Versuchsprotokoll

Martin Opitz, Frank Pilhofer

Mittwoch, 01. Dezember 1993

Physikalisches Anfängerpraktikum Teil II

Faradaykonstante

Versuch 6 / Platz b

Inhaltsverzeichnis

Einleitung 2

Grundlagen 2

- Elektrolyse 2
- Volumenumrechnung und Druckkorrektur 4
- Versuchsspezifische Ergänzungen 4

Durchführung der Messungen 5

- Versuchsaufbau 5
- Meßwerte 5
  - Fehlerbetrachtung 6

Aufgaben 7

- Auswertung 7
- Verwertung 7
- Wasserverbrauch 8
- Füllstandshöhe 8

Verwendete Größen und Konstanten 9

Einleitung

Dieser Versuch dient der Bestimmung der Faradaykonstante mit dem Hofmann'schen Wasserzersetzungsapparat, in dem eine Elektrolyse von leicht schwefelsaurem Wasser durchgeführt wird. Zwar kann die Konstante auch über einen einfachen Zusammenhang aus zwei Naturkonstanten bestimmt werden, doch ist die Verifikation in einem Alltagsversuch (zumindest Chemikeralltag) immer anschaulicher. So wird von uns der meßtechnisch erreichte Wert mit diesem Zusammenhang zur Überprüfung einer ebenso wichtigen Konstanten, der Avogadrozahl, verwendet.

Grundlagen

Elektrolyse

Salze lösen sich sehr gut in Wasser auf. Ihre Kristalle bestehen aus Ionengittern, also aus Atomen verschiedener Polarität. Aufgrund seines Dipolcharakters vermögen Wassermoleküle, die Bindungskräfte im Gitter zu neutralisieren und die Ionen aus dem Kristallverband herauszulösen. Je nach Polarität werden die Ionen dabei von den positiv polarisierten Wasserstoffatomen oder dem negativ polarisierten Sauerstoffatom der Wassermoleküle umgeben (Elektrolytmoleküle). Natürlich kann die Ladung des Ions nicht komplett neutralisiert werden. Der entstandene Molekülverbund ist weiterhin für seine Umgebung elektrisch polarisiert.

Werden Säuren oder Basen in Wasser gelöst, so ist der Vorgang nur teilweise vergleichbar. Während bei der Lösung von Salzen die Bindung zwischen Ionen und Wasser nur aufgrund elektrodynamischer Kräfte besteht, wird hier das Wasser chemisch verändert, genauer gesagt, selber ionisiert. Wird Wasser eine Säure hinzugefügt, entstehen echt positiv geladene Hydroniumionen (H_3O^+), bei Zugabe von Basen Hydroxidionen (OH^-).

Wichtig soll in diesem Zusammenhang nur sein, daß sich in allen Fällen elektrisch geladene Teilchen im Wasser befinden. Das ist an sich nichts überraschendes, da auch in destilliertem Wasser stets oben genannte Ionen spontan entstehen ($2H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$). Der Doppelpfeil deutet an, daß die Reaktion jedoch im gleichen Umfang in anderer Richtung abläuft, so daß normalerweise die Konzentration beider Ionen in der Größenordnung 10^{-7} liegt. Bei den hier vorliegenden Prozessen werden die Konzentrationen jedoch um mehrere Größenordnungen angehoben.

Werden nun zwei Pole in die Lösung gebracht und an diese eine Spannung angelegt, so werden Anziehungskräfte auf die Ionen ausgeübt (mit den dipolaren Wasserteilchen funktioniert das natürlich nicht; diese sind nach außen neutral). Die negativen Anionen wandern zur positiven Anode und umgekehrt. Dort angekommen, geben die Ionen ihre elektrische Ladung ab und werden damit elektrisch neutral. Die Elektrolytmoleküle zerfallen dadurch, das ehemals

geladene Ion scheidet sich elementar an der Elektrode ab. Dabei stehen die abgeschiedene Stoffmenge und die "verbrauchte" Elektrizitätsmenge natürlich in Zusammenhang.

Bezeichnen wir mit *w* die Wertigkeit eines Ions[1], so werden zur Neutralisierung ebenfalls *w* Elementarladungen benötigt (d.h. es müssen entweder w Elektronen geliefert oder abtransportiert werden): $Q_1 = we$. Zur Umsetzung von n Ionen wird daher eine Ladungsmenge von $Q_n = nwe$ benötigt. Chemiker interessiert es in diesem Zusammenhang, wieviel Ladung nötig ist, um ein Mol des Stoffes abzuscheiden. Ein Mol hat $N_A = 6,022094 \cdot 10^{23}$ (bezeichnet als ***Avogadro-Konstante***) Teilchen. Die Zahl ist als Umrechnungsfaktor zwischen der atomaren Masseneinheit $1u = 1,660552 \cdot 10^{-27}\,kg$ (ungefähr die Protonenmasse) und einem Gramm gewählt. So gilt natürlich auch $Q_{Mol} = weN_A$.

Ist bekannt, wieviel Ladung geflossen ist (d.h. die linke Seite), kann aus dem Quotienten die molare Anzahl an Teilchen bestimmt werden, die abgeschieden wurde: $\frac{Q}{weN_A} = N$. Zu dieser Zahl ist die Masse des Stoffes proportional. Es gilt $N = \frac{M}{M_{Molar}}$, wobei M_{Molar} die Masse eines Mol des Stoffes ist. Damit wird aus der ersten Formel $\frac{Q}{weN_A} = \frac{M}{M_{Molar}}$. Bringt man nun die Meßgrößen, also die Elektrizitätsmenge und die Stoffmenge (bzw. Masse) auf die eine Seite und die (stoffspezifischen) Konstante auf die andere, ergibt sich $\frac{Q}{M} = \frac{weN_A}{M_{Molar}}$. Die beiden Naturkonstanten der Elementarladung und der Avogadro-Konstante werden oft zur ***Faraday-Konstante*** zusammengefaßt. Man erhält das "***Faradaysche Äquivalenzgesetz***":

$$\frac{Q}{M} = \frac{wF}{M_{Molar}} \qquad (1)$$

Diese Formel ist auch bei gasförmigen Abscheidungen verwendbar, doch ist es viel bequemer, hier nicht die Masse des Gases zu bestimmen sondern gleich mit den Gasvolumina zu arbeiten. Hier ist jedoch noch ein weiterer Faktor zu berücksichtigen. An den Elektroden entstehen nur einzelne Radikale, die erst mit weiteren Atomen ein komplettes Gasmolekül bilden, welches hinterher aus *z* Atomen[2] besteht. Ein Gasmolekül nimmt unter Normbedingungen unabhängig von seiner Zusammensetzung immer das gleiche Volumen ein. Ähnlich wie oben kann also geschrieben werden: $N_M = \frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}}$. Hier ist $N_M = \frac{1}{z}N$ die Anzahl der Moleküle. Mit dieser Erweiterung für Gase wird (1) zu

$$\frac{Q}{V^{(0)}} = \frac{zwF}{V^{(0)}_{Molar}} \qquad (2)$$

Die 0 als oberer Index deutet an, daß die Formel nur unter Normbedingungen gilt.

---

1 Beispiele: Wasserstoff mit w=1, Sauerstoff mit w=2, Stickstoff mit w=3, Kohlenstoff mit w=4 etc.

2 Beispiele sind zum Beispiel Helium, für das als Edelgas *z*=1 gilt; Wasserstoff und Sauerstoff mit *z*=2 und Stickstoff mit *z*=3.

Volumenumrechnung und Druckkorrektur

Um Formel (2) auf Umgebungsbedingungen umzurechnen, muß einiges gerechnet werden. Benutzt wird hierfür in erster Linie die Gasgleichung $PV = nRT$. Bekannt ist hierbei die Stoffmenge $n = \frac{PV}{RT} = \frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}}$. Das Volumen unter Umgebungsbedingungen wird nun auf Normbedingungen zurückgerechnet. Verwendet wird wieder die Gasgleichung. Wird diese umgeschrieben, hat man $V = \frac{nRT}{P}$. Das Volumen eines Gases ist also proportional zu seiner Temperatur und antiproportional zu seinem Druck. Damit ist $\frac{V}{V^{(0)}} = \frac{p^{(0)}}{p} \cdot \frac{T}{T^{(0)}}$. Durch Umschreiben und Erweitern mit $\frac{1}{V^{(0)}_{Molar}}$ ergibt sich der Ausdruck $\frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}} = \frac{V}{V^{(0)}_{Molar}} \cdot \frac{p}{p^{(0)}} \cdot \frac{T^{(0)}}{T}$, der oben eingesetzt werden kann:

$$\frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}} = \frac{V}{V^{(0)}_{Molar}} \cdot \frac{p}{p^{(0)}} \cdot \frac{T^{(0)}}{T} = \frac{pV}{RT} \tag{3}$$

Nach dieser Volumenkorrektur muß noch eine Druckkorrektur in der Gleichung erfolgen, da der zu verwendende Druck p nicht einfach zu bestimmen ist. In dem verwendeten Hofmann'schen Wasserzersetzungsapparat befindet sich das Gas in einem abgedichteten Schenkel. Auf das Gas drücken eine Flüssigkeitssäule und der Außenluftdruck. Dem entgegen wirkt der Sättigungsdampfdruck über der Flüssigkeit. Zusammen ergibt sich die Abhängigkeit $p = p_S + p_L - p_D$. Der Druck p_S der Flüssigkeitssäule kann bereits hier angegeben werden: $p_S = \rho g h$, die anderen Größen sind Versuchsspezifisch und hängen vom Ort der Durchführung, der Wetterlage und der verwendeten Flüssigkeit ab. An dieser Stelle erhalten wir hier zunächst

$$p = \rho g h + p_L - p_D. \tag{4}$$

Wird das Ergebnis in die volumenkorrigierte Formel (3) eingesetzt, ergibt sich die fertige, allgemeine Korrekturformel:

$$\frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}} = \frac{V}{RT}\left(\rho g h + p_L - p_D\right) . \tag{5}$$

Versuchsspezifische Ergänzungen

Während die vorangegangenen Seiten möglichst allgemein gehalten wurden, soll die Theorie hier auf den durchgeführten Versuch angewendet werden. Zur Elektrolyse wird hier schwefelsaures Wasser verwendet. Die Dichte beträgt ungefähr $\rho = 1,08 \frac{Mg}{m^3}$, der Sättigungsdampfdruck beträgt ca. das 0,94-fache des Sättigungsdampfdruckes über reinem Wasser.

In Wasser zerfällt die Schwefelsäure zu $2H_2O + H_2SO_4 \rightarrow 2H_3O^+ + SO_4^-$. Bei Anlegen der Spannung wandern die Sulfatanionen zur positiven Anode, die Hydroniumionen zur Kathode. Letztere werden nach der Gleichung $H_3O^+ + e^- = H_2O + \frac{1}{2} H_2$ entladen. Für die Elektrolyseformel ist die Wertigkeit w=1, die Atomzahl im Molekül z=2.

An der Anode spielen sich zwei Reaktionen ab. Zum einen werden die Sulfatanionen entladen ($SO_4^{2-} + H_2O - 2e^- \rightarrow H_2SO_4 + \frac{1}{2} O_2$), andererseits werden auch die durch spontane

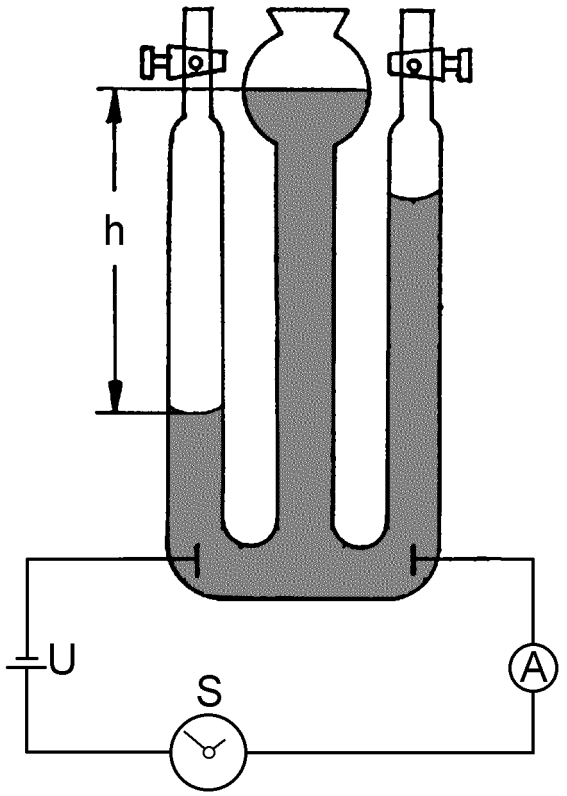
Dissoziation des Wassers entstehenden Hydroxidionen entladen ($2OH^- - 2e^- \rightarrow H_2O + \frac{1}{2}O_2$). In beiden Fällen ist *w*=2 und *z*=2. Interessant ist dabei, daß sich bei der gesamten Elektrolyse der Säuregehalt des Wassers nicht ändert. Werden Sulfatanionen entladen, so entsteht wieder Schwefelsäure, die sich gleich darauf wieder aufspaltet. Zwar werden auf der Anodenseite (positive) Ladungen "vernichtet", doch entstehen sie auf Kathodenseite in gleicher Menge neu, entweder durch Dissoziation der erneut entstanden Schwefelsäuremoleküle oder als Überbleibsel der spontanen Dissoziation von Wassermolekülen, bei denen die Hydroxidionen entladen wurden.

Dennoch steigt die Konzentration der Säure. Da ja anstelle der Säure das Wasser zersetzt wird, sinkt die Wassermenge im Gerät.

Durchführung der Messungen

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in der nebenstehenden Skizze dargestellt. Die Uhr im Stromkreis stellt einen zeitgesteuerten Schalter dar, der nach Ablauf einer bestimmten Zeit öffnet (in der Praxis realisiert durch einen ständig mit einer Hand am Schalter auf die Uhr schauenden Versuchsleiter). An der Spannungsversorgung war die Spannung regelbar; das Ampèremeter zeigt den Stromfluß an. Wird wie in der Grafik die Kathode in das linke Steigrohr geschaltet, so werden wir auf der linken Seite den Wasserstoff, auf der rechten Seite den Sauerstoff erwarten. Die eingezeichnete Höhe *h* ist nach jeder Messung zu messen; aus ihr wird der Druck der Flüssigkeitssäule auf die Gasblase berechnet.



Grafik 1 - Der Hofmann'sche Wasserzersetzungsapparat

Meßwerte

Zur Zeit des Versuches betrug die Umgebungstemperatur $T = 294° K \pm 0,3\%$, das Barometer zeigte einen Luftdruck von $100,192 hPa \pm 1\%$. Unter diesen Bedingungen ist der Sätti-

gungsdampfdruck von Wasserdampf über reinem Wasser $24,9hPa$, der Dampfdruck über der gegebenen Flüssigkeit $0,94 \cdot 24,9hPa = 23,406hPa$.

Im folgenden wurden 12 Messungen durchgeführt. Gemessen wurde als Eingangsgröße die Elektrizitätsmenge, bestehend aus Stromfluß und Zeit; hinterher konnte das Volumen des abgeschiedenen Gases und die Höhe der Flüssigkeitssäule über der Gasblase abgelesen werden. Aus diesen Werten wird im folgenden das Volumen der Gasblase unter Normbedingungen nach Formel 5 und die Faradaykonstante aus Formel 2 bestimmt.

I $[mA]$	t $[s]$	V $[\mu m^3]$	h $[mm]$	$V^{(0)}$ $[\mu m^3]$	$[\frac{C}{mol}]$
107±19%	240±0,4%	3,3±9%	124±2,5%	2,988±9,1%	96322±21%
251±8%	240±0,4%	7,8±4%	157±2%	7,087±4,2%	94879±9%
327±6%	240±0,4%	10,3±3%	168±1,8%	9,367±3,3%	93869±7%
392±5%	240±0,4%	12,2±2,5%	186±1,7%	11,119±2,8%	94821±6%
480±4%	240±0,4%	14,9±2%	205±1,5%	13,608±2,4%	94876±5%
547±3,5%	240±0,4%	16,9±2%	225±1,4%	15,467±2,4%	95121±4,5%
613±3%	240±0,4%	18,9±2%	235±1,3%	17,316±2,4%	95289±4%
691±3%	240±0,4%	21,1±1,5%	252±1,2%	19,366±2%	95969±4%
757±2,5%	240±0,4%	23,2±1,3%	265±1,2%	21,323±1,8%	95487±3,5%
827±2,5%	240±0,4%	25,3±1,2%	282±1,1%	23,295±1,7%	95487±3,5%
907±2,5%	240±0,4%	27,2±1,1%	295±1,1%	25,079±1,6%	97275±3%
1000±2%	240±0,4%	30±1%	316±1%	27,722±1,6%	97024±3%

Die Formel für das Volumen unter Normaldruck geht aus Formel 5 und den versuchsspezifischen Ergänzungen hervor:

$$V^{(0)} = V_{Molar}^{(0)} \frac{V}{RT}(\rho gh + 978,5hPa) \qquad (6)$$

Mit diesem Wert, Formel 2, der Äquivalenz $Q = I \cdot t$ und ein wenig Umstellen folgt die Berechnungsvorschrift für die Faradaykonstante

$$F = \frac{I \cdot t \cdot V_{Molar}^{(0)}}{2V^{(0)}} = \frac{I \cdot t \cdot R \cdot T}{2 \cdot V \cdot (\rho gh + 978,5hPa)} \qquad (7)$$

An dieser Stelle wurden auch schon die Werte für w=1 und z=2 in die Formel mit einbezogen.

Fehlerbetrachtung

Das verwendete Strommeßgerät hatte die Güteklasse 2 und war auf den Meßbereich von 0 bis 1 Ampere geeicht, so daß bei jeder Strommessung eine Unsicherheit von 20mA bestand. Der Zeitschalter konnte auf 1 Sekunde genau den Stromfluß steuern. Da jede Messung auf vier Minuten festgesetzt wurde, entstand hier ein Fehler von jeweils 0,4%. Die Gasmenge im Steigrohr wurde auf $\pm 0,3ml$ genau bestimmt, die Höhe der Flüssigkeitssäule auf $\pm 3mm$.

Die Fehler aller Meßgrößen sind bereits in der vorigen Tabelle eingetragen. Für die weiterführenden Meßwerte wurden bei additiven Größen die absoluten Fehler addiert, für multiplikative Größen wurde der Gauß'sche Fehlerfortpflanzungssatz benutzt.

Aufgaben

Auswertung

Die Meßwerte zeigen eine deutliche Proportionalität zwischen der "verbrauchten" Elektrizitätsmenge $Q = I \cdot t$ und der (auf Normvolumen zurückgerechneten) entstandenen Gasmenge $V^{(0)}$, was auch die graphische Auswertung im Anhang zeigt. Für die Werte kann also sinnvollerweise eine lineare Regression durchgeführt werden. Dafür schreiben wir Formel (7) um, $V^{(0)} = \frac{V^{(0)}_{Molar} \cdot t}{2F} I$, setzen $y = V^{(0)}$ und $x = I$ und berechnen die Koeffizienten der linearen Regression, die nebenstehend aufgeführt sind. Für die Steigung der Regressionsgerade gilt $\alpha = \frac{V^{(0)}_{Molar} \cdot t}{2F}$, die Faradaykonstante ist demnach $F = \frac{V^{(0)}_{Molar} \cdot t}{2\alpha}$. Der auf diese Weise errechnete Wert $F = 97193 \frac{C}{mol}$ besitzt auch einen sehr viel niedrigeren Fehler als derjenige, welcher nur primitiv für die einzelnen Werte ausgerechnet wurde: $\frac{\Delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2}$, d.h. $F = 97193 \frac{C}{mol} \pm 0{,}8\%$.

```
Steigung der Ausgleichsgeraden ................ 27.673478
y-Achsenabschnitt der Ausgleichsgeraden ....... .23480607

Streuung der y-Werte um die Ausgleichsgerade .. .15523260
Standardabweichung der Steigung ............... .17026904
Standardabweichung des y-Achsenabschnittes .... .10765987
```

Verwertung

Um die Messungen zu überprüfen, wird der gewonnene Wert der Faradaykonstante mit dem Literaturwert verglichen, wo dieser mit $96486 \frac{C}{mol}$ angegeben ist[3]. Der Wert von $F = 97193 \frac{C}{mol} \pm 0{,}8\%$ liegt mit einer Abweichung von 0,73% noch innerhalb der berechneten Fehlergrenzen, was ja auch deren Sinn ist.

Zum weiteren Vergleich wird aus dem Meßwert nach der Beziehung $F = e \cdot N_A$ die Avogadro-Konstante berechnet. Sie liegt in diesem Fall bei $N_A = 6{,}066 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol} \pm 0{,}8\%$. Die Abweichung vom Literaturwert $N_A = 6{,}0220941 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$[4] liegt wiederum - wenig überraschend - bei 0,73%.

---

[3] Quelle: Martienssen, W.: Einführung in die Physik

[4] dito

Wasserverbrauch

Hier soll kurz hergeleitet werden, wieviel Wasser zersetzt werden muß, um eine Abscheidung von 50ml Wasserstoff (unter Normbedingungen) zu erhalten. Das hat zwar nichts mit den Messungen zu tun, verschafft jedoch einen Überblick darüber, wieviel Stoffmenge denn während des Versuchs tatsächlich umgesetzt wurde (ein Liter ist eben doch anschaulicher als ein Mol).

Zunächst wird das Gasvolumen hierfür in die molare Gasmenge umgerechnet: $N = \frac{V^{(0)}}{V^{(0)}_{Molar}} = 2,231 \cdot 10^{-3} mol$ (Formel siehe Seite 3). Das heißt natürlich auch, daß ebenso viele Wassermoleküle zersetzt wurden (man beachte: ein Wassermolekül hat wie ein Wasserstoffmolekül zwei Wasserstoffatome). Ein Wassermolekül hat ein Gewicht von 18u[5], d.h. ein Mol Wasser hat das Gewicht 18g. Die Stoffmenge von $N = 2,231 \cdot 10^{-3} mol$ hat daher das Gewicht $m = 40,2mg$. Da die Dichte von Wasser unter Normbedingungen ziemlich genau $\rho = 10^3 \frac{kg}{m^3}$ ist, müssen daher $V^{(0)} = 40,2nm^3$ Wasser zersetzt werden, um die gewünschte Gasmenge von 50ml Wasserstoff zu erhalten.

Aus der Regressionsgerade von Seite 7 (bzw. graphisch im Anhang) kann weiter ersehen werden, daß hierfür ein Strom von 1,44A fließen müßte. Da in unseren Messungen dieser Strom jeweils vier Minuten floß, entspricht das einer Elektrizitätsmenge von 346,6C.

Füllstandshöhe

Auch wenn die beiden Hähne des Wasserzersetzungsapparats nach dem Versuch geöffnet werden, können sich in beiden Rohren unterschiedliche Flüssigkeitspegel einstellen. Das liegt an der chemischen Reaktivität des Sauerstoffs. Während dieser gemächlich von der positiven Elektrode zur Gasblase hochblubbert, hat er viel Zeit, mit den Molekülen seiner Umgebung (insbesondere mit den Sulfatanionen oder direkt mit Schwefelsäuremolekülen) zu reagieren. Es kann somit zur Bildung von Peroxydschwefelsäure ($H_2S_2O_8$) kommen. Direkt an der Elektrode sind die nächsten Spuren unerwünschter Stoffe zu finden. Dort entstehen zunächst nur höchst aggressive, einatomige Sauerstoffradikale, die teilweise auch mit einem Sauerstoffmolekül zu Ozon (O_3) oder mit einem Wassermolekül zu Wasserstoffsuperoxyd (H_2O_2) reagieren. Während Ozon ebenfalls als Gas aufsteigt, erhöhen die beiden anderen Substanzen die spezifische Dichte seitens der Anode. Konkret heißt das, daß damit das Wasser im einen Rohr schwerer wird als im anderen.

All diese Reaktionen auf Sauerstoffseite verzerren natürlich die entstehende Gasmenge. Würde die Messung hier durchgeführt, wären größere Abweichungen zu erwarten.

---

[5] $1u = 1,660552 \cdot 10^{-27} kg$ ist die atomare Masseneinheit

Glücklicherweise sind jedoch alle drei Substanzen nicht allzu stabil, was uns davor rettet, zwischen den Versuchen das Wasser auszuwechseln. Bereits nach einigen Stunden haben sich die Konzentrationen wieder normalisiert.

Verwendete Größen und Konstanten

An dieser Stelle sollen noch einmal als Zusammenfassung alle verwendeten Größen und Konstanten mit Einheiten und der benutzten Kennzeichnung aufgezählt werden.

Umgebungstemperatur	$T = 294° K$
Umgebungsluftdruck	$p_L = 1001,92 hPa$
Sättigungsdampfdruck über schwefelsaurem Wasser	$p_d = 24,9 hPa$
Dichte von schwefelsaurem Wasser	$\rho = 1,08 \cdot 10^3 \frac{kg}{m^3}$
Dichte von destilliertem Wasser	$\rho = 10^3 \frac{kg}{m^3}$
Gas-Konstante	$R = 8,3143 \frac{J}{K \cdot mol}$
Avogadrosche Zahl	$N_A = 6,0220941 \cdot 10^{23} \frac{1}{mol}$
Molares Normvolumen	$V_{Molar}^{(0)} = 22,414 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{mol}$
Erdbeschleunigung	$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
Elementarladung	$e = 1,6022 \cdot 10^{-19} C$
Faradaykonstante	$F = 96485,99 \frac{C}{mol}$
Atomare Masseneinheit	$u = 1,660552 \cdot 10^{-27} kg$

Die Konstanten stammen mit Ausnahme des Molaren Normvolumens und der Faradaykonstante aus "Martienssen, W.: Einführung in die Physik". Ersteres stammt aus dem Praktikumsheft, die Faradaykonstante stammt aus dem Taschenrechner (multiplizierte Avogadrosche Zahl mit der Elementarladung).