Gemessene Daten, Einzelversuch 11 (unterste Messstelle = 1900mm)....	81
10	DISKUSSION UND INTERPRETATION DER ERGEBNISSE .....	84
10.1	Interpretation der Ergebnisse und Ausblick auf weitere Versuchsreihen .....	85
11	ZUSAMMENFASSUNG.....	87

## 2 Ausgangssituation

Absorbieren nennt man die selektive Aufnahme eines Gases in einer Flüssigkeit unter molekulardispenser Verteilung. [1]

Bei der Absorption findet eine Stoffübertragung zwischen einer gasförmigen und einer flüssigen Phase statt.

Der Absorptionsprozess ist ein selektiver Vorgang, d. h. jedes Absorbens (Flüssigkeit) besitzt die Fähigkeit, nur ganz bestimmte Absorptive (Gaskomponenten) aufzunehmen. Andere Gaskomponenten werden entweder überhaupt nicht oder nur in sehr geringen Mengen absorbiert.

So verwendet man beispielsweise für die Absorption von Schwefeldioxid als Absorptionsmittel Wasser sowie Ammonsulfat-, Soda- und Kalklösungen.

Da bei der industriellen Gasreinigung von  $\text{SO}_2$  Sprühwäscher zum Einsatz kommen, bei denen auf verschiedenen Ebenen in den Sprühtürmen Wasser bzw. Kalklösungen eingespritzt werden, deren Flüssigkeitsstrahlen gleich abreisen und sich Tropfen bilden, ist es wichtig, das Stoffübergangsverhalten des Einzeltropfen zu kennen. [1],[2]

### 3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf, der Bau und die Inbetriebnahme einer Versuchsanlage zur Durchführung von Stoffaustauschmessungen an fallenden Einzeltopfen. Weiters ist zu zeigen, dass der Stoffaustausch durch Absorption am fallenden Einzeltopfen messtechnisch erfassbar sei. Es soll durch verschiedene Versuchsreihen bewiesen werden, dass der Stoffdurchgangskoeffizient  $k$  experimentell ermittelt werden kann. Mit Hilfe der Stoffübergangstheorien, wie der Zwei-Film-Theorie, der Penetrationstheorie, der Oberflächenerneuerungstheorie und der kombinierten Zwei-Film-Penetrationstheorie können die erlangten Ergebnisse rechnerisch bestätigt werden.

Weiters soll diese Demonstrationsanlage für Laborübungen am Institut für Verfahrenstechnik zur Ausbildung der Studenten Verwendung finden. Ziel der Laborübung ist es, die grundlegenden Stoffaustauschphänomene beim  $\text{SO}_2$ -Übergang aus einer Gasphase in eine fluide Phase aufzuzeigen und zu verdeutlichen.

## 4 Theoretische Grundlagen

### 4.1 Das Phasengleichgewicht

Ein Stofftransport tritt dann auf, wenn zwei Phasen miteinander in Kontakt gebracht werden. Dieser Stofftransport hält so lange an, bis die Temperatur und die Konzentrationen in beiden Phasen konstante Werte angenommen haben. Ist dieser Zustand erreicht, so spricht man von einem Gleichgewichtszustand.

Da die Gleichgewichtszusammensetzung der beiden Phasen oft sehr unterschiedlich ist, kann diese Konzentrationsdifferenz in Trennprozessen ausgenutzt werden. Dies geschieht alltäglich bei den verschiedenen Trennverfahren wie Rektifikation, Extraktion, Absorption, Kristallisation usw.. Deshalb ist das Phasengleichgewichtsverhalten im Chemieingenieurwesen von besonderer Bedeutung.

Die Gleichgewichtszusammensetzung hängt von den intensiven Variablen Temperatur, Druck und der Zusammensetzung der unterschiedlichen chemischen Verbindungen ab. Mit Hilfe der Phasengleichgewichtsthermodynamik versucht man eine Beziehung zwischen diesen Variablen herzustellen, um das Phasengleichgewichtsproblem zu lösen. [3]

### 4.2 Die Stoffübertragung

Unter Stoffübertragung versteht man den Transport einer oder mehrerer Komponenten eines Gemisches fluider oder fester Stoffe innerhalb einer Phase, oder über Phasengrenzflächen hinweg.

Die Stoffübertragung innerhalb einer Phase bis an die Phasengrenzfläche bezeichnet man als „Stoffübergang“, die über die Phasengrenze hinweg in eine andere Phase als „Stoffdurchgang“. Die treibende Kraft für den Stoffübergang sind Konzentration, Temperatur und Druckgradienten. Ich befasse mich mit dem am häufigsten vorkommenden Stoffübergang durch den Konzentrationsgradienten. Die Komponenten eines Gemisches bewegen sich von Bereichen höherer zu denen niedrigerer Konzentration. Gleichgewicht hinsichtlich des Stoffüberganges ist dann erreicht, wenn die treibenden Kräfte, also die Konzentrationsunterschiede verschwunden sind. Trennprozesse der Verfahrenstechnik, wie die Trocknung fester Stoffe, die Destillation, Extraktion und Sorption beruhen auf Vorgänge der Stoffübertragung. Diese spielen ebenso eine Rolle bei der Herstellung von Werkstoffen um gewünschte Eigenschaften zu erzielen. Der Ablauf chemischer Reaktionen wird oft entscheidend durch die Stoffübertragung bestimmt. [3],[4]

### 4.3 Absorption

Die Absorption ist schon immer ein wichtiger Bestandteil vieler technischer Prozesse gewesen. Überall, wo Gasgemische getrennt werden sollen um eine Komponente einen Prozess zuzuführen oder um eine Komponente als Produkt rein zu erhalten, muss sie als Verfahrensschritt in Betracht gezogen werden. Zusätzliche Bedeutung erlangte die Absorption in den letzten Jahren, seitdem Umweltschutz wachsende Bedeutung zukommt und schädliche Prozessabgase nicht mehr ohne weiteres der Umwelt zugeführt werden dürfen. Die Absorption muss deshalb zu jenen verfahrenstechnischen Grundoperationen gezählt werden, die eine Schlüsselstellung einnehmen. Es ist somit unumgänglich, sich im Rahmen einer verfahrenstechnischen Grundbildung auf diesem Gebiet einige Kenntnisse zu verschaffen. [4]

Der Begriff Absorption ist wie folgt definiert:

*„Absorbieren ist die Aufnahme eines Gases in das Innere einer kondensierten Phase unter molekulardispenser Verteilung.“ [1]*

Den umgekehrten Vorgang, die Entfernung des aufgenommenen Absorptivs aus dem Absorbat, bezeichnet man als Desorption (oder Austreiben) . Unter Desorption wird das Trennen eines absorbierten Gases, einer als Sorbens dienenden Flüssigkeit durch Temperatursteigerung und/oder Partialdruckerniedrigung, verstanden. Dabei handelt es sich um eine Regenerierung des Absorptionsmittels, wenn dieses erneut für die Durchführung des Absorptionsprozesses eingesetzt werden soll – unter gleichzeitiger Gewinnung des Absorptivs. Dabei unterscheidet man folgende Desorptionsmethoden:

- Austreiben im inerten Gasstrom (Strippen),
- Austreiben durch Entspannen des Absorptionsmittels bei Absorptionstemperatur,
- Austreiben durch Erwärmen des Absorptionsmittels unterhalb der Siedetemperatur des Absorptionsmittels.

Bei der Absorption findet eine Stoffübertragung zwischen einer gasförmigen und einer flüssigen Phase statt. Diese Stoffübertragung kann physikalischer oder chemischer Art sein. Vorwiegend physikalische Bindungskräfte sind bei der physikalischen Absorption (z.B. bei der Entfernung von Butadin aus Synthesegasen mittels Petroleums) wirksam. Die chemisch wirkenden Lösungsmittel gehen im Gegensatz zu den physikalisch lösenden mit dem zu absorbierenden Stoff eine chemische Bindung ein (zum Beispiel bei der Entfernung des Ammoniaks aus  $\text{NH}_3$ -Luftgemischen mittels Wasser). [5]

## 4.4 Stoffübergangstheorien

Die Berechnung von Stoffübergangskoeffizienten  $\beta$  kann in verschiedener Weise geschehen, wobei man nach der Art des jeweiligen Problems darüber entscheiden muss, nach welcher Theorie man die Stoffübergangskoeffizienten am besten bestimmt. Die wichtigsten Theorien sind die Zwei-Film-, die Grenzschicht- und die Penetrationstheorie.

### 4.4.1 Die Zwei-Film-Theorie

Die Zwei-Film-Theorie ist die einfachste und älteste Modelltheorie zur Beschreibung des Stoffdurchganges. Sie versucht die Stoffaustauschvorgänge anhand eines Modells darzustellen, in welchem der gesamte vorhandene Widerstand durch die Diffusionswiderstände der beiden laminaren Grenzschichten beiderseits der Phasengrenzfläche ersetzt wird. In den beiden Grenzschichten soll der Stoffaustausch nur durch Molekulardiffusion erfolgen, so dass sich in diesen, in erster Näherung ein linearer Verlauf der Konzentration, entsprechend Abbildung 4.4.1. einstellt.

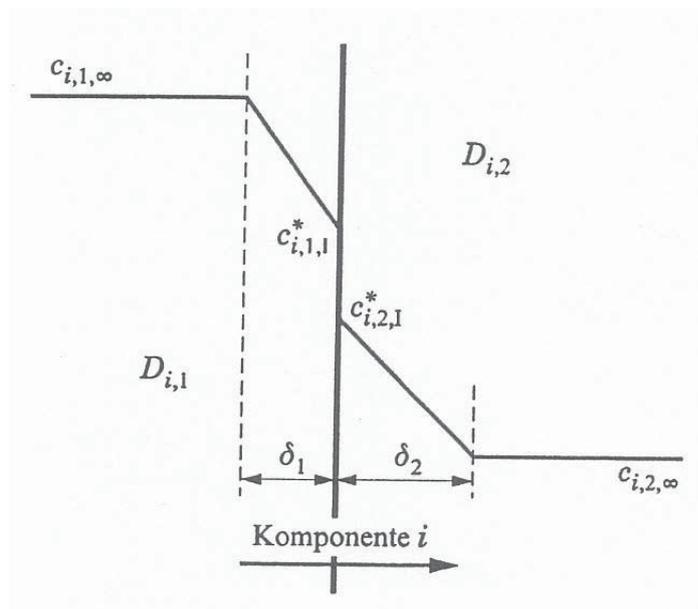


Abbildung 4.4.1.: Konzentrationsverlauf beim Stoffaustausch gemäß der Zwei-Film-Theorie

Der Stoffaustausch zwischen der Grenzschicht und dem Kern der Flüssigkeits- bzw. Gasphase erfolgt durch turbulente Strömungsvorgänge. Dabei kann das Konzentrationsgefälle vernachlässigt werden. Die Dicke der laminaren Grenzschicht und damit die Größe des Diffusionswiderstandes verkleinert sich bei dieser Modellvorstellung mit wachsender Strömungsgeschwindigkeit der einzelnen Phase. [6],[7],[8]

Die Molstromdichte kann nun mit Hilfe des Stoffübergangskoeffizienten  $\beta$  folgend formuliert werden:

$$n_{i,g}^* = \beta_g * (c_i^* - c_{i,g}) \quad (\text{Gl.: 4.4.1.1})$$

$$n_{i,l}^* = \beta_l * (c_i^* - c_{i,l}) \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2})$$

Da unter stationären Verhältnissen der Stoffstrom in gleicher Größe von der einen Phase durch die Grenzfläche in die andere Phase übergeht, muss gelten:

$$n_i^* = n_{i,g}^* = n_{i,l}^* \quad (\text{Gl.: 4.4.1.3})$$

$$\beta_g * (c_i^* - c_{i,g}) = \beta_l * (c_i^* - c_{i,l}) \quad (\text{Gl.: 4.4.1.4})$$

Es ist fast nicht möglich die Konzentration an der Phasengrenzfläche anzugeben. Daher wurde zur Berechnung der ausgetauschten Stoffmenge der „Stoffdurchgangskoeffizient  $k$ “ eingeführt, durch den der Gesamtwiderstand entweder nur auf die Gasseite oder nur auf die Flüssigkeitsseite bezogen wird.

#### 4.4.1.1 Gesamtwiderstand auf die Gasseite bezogen

$$n_{i,g}^* = k_g * (c_i^* - c_{i,g}) \quad (\text{Gl.:4.4.1.1.1})$$

Das treibende Gefälle wird durch die Differenz zwischen der Konzentration  $c_{i,\infty}$  der auszutauschenden Komponente  $i$  im Kern der Gasströmung und der Gleichgewichtskonzentration  $c_i^*$  dargestellt, welcher im Phasengleichgewicht mit der Konzentration  $c_{i,l,\infty}$  der Kernströmung der Flüssigkeit steht. [6]

#### 4.4.1.2 Gesamtwiderstand auf die Flüssigseite bezogen

Hier geht man von der Beziehung aus:

$$n_i^* = k_l * (c_i^* - c_{i,l}) \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.1})$$

Nimmt man nun den Fickschen Satz zu Hilfe, erhält man für die Stoffstromdichte:

$$n_i^* = D_{i,l} * \frac{c_{i,l,\infty} - c_{i,l,1}^*}{\delta_1} \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.2})$$

$$n_i^* = D_{i,g} * \frac{c_{i,l,\infty} - c_{i,l,2}^*}{\delta_2} \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.3})$$

daraus folgt:

$$\beta_{i,g} = \frac{D_{i,g}}{\delta_g} \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.4})$$

$$\beta_{i,l} = \frac{D_{i,l}}{\delta_l} \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.5})$$

daraus kann man für den Stoffdurchgangskoeffizienten sagen, dass gilt:

$$\frac{1}{k_{i,g}} = \frac{1}{\beta_{i,g}} + \frac{m}{\beta_{i,l}} \quad (\text{Gl.:4.4.1.2.6})$$

$$\frac{1}{k_{i,l}} = \frac{1}{m * \beta_{i,g}} + \frac{1}{\beta_{i,l}} \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.7})$$

Für den stationären Zustand gilt also:

$$n_i^* = \beta_{i,g} * (c_{i,g,\infty} - c_{i,g,l}^*) = \beta_{i,l} * (c_{i,l,1}^* - c_{i,g,\infty}) = k_{i,g} * (c_{i,g,\infty} - c_{i,g}^*) = k_{i,l} * (c_{i,l}^* - c_{i,l,\infty}) \quad (\text{Gl.: 4.4.1.2.8})$$

Zusammenfassend werden hier bei der Zwei-Film-Theorie folgende Annahmen getroffen:

- a.) Konstante Strömungsgeschwindigkeiten bis zur Grenzschicht
- b.) Konstante Konzentration in den Hauptphasen
- c.) Konzentrationsänderungen nur in den beiden Grenzschichten
- d.) Phasengleichgewicht an der Phasengrenze
- e.) Stationärer Zustand
- f.) Keine chemische Reaktion. [8]

#### 4.4.2 Die Penetrationstheorie

Dieses Modell wurde von Higbie im Jahre 1935 bei Versuchen zur Absorption von reinem CO<sub>2</sub> in Wasser bei Laborversuchen entwickelt. Er ging davon aus, dass die Kontaktzeit zwischen zwei fluider Medien zur Ausbildung eines Konzentrationsgradienten in einer Grenzschicht als stationärer Zustand nicht ausreicht. Deshalb nahm er an, dass die Stoffübertragung in der flüssigen Phase, bei sehr kurzer Kontaktzeit, als instationäre Diffusion erfolgt. Die Flüssigkeitsteilchen sollen aus der Hauptmasse der Flüssigkeit durch turbulente Bewegung an die Phasengrenzfläche transportiert werden. Damit wird die Turbulenz bis an die Phasengrenzfläche ausgedehnt. An der Phasengrenzfläche soll sich augenblicklich das Phasengleichgewicht einstellen, dann beginnt das Eindringen des Gases in die Flüssigkeit durch instationäre Diffusion. Bei der sehr kurzen Verweilzeit der Flüssigkeitsteilchen an der Phasengrenzfläche wird das Lösliche nur an die obere Flüssigkeitsschicht eindringen, so dass man die Tiefe der Flüssigkeit mit der Konzentration  $c_{g,\infty}$  als unendlich annehmen kann. Ein stationärer Zustand wird hier nicht erreicht, weil das Flüssigkeitsteilchen vorher wieder in den Kern der Strömung zurückgeführt wird. Die Sättigung der Waschflüssigkeit mit dem Löslichen hängt also von der Kontaktzeit ab.

Für die Stoffstromdichte aus dem Fickschen Gesetz erhält man

$$n_i^* = \sqrt{\frac{4 * D_{i,j}}{\pi * \tau}} * (c_{i,l}^* - c_{i,\infty}) \quad (\text{Gl.: 4.4.2.1})$$

$$\beta_f = 2 * \sqrt{\frac{D_{i,j}}{\pi * \tau}} \quad (\text{Gl.: 4.4.2.2})$$

Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zur Zwei-Film-Theorie, denn der Stoffübergangskoeffizient ist hier proportional der Wurzel aus dem Diffusionskoeffizienten und nicht direkt proportional wie bei der Zwei-Film-Theorie. Die Penetrationstheorie beinhaltet also den Transport von Masseteilchen durch turbulente Bewegung an die Phasengrenzfläche, wobei sich augenblicklich Phasengleichgewicht an der Phasengrenzfläche einstellt und anschließend die Übergangskomponente durch instationäre Diffusion in die Phase eindringt ohne dass ein stationärer Zustand erreicht wird. Will man den Stoffübergangskoeffizienten berechnen, so ist eine Annahme der Strömungszustände im Inneren des Fluids zu treffen, weil eine Vorhersage über die Kontaktzeit des Flüssigkeitselementes an der Phasengrenze zu tätigen ist. Bei der Anwendung der Penetrationstheorie auf den Stoffaustausch vom starren Tropfen und Tropfen mit

vollkommen ausgebildeter Zirkulation (mobiler Tropfen) erhält man folgende Beziehung für die Sherwood-Zahl:

$$Sh = 2 + 0.57 * Re^{0.5} * Sc^{0.33} \quad (\text{Gl.: 4.4.2.3})$$

[6],[7],[8],[9]

### 4.4.3 Die Oberflächenerneuerungstheorie

Bei der Oberflächenerneuerungstheorie handelt es sich um eine Abwandlung der Penetrationstheorie. Danckwerts Variante im Jahre 1951 geht von der Annahme aus, dass eine Zufallsverteilung der Kontaktzeit zwischen den Flüssigkeitselementen und der Gasphase voraussetzt. Die Oberflächenerneuerungstheorie verwendet daher an Stelle einer konstanten Verweilzeit, eine Verteilungsfunktion für die Verweilzeit der einzelnen Teilchen und einen, den Turbulenzgrad und das Alter der Teilchen berücksichtigenden Oberflächenerneuerungsfaktor. Aus dem Fickschen Gesetz erhält man daher für die mittlere Diffusionsstromdichte:

$$n_i^* = \sqrt{D_{i,j} * s} * (c_{i,l}^* - c_{i,\infty}) \quad (\text{Gl.: 4.4.3.1})$$

und demnach ist der Stoffübergangskoeffizient flüssigseitig:

$$\beta_f = \sqrt{D_{i,j} * s} \quad (\text{Gl.: 4.4.3.2})$$

Der Stoffübergangskoeffizient ist also analog zur Penetrationstheorie proportional der Wurzel aus dem Diffusionskoeffizienten. [1],[9]

### 4.4.4 Die kombinierte Film – Penetrationstheorie

Die Kombination der Film- und Penetrationstheorie durch Toor und Marchello im Jahre 1958 geht davon aus, dass sich die Oberfläche – ähnlich wie bei der Oberflächenerneuerungstheorie – fortlaufend durch Turbulenzen aus der Hauptmasse der Flüssigkeit erneuert. Dadurch wird bei kurzen Kontaktzeiten zwischen Gas und Flüssigkeit die Annahme eines instationären Diffusionsprozesses aufrecht erhalten. Bei sehr langen Diffusionszeiten gilt diese Annahme jedoch nicht mehr. Denn es wird sich – wie bei der Zwei-Film-Theorie – in Grenzflächennähe eine stagnierende Schicht mit stationärem Konzentrationsgradienten aufbauen, durch welche die Stoffaustauschkomponente hindurch diffundieren muss. Dadurch gehorchen jene Teilchen, die eine andauernde Erneuerung erfahren, der Penetrationstheorie und solche Teilchen, die eine sehr lange Verweilzeit an der

Flüssigkeitsoberfläche aufweisen, der Zwei-Film-Theorie. Für die kombinierte Film- und Penetrationstheorie gelten nun folgende Gesetzmäßigkeiten:

Für die Stoffstromdichte aus dem Fickschen Gesetz:

$$n_i^* = \sqrt{\frac{D_{i,j}}{\pi * \tau}} * \left( 1 + 2 * \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 * \delta^2}{D_{i,j} * t}} \right) (c_{i,l}^* - c_{i,\infty}) \quad (\text{Gl.: 4.4.4.1})$$

Für lange Verweilzeiten ist die Stoffstromdichte direkt proportional dem Diffusionskoeffizienten und für kurze Verweilzeiten ist die Stoffstromdichte analog zur Penetrationstheorie direkt proportional der Wurzel aus dem Diffusionskoeffizienten:

$$n_i^* = \sqrt{\frac{D_{i,j}}{\pi * \tau}} * (c_{i,l}^* - c_{i,\infty}) \quad (\text{Gl.: 4.4.4.2})$$

[1],[9],[10].

## 4.5 Ähnlichkeitstheorie

### 4.5.1 Allgemeines

Die allgemeinen Differentialgleichungen des Stofftransportes, die alle den Vorgang beschreiben und physikalische Größen miteinander verknüpfen, führen auf technische Probleme angewandt, zu unübersichtlichen Ergebnissen oder unlösbaren Gleichungen. Das Anwenden spezieller empirischer Gleichungen, durch Auswerten von Versuchsergebnissen gewonnen, bleibt stets auf den einen konkreten Fall beschränkt. In der Praxis verwendet man häufig empirische Gleichungen. Ziel aber bleibt, eine allgemeine Gesetzmäßigkeit zu finden. Diese Lücke wird vor allem bei komplizierten Vorgängen fühlbar, die von einer großen Anzahl physikalischer Größen abhängen. Die Ähnlichkeitstheorie gestattet nun ein Auswerten der Versuchsergebnisse, die an Pilotanlagen gewonnen wurden, das zu allgemeinen Gesetzmäßigkeiten führt. Die Grundlage dabei bildet die Erkenntnis, dass alle physikalischen Gesetze unabhängig von der Wahl des Maßsystems sind. Dies macht sie mit Hilfe dimensionsloser Kennzahlen. Die Ähnlichkeitstheorie gewährt somit Einblicke in technische Sachverhalte auch dort, wo sich mathematische Formulierungen auf numerischen Weg nur sehr schwer lösen lassen. Weiters erlaubt die Ähnlichkeitstheorie die Auslegung und Optimierung einer verfahrenstechnischen Anlage ohne langwierige theoretische Vorausberechnung, sondern allein durch Versuche an Pilotanlagen. Die Ähnlichkeitstheorie stellt also zur Zeit unter den bekannten Möglichkeiten zur Berechnung des konvektiven Stoff- und Wärmeüberganges

1. Aufstellen und Lösen des kompletten Differentialgleichungssystems
2. Empirische Beziehungen
3. Versuche zur Bestimmung aller Einflussgrößen
4. Versuche und Auswertung mit der Ähnlichkeitstheorie

die beste Möglichkeit dar. [8],[11]

## **4.5.2 Arten von Ähnlichkeiten**

### **4.5.2.1 Geometrische Ähnlichkeit**

Die geometrische Ähnlichkeit sagt folgendes aus: einander entsprechende Längen sind immer im konstanten Verhältnis.

### **4.5.2.2 Physikalische Ähnlichkeit**

Die physikalische Ähnlichkeit verlangt neben konstanten Verhältnissen der Längen auch solche der übrigen physikalischen Messgrößen des Problems wie die Kräfte, Zeiten, Geschwindigkeiten und Temperaturen (dynamische und thermische Ähnlichkeit).

### **4.5.2.3 Partielle Ähnlichkeit**

Von partieller Ähnlichkeit spricht man, wenn nicht alle Messgrößen in einem konstanten Verhältnis gehalten werden können.

## **4.5.3 Vorteile der Ähnlichkeitstheorie**

Die Kombination der Messgrößen zu nur wenigen dimensionslosen Kennzahlen der Ähnlichkeit verringert die Anzahl der veränderlichen Kennzahlen. Darin liegt die Bedeutung der Ähnlichkeitstheorie, denn eine Funktion zwischen beispielsweise drei Veränderlichen ist viel bestimmter und erfordert zum Prüfen einen geringeren experimentellen Aufwand als eine Funktion zwischen einer größeren Anzahl an Veränderlichen. [2],[11]

Die bedeutendsten Vorteile der Ähnlichkeitstheorie sind:

1. Unabhängigkeit vom Dimensionssystem,
2. Reduzierung der Parameter die das Problem beschreiben,
3. die Verringerung des Versuchsaufwandes,
4. sie ermöglicht die Extrapolierbarkeit einzelner Parameter und die Modellübertragung,
5. sie ermöglicht die Untersuchung, ob totale Ähnlichkeit erreichbar ist,
6. sie stellt die Basis für Konzepte für eine teilweise Ähnlichkeit zur Verfügung,
7. sie verbessert die Durchschaubarkeit des physikalischen Problems. [8]

### 4.5.4 Wichtige dimensionslose Kennzahlen

Die nachfolgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht häufig verwendeter Kennzahlen des Stoffwärme- und Impulstransportes.

Bezeichnung	Kennzahl	Formelzeichen	
Sim- plexe	Geometriezahl	$\Gamma = \text{Längenverhältnis} = \frac{l_1}{l}$	$a$ Temperaturleitzahl $c$ Schallgeschwindigkeit $D$ Diffusionszahl $d$ Durchmesser $F$ Kraft $g$ Erdbeschleunigung $l$ kennzeichnende Abmessung $m$ Masse $p$ Druck $T$ Temperatur $w$ Strömungsgeschwindigkeit
	KNUDSEN-Zahl	$Kn = \frac{\text{mittlere freie Weglänge}}{\text{Rohrdurchmesser}} = \frac{\lambda}{d}$	$\alpha$ Wärmeübergangszahl $\beta$ Stoffübergangszahl $\gamma$ Volumenausdehnungszahl $\eta$ dynamische Zähigkeit $\lambda$ Wärmeleitzahl $\nu$ kinematische Zähigkeit $\rho$ Dichte $\sigma$ Oberflächenspannung $\tau$ Zeit $Fa$ FANNING-Zahl
	Zähigkeitszahl	$H = \text{Zähigkeitsverhältnis} = \frac{\eta_1}{\eta_2}$	
	MACH-Zahl	$Ma = \frac{\text{Strömungsgeschwindigkeit}}{\text{Schallgeschwindigkeit}} = \frac{w}{c}$	
Kom- plexe	ARCHIMEDES-Zahl	$Ar = \frac{\text{Dichte-Antriebskraft}}{\text{innere Trägheitskraft}} = \frac{gl^3}{\nu^2} \frac{\Delta\rho}{\rho}$	
	BODENSTEIN-Zahl	$Bo = \frac{\text{Konvektionsstrom}}{\text{Diffusionsstrom}} = Sc Re = \frac{wl}{D}$	
	EULER-Zahl	$Eu = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Trägheitskraft}} = \frac{\Delta p}{\rho w^2}$	
	FOURIER-Zahl	$Fo = \frac{\text{Wärmeleitstrom}}{\text{Konvektionsstrom}} = \frac{a\tau}{l^2}$	
	FROUDE-Zahl	$Fr = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Schwerkraft}} = \frac{1}{Fa} = \frac{w^2}{gl}$	
	GALILEI-Zahl	$Ga = \frac{\text{Schwere Antriebskraft}}{\text{innere Trägheitskraft}} = \frac{Re^2}{Fr} = \frac{gl^3}{\nu^2}$	
	GRASHOF-Zahl	$Gr = \frac{\text{thermische Antriebskraft}}{\text{innere Trägheitskraft}} = \frac{gl^3}{\nu^2} \gamma \Delta T$	
	NEWTON-Zahl	$Ne = \frac{\text{Antriebskraft}}{\text{Trägheitskraft}} = \frac{Fr}{mw}$	
	NUSSELT-Zahl	$Nu = \frac{\text{Wärmeübergangstrom}}{\text{Wärmeleitstrom}} = \frac{\alpha l}{\lambda}$	
	PÉCLET-Zahl	$Pe = \frac{\text{Konvektionsstrom}}{\text{Wärmeleitstrom}} = \frac{Re}{Pr} = \frac{wl}{a}$	
	REYNOLDS-Zahl	$Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{innere Reibungskraft}} = \frac{wl}{\nu}$	
	SHERWOOD-Zahl	$Sh = \frac{\text{Stoffübergangstrom}}{\text{Diffusionsstrom}} = \frac{\beta l}{D}$	
	WEBER-Zahl	$We = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Oberflächenkraft}} = \frac{\rho w^2 l}{\sigma}$	
	Güte- grade	LEWIS-Zahl	$Le = \frac{\text{Wärmeleitstrom}}{\text{Diffusionsstrom}} = \frac{Sc}{Pr} = \frac{a}{D}$
PRANDTL-Zahl		$Pr = \frac{\text{innere Reibung}}{\text{Wärmeleitstrom}} = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a}$	
SCHMIDT-Zahl		$Sc = \frac{\text{innere Reibung}}{\text{Diffusionsstrom}} = \frac{Bo}{Re} = \frac{\nu}{D}$	
STANTON-Zahl		$St = \frac{\text{Stoffübergangstrom}}{\text{Konvektionsstrom}} = \frac{Sh}{Bo} = \frac{\beta}{w}$	

Abbildung 4.4.5.1.: Wichtige Ähnlichkeitszahlen

## 4.6 Stoffaustausch am Einzeltropfen

### 4.6.1 Stoffübergang an Kugeln und anderen Körpern

Der Stoffübergang an Kugeln ist von grundsätzlicher Bedeutung für viele verfahrenstechnische Prozesse, bei denen einzelne Partikel oder auch Partikelschwärme auftreten. Die Partikel können sowohl feste als auch fluide Körper sein. Fluide Körper sind Tropfen und Blasen. Sie haben im Bereich sehr kleiner Werte für den Durchmesser stets Kugelform. Unter technisch bedeutsamen Bedingungen weicht die Form der Tropfen oder Blasen aber fast immer von der einer Kugel ab. Die Deformationsfähigkeit der Tropfen und Blasen führt zu eigenen Gesetzmäßigkeiten für die Bewegung und den Stoff- und Wärmeübergang. Wird allerdings vorausgesetzt, dass die Konzentration der diffundierenden Komponente gering ist, darf die Ficksche Transportgleichung eingeführt werden. [12],[25]

### 4.6.2 Stofftransport

Die Zwei-Film-Theorie fluider Phasen bildet die Grundlage der Stoffübertragung und der Absorption. Danach muss bei der Absorption das Absorptiv aus der Gasphase durch je eine dünne Gas- und Flüssigkeitsgrenzschicht hindurch, in das Absorptionsmittel diffundieren. Diese Grenzschichten gelten als Hauptwiderstände des Stofftransportes. Unmittelbar an der Phasengrenzfläche herrscht nach der Zwei-Film-Theorie zu jedem Zeitpunkt des Vorganges Gleichgewicht. Bedeuten  $m_{a,r}$  die in der Trägermasse  $m_r$  (Raffinat) enthaltene Absorptivmasse und  $m_{a,s}$  die in der Absorptionsmittelmasse  $m_s$  (Solvent) gelöste Absorptivmasse, so folgt – analog den für die Solventextraktion angewandten Beladungen – als Absorptivbeladung des Trägergases. [2]

$$y = \frac{m_{a,r}}{m_r} \quad (\text{Gl. 4.6.2.1})$$

und als Absorptivbeladung des Absorptionsmittels

$$x = \frac{m_{a,s}}{m_s} \quad (\text{Gl. 4.6.2.2})$$

Mit den Gleichgewichtsbeladungen  $y_{gr}$  und  $x_{gr}$  an der Phasengrenzfläche erhält das Henry-Beladungsgesetz die Form:

$$y_{gr} = H \cdot x_{gr} \quad (\text{Gl. 4.6.2.3})$$

Der Stofftransport durch die Phasengrenzfläche hindurch findet nach der Zwei-Film-Theorie aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen keinen Übergangswiderstand. Diese

vereinfachende Annahme entspricht jedoch nicht den tatsächlichen Gegebenheiten, da der Phasenübergang der Gaskomponente bei Absorption mit einem Solvatisierungsprozess verbunden ist, der in seiner Geschwindigkeit einer Reaktion erster Ordnung gleicht. Für den Stoffübergang des Absorptivs von der Gasphase zur Phasengrenzfläche und von der Phasengrenzfläche zur Flüssigphase, ist nicht die unmittelbare Beladungsdifferenz beider Phasen als molekulare Triebkraft entscheidend, sondern jeweils die Differenz zwischen den örtlichen Beladungen in der Gasphase  $y$  und an der Phasengrenzfläche  $y_{gr}$  auf der Gasseite

$$\Delta y = y - y_{gr} \quad (\text{Gl. 4.6.2.4})$$

sowie die Beladungsdifferenz zwischen  $x_{gr}$  und dem Absorptionsmittel  $x$  auf der Flüssigkeitsseite

$$\Delta x = x_{gr} - x \quad (\text{Gl. 4.6.2.5})$$

Im kontinuierlich arbeitenden Gegenstromabsorbern verläuft der Stofftransport stationär. Dabei ändert sich die Phasenzusammensetzung stetig entlang der Prozessraumphasengrenzfläche, bleibt aber für jeden Querschnitt der Grenzschicht und damit für jeden Absorberquerschnitt zeitlich unverändert. Das Berechnen des Stoffüberganges erfordert deshalb ein Ersetzen der örtlichen Triebkräfte  $\Delta y$  und  $\Delta x$  durch die mittleren Prozessraumtriebkräfte  $\Delta y_m$ ,  $\Delta x_m$  des Gesamtvorganges im Absorber. Alle nachfolgenden Betrachtungen setzen vereinfacht voraus, dass entlang der gesamten Grenzfläche für die Henry-Beladungskoeffizienten des Verteilungsgleichgewichtes gilt:

$H' = \text{konstant}$ .

Isotherme Arbeitsweise und annähernd linearer Verlauf der Gleichgewichtskurve im Arbeitskonzentrationsbereich des Absorbers erfüllen diese Bedingung. [2]

Der erste Schritt der Absorption ist der Stoffübergang von der Gasphase zur Phasengrenzfläche. Die Gasphase tritt im Gegenstrom zum Absorptionsmittel ein und aus. Mit den Phasenbeladungen  $y_a$  und  $y_e$  der Gasphase und der dazugehörigen Grenzflächenbeladung  $y_{gr,a}$ ,  $y_{gr,e}$  folgt für die örtlichen Triebkräfte am Anfang und am Ende der Prozessraumgasgrenzschicht

$$\Delta y_a = y_a - y_{gr,a}, \quad (\text{Gl. 4.6.2.6})$$

$$\Delta y_e = y_e - y_{gr,e} \quad (\text{Gl. 4.6.2.7})$$

wobei die Anfangs- und Endtriebkraft des Gegenstromes nach der Forderung:

$$\Delta y_a \gg \Delta y_e \quad (\text{Gl. 4.6.2.8})$$

zu wählen sind. Diese Beladungsdifferenzen geben die mittlere Prozessraumtriebkraft der Gasgrenzschicht

$$\Delta y_m = \frac{\Delta y_a - \Delta y_e}{\ln \frac{\Delta y_a}{\Delta y_e}} \quad (\text{Gl. 4.6.2.9})$$

und die Stoffübergangsgeschwindigkeit erhält mit der Stoffübergangszahl der Gasgrenzschicht  $\beta_y$  die Form

$$g_{d,y} = \beta_y * \Delta y_m \quad (\text{Gl. 4.6.2.10})$$

Der zweite Schritt der Absorption, der Stoffübergang von der Phasengrenze in die Flüssigphase findet im Prozessraum die Anfangs- und Endbedingungen  $x_a, x_e, x_{gr,a}, x_{gr,e}$  vor, welche die örtlichen Triebkräfte aller bestimmen

$$\Delta x_a = x_{gr,a} - x_a \quad (\text{Gl. 4.6.2.11})$$

$$\Delta x_e = x_{gr,e} - x_e \quad (\text{Gl. 4.6.2.12})$$

Auch hier sind die Anfangs- und Endtriebkraft des Gegenstromes nach der Forderung zu wählen

$$\Delta x_a \gg \Delta x_e \quad (\text{Gl. 4.6.2.13})$$

Die mittlere Prozessraumtriebkraft der Flüssigkeitsgrenzschicht

$$\Delta x_m = \frac{\Delta x_a - \Delta x_e}{\ln \frac{\Delta x_a}{\Delta x_e}} \quad (\text{Gl. 4.6.2.14})$$

und die Stoffübergangsgeschwindigkeit erhält mit der Stoffübergangszahl der Flüssigkeitsgrenzschicht  $\beta_x$  die Form

$$g_{d,x} = \beta_x * \Delta x_m \quad (\text{Gl. 4.6.2.15})$$

Die während eines stationären Absorptionsvorganges durch die Gas- und Flüssigkeitsgrenzschicht übergehenden Absorptivmengen müssen einander gleich sein

$$g_d = g_{d,y} = g_{d,x} \quad (\text{Gl. 4.6.2.16})$$

Diese Absorptionsgeschwindigkeit  $g_d$  – als Absorptivmassenstromdichte – führt zu der Gleichung

$$\frac{\beta_y}{\beta_x} = \frac{\Delta x_m}{\Delta y_m} \quad (\text{Gl. 4.6.2.17})$$

Das Verhältnis der Stoffübergangszahlen der Gas- und Flüssigkeitsgrenzschicht gleicht dem umgekehrten Verhältnis der mittleren Grenzschichttriebkräfte im Prozessraum. Die Gleichungen (Gl. 4.6.2.10) und (Gl. 4.6.2.15) sind für praktische Berechnungen ungeeignet, da  $\Delta y$  oder  $\Delta x$  der Phasengrenzzustände  $\Delta y_{gr}$  oder  $\Delta x_{gr}$  fordern. Das Eliminieren dieser Zustandswerte gelingt mittels des Henry-Verteilungsgesetzes. Die Triebkräfte des Stoffdurchganges in der Gasgrenzschicht ( $\Delta y$ ) unterscheiden sich von denen in der Flüssigkeitsgrenzschicht ( $\Delta x$ ). Dagegen ist die Triebkraft des Wärmeüberganges stets die Temperaturdifferenz. Soll eine der Wärmedurchgangsgleichung analoge Stoffdurchgangsgleichung für den Gesamtvorgang der Absorption entstehen, so müssen gleiche Größen für die Triebkräfte beider Grenzschichten vorliegen. Das Henry-Beladungsgesetz kennzeichnet den Gleichgewichtszustand der Phasengrenzfläche. Dieses Gleichgewichtsgesetz findet Anwendung um Ersatzbeladungen zum Berechnen des Stoffdurchganges zu schaffen. Für den Stoffdurchgang von der Gasphase zur Flüssigphase ausgehend von der Beladung  $y$  der Gasphase als Bezugsphase vertritt eine Ersatzbeladung  $y^*$  die Beladung  $x$  der Flüssigphase

$$y^* = H' \cdot x \quad (\text{Gl. 4.6.2.18})$$

Diese Ersatzbeladung  $y^*$  würde mit der Flüssigkeitsbeladung  $x$  im Gleichgewicht stehen und tritt an Stelle der Grenzflächenbeladung  $y_{gr}$ . Die Anfangs- und Endtriebkräfte des stationären Stoffdurchganges betragen für den Prozessraum – bezogen auf die Gasphase –

$$\Delta y_a = y_a - y_a^* \quad (\text{Gl. 4.6.2.19})$$

$$\Delta y_e = y_e - y_e^* \quad (\text{Gl. 4.6.2.20})$$

wobei die Anfangs- und Endtriebkräfte des Gegenstromes so zu wählen sind

$$\Delta y_a \setminus \Delta y_e \quad (\text{Gl. 4.6.2.21})$$

Diese Beladungsdifferenzen gehen in die Gleichung (Gl. 4.6.2.9.) der mittleren Prozessraumtriebkraft  $\Delta y_m$  ein und die Stofftransportgeschwindigkeit des Stoffdurchganges folgt mit einer Stoffdurchgangskennzahl  $k_y$  - bezogen auf die Gasphase - aus:

$$g_d = k_y * \Delta y_m . \quad (\text{Gl. 4.6.2.22})$$

Anstelle der Gasphase kann auch die Flüssigphase mit ihrer Beladung  $x$  als Bezugsphase dienen. In diesem Falle ist die Ersatzbeladung  $x^*$  der Gasphase  $y$  gegeben durch

$$x^* = \frac{y}{H'} \quad (\text{Gl. 4.6.2.23})$$

Die Anfangs- und Endtriebkräfte des stationären Stoffdurchganges betragen für den Prozessraum - bezogen auf die Flüssigphase -

$$\Delta x_a = x_a^* - x_a \quad (\text{Gl. 4.6.2.24})$$

$$\Delta x_e = x_e^* - x_e \quad (\text{Gl. 4.6.2.25})$$

wobei die Anfangs- und Endtriebkräfte des Gegenstromes wieder entsprechend der Forderung (Gl. 4.6.2.13.) zu wählen sind. Diese Beladungsdifferenzen gehen in die Gleichung (Gl.4.6.2.14.) der mittleren Prozessraumtriebkraft  $\Delta x_m$  ein und die Stofftransportgeschwindigkeit des Stoffdurchganges folgt mit der Stoffdurchgangskennzahl  $k_x$  - bezogen auf die Flüssigphase - aus

$$g_d = k_x * \Delta x_m . \quad (\text{Gl. 4.6.2.26})$$

Die Stoffübergangszahlen der beiden Grenzschichten  $\beta_y$ ,  $\beta_x$  und die phasenbezogenen Stoffdurchgangszahlen  $k_y$ ,  $k_x$  stehen miteinander im Zusammenhang. Für die Stoffdurchgangszahl  $k_y$  gilt:

$$\frac{1}{k_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{H'}{\beta_x} \quad (\text{Gl. 4.6.2.27})$$

und für die Stoffdurchgangszahl  $k_x$

$$\frac{1}{k_x} = \frac{1}{\beta_x} + \frac{1}{H' * \beta_y} \quad (\text{Gl. 4.6.2.28})$$

Liegt Chemisorption vor, d. h. findet während der Absorption eine chemische Reaktion zwischen Absorptiv und Absorptionsmittel statt, so tritt Stoffübergangsgeschwindigkeit in der Flüssigkeitsgrenzschicht die Reaktionsgeschwindigkeit als bestimmender Faktor hinzu. Der Teildruck des Absorptivs über die Lösung wird dann von dem Anteil bestimmt, der nicht mit dem Absorptionsmittel reagiert. Für umkehrbare Reaktionen erster Ordnung genügt nach A.P. Bjelopolski das Einführen eines Erhöhungsfaktors  $b$ , der die Steigerung der Stoffübergangsgeschwindigkeit in der Flüssigkeitsgrenzschicht in Folge Chemisorption angibt und (Gl. 4.6.2.27) geht für die Chemisorption über in

$$\frac{1}{k_y} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{H'}{b * \beta_x} \quad (\text{Gl. 4.6.2.29})$$

Die einander gleichwertigen, den Gesamtvorgang der Absorption beschreibenden Stoffdurchgangsgleichungen (Gl. 4.6.2.28) und (Gl. 4.6.2.29) enthalten messbare Triebkraftgrößen  $(y,x)$  und experimentell zugängliche phasenbezogene Stoffdurchgangszahlen. Die beiden Stoffdurchgangszahlen stehen in gesetzmäßiger Beziehung zueinander; es gilt nach Vereinigen der Gleichungen (Gl. 4.6.2.27) und (Gl.4.6.2.28) :

$$k_x = H' * k_y \quad (\text{Gl. 4.6.2.30})$$

d. h. die phasenbezogenen Stoffdurchgangszahlen sind einander proportional.

Es gibt Grenzfälle für die Gleichungen (Gl. 4.6.2.27) und (Gl. 4.6.2.28) je nach Überwiegen des Widerstandes der Gasgrenzschicht  $1/\beta_y$  oder der Flüssigkeitsgrenzschicht  $1/\beta_x$ . Derartige Grenzfälle liegen in der Praxis häufig vor. Für leichtlösliche Gase -  $H'$  klein - bleibt der Widerstand der Flüssigkeitsgrenzschicht gering im Vergleich zum Widerstand der Gasgrenzschicht und Gleichung (Gl. 4.6.2.27) ergibt:

$$k_y = \beta_y \quad (\text{Gl. 4.6.2.31})$$

Im umgekehrten Falle - bei schwerer Gaslöslichkeit ( $H'$  groß) - lässt sich der Widerstand der Gasgrenzschicht vernachlässigen und Gleichung (Gl. 3.6.2.28) führt zu

$$k_x = \beta_x \quad (\text{Gl. 4.6.2.32})$$

Diese Grenzfälle gestatten ein angenähertes experimentelles Bestimmen der Stoffübergangszahlen. Das Berechnen der Stoffübergangs- und Stoffdurchgangszahlen erfordert ähnlichkeiththeoretische Betrachtungen der Strömungs- und Austauschvorgänge in Absorbern. Die Kriteriengleichungen des Stoffübergangs bei erzwungener Strömung haben für die Gasgrenzschicht die Grundform [2]

$$Sh_g = c * Re_g^a * Sc_g^b \quad (\text{Gl.4.6.2.33})$$

und für die Flüssigkeitsgrenzschicht die Grundform

$$Sh_f = c * Re_f^a * Sc_f^b * Ga^d \quad (\text{Gl. 4.6.2.34})$$

## 5 Beschreibung des Stoffsystems

### 5.1 Wasser

(Wasserstoffoxid)  $\text{H}_2\text{O}$

Molekulargewicht: 18,02 g/mol

In reinstem Zustand ist Wasser eine klare, geruch- und geschmackslose, farblose – in dicker Schicht jedoch ebenso wie Eis bläulich schimmernde – Flüssigkeit.

Schmelzpunkt  $0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$

Siedepunkt  $100^\circ\text{C} = 373,15\text{ K}$

Durch den Schmelzpunkt (Gefrier- oder Erstarrungspunkt) und Siedepunkt des Wassers bei 1013 mbar ist die Celsius-Temperatur-Skala festgelegt.  $1\text{ cm}^3$  Wasser von  $4^\circ\text{C}$  besitzt die Masse von 1 g. Eis von  $0^\circ\text{C}$  hat die Dichte 0,9168.

Das (berechnete) Litergewicht des Wasserdampfes beträgt unter Normalbedingungen ( $0^\circ\text{C}$  und 1013 mbar) 0,5974 g. Seine kritische Temperatur  $374^\circ\text{C}$ , der kritische Druck 221,29 bar, das kritische Molvolumen 0,057 l/mol.

Beim Tripelpunkt des Wassers liegen flüssiges Wasser, Eis und Wasserdampf im nonvarianten Gleichgewicht nebeneinander vor. Als zugehörige Temperatur ist 273,16 K definiert worden – der „wahre“ Tripelpunkt liegt bei  $0,0099^\circ\text{C}$  und 611 Pa (6,11mbar).

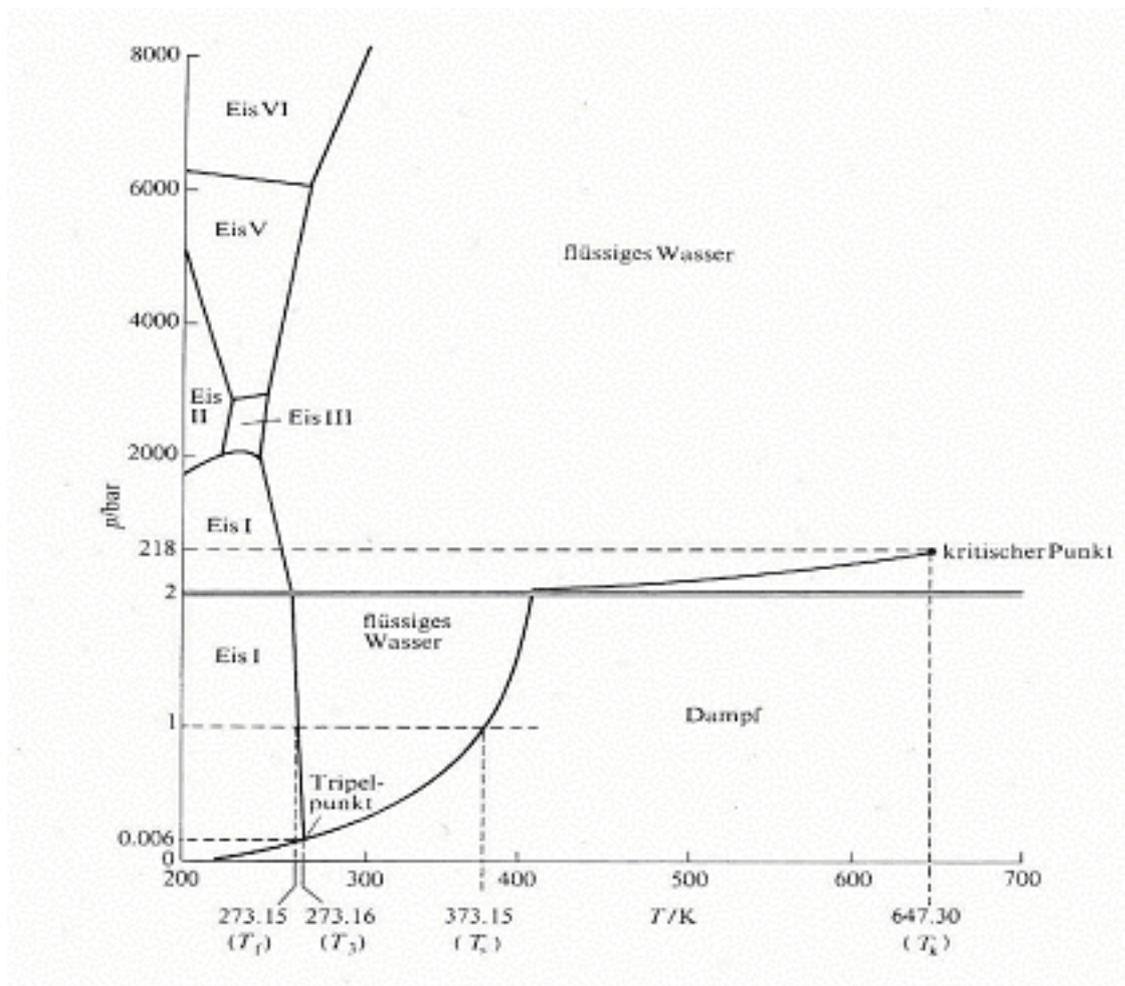


Abbildung 5.1.1.: Zustandsdiagramm von Wasser [20]

Die Abbildung zeigt das Zustandsdiagramm von Wasser. Da es mehrere Eis-Modifikationen gibt, sind zahlreiche weitere Tripelpunkte bekannt, z.B. zwischen flüssigem Wasser und zwei festen Eis-Phasen und zwischen drei Eis-Modifikationen.

Bildungsenthalpie 285,89 kJ/mol

Schmelzenthalpie 6,010 kJ/mol (bei 0°C)

Verdampfungsenthalpie 40,651 kJ/mol (bei 100°C)

Oberflächenspannung  $71,96 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}$

Viskosität 0,8937 mPa\*s.

Die elektrische Leitfähigkeit 0,0635 mS/cm ist ein Maß für die Reinheit des Wassers. Schon geringe Zusätze verändern die Leitfähigkeit erheblich.

Die in mancher Hinsicht anomalen Eigenschaften des Wassers lassen sich auf die Struktur des H<sub>2</sub>O-Molekül zurückführen, in dem die beiden Wasserstoffatome unter einem Winkel von 105° angeordnet sind. Aufgrund der unterschiedlichen Elektronegativitäten von Sauerstoff

und Wasserstoff ist die O–H-Bindung polarisiert, d.h. die beiden entgegengesetzten elektrischen Pole fallen in ihrer räumlichen Lage nicht zusammen, sodass das Wassermolekül einen Dipol bildet.

Diese und die dielektrischen Eigenschaften erklären die Eignung des Wassers als Lösungsmittel für polare Stoffe, die elektrolytische Dissoziation gelöster Salze, Basen und Säuren, die Neigung zur Komplex-Bildung. Die Solvatation (Hydratation; die Bildung von Hydraten) kann mit Erwärmung oder Abkühlung verbunden sein, die Fähigkeit zur Ausbildung von Wasserstoff-Brückenbindungen und damit vor allem auch die Struktur des flüssigen Wassers.

Wasser ist mischbar mit den niederen Alkoholen, Glykolen, zyklischen Ethern, Aminen, Carbonsäuren und Aceton, in den höheren Homologen nimmt die Löslichkeit mit steigender C-Zahl ab, und in unpolaren Flüssigkeiten wie Kohlenwasserstoffen und Halogenkohlenwasserstoffen ist es praktisch unlöslich. Desgleichen in aliphatischen Ethern und Estern. Bei Raumtemperatur ist Wasser kaum dissoziiert. [19],[20]

## 5.2 Iod

(vom griechischen: iodes = veilchenfarbig, nach der Farbe des Dampfes).

Chemisches Symbol: I

Ordnungszahl: 53

Schmelzpunkt: 113,5°C

Siedepunkt: 184,5°C

Atomgewicht: 126,9045 g/mol

Iod ist ein nichtmetallisches, anisotropes Element, mit mehr als 30 künstlichen Isotopen 110I–140I und HWZ von 0,65 Sek. bis  $1,57 \cdot 10^7$  Jahren.

- Eigenschaften:

Iod steht in der 7. Hauptgruppe des Periodensystems (Halogene). Seine Wertigkeit ist infolgedessen meist  $-1$ , seltener  $+1$ ,  $+3$  bis  $+7$ . Die Verbindungen sind in der Regel farblos. Reines Iod bildet schwarzgraue, graphitartige, rhombisch kristalline Blättchen, die sich schon bei Raumtemperatur allmählich (oft unter Bräunung der näheren Umgebung) verflüchtigen (Sublimation). Beim Erhitzen bis zum Siedepunkt entstehen blauviolett gefärbte giftige Dämpfe von charakteristischem Geruch, die zu heftigen, katarrhaltigen Reaktionen der Nasen- und Augenschleimhäute führen.

MAK-Wert:  $1 \text{ mg/m}^3$

In Wasser löst sich Iod bei 20° nur sehr wenig (1:3500) und ähnlich wie in den sauerstoffhaltigen organischen Lösungsmitteln (Alkohol, Ether, Aceton) mit bräunlichgelber bis brauner Farbe, während es sich in den sauerstofffreien Lösungsmitteln (Schwefelkohlenstoff, Benzol, Chloroform, Tetrachlormethan) mit violetter bzw. roter Farbe löst.

- Reaktionen:

Iod ist wesentlich reaktionsträger als die übrigen Halogene. Es verbindet sich z.B. weniger energisch mit Wasserstoff und der entstehende Iodwasserstoff lässt sich durch Erhitzen größtenteils wieder in Iod und Wasserstoff zurückverwandeln. Iod vereinigt sich direkt (ggf. bei leichtem Erwärmen) mit Schwefel, Phosphor, Eisen, Quecksilber, Antimon, Silicium, Nickel oder Kalium zu Iodiden.

- Nachweis:

Freies Iod erkennt man an dem violetten, typisch riechenden Dampf, an der braunen alkalischen und rotvioletten Schwefelkohlenstoff-Lösung, an der Bildung von blauer Iodstärke.

Iodid-Ionen in Iodiden geben folgende charakteristische Reaktion:

bei Zusatz von Chlorwasser zu einer Iodid-Lösung scheidet sich bräunliches Iod aus:  $2\text{KI} + \text{Cl}_2 \leftrightarrow 2\text{KCl} + \text{I}_2$ , das beim Mischen mit Schwefelkohlenstoff diesen rotviolett färbt. Zur quantitativen Bestimmung von freiem Iod bedient man sich z.B. der Titration mit Thiosulfat.

- Herstellung:

Bedeutende Mengen Iod werden aus Salzsolen hergestellt, die bei der Erdöl- u. Erdgas-Förderung anfallen. Sie enthalten zwischen 30 und mehr als 100 ppm Iod, das als Iodid vorliegt und aus diesem mit Chlor freigesetzt, mit Luft ausgeblasen und in schwefelsaurer Lösung mit  $\text{SO}_2$  reduziert wird. Aus der erhaltenen Lösung von Iodwasserstoffsäure wird durch gasförmiges Chlor elementares Iod ausgeschieden.

- Verwendung:

In der Medizin kann Iod in elementarer oder gebundener Form verwendet werden und zwar als Antiseptikum in Arzneimitteln gegen Schilddrüsenstörungen.

Weiter verwendet man Iod für Katalysatoren, in Stabilisatoren, für Farbstoffe und Tinten, zur Herstellung reiner Metalle nach dem Aufwuchsverfahren, in der Photographie und in der analytischen Chemie (Iodometrie). [12],[13],[14]

### 5.3 Schwefeldioxid

SO<sub>2</sub>

Molekulargewicht. 64,06 g/mol.

Farbloses, stechend riechendes Gas, Litergewicht 2,927 g (ca. 2,3mal schwerer als Luft).

Schmelzpunkt  $-72,7^{\circ}\text{C}$

Siedepunkt  $-10^{\circ}\text{C}$

kritischer Druck 77,8 bar (7,78 MPa)

kritische Temperatur  $157,5^{\circ}\text{C}$

Die Löslichkeit von SO<sub>2</sub> in Wasser zu schwefeliger Säure beträgt 18,6 bzw. 10,1 Gewichtsprozent (bei  $20^{\circ}\text{C}$  bzw.  $0^{\circ}\text{C}$  u. 1013 mbar). Sehr leicht löslich ist SO<sub>2</sub> auch in Alkohol. Konzentrierte Schwefelsäure löst das 58fache Volumen an SO<sub>2</sub>. Formal ist SO<sub>2</sub> das Anhydrid der schwefeligen Säure.

Gasförmiges SO<sub>2</sub> ist unbrennbar, kann jedoch (besonders unter dem Einfluss von Katalysatoren) zu Schwefeltrioxid oxidiert werden.

Die Reaktion von SO<sub>2</sub> mit Schwefelwasserstoff führt im Claus-Verfahren zu Schwefel.

- Physiologisch:

SO<sub>2</sub> ist stark toxisch (MAK  $5\text{ mg/m}^3$ ) und ruft in Mischung mit Luft schon in einer Konzentration von 0,04% Vergiftungserscheinungen (Hornhauttrübung, Atemnot, Entzündungen der Atmungsorgane) hervor. Größere Mengen können tödlich wirken. Lösungen von SO<sub>2</sub> in Wasser (3:1000) verätzen die Magenwände.

- Nachweis:

In höheren Konzentrationen ist SO<sub>2</sub> am stechenden Geruch kenntlich. Mit Prüfröhrchen kann es im Bereich 0,5–5000 ppm nachgewiesen werden.

- Herstellung:

Die Gewinnung von reinem SO<sub>2</sub> erfolgt aus SO<sub>2</sub>-haltigen Gasen, die durch Verbrennen von Elementarschwefel oder durch Rösten von Pyrit, Pyrrhotit oder anderen sulfidischen Erzen erhalten werden.

Erhebliche SO<sub>2</sub>-Mengen fallen bei den Entschwefelungsprozessen an, die aus Gründen des Umweltschutzes heute der Verbrennung fossiler Brennstoffe nachgeschaltet werden. Dabei wird SO<sub>2</sub> meist direkt zu Gips weiterverarbeitet. [14],[15],[20]

## 5.4 Natriumthiosulfat

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

Molekulargewicht 248,20g/mol

Schmelzpunkt 45 - 50°C

Natriumthiosulfat löst sich sehr leicht in Wasser mit schwach alkalischer Reaktion. Beim Ansäuern entsteht eine sich allmählich verstärkende, anfangs weiße, später gelbliche Trübung von ausgeschiedenem Schwefel; die Säure (z.B. Salzsäure) macht zunächst Thioschwefelsäure ( $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) frei, die sofort zerfällt. Außerdem ist Natriumthiosulfat auch das wichtigste Salz der Thioschwefelsäure.

Elementares Chlor wird von Natriumthiosulfat leicht gebunden und Silberhalogenide lösen sich in Natriumthiosulfat-Lösung auf. Stärkere Natriumthiosulfat-Lösungen bewirken bei manchen Pflanzen Keimhemmung oder Hemmung des Wurzelwachstums.

- Herstellung:

Aus Natriumsulfit mit Natriumdisulfid oder durch Erhitzen von Natriumsulfit-Lösung mit fein verteiltem Schwefel unter Druck ( $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{S} \leftrightarrow \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), früher als Nebenprodukt bei der Fabrikation von Schwefel-Farbstoffen.

- Verwendung:

Als Fixiersalz in der Photographie, zur Entfernung des Chlors aus gebleichten Geweben und Papiermasse (Antichlor), in der Iodometrie wegen seiner quantitativen Umsetzung mit Iod zu Natriumtetrathionat ( $\text{Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$ ) und in der Chromlederfabrikation, zur Extraktion von Silberchlorid aus Silbererzen. [13],[16],[17]

## 5.5 Schwefel

sulfur.

chemisches Symbol S

Nichtmetallisches Element der 6. Hauptgruppe des Periodensystems,

Ordnungszahl: 16

Atomgewicht 32,066 g/mol

- Modifikation:

Cyclooctaschwefel, der am häufigsten vorkommende Schwefel, liegt bei Raumtemperatur in Gestalt von zitronengelben Brocken, Stangen oder Pulver vor und wird rhombischer Schwefel genannt.

Je nach der Geschwindigkeit des Erhitzens geht dieser Schwefel zwischen 110°C und 119°C in eine hellgelbe dünnflüssige Schmelze über, die bei 114°C–115°C wieder erstarrt, wobei häufig auch von einem idealen (112,8°C) und einem natürlichen (110,2°C) Schmelzpunkt gesprochen wird.

Erwärmt man die gelbe, leicht bewegliche Schwefelschmelze auf 159° (Floor-Temperatur), so wird diese braun und allmählich dickflüssig. Bei 200°C ist die Schwefel-Schmelze dunkelbraun und etwa so zäh wie Harz, oberhalb 250°C nimmt die Zähflüssigkeit wieder ab. Bei 400°C wird die Schmelze dünnflüssig, der Siedepunkt liegt bei 444,6°C.

Rhombischer Schwefel ist unlöslich in Wasser, nur wenig löslich in den meisten organischen Lösungsmitteln und gut löslich in Schwefelkohlenstoff (bei 25° lösen sich in 100 g CS<sub>2</sub> etwa 30 g, in 100 g Benzol nur etwa 1,2 g).

- Chemische Eigenschaften:

Schwefel hat mit Sauerstoff nur wenig Ähnlichkeit. An der Luft entzündet sich Schwefel bei ca. 260°C und verbrennt mit schwach blauer Flamme zu stechend riechendem Schwefeldioxid und bis zu 40% Schwefeltrioxid.

- Physiologisch:

Auf der Haut bewirkt Schwefelpulver erst nach längerer Zeit eine leichte Reizung. Aus diesem Grund wird Schwefel gelegentlich zur Reizkörpertherapie genutzt. Auch auf niedere Tiere und Pflanzen zeigt Schwefel kaum Wirkung, er wirkt aber giftig, wenn er bei Berührung mit der lebenden Substanz in Schwefeldioxid oder Schwefelwasserstoff übergeführt wird.

- Nachweis:

Freien Schwefel erkennt man leicht an seiner Farbe und an der charakteristischen blauen Flamme, die von stechendem Schwefeldioxidgeruch begleitet wird. Vermutet man freien Schwefel in Gemischen, so schüttelt man diese mit Schwefelkohlenstoff, filtriert und lässt das Filtrat eintrocknen, worauf sich gelber Schwefel ausscheidet, falls dieser im Gemisch vorhanden war.

- Vorkommen:

Schwefel kommt als Element und in Form von Sulfiden oder Sulfaten an vielen Punkten der Erde vor. Vulkanische Gase enthalten oft Schwefelwasserstoff und Schwefeldioxid, wobei beide Gase miteinander unter Bildung von dichten Schwefelwolken reagieren.

- Herstellung:

Den größten Teil des weltweit produzierten Schwefels erhält man heute als Rekuperationsschwefel aus dem bei der Entschwefelung von Erdgas und Erdöl (sowie von Synthese- u. Koksofengas) anfallenden  $\text{H}_2\text{S}$ -haltigen sogenannten „Sauergas“. [14],[15],[16]

## 6 Beschreibung der Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

### 6.1 Beschreibung der Einzelkomponenten der Anlage

In diesem Kapitel wird auf die einzelnen Anlagenteile etwas näher eingegangen, um die Funktion der Versuchsanlage leichter verstehen zu können und um den Einzelversuch nachvollziehen zu können.

#### 6.1.1 Aufgabebehälter der Flüssigphase

Der Aufgabebehälter der Flüssigphase hat ein maximales Fassungsvermögen von 50 Liter, wurde aber nie vollgefüllt, da die benötigte Wassermenge pro Versuch im Vergleich zum Fassungsvermögen vernachlässigbar klein ist.

#### 6.1.2 Die Präzisionsschlauchpumpe

Die Präzisionsschlauchpumpe ist mikroprozessorgesteuert und dient zur genauen Dosierung der Flüssigkeitsmenge, die dem Tropfengenerator zugeführt wird.

Firma / Typ : ISMATEC Laboratoriumstechnik ( D ) / REGLO Digital 2-Kanal



Abbildung 6.1.2.1: Präzisionsschlauchpumpe, Vorderansicht

Beim Aktivieren der Pumpe beginnt sich das Zellrad, je nachdem wie groß die erwünschte Durchflussmenge ist, mit definierter Drehzahl zu drehen. Die Walzen, welche sich auf dem Zellrad befinden, bewirken zusammen mit der einen Gegendruck erzeugenden

Schlauchhalterung, einen konstanten Durchfluss im Präzisionsschlauch. Somit ist garantiert, dass dem Tropfengenerator eine definierte Flüssigkeitsmenge zugeführt wird.

### 6.1.3 Der Tropfengenerator

Der Tropfengenerator dient zur Erzeugung der Einzeltropfen, wobei eine konstante Tropfenfrequenz und eine konstante Tropfengröße gewährleistet sein soll.

Dieser Tropfengenerator ragt durch eine Glaskapillare oder durch eine Kunststoffkapillare, je nach gewünschter Tropfengröße, in die Tropfensäule. Durch einen Seitenarm wird die fluide Phase mit konstantem Druck und konstanter Durchflussmenge zugegeben. Zur Tropfenerzeugung dient eine Membran, die durch eine elektromagnetische Spule angeregt, regelmäßige Stöße ausübt. Die dadurch in der Kapillare entstehenden Druckwellen bewirken den Abschlag des Einzeltropfen. Da dies immer im selben zeitlichen Abstand erfolgt, werden die Tropfen alle gleich groß

Im Wesentlichen besteht der Tropfengenerator aus folgenden Einzelkomponenten:

- der Druckstoßsperre
- der Pulskammer
- der Tropfenkapillare
- dem elektromagnetischen Stößel
- Pulsgeberschaltung mit Tropfenzähler
- dem Netzgerät zur Spannungsversorgung.

#### **Die Druckstoßsperre:**

Als Druckstoßsperre dient eine handelsübliche Stahlkanüle für Einwegspritzen der Dimension 0,7 x 50 mm. Sie hat die Aufgabe zu verhindern, dass sich der Druckstoß von der Pulskammer in den Vorlagebehälter der Flüssigphase fortpflanzt.

#### **Die Pulskammer:**

Die Pulskammer besteht in der Hauptachse aus einem T-förmigen Laborglas mit einer Länge von 150 mm und einem Nenndurchmesser von einem Zoll. Die Abzweigung befindet sich seitlich in der Mitte, ist 100 mm lang und hat einen Durchmesser von 3/4 Zoll. Die Zuleitung der Flüssigphase in die Pulskammer und die Einbindung der Druckstoßsperre ist dadurch realisiert, indem die als Druckstoßsperre wirkende Stahlkanüle der Einwegspritze mit ihrem spitzen Ende durch einen Silikonstopfen gesteckt ist, der seinerseits das seitliche Stück der Pulskammer verschließt. Am anderen Ende der Stahlkanüle wird der Schlauch für die Zuleitung der Flüssigphase aufgesteckt. Das obere Ende der Pulskammer ist mit einer

0,3 mm starken Teflonmembran verschlossen, die zusätzlich mit Silikon abgedichtet ist. In der unteren Öffnung steckt ein durchbohrter Silikonstopfen, in dem die Tropfenkapillare eingeführt wird.

### **Das Netzgerät:**

Als Spannungsversorgung für die Pulsgeberschaltung mit Tropfenzähler dient ein handelsübliches Labornetzgerät mit regelbarer Spannung und einstellbarer Strombegrenzung.

Firma / Typ: CONRAD / Laboratory Power Supply PS-403D

### **Die Pulsgeberschaltung mit Tropfenzähler:**

An der Vorderseite des Pulsgebergehäuses befindet sich eine LED-Anzeige zur Überprüfung der Tropfenanzahl und ein Drehknopf zum Einstellen der Periodendauer.

*Tabelle 6.1.3.1.: Periodendauer der Pulsgeberschaltung*

Voreinstellung (Drehknopf)	1	2
Pulszeit in [ms]	350	750
Pausezeit in [ms]	500	1000
Periodendauer in [ms]	850	1750
Tropfenzahl pro Sekunde	1,20	0,58

Die Stromversorgung erfolgt durch das Netzgerät über zwei Bananenstecker, das Ausgangssignal zum Stößel läuft über eine Klinkersteckerbuchse.

Die Aufgabe der Pulsgeberschaltung besteht also darin, Rechtecksignale zu erzeugen und damit den elektromagnetischen Stößel zu versorgen, der wiederum regelmäßige Stöße auf die Membran der Pulschammer ausübt.

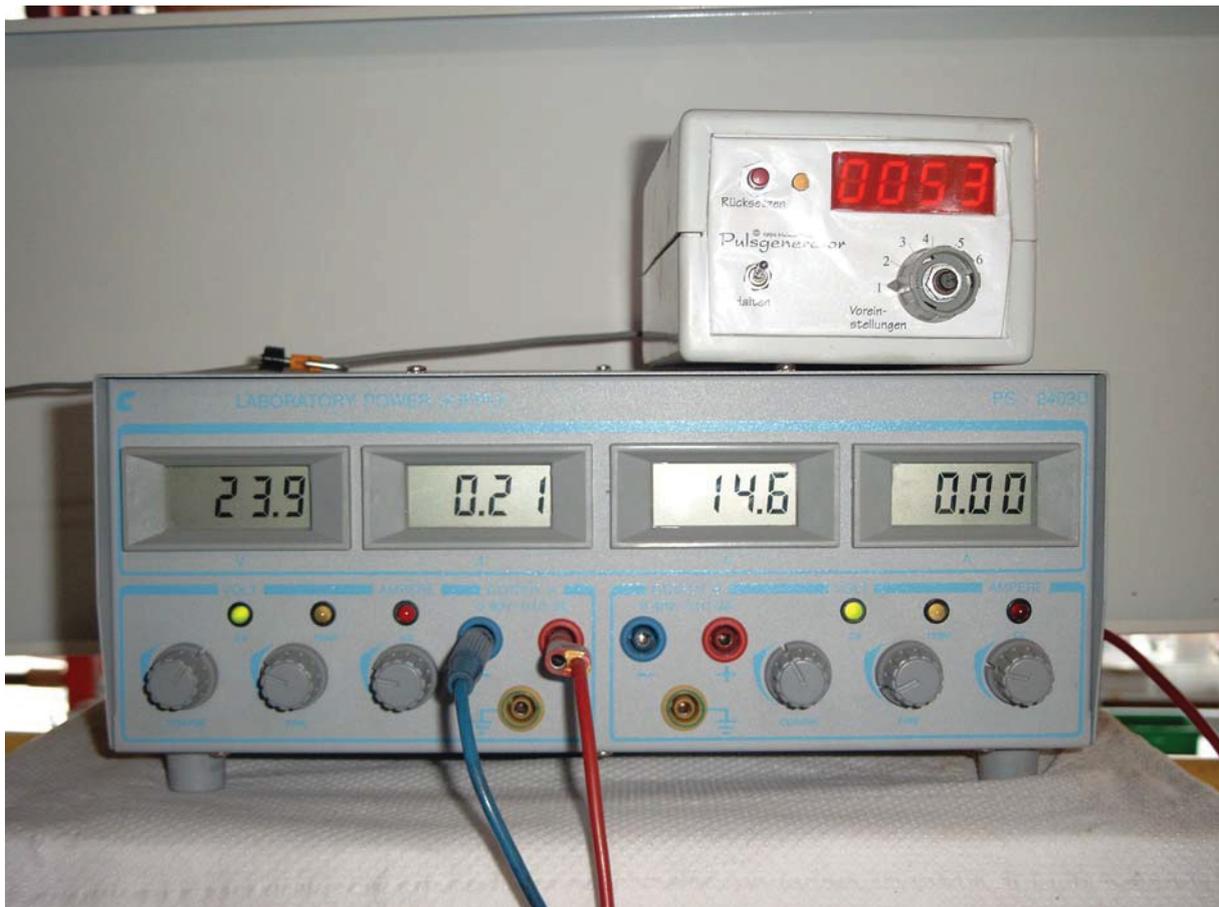


Abbildung 6.1.3.1.: Pulsgeberschaltung mit Zählerinheit und Netzgerät zur Spannungsversorgung

### Die Tropfenkapillare:

Die Tropfenkapillare dient zur Einbringung der Tropfen in die Stoffaustauschsäule und ist ein an einem Ende auf einen Innendurchmesser von etwa 1 mm dünnggezogenes Glas- oder Kunststoffröhrchen mit einem Innendurchmesser von 2,2 mm und einer Länge von 150 mm. Die Tropfenkapillare wird am oberen Ende der Stoffaustauschsäule montiert.

### Der elektromagnetische Stößel:

Der elektromagnetische Stößel ist eine einfache elektromagnetische Spule mit Eisenkern und dient zur Erzeugung des Druckstoßes in der Pulskammer.

Firma / Typ: KUHNKE M32-F-HS 2617 24 V = 100 % ED 8717

### Tropfengenerator während des Füllvorganges

Um das Aussehen des Tropfengenerators zu veranschaulichen, soll diese Abbildung, welche den Generator während des Füllvorganges darstellt, beitragen. Beim Füllen wird er von der Tropfensäule genommen und auf den Kopf gestellt, damit die Luft, welche sich in der Pulschammer befindet, durch die Tropfenkapillare entweichen kann.



*Abbildung. 6.1.3.2.: Tropfengenerator während des Füllvorganges*

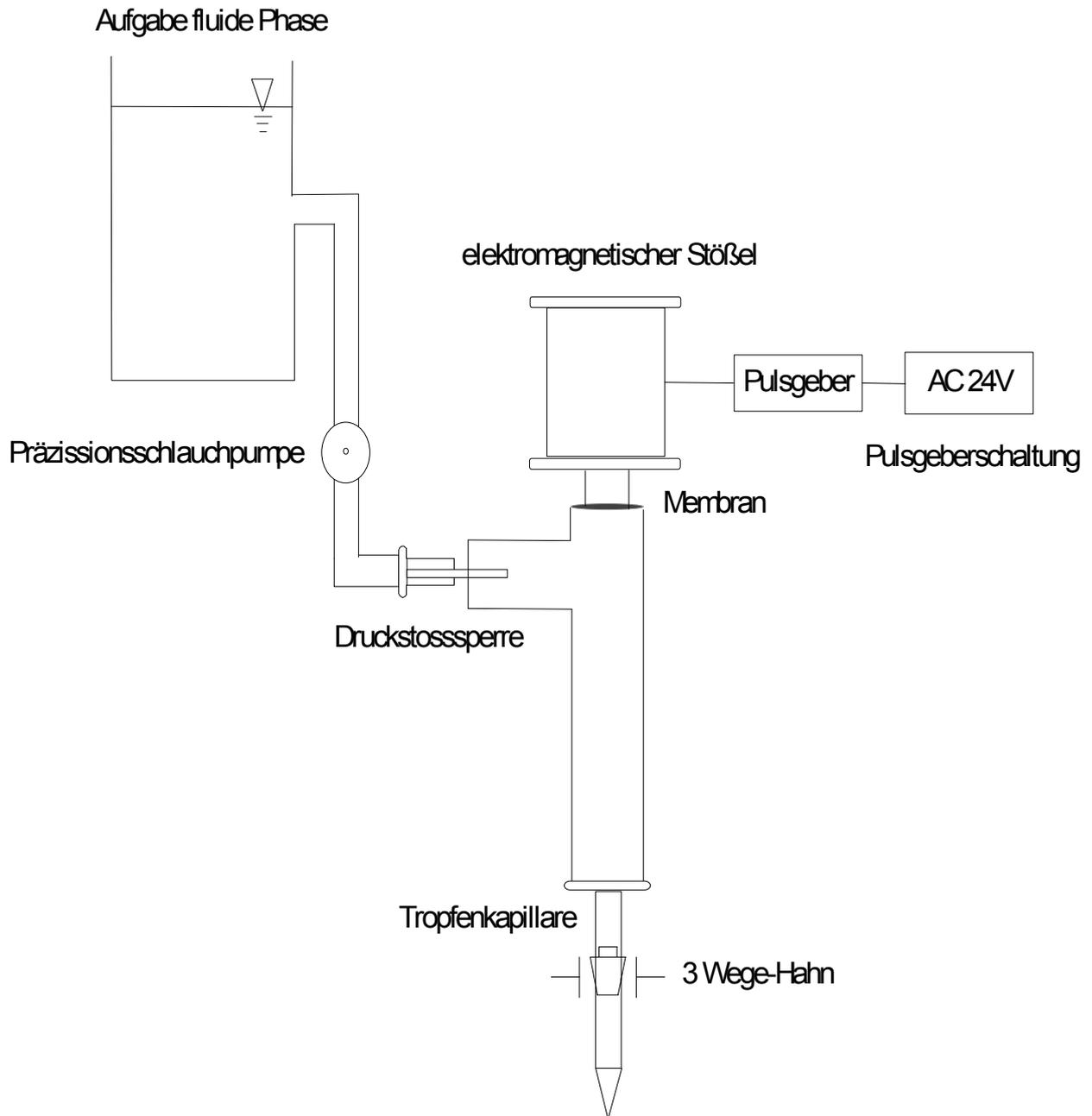


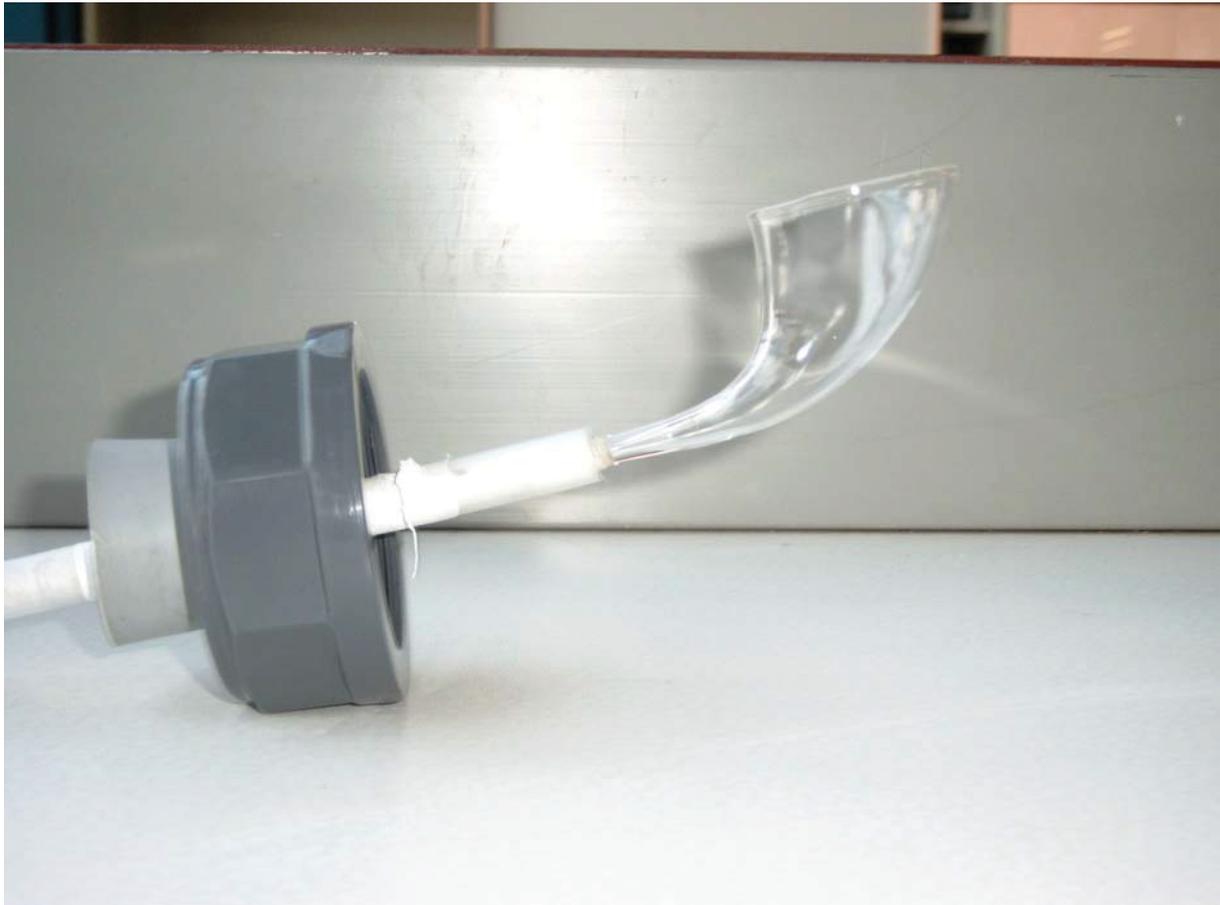
Abbildung.6.1.3.3.: Schematische Darstellung des Tropfengenerators

### 6.1.4 Die Stoffaustauschsäule



Abbildung: 6.1.4.1.: Stoffaustauschsäule während des Versuches

### 6.1.5 Die Absaugtrichterkapillare



*Abbildung: 6.1.5.1.: Absaugtrichterkapillare, ausgebaut aus der Tropfensäule*

### 6.1.6 Das Probenahmegefäß mit vorgelegter Iodlösung



Abbildung: 6.1.6.1.: Probenahmegefäß und Erlenmeyerkolben mit vorgelegter Iodlösung

### 6.1.7 Die Gasanalytik

Mit Hilfe der Gasanalytik wurde die Rohgaskonzentration bestimmt. Die  $\text{SO}_2$ -Konzentration in der Gasphase konnte mittels einer Online-Gasanalytik NDIR-spektrometrisch bestimmt werden.

#### Betriebsdaten der Analysatormodule: Uras 14

Die folgenden Daten beziehen sich auf die kleinsten Messbereiche Klasse 1. Bei Messbereichen kleiner als Klasse 1 bis hin zu Klasse 2 können die Daten bezüglich des Nullpunktes von den folgenden Angaben abweichen.

**Stabilität:** Linearitätsabweichung < 1 % der Messspanne

Wiederholbarkeit :~ 0,5 % der Messspanne

Nullpunktsdrift < 1 % der Messspanne pro Woche

Empfindlichkeitsdrift 51 % des Messwertes pro Woche

Ausgangssignalschwankungen: 5 0,2 % der Messspanne bei 2 a und

elektronischer T90-Zeit = 5 s

Nachweisgrenze 0,5 % der Messspanne

**Einflusseffekte:** Durchflusseinfluss: Durchfluss im Bereich 20 100 l/h: innerhalb der

Nachweisgrenze

Begleitgaseinfluss: der Kalibrierung des Analysators muss eine Analyse des Messgases zugrundegelegt werden. Selektivierungsmaßnahmen zur Verringerung des Begleitgaseinflusseffektes (Optionen): Einbau von Interferenzfiltern oder Filterküvetten oder interne elektronische Querempfindlichkeits- bzw. Trägergaskorrektur einer Messkomponenten durch die anderen mit dem Uras 14 gemessenen Messkomponenten.

Temperatureinfluss Umgebungstemperatur im zulässigen Bereich; am

Nullpunkt: 51 % der Messspanne pro 10 Grad Celsius auf die Empfindlichkeit mit Temperaturkompensation: kleiner 3 % des Messwertes pro 10 Grad C; auf die Empfindlichkeit mit Thermostatisierung auf 60 Grad C (Option): kleiner 1 % des Messwertes pro 10 Grad C

Luftdruckeinfluss am Nullpunkt: kein Einflusseffekt auf die Empfindlichkeit mit Druckkorrektur mittels eingebautem Drucksensor kleiner 0,2 % des Messwertes pro 1 % Luftdruckänderung. Arbeitsbereich des Drucksensors: 600 ... 1200 h\*Pa. Option: Anschluss des Drucksensors nach außen geführt

Energieversorgungseinfluss 24 V DC  $\pm$  5 %: 9 0,2 % der Messspanne

**T<sub>90</sub> -Zeit** abhängig von der Länge der Messküvette und der Messgasleitung sowie vom Messgasdurchfluss und von der Dämpfung

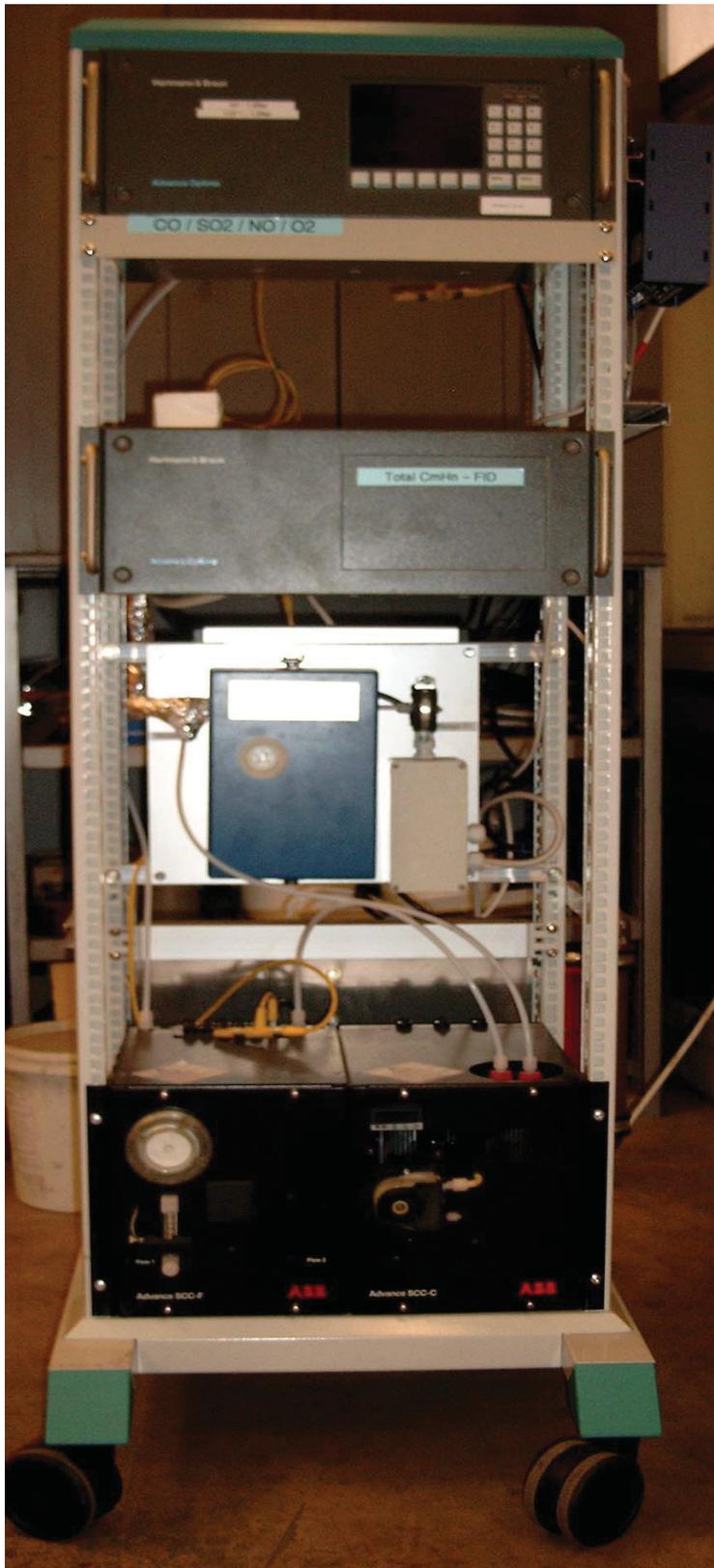
**Abbildung der Analyseeinheit**

Abbildung: 6.1.7.1.: NIDR spektrometrische Gasanalyseeinheit

## 6.2 Inbetriebnahme der Anlage

In diesem Kapitel werden die Richtlinien für die richtige Inbetriebnahme der Anlage beschrieben und eine Arbeitsanweisung für die korrekte Durchführung des Versuches gegeben.

### 6.2.1 Vorbereitungen im Labor

- Ein mit deionisiertem Wasser gespültes Probenahmegefäß wird mit einer definierten Iodmenge bestückt, welche sich im Bereich von 2 ml bis zu 5 ml bewegt. Die Aufgabe dieser Iodmenge erfolgt mit Hilfe einer Pipette und wird mit verdünnter Salzsäure versetzt, damit die Reaktionsfreudigkeit der Stammlösung erhöht wird. Danach wird dieser Stammlösung noch deionisiertes Wasser hinzugegeben.

### 6.2.2 Anfahren der Anlage

- Füllen des Tropfengenerators:

Da sich der Tropfengenerator, wenn gewisse Zeit kein Versuch gefahren wurde, teilweise entleert, dieser aber, damit der durch die Pulsgeberschaltung beaufschlagte elektromagnetische Stößel korrekt arbeiten kann, immer bis zum Rand gefüllt sein soll, muss der Tropfengenerator aus der Halterung entnommen werden, umgedreht und gefüllt werden. Die in Kapitel 8 angeführten Versuche wurden mit deionisiertem Wasser durchgeführt.

Wenn die gesamte Luft aus dem Tropfengenerator entfernt wurde, kann dieser wieder in die Halterung eingespannt werden.

- Spülen der Absaugtrichterkapillare:

Da sich die Trichterabsaugkapillare von Zeit zu Zeit benetzt, muss sie vor jedem Versuch mit Aceton gespült werden, um ein korrektes Abrinnen der Tropfen zu gewährleisten. Dies erfolgt noch vor dem Einspannen der Absaugkapillare in die Tropfensäule. Nach der Montage des Absaugtrichters muss ein weiteres mal, mit Hilfe einer handelsüblichen Spritze, mit Aceton gespült werden.

- Einstellen des Pulsgenerators:

Das Einstellen des Pulsgenerators ist deshalb wichtig, damit eine konstante Tropfengröße erreicht werden kann. Bei den gefahrenen Vorversuchen wurde die optimale Pulsgebereinstellung gefunden: - eingestellte Spannung: 24 Volt

- eingestellte Stromstärke: 0.2 Ampere
- die Frequenz variiert jedoch zwischen

TG-Stellung 1 und TG-Stellung 2.

- Einstellung der Durchflussmenge der Präzisionsschlauchpumpe

Diese Präzisionsschlauchpumpe sorgt für Förderung der fluiden Phase aus dem Versorgungsbehälter in die Kammer des Tropfengenerators. Durch die Einstellung einer exakten Fördermenge wird sichergestellt, dass die Tropfenkammer während des Versuches immer voll gefüllt ist. Die Fördermenge bewegt sich je nach verwendeter Tropfengeneratorkapillare zwischen 1.3 ml/min und 1.6 ml/min.

- Reinigen der Absaugkapillare:

Da die Absaugkapillare mit Aceton benetzt sein könnte, schaltet man, ohne das sich das Probennamegefäß in der dafür vorgesehenen Einspannvorrichtung hinter der Absaugkapillare befindet, die Anlage kurzfristig ein, um diese mit der fluiden Phase zu reinigen. Die Tropfenanzahl ist hierbei nebensächlich, sollte aber nicht unter 100 Tropfen liegen.

### 6.2.3 Aufgabe der Gasphase

- Einwiegen des Schwefels:

Um die gewünschte Konzentration  $\text{SO}_2$  in der Tropfensäule zu erhalten, werden einige Milligramm Schwefel auf einem Löffel eingewogen. Diese eingewogene Schwefelmenge wird noch außerhalb der Tropfensäule entzündet und in die dafür vorgesehen Öffnung in die Säule hineingehalten. Der entstehende Schwefelrauch verteilt sich dann in der Säule und um die gewünschte Gasbulkonzentration zu erreichen, sollte die Verweilzeit des brennenden Schwefels etwa eine halbe bis eine Minute betragen.

- Einschalten der Umwälzpumpe:

Nachdem die Schwefelaufgabeöffnung wieder verschlossen wurde, schließt man die Umwälzpumpe an die Tropfensäule an, um eine disperse Verteilung des  $\text{SO}_2$  in Luft zu erreichen. Hierbei hat sich gezeigt, dass es völlig ausreicht, wenn die Pumpe eine Minute in Betrieb ist, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen.

- Überprüfen auf Überdruck

Nach dem Schließen aller Hähne ist die gesamte Anlage dicht. Da durch die Umwälzung der Luft in der Tropfensäule ein Überdruck entstanden sein könnte, muss

mit Hilfe des Manometers überprüft werden, ob im Inneren der Säule Atmosphärendruck herrscht.

#### - Messen der Gasbulkonzentration

Nach abermaligen Öffnen der Hähne wird die Anlage an ein Online-Gasanalytik-Messgerät angeschlossen. Die Gasbulkonzentration wird nun NDIR-spektrometrisch bestimmt, wobei dieser Vorgang einige Minuten dauern kann, um exakte Werte zu erhalten.

### 6.2.4 Durchführung des Einzelversuches

#### - Einspannen des Probenahmegefäßes

Das Gasanalytik-Messgerät wird wieder abgeschlossen, die Anlage dicht gemacht und das Probenahmegefäß in die dafür vorgesehene Halterung eingespannt. Damit ein optimales Abrinnen der Tropfen durch die Auffangkapillare in das Gefäß gewährleistet ist, geschieht dies in einem Winkel von 45°. Die Klemme des Schlauches der von der Absaugkapillare zum Probenahmegefäß führt, muss entfernt werden.

#### - Starten des Tropfengenerators

Die Zählleinheit, welche die Tropfenanzahl widerspiegelt, wird auf null gesetzt, die Präzisionsschlauchpumpe eingeschaltet und der Pulsgenerator aktiviert. Damit ist der Versuch gestartet.

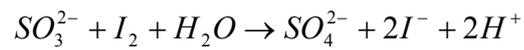
#### - Versuchende

Nachdem alle Einzeltropfen die Auffangkapillare erreicht haben, wobei die Tropfenanzahl zwischen 400 und 1000 Tropfen variiert, wird der Pulsgenerator und die Präzisionsschlauchpumpe wieder abgeschaltet und das Probenahmegerät wird aus der Halterung entnommen.

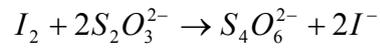
### 6.2.5 Auswertung des Versuches

Um Sulfit in wässriger Lösung quantitativ erfassen zu können, bedient man sich eines iodometrischen Titrationsverfahren. Wie bereits erwähnt, wird ein mit deionisiertem Wasser gespültes Probenahmegefäß mit einer definierten Iodmenge bestückt und mit ein wenig verdünnter HCl versetzt.

Das Sulfit in der wässrigen Probe reagiert mit dem Iod nach folgender Gleichung:



Die nach der Umsetzung verbleibende Restmenge an Iod wird durch Titration mit einer Natriumthiosulfat-Lösung bestimmt:



Diese Titration erfolgt händisch, wobei der Punkt exakt stöchiometrischer Umsetzung dann erreicht ist, wenn die Iodfärbung der Lösung verschwunden ist.

Mit dem erlangten Titrationsergebnis kann man nun unter Zuhilfenahme der einzelnen Berechnungsmodelle die Menge an  $SO_2$ , die während des Versuches vom Gas in die Flüssigkeit überging, ermitteln.

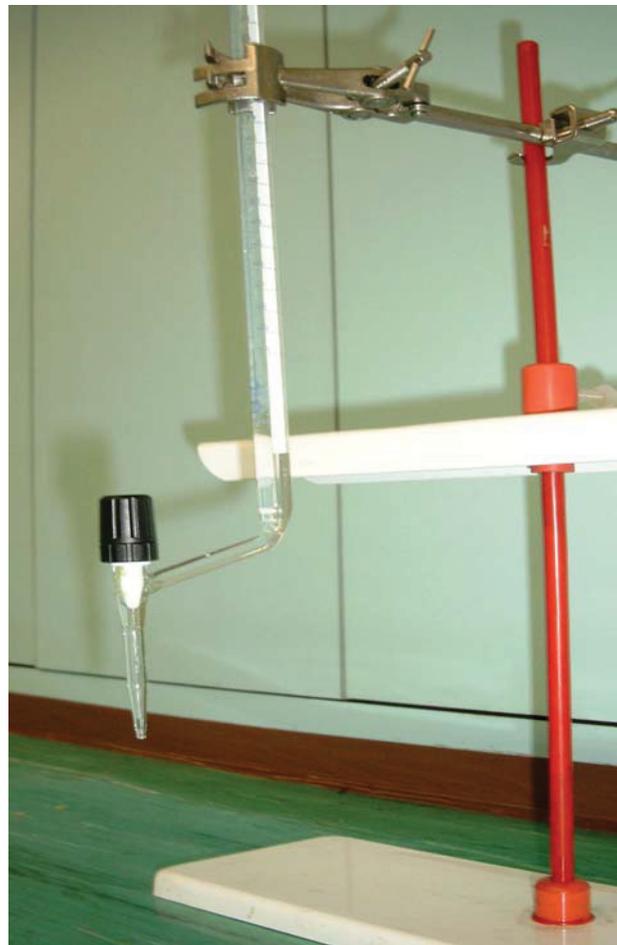
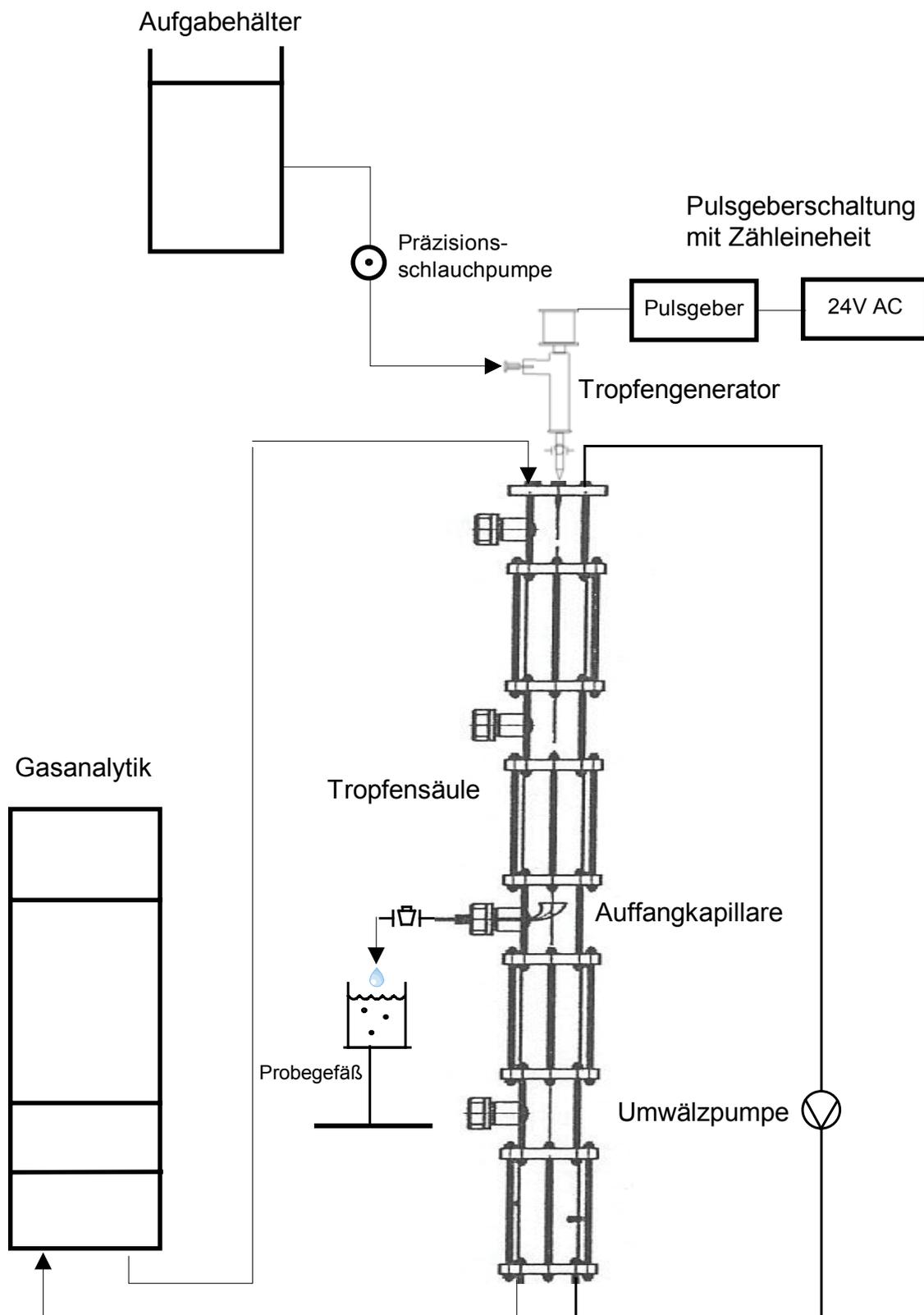


Abbildung 6.2.5.1.:Bürette zur Durchführung des Titrationsvorganges

### 6.3 Schematische Darstellung der Versuchsanlage



## 7 Theoretische Berechnung des Stoffdurchgangskoeffizienten gemäß der Stoffaustauschmodelle

### 7.1 Ermittlung der Tropfengröße

Im Zuge einer Vorversuchsreihe wurden Tropfen generiert, deren Tropfengröße ein stabiles Flugverhalten gewährleisten. Dabei ist besonders wichtig, dass die kritische Weberzahl = 10 nicht überschritten wird (kein Tropfenzerfall).

$$m_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{\text{Tropfenanzahl}} \quad (\text{Gl. 7.1.1})$$

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \quad (\text{Gl. 7.1.2})$$

$$d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 * V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} \quad (\text{Gl. 7.1.3})$$

Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht klar war, wie eine konstante Tropfengröße erreicht werden kann, bei der sich die Tropfen im freien Fall stabil verhalten, wurde mit der Höhendifferenz der Pipettenspitze und der Bezugshöhe des Versorgungswasserpegels experimentiert (siehe Tabelle: 7.1.1.).

Durch verändern dieser Höhendifferenz ändert sich natürlich auch die potentielle Energie. Ziel dieser Experimente war es herauszufinden, bei welcher Höhendifferenz der Tropfengenerator genau mit der selben Flüssigkeitsmenge befüllt wird, welche den Generator über die Kapillarspitze wieder verlässt. Da die Pulskammer des Tropfengenerators immer voll gefüllt ist, ist für eine korrekte Arbeitsweise unumgänglich.

Da aber dann bei den Hauptversuchen eine Präzisionsschlauchpumpe zwischen dem Versorgungsbehälter und dem Tropfengenerator installiert wurde, kann die Höhendifferenz ignoriert werden, da durch das Einstellen der richtigen Fördermenge der Pumpe (ml/min) gewährleistet ist, dass die Pulskammer immer voll gefüllt ist.

Tabelle 7.1.1. : Ermittlung des Tropfendurchmessers bei verschiedenen Fallhöhen

lf.Nr.	U[V]	I[A]	TG-Stellung	n-Tropfen	h1[mm]	h2[mm]	h3[mm]	m1[g]	m2[g]	m3[mg]	V[m <sup>3</sup> ]	d[mm]
1	24	0,2	2	999	415	429	14	65,93	72,46	6,54	6,55E-09	2,32
2	24	0,2	2	2000	415	428	13	66,05	78,50	6,23	6,24E-09	2,28
3	24	0,2	2	500	415	426	11	65,57	68,42	5,70	5,71E-09	2,22
4	24	0,2	2	2263	332	425	93	65,93	126,32	26,69	2,67E-08	3,71
5	24	0,2	2	1070	332	423	91	66,05	93,55	25,70	2,57E-08	3,66
6	24	0,2	2	707	332	422	90	65,57	84,05	26,14	2,62E-08	3,68
7	24	0,2	2	603	363	421	58	65,93	76,87	18,14	1,82E-08	3,26
8	24	0,2	2	1212	363	420	57	66,05	88,20	18,28	1,83E-08	3,27
9	24	0,2	2	1860	363	419	56	65,57	99,66	18,33	1,84E-08	3,27

## 7.2 Berechnung der Tropfengeschwindigkeit

### 7.2.1 Formeln zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit

Bei Annahme eines festen kugelförmigen Teilchens und unter der Voraussetzung, dass sich die Teilchen gegenseitig nicht beeinflussen, ergibt sich die stationäre Endgeschwindigkeit aus der Kräftebilanz von Auftriebskraft, Widerstandskraft und Gewichtskraft.[21]

$$F_A = V_{H_2O} * \rho_{Luft} * g \quad (\text{Gl. 7.2.1.1})$$

$$F_W = c_w * \frac{\rho_{Luft}}{2} * \omega^2 * A \quad (\text{Gl. 7.2.1.2})$$

$$F_G = V_{H_2O} * \rho_{Wasser} * g \quad (\text{Gl. 7.2.1.3})$$

$$V_{H_2O} = \frac{d_{Tropfen}^3 * \pi}{6} \quad (\text{Gl. 7.2.1.4})$$

$$A_{Tropfen} = d_{Tropfen}^2 * \pi \quad (\text{Gl. 7.2.1.5})$$

Formelapparat zur Berechnung der Fallgeschwindigkeit der Tropfen:

$$F(A) + F(W) = F(G) \Rightarrow F(W) = F(G) - F(A)$$

$$c(w) * \frac{\rho(Luft)}{2} * \omega^2 * A = (V(H_2O) * \rho(H_2O) * g) - (V(H_2O) * \rho(Luft) * g)$$

$$c(w) * \frac{\rho(Luft)}{2} * \omega^2 * \left(\frac{d^2 * \pi}{4}\right) = \frac{\pi * d^3}{6} * (\rho(H_2O) - \rho(Luft)) * g$$

$$\omega^2 = \frac{4}{c(w)} * \frac{d}{3} * (\rho(H_2O) - \rho(Luft)) * g * \frac{1}{\rho(Luft)}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{4 * (\rho(H_2O) - \rho(Luft)) * d * g}{3 * c(w) * \rho(Luft)}}$$

## 7.2.2 Berechnung über das Diagramm: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynolds-Zahl

Ziel dieser Berechnung ist es, die Fallgeschwindigkeit der frei fallenden Tropfen zu ermitteln. Dabei wird ein Tropfendurchmesser angenommen und danach wird die Geschwindigkeit für diesen Durchmesser mit nachstehender Formel berechnet. [22],[23],[24]

$$\omega = \sqrt{\frac{4 * (\rho_{Wasser} - \rho_{Luft}) * d_{Tropfen} * g}{3 * c_w + \rho_{Luft}}} \quad (\text{Gl. 7.2.2.1})$$

Dichten bei 20°C (293.15K):  $\rho_{Wasser} = 998.21 \frac{kg}{m^3}$

$$\rho_{Luft} = 1.188 \frac{kg}{m^3}$$

Die Reynolds-Zahl wird berechnet, um im Diagramm den richtigen Widerstandsbeiwert  $c_w$  ablesen zu können. Die Weber-Zahl, die das Verhältnis der Trägheitskraft zur Oberflächenkraft ausdrückt, muss ermittelt werden um sicher zu stellen, dass kein Tropfenzerfall stattfinden kann.

$$Re = \frac{w * d_{Tropfen}}{\nu_{Gas}} \quad (\text{Gl. 7.2.2.2})$$

$$We = \frac{\rho_{Wasser} * w^2 * d_{Tropfen}}{\nu_{Gas}} \quad (\text{Gl. 7.2.2.3})$$

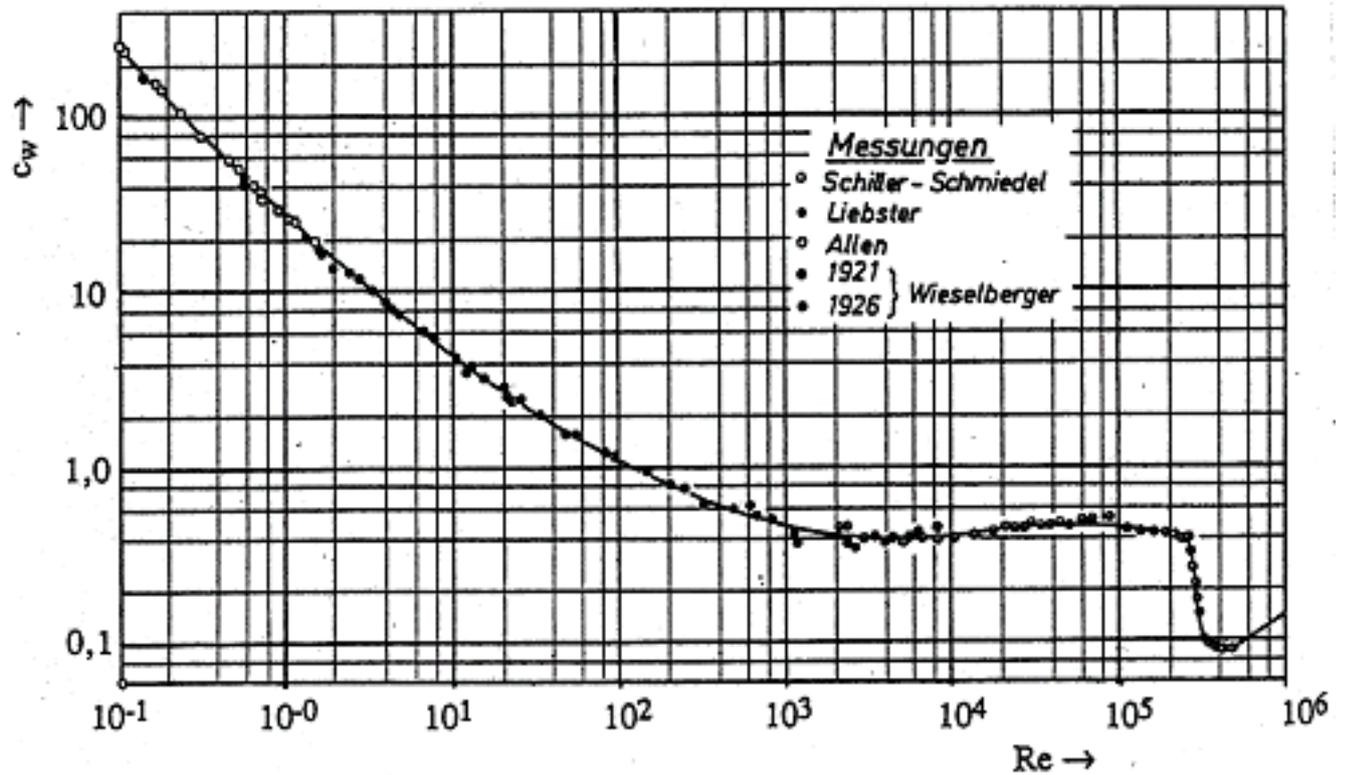


Abbildung:7.2.2.1.: Widerstandsbeiwert als Funktion der Reynoldszahl

Tabelle7.2.2.1: Reynolds- bzw. Weberzahlen für bestimmte Tropfendurchmesser

d [mm]	$c_w$ [-]	w [m/s]	We-Zahl	Re-Zahl
2	0,41	7,32	1,55	813
3	0,42	8,86	3,41	1476
4	0,5	9,37	5,08	2082
5	0,5	10,48	7,95	2911

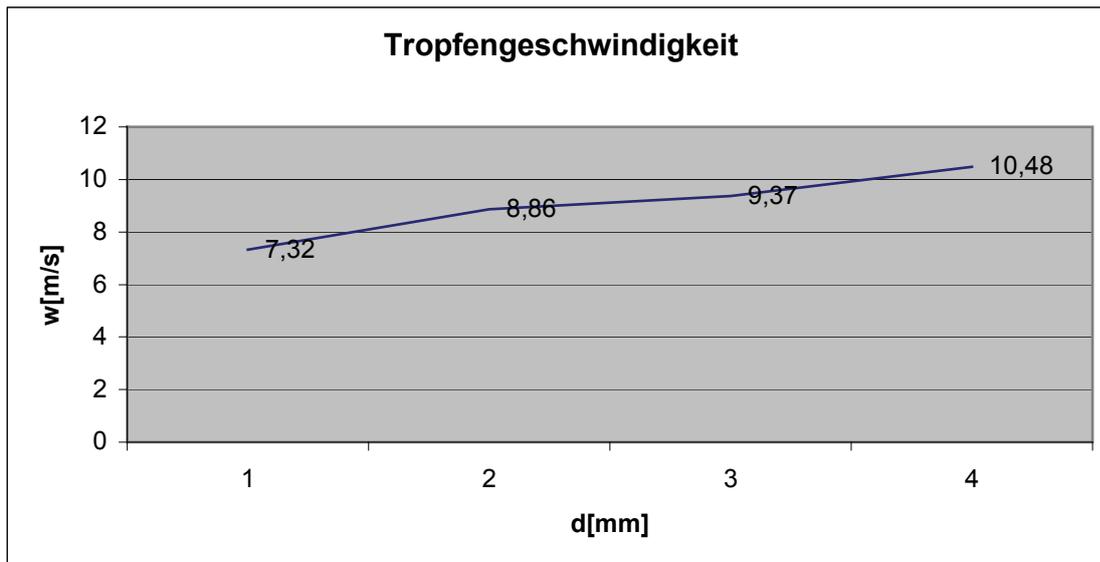


Abbildung:7.2.2.2.: Tropfengeschwindigkeit als Funktion des Tropfendurchmessers gemäß (Gl.7.2.2.1.) und unter der Verwendung des Widerstandsbeiwertdiagramms Abbildung 7.2.2.1..

### 7.2.3 Berechnung über die Formel von Kaskas und Brauer für den Widerstandsbeiwert

Im Gegensatz zur vorherigen Berechnung wird der Widerstandsbeiwert  $c_w$  nicht mehr über ein Diagramm ermittelt, sondern über die Formel:

$$c_w = \frac{24}{Re} + \frac{4}{\sqrt{Re}} + 0.4 \quad (\text{Gl. 7.2.3.1.})$$

Dichten bei 20°C (293.15K):  $\rho_{Wasser} = 998.21 \frac{kg}{m^3}$

$$\rho_{Luft} = 1.188 \frac{kg}{m^3}$$

Die Tropfengeschwindigkeit, die Reynolds-Zahl und die Weber-Zahl werden jedoch wieder auf die gleiche Weise ermittelt.

Tabelle 7.2.3.1.: Reynolds- bzw. Weberzahlen für bestimmte Tropfendurchmesser

d [ mm ]	$c_w$ [-]	w [ m/s ]	We-Zahl	Re-Zahl
2	0,44	7,06	1,44	784
3	0,43	8,75	3,33	1458
4	0,42	10,22	6,05	2271
5	0,42	11,43	9,46	3175

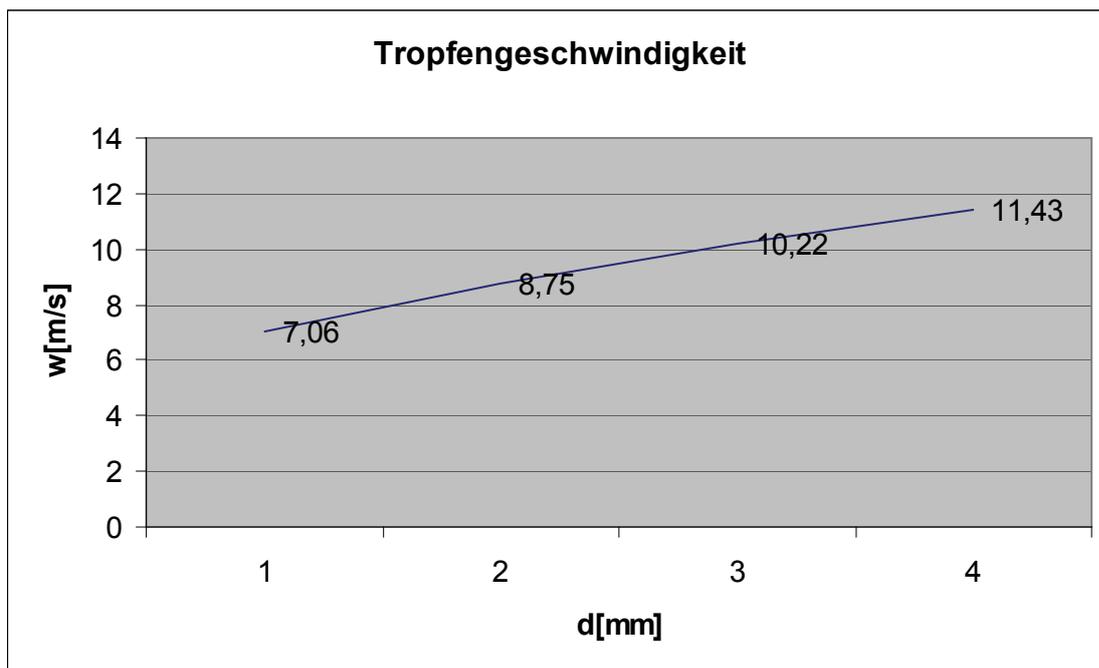


Abb. 7.2.3.1.: Tropfengeschwindigkeit als Funktion des Tropfendurchmessers unter Verwendung der Widerstandsbeiwertkorrelation nach der Formel von Kaskas und Brauer (7.2.3.1.).

## 7.3 Berechnung der Tropfenkonzentration und des Stoffaustausches

### 7.3.1 Formeln allgemein

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c \quad (\text{Gl. 7.3.1.1})$$

$$k = \frac{1}{\frac{H}{R * T * \beta_l} + \frac{1}{\beta_g}}$$

$$A = d_{Tropfen}^2 * \pi$$

$$\Delta c = c_{g,\infty} - c_g^*$$

(Gl. 7.3.1.2 – 7.3.1.4)

### 7.3.2 Berechnung des Stoffdurchgangskoeffizienten:

$$k = \frac{1}{\frac{H}{R * T * \beta_l} + \frac{1}{\beta_g}} \quad (\text{Gl. 7.3.1.5})$$

- Stoffübergangskoeffizienten:

$$\beta_l = \sqrt{\frac{D_l}{\pi * t_{\text{exp}}}}$$

(Gl. 7.3.1.6 + 7.3.1.7)

$$\beta_g = \frac{Sh * D_g}{d_{Tropfen}}$$

- Die Sherwood-Zahl ist definiert als: Stoffübergangsstrom / Diffusionsstrom.

Sie ist ein Maß dafür, um wie viel schneller eine Stoffübertragung einer Phase in eine andere Phase erfolgt, als dies bei reiner Diffusion geschehen würde.

$$Sh = 2 + 0.57 * Re^{0.5} * Sc^{0.33} \quad (\text{Gl. 7.3.1.8})$$

wobei Re für die Reynolds-Zahl ( Trägheitskraft /innere Reibung ) und Sc für die Schmidt-Zahl (innere Reibung / Diffusionsstrom) steht.

$$Re = \frac{\omega * d_{Tropfen}}{v_{gas}}$$

$$Sc = \frac{v_{gas}}{D_g}$$

(Gl. 7.3.1.9 + 7.3.1.10)

### 7.3.3 Berechnung der Kontaktfläche

$$A = d_{Tropfen}^2 * \pi \quad (\text{Gl. 7.3.1.11})$$

### 7.3.4 Berechnung des Konzentrationsunterschiedes

$$\Delta c = c_{g,\infty} - c_g^* \quad (\text{Gl. 7.3.1.12})$$

- Man wählt eine Anfangskonzentration  $\Delta c_A$  und eine  $c_g^*$ .

$c_g^*$  ist jene hypothetische Konzentration des Gases, welche mit dem gesättigten Tropfen am Boden der Kolonne im Gleichgewicht steht.

Diese Konzentration wird nun für die Berechnung der Konzentration am Boden der Kolonne herangezogen.

$$\Delta c_{Ende} = \Delta c_{Anfang} - c_g^* \left[ \frac{mol}{m^3} \right] \quad (\text{Gl. 7.3.1.13})$$

Nun ist man in der Lage das treibende mittlere Gefälle zu berechnen:

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} \quad (\text{Gl. 7.3.1.14})$$

## 7.4 Berechnungsbeispiele für verschiedene Tropfendurchmesser

### 7.4.1 Tropfendurchmesser: 2,3 mm

In diesem Berechnungsbeispiel wurde die Tropfengröße bzw. der Tropfendurchmesser mit 2.3 mm festgelegt und aus (Gl. 7.2.2.1) folgt eine Tropfengeschwindigkeit von 7.3 m/s.

Es können folgende weitere Berechnungen gemacht werden:

$$\beta_l = \sqrt{\frac{D_l}{\pi * t_{\text{exp}}}} = \sqrt{\frac{3.4 * 10^{-9}}{\pi * 0,03}} = 1.899 * 10^{-4} \frac{m}{s}$$

$D_l$ ...bei 20°C = 3.4exp-9[m<sup>2</sup>/s]

Kontaktzeit des Tropfensegmentes liegt zwischen 0.01s und 0.05s (gewählt = 0.03s).

$$\text{Re} = \frac{\omega * d_{\text{Tropfen}}}{v_{\text{gas}}} = \frac{7.3 \left[ \frac{m}{s} \right] * (2.3 * 10^{-3}) [m]}{1.8 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 932.7 \approx 930$$

$$\text{Sc} = \frac{v_{\text{gas}}}{D_g} = \frac{1.8 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}{1.55 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 1.161$$

$$\text{Sh} = 2 + 0.57 * \text{Re}^{0.5} * \text{Sc}^{0.33} = 2 + 0.57 * 930^{0.5} * 1.161^{0.33} = 20.26$$

$$\beta_g = \frac{\text{Sh} * D_g}{d_{\text{Tropfen}}} = \frac{20.26 * 1.55 * 10^{-5}}{2.3 * 10^{-3}} = 0.137 \frac{m}{s}$$

$$k = \frac{1}{\frac{H}{R * T * \beta_l} + \frac{1}{\beta_g}} = \frac{1}{\frac{120}{8.314 * 293.15 * 1.899 * 10^{-4}} + \frac{1}{0.137}} = 3,751 * 10^{-3} \frac{m}{s}$$

H...bei 25 °C = 120 [kg m<sup>2</sup> / mol s]

$$A = d_{Tropfen}^2 * \pi = (2.3 * 10^{-3})^2 * \pi = 1.66 * 10^{-5} m^2$$

$$\Delta c_{Ende} = c_{g,\infty} - c_g^*$$

Rohgaskonzentration gewählt 1000 [mg / m<sup>3</sup>]

Relative Atommasse SO<sub>2</sub> = 64.064 [g / mol]

Daraus ergibt sich eine Konzentration von 0.0156 [mol / m<sup>3</sup>]

Anfangskonzentration  $\Delta c_{Anfang} = 0.016$  [mol / m<sup>3</sup>]

$c_g^* = 0.008$  [mol / m<sup>3</sup>]

$$\Delta c_{Ende} = c_{g,\infty} - c_g^* = 0.016 - 0.008 = 0.008 \frac{mol}{m^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{Ende} = 0.008$  [mol / m<sup>3</sup>]

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{Anfang} - \Delta c_{Ende}}{\ln \frac{\Delta c_{Anfang}}{\Delta c_{Ende}}} = \frac{0.016 - 0.008}{\ln 2} = 0.0115 \frac{mol}{m^3}$$

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c = 1.424 * 10^{-3} \frac{m}{s} * 1.66 * 10^{-5} m^2 * 0.0115 \frac{mol}{m^3} = 2.718 * 10^{-10} \frac{mol}{s}$$

$$N_{SO_2} = 2.718 * 10^{-10} \frac{mol}{s}$$

Bei einer Fallgeschwindigkeit von 7.3 m/s und einer Fallhöhe von 2 m ergibt sich eine Kontaktzeit von 0.27 Sekunden.

D.h. der Stoffaustausch aus dem Gasstrom in den fallenden Einzeltropfen definiert sich wie folgt:

$$\dot{N}_{SO_2} = 7.34 * 10^{-11} mol .SO_2$$

Kugelvolumen:

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{d^3 * \pi}{6} = \frac{(2.3 * 10^{-3})^3 * \pi}{6} = 6.37 * 10^{-9} \text{ m}^3.$$

Dies ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{7.34 * 10^{-11} \text{ mol}}{6.37 * 10^{-9} \text{ m}^3} = 0.01172 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T}$$

Kontrolle der Einheiten:

$$c_g^* \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right] = c_{\text{Tropfen}} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right] * H \left[ \frac{\text{kg} * \text{m}^2}{\text{mol} * \text{s}^2} \right] * \frac{1}{R * T} \left[ \frac{\text{mol} * \text{K} * \text{s}^2}{\text{kg} * \text{m}^2 * \text{K}} \right]$$

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 0.01175 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 0.0015 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Iterationsrechnung für die hypothetische Gaskonzentration, die mit der Flüssigkonzentration im Gleichgewicht steht:

Diese Berechnung funktioniert wie folgt: eine hypothetische Gaskonzentration wird angenommen, mit der dann eine  $\Delta c_{\text{Ende}}$  bestimmt wird. Über die Formel (7.3.1.14.) berechnet man dann das mittlere treibende Gefälle, die Stoffmenge von SO<sub>2</sub> wird ermittelt. Über das Kugelvolumen erhält man die Konzentration im Tropfen und über das Henrysche Gesetz wird nun wiederum die hypothetische Gaskonzentration, die mit der Flüssigkeitskonzentration im Gleichgewicht steht, berechnet werden. Dies hat so lange zu erfolgen, bis der Wert iteriert.

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.016 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c_{\text{Ende}} = \Delta c_{g,\infty} - c_g^* = 0.016 - 0.0015 = 0.0145 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{\text{Ende}} = 0.0145 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} = \frac{0.016 - 0.0145}{\ln \frac{0.016}{0.0145}} = 0.01523 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c = 1.424 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1.66 * 10^{-5} \text{ m}^2 * 0.01523 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 3.60 * 10^{-11} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{SO_2} = 3.60 * 10^{-11} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{SO_2} = 9.72 * 10^{-11} \text{ molSO}_2$$

Kugelvolumen:

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{d^3 * \pi}{6} = \frac{(2.3 * 10^{-3})^3 * \pi}{6} = 6.37 * 10^{-9} \text{ m}^3$$

Dies ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{9.72 * 10^{-11} \text{ mol}}{6.37 * 10^{-9} \text{ m}^3} = 0.01525 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T}$$

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 0.01525 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 0.0020 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.016 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g,\infty} - c_g^* = 0.016 - 0.0020 = 0.014 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{\text{Ende}} = 0.014 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_A - \Delta c_B}{\ln \frac{\Delta c_A}{\Delta c_B}} = \frac{0.016 - 0.014}{\ln \frac{0.016}{0.014}} = 0.015 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c = 1.424 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1.66 * 10^{-5} \text{ m}^2 * 0.015 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 3.54 * 10^{-10} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{SO_2} = 3.54 * 10^{-10} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{SO_2} = 9.57 * 10^{-11} \text{ molSO}_2$$

Dies ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{9.57 * 10^{-11} \text{ mol}}{6.37 * 10^{-9} \text{ m}^3} = 0.015 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T}$$

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 0.015 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 0.00198 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.016 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g,\infty} - c_g^* = 0.016 - 0.00198 = 0.014 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Tabelle 7.4.1.1.: Eckdaten der iterativen Berechnung der Stoffstromdichte für einen Tropfendurchmesser von 2.5 mm und einer Anfangskonzentration von 0.016 mol/m<sup>3</sup>:

lf.Nr. der Iterationen	$\Delta C_{\text{Anfang}}$	$\Delta C_{\text{Ende}}$	$\Delta C_{\text{Mitte}}$	$N_{\text{SO}_2}$	$C_{\text{Tropfen}}$	$c_g^*$
	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol/m <sup>3</sup> ]	[mol/s]	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol / m <sup>3</sup> ]
						0,00800
1	0,016	0,0080	0,01150	7.34exp-11	0,01172	0,00150
2	0,016	0.0145	0.01523	9.72exp-11	0,01525	0,00200
3	0,016	0,0140	0,01500	9,57exp-11	0,01500	0,00198

### Zusammengefasstes Berechnungsergebnis für einen Tropfendurchmesser von 2.3mm:

Bei der Berechnung wurde der Tropfendurchmesser mit 2,3 mm gewählt und mit der Formel (Gl.7.2.2.1.) erhielt man daraus eine Tropfengeschwindigkeit von 7,3 m/s. Dieser Tropfen fiel in einer Gasatmosphäre mit einer SO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,016 mol/m<sup>3</sup>. Bei dieser Fallgeschwindigkeit und einer Fallhöhe von 2 m ergab sich eine tatsächliche Fallzeit von 0,27 Sekunden.

Daraus wurde der Stoffdurchgangskoeffizient mit dem Wert:  $3,751 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$  berechnet und

die Stoffmenge SO<sub>2</sub> beträgt:  $9,57 \cdot 10^{-11} \frac{mol}{s}$ . Die Tropfenkonzentration nach der Iteration

beläuft sich auf  $0,015 \frac{mol}{m^3}$ .

### 7.4.2 Tropfendurchmesser: 3,5 mm

Da bei den Versuchen kein Tropfen mit einem Durchmesser von 2,3 mm erzeugt werden konnte, wird hier ein weiteres Berechnungsbeispiel angeführt und zwar mit einem festgelegten Tropfendurchmesser von 3,5 mm.

Aus (Gl. 7.2.2.1) folgt eine Tropfengeschwindigkeit von 7.43 m/s.

Es können folgende weitere Berechnungen durchgeführt werden:

$$\beta_l = \sqrt{\frac{D_l}{\pi * t_{\text{exp}}}} = \sqrt{\frac{3.4 * 10^{-9}}{\pi * 0,03}} = 1.899 * 10^{-4} \frac{m}{s}$$

$D_l$ ...bei 20°C = 3.4exp-9[m<sup>2</sup>/s]

Kontaktzeit des Tropfensegmentes liegt

zwischen 0.01s und 0.05s (gewählt = 0.03s).

$$Re = \frac{\omega * d_{\text{Tropfen}}}{v_{\text{gas}}} = \frac{7,43 \left[ \frac{m}{s} \right] * (3,5 * 10^{-3}) [m]}{1.8 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 1444$$

$$Sc = \frac{v_{\text{gas}}}{D_g} = \frac{1.8 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]}{1.55 * 10^{-5} \left[ \frac{m^2}{s} \right]} = 1.161$$

$$Sh = 2 + 0.57 * Re^{0.5} * Sc^{0.33} = 2 + 0.57 * 1444^{0.5} * 1.161^{0.33} = 24.76$$

$$\beta_g = \frac{Sh * D_g}{d_{\text{Tropfen}}} = \frac{24.76 * 1.55 * 10^{-5}}{3.5 * 10^{-3}} = 0.110 \frac{m}{s}$$

$$k = \frac{1}{\frac{H}{R * T * \beta_l} + \frac{1}{\beta_g}} = \frac{1}{\frac{120}{8.314 * 293.15 * 1.899 * 10^{-4}} + \frac{1}{0.110}} = 3,707 * 10^{-3} \frac{m}{s}$$

Da bei den Versuchen weiters festgestellt wurde, dass die Gasbulkkonzentration höher ist als ursprünglich angenommen, wurde die Iterationsrechnung ein zweites mal und zwar mit einer Anfangskonzentration von 0.05 [mol / m<sup>3</sup>] durchgeführt

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.05$  [mol / m<sup>3</sup>]

$c_g^* = 0.025$  [mol / m<sup>3</sup>]

$$\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g,\infty} - c_g^* = 0.05 - 0.025 = 0.025 \frac{mol}{m^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{\text{Ende}} = 0.025$  [mol / m<sup>3</sup>]

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} = \frac{0.05 - 0.025}{\ln 2} = 0.0361 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c = 3.751 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3.848 * 10^{-5} \text{m}^2 * 0.0361 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 5.2112 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{SO_2} = 5.2112 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

Bei einer Fallgeschwindigkeit von 7.43 m/s und einer Fallhöhe von 2[m ergibt sich eine Kontaktzeit von 0.27 Sekunden.

D.h. der Stoffaustausch aus dem Gasstrom in den fallenden Einzeltropfen beträgt:

$$\dot{N}_{SO_2} = 1.407 * 10^{-9} \text{mol} \cdot SO_2$$

Kugelvolumen:

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{d_{\text{Tropfen}}^3 * \pi}{6} = \frac{(3.5 * 10^{-3})^3 * \pi}{6} = 2.245 * 10^{-8} \text{m}^3$$

ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{1.407 * 10^{-9} \text{mol}}{2.245 * 10^{-8} \text{m}^3} = 0.0627 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T}$$

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 0.0627 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 3.034 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.05$  [mol / m<sup>3</sup>]

$$\Delta c_{\text{Ende}} = \Delta c_{g,\infty} - c_g^* = 0.05 - 3.034 * 10^{-3} = 0.047 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{\text{Ende}} = 0.047 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} = \frac{0.05 - 0.047}{\ln \frac{0.05}{0.047}} = 0.048 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$N_{\text{SO}_2} = k * A * \Delta c = 3.751 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3.848 * 10^{-5} \text{ m}^2 * 0.048 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 6.93 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{\text{SO}_2} = 6.93 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{\text{SO}_2} = 1.87 * 10^{-9} \text{ molSO}_2$$

Kugelvolumen:

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{d_{\text{Tropfen}}^3 * \pi}{6} = \frac{(3.5 * 10^{-3})^3 * \pi}{6} = 2.245 * 10^{-8} \text{ m}^3$$

Ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{1.87 * 10^{-9} \text{ mol}}{2.245 * 10^{-8} \text{ m}^3} = 0.0833 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T}$$

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 0.0833 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 4.03 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Anfangskonzentration  $\Delta c_{\text{Anfang}} = 0.05 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g,\infty} - c_g^* = 0.05 - 4.04 * 10^{-3} = 0.046 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Konzentration am Kolonnenboden  $\Delta c_{\text{Ende}} = 0.046 \text{ [mol / m}^3\text{]}$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_A - \Delta c_B}{\ln \frac{\Delta c_A}{\Delta c_B}} = \frac{0.05 - 0.046}{\ln \frac{0.05}{0.046}} = 0.048 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$N_{SO_2} = k * A * \Delta c = 3.751 * 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 3.848 * 10^{-5} \text{m}^2 * 0.046 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} = 6.64 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$N_{SO_2} = 6.64 * 10^{-9} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$\dot{N}_{SO_2} = 1.80 * 10^{-9} \text{molSO}_2$$

Ergibt eine Konzentration im Tropfen:

$$c_{Tropfen} = \frac{1.80 * 10^{-9} \text{mol}}{2.245 * 10^{-8} \text{m}^3} = 0.080 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Henry-Gesetz: (Berechnung von  $c_g^*$ )

$$c_g^* = c_{Tropfen} * \frac{H}{R * T}$$

$$c_g^* = c_{Tropfen} * \frac{H}{R * T} = 0.08 * \frac{360}{8.314 * 328.15} = 3.90 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Tabelle 7.4.1.2.: Eckdaten der iterativen Berechnung der Stoffstromdichte für einen Tropfendurchmesser von 3,5 mm und einer Anfangskonzentration von 0.05 mol/m<sup>3</sup> :

If.Nr. der Iterationen	$\Delta C_{\text{Anfang}}$	$\Delta C_{\text{Ende}}$	$\Delta C_{\text{Mitte}}$	N SO <sub>2</sub>	C Tropfen	$c_g^*$
	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol/m <sup>3</sup> ]	[mol/s]	[mol / m <sup>3</sup> ]	[mol / m <sup>3</sup> ]
						0,025
1	0,05	0,025	0,0361	5.21exp-9	0,0627	0,034exp-3
2	0,05	0,047	0,048	1.87exp-9	0,0833	4.03exp-3
3	0,05	0,046	0,048	1.80exp-9	0,080	3.90exp-3

### Zusammengefasstes Berechnungsergebnis für einen Tropfendurchmesser von 3,5mm:

Bei der Berechnung wurde der Tropfendurchmesser mit 3.5 mm gewählt und mit der Formel (Gl.7.2.2.1.) erhielt man daraus eine Tropfengeschwindigkeit von 7,43 m/s. Dieser Tropfen fiel in einer Gasatmosphäre mit einer SO<sub>2</sub>-Konzentration von 0,05 mol/m<sup>3</sup>. Bei dieser Fallgeschwindigkeit und einer Fallhöhe von 2 m ergab sich eine tatsächliche Fallzeit von 0,27 Sekunden.

Daraus wurde der Stoffdurchgangskoeffizient mit dem Wert:  $3,707 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}$  berechnet und

die Stoffmenge SO<sub>2</sub> beträgt:  $1.80 \cdot 10^{-9} \frac{mol}{s}$ . Die Tropfenkonzentration nach der Iteration

beläuft sich auf  $0,08 \frac{mol}{m^3}$ .

Der Stoffdurchgangskoeffizient unterscheidet sich also nur unwesentlich von jenem mit dem Tropfendurchmesser 2.3 mm und der Anfangskonzentration von 0.0016 mol/m<sup>3</sup>. Die Stoffmenge an SO<sub>2</sub> ist jedoch um exp2 höher und die Tropfenkonzentration ist fünf mal so groß als beim kleineren Tropfen mit der niedrigeren Anfangskonzentration.

## 8 Parameter der durchgeführten Versuche

In diesem Kapitel werden einige charakteristische Versuchsergebnisse zusammengefasst, um in weiterer Folge Aussagen über die Wirkung des veränderns gewisser Kenngrößen zu erlangen. Verändert wurden hierbei die Gasbulkkonzentration, die Tropfenanzahl, die Tropfengröße und die Weglänge der frei fallenden Tropfen.

*Tabelle 8.1.: Zusammenfassung der veränderten Einflussgrößen der Versuche*

lf.Nr.	Fallstrecke	Tropfengröße	Tropfenanzahl	$c_{g,\infty,anfang}$	$c_{g,\infty,ende}$	Tropfen- auffang- vorrichtung
	[mm]	[mm]	[1]	[ppm]	[ppm]	
1	400	4,21	400	2040	1890	Kapillar- absaugung
2	400	3,58	500	3040	2780	
3	400	4,21	400	1710	1650	
4	400	4,18	400	1710	1650	
5	400	4,25	400	1650	1550	
6	400	3,34	800	1300	1200	
7	900	3,23	800	900	840	
8	900	3,06	600	1400	1320	
9	900	3,42	400	840	810	
10	1900	3,47	1000	950	650	
11	1900	3,54	500	1340	1140	
12	1900	3,44	500	1130	930	
13	1900	3,42	700	840	700	
14	1900	3,47	500	900	700	
15	1900	3,37	700	1370	1210	
16	2000	3,31	600	740	650	Silikonöl- vorlage
17	2000	3,42	400	1980	1800	
18	2000	3,22	1000	1690	1250	

Die Fallstrecke ergibt sich automatisch wenn die Messstelle gewählt wurde. Bei der obersten Messstelle ergibt sich von der Tropfenkapillarspitze bis zum Auffangtrichter eine freie Weglänge von 400 mm, bei der mittleren Messstelle ein Fallweg von 900 mm und bei der untersten Messstelle muss der Tropfen 1900 mm zurücklegen. Bei jenen Versuchen, bei denen der Erlenmeyerkolben zum Einsatz kam, musste die Tropfensäule unten geöffnet werden und die mit Siliconöl überschichtete Vorlage wurde am Boden der Säule platziert. Dadurch ergab sich eine Fallstrecke von 2000 mm.

Die Siliconölüberschichtung soll einen Stoffaustausch nach dem Fallen der Tropfen verhindern, indem die aufgefangene Probe vom Gasbulk inert getrennt wurde.

Die verschiedenen Tropfengrößen ergaben sich aus den diversen Tropfenabschlagfrequenzen und den verschiedenen Tropfenkapillaren (siehe auch Kapitel 6.1.3.).

Bei der Wahl der Tropfenanzahl soll eruiert werden, ob die Abnahme der Gasbulkkonzentration Einfluss auf den Stoffübergang aus dem Gas in die Flüssigkeit hat.

Gemessen wurden die Gasbulkkonzentrationen  $c_{g,\infty,anfang}$  und  $c_{g,\infty,ende}$  mit einem Gasanalysemessgerät (Kapitel 6.1.8.). Diese Messungen fanden unmittelbar vor dem Aktivieren der Pulsgeberschaltung bzw. gleich nach Beendigung des Einzelversuches statt.

Die Variation der Tropfenauffangvorrichtung soll in weitere Folge zeigen, ob nach dem Fallen der Tropfen, das bedeutet, wenn die Tropfen sich bereits im Auffanggefäß befinden, noch ein Stoffaustausch erfolgt oder ob das treibende Konzentrationsgefälle während des Tropfenfalles auf null sinkt.

## 9 Berechnungen zur Auswertung der durchgeführten Versuche

### 9.1 Allgemeines

Die eruierten Versuchsergebnisse wurden anhand des folgenden Formelapparates ausgewertet:

Die relevanten Daten werden festgehalten:

- die Menge an Iod, welche in das Probegefäß vorgelegt wurde
- die Anfangskonzentration des SO<sub>2</sub> im Gaspulk
- die Endkonzentration im Gaspulk
- die Masse der fallenden und mit dem Gas in Kontakt getreten Tropfen
- die Anzahl der fallenden Einzeltropfen

### Formelapparat für die Auswertung

Mit den hier angeführten Daten kann nun berechnet werden:

- das Volumen des Topfens:

$$V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} \quad (\text{Gl. 9.1.1})$$

wobei sich die Masse des Einzeltropfens aus der Beziehung ergibt:

$$m_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{\text{Tropfenanzahl}} \quad (\text{Gl. 9.1.2})$$

- Über das Volumen kann nun der Tropfendurchmesser bestimmt werden:  $V_{\text{Tropfen}} = \frac{d^3 * \pi}{6}$

umgeformt ergibt:

$$d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 * V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} \quad (\text{Gl. 9.1.3})$$

- Wenn der Durchmesser berechnet wurde, kommt man mit

$$A_{\text{Tropfen}} = d_{\text{Tropfen}}^2 * \pi \quad (\text{Gl. 9.1.4})$$

auf die Kontaktfläche des fallenden Einzeltropfens.

- Mit den stöchiometrischen Beziehungen:



kann durch iodometrische Bestimmung die Konzentration im Tropfen bestimmt werden.

- Ermittlung der Stoffmenge von Iod, welches durch Titration neutralisiert wird

- Ermittlung der vorgelegten Stoffmenge

- Daraus ergibt sich die Stoffmenge  $n_{\text{SO}_3^{2-}}$  im Einzeltropfen:

$$n_{\text{SO}_3^{2-}(\text{Tropfen})} = \frac{n_{\text{SO}_3^{2-}}}{\text{Tropfenanzahl}} \quad (\text{Gl. 9.1.5})$$

- Die Konzentration ergibt sich aus:

$$c_{\text{Tropfen}} = \frac{n_{\text{SO}_3^{2-}(\text{Tropfen})}}{V_{\text{Tropfen}}} \quad (\text{Gl. 9.1.6})$$

- Die mittlere Gaspulkkonzentration ergibt sich aus der Anfangs- und der Endkonzentration, es muss aber darauf geachtet werden, dass die Einheiten von ppm auf mol/m<sup>3</sup> umzuwandeln sind:

$$c_{g,\infty} = \frac{c_{\text{SO}_2\text{Anfang}} + c_{\text{SO}_2\text{Ende}}}{2} \quad (\text{Gl. 9.1.7})$$

- Weiters ergibt sich die hypothetische Gleichgewichtskonzentration  $c_g^*$  aus folgender Beziehung:

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} \quad (\text{Gl. 9.1.8})$$

- Der logarithmische Mittelwert folgt aus:

$$\Delta c_{Ende} = c_{g,\infty} - c_g^* \quad (\text{Gl. 9.1.9})$$

und

$$\Delta c_{Anfang} = c_{g,\infty} \quad (\text{Gl. 9.1.10})$$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{Anfang} - \Delta c_{Ende}}{\ln \frac{\Delta c_{Anfang}}{\Delta c_{Ende}}} \quad (\text{Gl. 9.1.11})$$

Und so kann man letztlich über die Fallzeit und den übergehenden Stoffmengenfluss den Stoffdurchgangskoeffizienten bestimmen:

$$\dot{N}_{SO_2} = \frac{n_{SO_3^2-Tropfen}}{\text{Fallzeit}} \quad (\text{Gl. 9.1.12})$$

$$k = \frac{\dot{N}_{SO_2}}{A * \Delta c} \quad (\text{Gl. 9.1.13})$$

## 9.1.1 Auswertung der Ergebnisse der einzelnen Messstellen

### 9.1.1.1 Gemessene Daten, Einzelversuch 12 (unterste Messstelle = 1900mm)

- Vorgelegte Iodmenge: 2 ml
- liquide Phase: deionisiertes Wasser
- Anfangskonzentration: 1130 ppm
- Endkonzentration: 930 ppm
- Gesamtmasse: 10.645 g
- Tropfenanzahl: 500

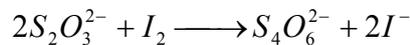
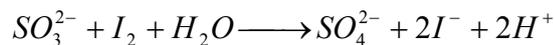
- Tropfenmasse:  $m_{Tropfen} = \frac{m_{gesamt}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{10.604 * 10^{-3} \text{ kg}}{500} = 21.29 * 10^{-5} \text{ kg}$

- das Volumen des Tropfens:  $V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{21.29 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{998.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.13282 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$

- Tropfendurchmesser:  $d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 2.13282 \cdot 10^{-8}}{\pi}} = 0.00344 \text{ m} \cong 3.4 \text{ mm}$ .

- Kontaktfläche:  $A_{\text{Tropfen}} = d_{\text{Tropfen}}^2 \cdot \pi = 0.00344^2 \cdot \pi = 3.7192 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

- Mit den stöchiometrischen Beziehungen:



kann durch iodometrische Bestimmung die Konzentration im Tropfen bestimmt werden.

- Ermittlung der Stoffmenge von Iod:  $n_{\text{Iod}, \text{rück}} = \frac{1.50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \cdot 0.05 \text{ mol} = 7.50 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$

- Ermittlung der vorgelegten Stoffmenge:  $n_{\text{Iod}, \text{Vorlage}} = \frac{2.00 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \cdot 0.05 \text{ mol} = 10.00 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$

Stoffmenge  $n_{\text{SO}_3^{2-}}$  im Einzeltropfen:

$$n_{\text{SO}_3^{2-}} = n_{\text{Iod}, \text{Vorlage}} - n_{\text{Iod}, \text{rück}} = 10.00 \cdot 10^{-5} - 7.50 \cdot 10^{-5} = 2.50 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$$

$$n_{\text{SO}_3^{2-} (\text{Tropfen})} = \frac{n_{\text{SO}_3^{2-}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{2.5 \cdot 10^{-5}}{500} = 50.00 \cdot 10^{-9} \text{ mol}$$

Die Konzentration ergibt sich aus:  $c_{\text{Tropfen}} = \frac{n_{\text{SO}_3^{2-} (\text{Tropfen})}}{V_{\text{Tropfen}}} = \frac{50.00 \cdot 10^{-9} \text{ mol}}{2.13282 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3} = 2.344 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$ .

Die mittlere Gasbulkkonzentration:

$$1130 \text{ ppm} = \frac{1130 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} \cdot 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 2.0892 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$930 \text{ ppm} = \frac{930 * 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} * 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 1.7190 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$c_{g,\infty} = \frac{c_{SO_2,Anfang} + c_{SO_2,Ende}}{2} = \frac{(2.0892 + 1.7190) * 10^{-2}}{2} = 1.9043 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Hypothetische Gleichgewichtskonzentration:

$$c_g^* = c_{Tropfen} * \frac{H}{R * T} = 2.344 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * \frac{1.2 * 10^5 \frac{\text{Pa} * \text{m}^3}{\text{kmol}}}{8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} * \text{K}} * 298.15 \text{K}} = 0.1135 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Logarithmischer Mittelwert: } \Delta c_{Ende} = c_{g,\infty} - c^* = 1.9043 * 10^{-2} - 0.1135 = -0.0945 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} .$$

Da angenommen werden kann, dass das Konzentrationsgefälle bis zum Boden der Tropfensäule ausgeglichen ist, kann festgestellt werden, dass der negative  $\Delta c_{Ende}$ -Wert einen auf die Ungenauigkeit in der Messung zurückzuführender Messfehler darstellt. Für die weitere Berechnung wird nun angenommen, dass  $\Delta c_{Ende}$  den Zahlenwert:  $\Delta c_{Ende} = 0.01 * \Delta c_{Anfang}$  entspricht, um zumindest eine tendenzielle Berechnung eines Stoffdurchgangskoeffizienten zu ermöglichen.

$$\Delta c_{Anfang} = c_{g,\infty} = 1.9043 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{Anfang} - \Delta c_{Ende}}{\ln \frac{\Delta c_{Anfang}}{\Delta c_{Ende}}} = \frac{1.9043 * 10^{-2} - (1.9 * 10^{-4})}{\ln \frac{1.9043 * 10^{-2}}{(1.9 * 10^{-4})}} = 4.09 * 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Stoffdurchgangskoeffizient berechnet über die Stoffmenge:

$$\dot{N}_{SO_2} = \frac{n_{SO_2-Tropfen}}{\text{Fallzeit}} = \frac{50 * 10^{-9}}{0.7} = 7.1429 * 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$k = \frac{\dot{N}_{SO_2}}{A * \Delta c} = \frac{7.1429 * 10^{-8}}{3.7182 * 10^{-5} * 4.09 * 10^{-3}} = 0.4697 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

**9.1.1.2 Gemessene Daten, Einzelversuch 2 (oberste Messstelle=400mm)**

- Vorgelegte Iodmenge: 4 ml
- liquide Phase: deionisiertes Wasser
- Anfangskonzentration: 3040 ppm
- Endkonzentration: 2780 ppm
- Gesamtmasse: 12.039 g
- Tropfenanzahl : 500

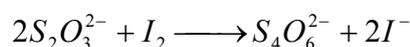
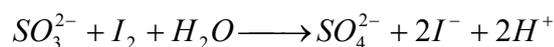
$$\text{- Tropfenmasse : } m_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{12.039 * 10^{-3} \text{ kg}}{500} = 2.4078 * 10^{-5} \text{ kg}$$

$$\text{- das Volumen des Tropfens : } V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{2.4078 * 10^{-5} \text{ kg}}{998.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.41211 * 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{- Tropfendurchmesser : } d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 * V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 * 2.4078 * 10^{-8}}{\pi}} = 0.00358 \text{ m} \cong 3.58 \text{ mm} .$$

$$\text{- Kontaktfläche : } A_{\text{Tropfen}} = d_{\text{Tropfen}}^2 * \pi = 0.00358^2 * \pi = 4.03 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Mit den stöchiometrischen Beziehungen:



kann durch iodometrische Bestimmung die Konzentration im Tropfen bestimmt werden.

$$\text{- Ermittlung der Stoffmenge von Iod: } n_{\text{Iod, rick}} = \frac{3.75 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} * 0.05 \text{ mol} = 18.75 * 10^{-5} \text{ mol}$$

$$\text{- Ermittlung der vorgelegten Stoffmenge: } n_{\text{Iod, Vorlage}} = \frac{4.00 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} * 0.05 \text{ mol} = 20.00 * 10^{-5} \text{ mol}$$

Stoffmenge  $n_{SO_3^{2-}}$  im Einzeltropfen:

$$n_{SO_3^{2-}} = n_{Iod} - n_{ges} = 20.00 * 10^{-5} - 18.75 * 10^{-5} = 1.25 * 10^{-5} \text{ mol}$$

$$n_{SO_3^{2-}(\text{Tropfen})} = \frac{n_{SO_3^{2-}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{1.25 * 10^{-5}}{500} = 25.00 * 10^{-9} \text{ mol}.$$

Die Konzentration ergibt sich aus:  $c_{\text{Tropfen}} = \frac{n_{SO_3^{2-}(\text{Tropfen})}}{V_{\text{Tropfen}}} = \frac{25.00 * 10^{-9} \text{ mol}}{2.4078 * 10^{-8} \text{ m}^3} = 1.036 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}.$

Die mittlere Gasbulkonzentration:

$$3040 \text{ ppm} = \frac{3040 * 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} * 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 5.62 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$2780 \text{ ppm} = \frac{2780 * 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} * 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 5.14 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$c_{g,\infty} = \frac{c_{SO_2 \text{ Anfang}} + c_{SO_2 \text{ Ende}}}{2} = \frac{(5.62 + 5.14) * 10^{-2}}{2} = 5.38 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Hypothetische Gleichgewichtskonzentration:

$$c_g^* = c_{\text{Tropfen}} * \frac{H}{R * T} = 1.036 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * \frac{1.2 * 10^5 \frac{\text{Pa} * \text{m}^3}{\text{kmol}}}{8314 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} * 298.15 \text{ K}} = 5.017 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Logarithmischer Mittelwert:  $\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g,\infty} - c^* = 5.380 * 10^{-2} - 5.017 = 0.363 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3},$

$$\Delta c_{\text{Anfang}} = c_{g,\infty} = 5.017 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} = \frac{(5.38 - 0.363) * 10^{-2}}{\ln \frac{5.38 * 10^{-2}}{0.363 * 10^{-2}}} = 1.861 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Stoffdurchgangskoeffizient :

$$\dot{N}_{SO_2} = \frac{n_{SO_3^{2-} \text{-Tropfen}}}{\text{Fallzeit}} = \frac{25 * 10^{-9}}{0.7} = 3.57 * 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$k = \frac{\dot{N}_{SO_2}}{A * \Delta c} = \frac{3.57 * 10^{-8}}{4.03 * 10^{-5} * 1.861 * 10^{-2}} = 4.7 * 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### 9.1.1.3 Gemessene Daten, Einzelversuch 3 (oberste Messstelle= 400 mm)

- Vorgelegte Iodmenge: 2 ml
- Anfangskonzentration : 1710 ppm
- Endkonzentration : 1650 ppm
- Gesamtmasse : 15.544 g
- Tropfenanzahl : 400

$$\text{- Tropfenmasse : } m_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{15.544 * 10^{-3} \text{ kg}}{400} = 3.8885 * 10^{-5} \text{ kg}$$

$$\text{- Volumen des Tropfens : } V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{3.8885 * 10^{-5} \text{ kg}}{998.21 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 3.8954 * 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{- Tropfendurchmesser : } d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 * V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 * 3.8954 * 10^{-8}}{\pi}} = 0.004205 \text{ m} \cong 4.205 \text{ mm} .$$

$$\text{- Kontaktfläche : } A_{\text{Tropfen}} = d_{\text{Tropfen}}^2 * \pi = 0.004205^2 * \pi = 5.557 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Mit den stöchiometrischen Beziehungen:



kann durch iodometrische Bestimmung die Konzentration im Tropfen bestimmt werden.

$$\text{- Ermittlung der Stoffmenge von Iod: } n_{\text{Iod, r\u00fcck}} = \frac{1.85 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} * 0.05 \text{ mol} = 9.25 * 10^{-5} \text{ mol}$$

- Ermittlung der vorgelegten Stoffmenge:  $n_{Iod, Vorlage} = \frac{2.00 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} * 0.05 \text{ mol} = 10.00 * 10^{-5} \text{ mol}$

Stoffmenge  $n_{SO_3^{2-}}$  im Einzeltropfen:

$$n_{SO_3^{2-}} = n_{Iod} - n_{ges} = 10.00 * 10^{-5} - 9.25 * 10^{-5} = 0.75 * 10^{-5} \text{ mol}$$

$$n_{SO_3^{2-} (Tropfen)} = \frac{n_{SO_3^{2-}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{0.75 * 10^{-5}}{400} = 18.75 * 10^{-9} \text{ mol} .$$

Die Konzentration ergibt sich aus:  $c_{Tropfen} = \frac{n_{SO_3^{2-} (Tropfen)}}{V_{Tropfen}} = \frac{18.75 * 10^{-9} \text{ mol}}{3.8954 * 10^{-8} \text{ m}^3} = 0.4813 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} .$

Die mittlere Gasbulkonzentration:

$$1710 \text{ ppm} = \frac{1710 * 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} * 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 3.309 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$1650 \text{ ppm} = \frac{1650 * 10^{-6} \frac{\text{kgSO}_2}{\text{kgLuft}} * 1.1845 \frac{\text{kgLuft}}{\text{m}^3}}{64,0648 \frac{\text{kgSO}_2}{\text{mol}}} = 3.050 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$c_{g, \infty} = \frac{c_{SO_2, \text{Anfang}} + c_{SO_2, \text{Ende}}}{2} = \frac{(3.309 + 3.050) * 10^{-2}}{2} = 3.180 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Hypothetische Gleichgewichtskonzentration:

$$c_g^* = c_{Tropfen} * \frac{H}{R * T} = 0.4813 \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} * \frac{1.2 * 10^5 \frac{\text{Pa} * \text{m}^3}{\text{kmol}}}{8314 \frac{\text{J}}{\text{mol} * \text{K}} * 298.15 \text{ K}} = 2.33 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Logarithmischer Mittelwert:  $\Delta c_{\text{Ende}} = c_{g, \infty} - c_g^* = 3.180 * 10^{-2} - 2.33 * 10^{-2} = 0.85 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3} ,$

$$\Delta c_{\text{Anfang}} = c_{g, \infty} = 3.180 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{\text{Anfang}} - \Delta c_{\text{Ende}}}{\ln \frac{\Delta c_{\text{Anfang}}}{\Delta c_{\text{Ende}}}} = \frac{(3.180 - 0.850) * 10^{-2}}{\ln \frac{3.180 * 10^{-2}}{0.850 * 10^{-2}}} = 1.766 * 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{m}^3}$$

Stoffdurchgangskoeffizient :

$$\dot{N}_{SO_2} = \frac{n_{SO_3^{2-}\text{-Tropfen}}}{\text{Fallzeit}} = \frac{18.75 \cdot 10^{-9}}{0.7} = 2.678 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$k = \frac{\dot{N}_{SO_2}}{A \cdot \Delta c} = \frac{18.75 \cdot 10^{-8}}{5.557 \cdot 10^{-5} \cdot 1.766 \cdot 10^{-2}} = 2.73 \cdot 10^{-2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

#### 9.1.1.4 Gemessene Daten, Einzelversuch 11 (unterste Messstelle = 1900mm)

- Vorgelegte Iodmenge: 4 ml
- Anfangskonzentration :1340 ppm
- Endkonzentration :1140 ppm
- Gesamtmasse : 11.594 g
- Tropfenanzahl : 500

$$\text{- Tropfenmasse : } m_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{gesamt}}}{\text{Tropfenanzahl}} = \frac{11.594 \cdot 10^{-3} \text{ kg}}{500} = 2.3188 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

$$\text{- Volumen des Tropfens : } V_{\text{Tropfen}} = \frac{m_{\text{Tropfen}}}{\rho_{\text{Wasser}}} = \frac{2.3188 \cdot 10^{-5} \text{ kg}}{998.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.3232 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$\text{- Tropfendurchmesser : } d_{\text{Tropfen}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{\text{Tropfen}}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 2.3232 \cdot 10^{-8}}{\pi}} = 0.00354 \text{ m} \cong 3.54 \text{ mm} .$$

$$\text{- Kontaktfläche : } A_{\text{Tropfen}} = d_{\text{Tropfen}}^2 \cdot \pi = 0.003454^2 \cdot \pi = 3.937 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

- Mit den stöchiometrischen Beziehungen:



kann durch iodometrische Bestimmung die Konzentration im Tropfen bestimmt werden.

- Ermittlung der Stoffmenge von Iod:  $n_{Iod,rück} = \frac{3.35ml}{1000ml} * 0.05mol = 16.75 * 10^{-5} mol$

- Ermittlung der vorgelegten Stoffmenge:  $n_{Iod,Vorlage} = \frac{4.00ml}{1000ml} * 0.05mol = 20.00 * 10^{-5} mol$

Stoffmenge  $n_{SO_3^{2-}}$  im Einzeltropfen:

$$n_{SO_3^{2-}} = n_{Iod,Vorlage} - n_{Iod,rück} = 20.00 * 10^{-5} - 16.75 * 10^{-5} = 3.25 * 10^{-5} mol$$

$$n_{SO_3^{2-}(Tropfen)} = \frac{n_{SO_3^{2-}}}{Tropfenanzahl} = \frac{3.25 * 10^{-5}}{500} = 65 * 10^{-9} mol .$$

Die Konzentration ergibt sich aus:  $c_{Tropfen} = \frac{n_{SO_3^{2-}(Tropfen)}}{V_{Tropfen}} = \frac{65.00 * 10^{-9} mol}{2.3232 * 10^{-8} m^3} = 2.7979 \frac{mol}{m^3} .$

Die mittlere Gasbulkonzentration:

$$1340 ppm = \frac{1340 * 10^{-6} \frac{kgSO_2}{kgLuft} * 1.1845 \frac{kgLuft}{m^3}}{64,0648 \frac{kgSO_2}{mol}} = 2.4775 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$$

$$1140 ppm = \frac{1140 * 10^{-6} \frac{kgSO_2}{kgLuft} * 1.1845 \frac{kgLuft}{m^3}}{64,0648 \frac{kgSO_2}{mol}} = 2.1077 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$$

$$c_{g,\infty} = \frac{c_{SO_2,Anfang} + c_{SO_2,Ende}}{2} = \frac{(2.4775 + 2.1077) * 10^{-2}}{2} = 2.29265 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$$

Hypothetische Gleichgewichtskonzentration:

$$c_g^* = c_{Tropfen} * \frac{H}{R * T} = 2.7979 \frac{mol}{m^3} * \frac{1.2 * 10^5 \frac{Pa * m^3}{kmol}}{8314 \frac{J}{kmol * K} * 298.15K} = 0.13544 \frac{mol}{m^3}$$

Logarithmischer Mittelwert:  $\Delta c_{Ende} = c_{g,\infty} - c^* = 2.29265 * 10^{-2} - 0.13544 = -0.1125 \frac{mol}{m^3} ,$

Da angenommen werden kann, dass das Konzentrationsgefälle bis zum Boden der Tropfensäule ausgeglichen ist, kann festgestellt werden, dass der negative  $\Delta c_{Ende}$  -Wert einen auf die Ungenauigkeit in der Messung zurückzuführender Messfehler darstellt. Für die

weitere Berechnung wird nun angenommen, dass  $\Delta c_{Ende}$  den Zahlenwert:  $\Delta c_{Ende} = 0.01 * \Delta c_{Anfang} \left[ \frac{mol}{m^3} \right]$  entspricht, um zumindest eine tendenzielle Berechnung eines Stoffdurchgangskoeffizienten zu ermöglichen.

$$\Delta c_{Anfang} = c_{g,\infty} = 2.29265 * 10^{-2} \frac{mol}{m^3}$$

$$\Delta c = \frac{\Delta c_{Anfang} - \Delta c_{Ende}}{\ln \frac{\Delta c_{Anfang}}{\Delta c_{Ende}}} = \frac{2.29265 * 10^{-2} - (2.29 * 10^{-4})}{\ln \frac{2.29265 * 10^{-2}}{(2.29 * 10^{-4})}} = 4.927 * 10^{-3} \frac{mol}{m^3}$$

Stoffdurchgangskoeffizient berechnet über die Stoffmenge:

$$\dot{N}_{SO_2} = \frac{n_{SO_3^- Trofen}}{Fallzeit} = \frac{65 * 10^{-9}}{0.7} = 9.286 * 10^{-8} \frac{mol}{s}$$

$$k = \frac{\dot{N}_{SO_2}}{A * \Delta c} = \frac{9.286 * 10^{-8}}{3.7182 * 10^{-5} * 4.927 * 10^{-3}} = 0.507 \frac{m}{s}$$

## 10 Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Tabelle 10.1.: Einflussgrößen und deren Auswirkung auf die Konzentrationen

lf.Nr.	Fall strecke	Tropfen größe	Tropfen anzahl	$c_{Gas,m}$	$c_{Tropfen}$	$c_g^*$	$\Delta c_{\text{anfang}}$ = $c_{g,\infty}$	$\Delta c_{\text{ende}}$	$\Delta c_{\text{ende,th}}$	$\Delta c$	$\dot{N}_{SO_2}$	k
	mm	mm	-	ppm	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{m^3}$	$\frac{mol}{s}$	$\frac{m}{s}$
						Exp-2	Exp-2	Exp-2	Exp-4	Exp -3	Exp-8	
<b>1</b>	<b>400</b>	<b>4,21</b>	<b>400</b>	<b>1965</b>	<b>0,802</b>	<b>3,800</b>	<b>3,63</b>	<b>-0,20</b>	<b>3,63</b>	<b>7,804</b>	<b>4,46</b>	<b>0,1030</b>
<b>2</b>	<b>400</b>	<b>3,58</b>	<b>500</b>	<b>2910</b>	<b>1,036</b>	<b>5,017</b>	<b>5,38</b>	<b>0,363</b>		<b>18,61</b>	<b>3,57</b>	<b>0,0470</b>
<b>3</b>	<b>400</b>	<b>4,21</b>	<b>400</b>	<b>1680</b>	<b>0,483</b>	<b>2,330</b>	<b>3,18</b>	<b>0,85</b>		<b>17,66</b>	<b>2,68</b>	<b>0,0273</b>
<b>4</b>	<b>400</b>	<b>4,18</b>	<b>400</b>	<b>1680</b>	<b>0,656</b>	<b>3,176</b>	<b>3,16</b>	<b>-0,7</b>	<b>3,162</b>	<b>6,677</b>	<b>3,57</b>	<b>0,0970</b>
<b>5</b>	<b>400</b>	<b>4,25</b>	<b>400</b>	<b>1600</b>	<b>0,465</b>	<b>2,253</b>	<b>2,96</b>	<b>0,706</b>		<b>15,72</b>	<b>2,68</b>	<b>0,0299</b>
6	400	3,34	800	1250	2,240	10,80	2,31	-8,50	2,31	4,963	6,25	0,3600
<b>7</b>	<b>900</b>	<b>3,23</b>	<b>800</b>	<b>870</b>	<b>1,231</b>	<b>5,960</b>	<b>1,61</b>	<b>-4,351</b>	<b>1,61</b>	<b>3,450</b>	<b>3,13</b>	<b>0,2750</b>
<b>8</b>	<b>900</b>	<b>3,06</b>	<b>600</b>	<b>1360</b>	<b>1,383</b>	<b>6,694</b>	<b>2,52</b>	<b>-4,179</b>	<b>2,52</b>	<b>5,404</b>	<b>2,98</b>	<b>0,1870</b>
9	900	3,42	400	825	1,490	7,213	1,53	-5,688	1,53	3,277	4,46	0,3700
10	1900	3,47	1000	800	1,815	8,780	1,48	-7,305	1,48	3,170	5,71	0,4740
11	1900	3,54	500	1240	2,798	13,544	2,29	-10,62	2,29	4,929	9,29	0,5321
12	1900	3,44	500	1030	2,344	11,34	1,91	-9,43	1,91	4,106	7,14	0,4677
13	1900	3,42	700	770	4,094	19,81	1,42	-18,40	1,42	3,06	12,24	1,080
14	1900	3,47	500	800	1,830	8,900	1,48	-7,40	1,48	3,176	5,714	0,476
15	1900	3,37	700	1290	3,741	18,10	2,39	-15,70	2,39	5,125	10,70	0,565
16	2000	3,31	600	695	3,947	19,11	1,29	-17,82	1,29	2,76	10,70	1,12
<b>17</b>	<b>2000</b>	<b>3,42</b>	<b>400</b>	<b>1890</b>	<b>1,191</b>	<b>5,76</b>	<b>3,49</b>	<b>-2,2</b>	<b>3,49</b>	<b>12,38</b>	<b>3,57</b>	<b>0,0783</b>
18	2000	3,22	1000	1470	2,873	13,90	2,72	-11,2	2,72	5,843	7,14	0,376

## 10.1 Interpretation der Ergebnisse und Ausblick auf weitere Versuchsreihen

In der *Tabelle 10.1* wurden einige wichtige Versuchsdaten zusammengefasst. Diese Ergebnisse der Einzelversuche lassen nachstehende Beobachtungen zu:

- Die Gasbulkkonzentration abzüglich der hypothetischen Gaskonzentration die, mit der Flüssigkonzentration im Gleichgewicht steht, ergibt das treibende Gefälle am Ende der Fallstrecke der Tropfen. Dieses treibende Gefälle kehrt sich vorzeichenmäßig während des Versuches scheinbar um.
- Weitere Versuche sollen nun aufklären, ob das auf Grund unbeeinflussbarer Parameter, wie zum Beispiel dem Absinken der Gasbulkkonzentration während des Versuches, bedingt durch die nicht vollständig gasdichte Ausführung der Versuchsanlage, verursacht wird, oder ob dafür die Auswirkung von Messungenauigkeiten verantwortlich ist.
- Die Kontaktzeit der Tropfen mit dem Gas geht weit über die Fallzeit hinaus, da die Bildung der Tropfen an der Kapillare des Tropfengenerators beinahe gleich lange dauert, wie die eigentliche Fallzeit.
- Die Ergebnisse der obersten Messstelle sind im Vergleich zu den tiefer liegenden Messstellen plausibler. Je länger die Fallstrecke, desto höher wird die Konzentration im Tropfen.
- Würde man den Tropfen in einer inerten Atmosphäre bilden können, dann würde der Stoffaustausch erst während der Flugphase beginnen. Unter der Voraussetzung, dass die Überschichtung mit Silikonöl ebenfalls eine inerte Atmosphäre, diesmal aber am Ende der Fallstrecke schafft, könnte nun, in Kombination mit der inerten Bildung der Tropfen tatsächlich der Stoffaustausch nur während des Falles betrachtet werden.
- Man kann jedoch zum jetzigen Zeitpunkt nicht sagen, ob eine Überschichtung der Probe mit Silikonöl zielführend ist, da der gesamte Stoffaustausch beim Auffangen an der untersten Messstelle bereits stattgefunden hat.
- Eine mögliche Messungenauigkeit könnte sich auch in der Iodometrie ergeben haben, da beim Titrieren mit der Bürette nur in 0,05 ml-Schritten vorgegangen werden kann und damit der Tropfenfehler für die geringe Menge an insgesamt verbrauchtem Iod während des Versuches doch relativ hoch erscheint.
- Es könnten Versuche gefahren werden, bei denen die Tropfenanzahl viel höher gewählt wird und dadurch die Masse der Gesamtprobe größer wird. Dadurch ergibt sich jedoch das Problem, dass diese Variante der

Versuchsdurchführung länger dauert. Während der längeren Versuchszeit, sinkt auch die Gasbulkkonzentration weiter ab (Dichtheitsproblem, siehe oben), und es sollte untersucht werden, welchen Einfluss dies auf den gesamten Stoffaustausch hat.

## 11 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit besteht im Prinzip aus zwei Teilabschnitten. Zum Ersten wurde eine Versuchsanlage zur Durchführung von Stoffaustauschmessungen an fallenden Einzeltropfen konstruiert und am Institut für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes in Betrieb genommen. Mit dieser Anlage wurde gezeigt, dass der Stoffaustausch am fallenden Einzeltropfen messtechnisch erfassbar ist und darüber hinaus wurden die aufgenommenen Messwerte rechnerisch ausgewertet. Dabei wurden für bestimmte Tropfengrößen und bestimmte Gasbulkkonzentrationen die Tropfenkonzentration und weiters auch der Stoffdurchgangskoeffizient ermittelt.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde die Tropfengröße und die Konzentration des Gases im Bulk den Versuchswerten angepasst, und mit Hilfe der Stoffübergangstheorien und den daraus entstanden Formelapparat wiederum die Konzentration im Tropfen und der Stoffdurchgangskoeffizient berechnet.

In der nachstehenden Tabelle 11.1 wird der Vergleich des berechneten Stoffaustausches mit den Messdaten und deren Auswertung aufgezeigt.

*Tabelle 11.1 Vergleich der berechneten und der gemessen und ausgewerteten Zahlenwerte :*

		Brechnet:	Gemessen:
Tropfendurchmesser	[mm]	<b>3,5</b>	<b>3,58</b>
$\Delta C_{\text{Anfang}}$	[mol / m <sup>3</sup> ]	<b>0.050</b>	<b>0.054</b>
$\Delta C_{\text{Ende}}$	[mol / m <sup>3</sup> ]	<b>0.0460</b>	<b>0.0034</b>
$\Delta C_{\text{Mitte}}$	[mol / m <sup>3</sup> ]	<b>0.048</b>	<b>0.018</b>
$N_{\text{SO}_2}$	[mol/s]	<b>1.8exp-9</b>	<b>35,7exp-9</b>
$C_{\text{Tropfen}}$	[mol / m <sup>3</sup> ]	<b>0,08</b>	<b>1,04</b>
$C_g^*$	[mol / m <sup>3</sup> ]	<b>3.9exp-3</b>	<b>50,2exp-2</b>
k	[m/s]	<b>0,0037</b>	<b>0.040</b>

**Literaturverzeichnis:**

- [1] Weiss, Militzer, Gramlich, Thermische Verfahrenstechnik. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1993)
- [2] Vauck, Müller, Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. 9. überarbeitete Auflage. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie (1992)
- [3] Prausnitz, Gmehling, Thermodynamik der Phasengleichgewichte. VT3-Hochschulkurs, Fachzeitschrift vt „Verfahrenstechnik“ 13 (1979)
- [4] Bierwerth, Lehrbrief, Thermische Verfahrenstechnik II. Studiengemeinschaft Darmstadt, VEF3
- [5] Bockhard, Güntzschel, Poetschukat, Grundlagen der Verfahrenstechnik für Ingenieure. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart (1981)
- [6] Grassman, Widmer, Einführung in die thermische Verfahrenstechnik 2. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin (1974)
- [7] Kögl, Moser, Grundlagen der Verfahrenstechnik. Wien, Springer Verlag (1981)
- [8] Pflügl, Renz, Vorlesungsskriptum – Stoffaustausch. 5. korrigierte Auflage, Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik und Anlagentechnik, TU Graz (2001)
- [9] Baer, Stephan, Wärme und Stoffübertragung. 2. Auflage. Springer Verlag Berlin, Heidelberg (1994)
- [10] Jakubith, Chemische Verfahrenstechnik- Einführung in die Reaktionstechnik und Grundoperationen. Weinheim, VHS Verlagsgesellschaft (1991)
- [11] Draxler, Vorlesungsskriptum – Thermische Verfahrenstechnik, Institut für Verfahrenstechnik, Montanuniversität Leoben (2003)
- [12] Fries, Getost, Organische Reagenzien für die Spurenanalyse. Darmstadt, Merk (1975)
- [13] Schwister, Taschenbuch der Chemie. Fachbuchverlag Leipzig, Köln (1995)
- [14] Braun, Dörnhardt, Vergiftungsregister. Stuttgart, Fischer (1975)
- [15] Ludewig, Lohs, Akute Vergiftungen. Stuttgart, Fischer (1981)
- [16] Otto, Analytische Chemie, 2. überarbeitete Auflage. WILEY-VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Deutschland (2000)
- [17] Winnacher, Küdler, Chemische Technologie 3. Auflage. München, Hanser Verlag (1970)

- 
- [18] Analytiker Taschenbuch. Berlin, Springer-Verlag (1980)
- [19] Duden, Grundwissen der Chemie. Brockhaus AG, Mannheim (1995)
- [20] Atkins, Physikalische Chemie. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, Deutschland (1990)
- [21] Kepplinger, Vorlesungsskriptum – Verfahrenstechnik I, Institut für Verfahrenstechnik, Montanuniversität Leoben (1998)
- [22] Kalide, Einführung in die Technische Strömungslehre. Carl Hanser Verlag, München, Wien (1990)
- [23] Noll, Numerische Strömungsmechanik. Springer – Verlag, Berlin, Heidelberg (1993)
- [24] Kuchling, Taschenbuch der Physik. Fachbuchverlag, Leipzig, Köln (1991)
- [25] Brauer, Stoffaustausch einschließlich chemischer Reaktionen. Verlag Sauerländer, Aarau, Frankfurt (1971)

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
$\rho_{Luft}$	Dichte der Luft	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{Wasser}$	Dichte des Wassers	kg/m <sup>3</sup>
$\nu_{gas}$	dynamische Viskosität, Gas	m <sup>2</sup> /s
$x^*$	Ersatzbeladung die mit y im Gleichgewicht steht	kg/kg
$y_a^*$	Ersatzbeladung, Anfang	kg/kg
$y^*$	Ersatzbeladung, die mit x im Gleichgewicht steht	kg/kg
$y_e^*$	Ersatzbeladung, Ende	kg/kg
$D_{i,l}$	Flüssigdiffusionskoeffizient der Komponente i	m/s <sup>2</sup>
$c_{i,l,\infty}^*$	Flüssigkeitsbulkonzentration der Komponente i	mol/m <sup>3</sup>
$c_{g,\infty}$	Gasbulkonzentration	mol/m <sup>3</sup>
$c_{g,Ende}$	Gasbulkonzentration, Versuchsende	ppm
$D_{i,g}$	Gasdiffusionskoeffizient der Komponente i	m/s <sup>2</sup>
$c_i^*$	Gleichgewichtskonzentration der Komponente i	mol/m <sup>3</sup>
$c_{i,l}^*$	Gleichgewichtskonzentration der Komponente i, flüssig	mol/m <sup>3</sup>
$c_{i,g}^*$	Gleichgewichtskonzentration der Komponente i, gas	mol/m <sup>3</sup>
$y_{gr,a}$	Grenzflächenbeladung, Anfang	kg/kg
$y_{gr,e}$	Grenzflächenbeladung, Ende	kg/kg
$\delta_1$	Grenzschichtdicke	m
$\delta_2$	Grenzschichtdicke	m

$c_g^*$	Hypothetische Gleichgewichtskonzentration	mol/m <sup>3</sup>
$c_{i,l}^*$	Konzentration an der Phasengrenze	mol/m <sup>3</sup>
$\Delta c_{Ende}$	Konzentrationsdifferenz, Kolonnenboden	mol/m <sup>3</sup>
$\Delta y_m$	mittlere Prozessraumtriebkraft	kg/kg
$\Delta x_m$	mittlere Prozessraumtriebkraft	kg/kg
$\nu_{gas}$	Oberflächenspannung	N/m
$\Delta x$	örtliche Triebkraft	kg/kg
$y_a$	Phasenbeladung, Anfang	kg/kg
$y_e$	Phasenbeladung, Ende	kg/kg
$k$	Stoffdurchgangskoeffizient	m/s
$k_g$	Stoffdurchgangskoeffizient, gas	m/s
$k_l$	Stoffdurchgangskoeffizient, flüssig	m/s
$n_{SO_3^{2-}}$	Stoffmenge an $SO_3^{2-}$ in der Probe	mol
$n_i^*$	Stoffstromdichte	mol*s/m <sup>2</sup>
$n_{i,l}^*$	Stoffstromdichte, flüssig	mol*s/m <sup>2</sup>
$n_{i,g}^*$	Stoffstromdichte, gas	mol*s/m <sup>2</sup>
$g_D$	Stoffübergangsgeschwindigkeit	s
$\beta$	Stoffübergangskoeffizient	m/s
$\beta_l$	Stoffübergangskoeffizient, flüssig	m/s
$\beta_g$	Stoffübergangskoeffizient, gas	m/s
$\beta_g$	Stoffübergangskoeffizient, gas	m/s

$\beta_l$	Stoffübergangskoeffizient, liquid	m/s
$\dot{N}_{SO_2}$	Transportstrom	mol/s
$n_{Tropfen}$	Tropfenanzahl	-
$\omega$	Tropfengeschwindigkeit	m/s
$c_{Tropfen}$	Tropfenkonzentration	mol/m <sup>3</sup>
$m_{Tropfen}$	Tropfenmasse	kg
$c_w$	Widerstandsbeiwert	-
$c_{g,Anfang}$	Gasbulkonzentration, Versuchsanfang	ppm
$\Delta c_{Anfang}$	Konzentrationsdifferenz, Kolonnenkopf	mol/m <sup>3</sup>
$n_{SO_3^{2-},Tropfen}$	Stoffmenge an $SO_3^{2-}$ im Tropfen	mol
$n_{Ion,Rück}$	Stoffmenge des rüctitrierten Iod	mol
$n_{Ion,Vorlage}$	Stoffmenge des vorgelegten Iod	mol
A	Tropfenfläche	m <sup>2</sup>
	an der Phasengrenze	s
b	Erhöhungsfaktor	-
d	Tropfendurchmesser	mm
D <sub>g</sub>	Diffusionskoeffizient SO <sub>2</sub> in Luft	m <sup>2</sup> /s
D <sub>l</sub>	Diffusionskoeffizient SO <sub>2</sub> in H <sub>2</sub> O	m <sup>2</sup> /s
d <sub>Tropfen</sub>	Tropfendurchmesser	m
F <sub>A</sub>	Auftriebskraft	N
F <sub>G</sub>	Gewichtskraft	N
F <sub>w</sub>	Widerstandskraft	N

g	Erdbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
H	Henrykoeffizient	kg*m <sup>2</sup> /mol*s <sup>2</sup>
H'	Henry Beladungskoeffizient	-
h1	Bezugshöhe zur Pipettenspitze	mm
h2	Bezugshöhe zum Versorgungswasserpegel	mm
h3	Höhendifferenz absolut	mm
I	Strom der Pulsgeberschaltung	A
K	Stoffdurchgangskoeffizient	m/s
m <sub>a,r</sub>	Im Trägergas enthaltene Absorbtivmasse	kg
m <sub>a,s</sub>	im Absorptionsmittel gelöste Absorbtivmasse	kg
m <sub>r</sub>	Trägermasse Rafinat	kg
m <sub>s</sub>	Trägermasse Sorbens	kg
m	Steigung der Gleichgewichtskurve	-
m1	Masse des leeren Becherglases	g
m2	Masse Becherglas + Wasser	g
m3	Masse des einzelnen Tropfens	mg
Δy	örtliche Triebkraft	kg/kg
R	Gaskonstante	kg*m <sup>2</sup> /mol*K*s <sup>2</sup>
Re	Reynolds-Zahl	-
s	Oberflächenerneuerungsfaktor	-
Sh	Sherwood-Zahl	-
t <sub>exp</sub>	Expositionszeit	s
T	Temperatur des Gases	K
t	Zeit	s
TG-Stellung	Tropfenabschlagfrequenzprogramm	-

---

U	angelegte Spannung an die Pulsgeberschaltung	V
$\tau$	Verweilzeit eines Flüssigkeitsteilchens	s
$V_{\text{Tropfen}}$	Volumen des einzelnen Tropfens	$\text{m}^3$
We	Weber-Zahl	-
$x_{g,r}$	Gleichgewichtsbeladung an der Phasengrenze	kg/kg
x	Sorbensbeladung	kg/kg Sorbens
$y_{g,r}$	Gleichgewichtsbeladung an der Phasengrenze	kg/kg
y	Trägergasbeladung	kg/kg Trägergas
$\Delta c$	Konzentrationsdifferenz	$\text{mol}/\text{m}^3$