

Untersuchung des diffusiven Transportes von Uranin in einer Wassersäule mit unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen

vorgelegt als

Master-Arbeit

am

Institut für Geologie, Mineralogie und Geophysik
der Ruhr-Universität Bochum

von

Gregor Nober (B.Sc.)

Betreuer:

Prof. Dr. Stefan Wohnlich
M.Sc. Marion Stemke

Bochum, März 2016

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass diese Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfen ausgeführt und verfasst wurde.

Ich habe alle entnommenen Fakten und Textstellen durch entsprechende Zitate gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde in dieser oder ähnlicher Form bei keiner Fakultät weder dieser noch einer anderen Hochschule eingereicht.

Gregor Nober

Aufgabenstellung der Arbeit

Zur Ermittlung von nicht sichtbaren Fließverhalten von Wasser nehmen Markierungsstoffe wie z.B. Uranin eine bedeutende Rolle ein. Bei Uranin (Natrium-Salz des Fluorescein) sind die gute Sichtbarkeit und Messbarkeit in bereits sehr geringen Konzentrationen als Vorteile anzusehen, zudem gilt es als gesundheitlich unbedenklich. In einem Labor ist der Markierungsstoff ebenfalls gut geeignet, um Veränderungen des Strömungsverhalten von Wasser erkennbar zu machen.

Die M.Sc.-Arbeit wird im Rahmen einer möglichen Nutzung eines ehemaligen Minenschachtes zur Wärmegewinnung mittels einer Erdwärmesonde für geothermische Gebäudeheizung durchgeführt. In Versuchsreihen soll das Ausbreitungsverhalten einer Uranin-Lösung in einer Wassersäule beobachtet werden. Dabei wird eine Wassersäule mit Natriumchlorid angereichert, um so die Situation eines Grubenschachtes nachzustellen. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen wird dabei auf das Verhalten des Uranins bei geringen Dichteunterschieden gelegt werden. Es soll beurteilt werden, inwiefern Uranin zur Detektion von Dichteschichtungen oder Wasserbewegungen in einem Grubenschacht in Betracht gezogen werden kann. Dies soll vornehmlich experimentell untersucht und, wenn möglich, numerisch simuliert werden.

Abstract

To the enquiry of non visible flow behaviour of water tracers, such as fluorescein-sodium, take a significant role. Fluorescein-sodium already shows good visibility and measurability even in very low concentrations in water. Additionally, no health risk is enclosed. Due to the properties named above, fluorescein-sodium is also suited to detect changes in flow behaviour of water at the laboratory.

This M.Sc.-thesis is carried out within the scope of a geothermal use of a former mine shaft. In series of experiments the propagation behaviour of a fluorescein-sodium-solution shall be observed in a water column. The water column will be fortified with sodium chloride to pattern the situation of a mine shaft. During experiments the main attention of the investigations will be laid on the behaviour of the fluorescein-sodium. The suitability of fluorescein-sodium for the discovery of density stratifications or water movements in a mine shaft is to be evaluated.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse.....	7
Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	8
Anhangsverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Danksagung	13
1. Einführung und Motivation.....	14
2. Grundlagen	17
2.1. Diffusion	17
2.2. Konvektion	20
2.3. Dichteströmung.....	20
3. Laborversuche.....	21
3.1. Versuchsaufbau	21
3.2. Verschiedene Eingabemethoden	23
3.2.1. Punktuelle Eingabe	23
3.2.2. Flächenhafte Eingabe.....	24
3.2.3. Eingabe über eine Saugkerze.....	26
3.3. Versuchsdurchführungen	27

4. Darstellung der Ergebnisse	34
4.1. Uranin-Lösung in Wasser	34
4.2. Uranin-Lösung in NaCl-Lösung.....	36
5. Interpretation der Ergebnisse	42
5.1. Versuchsreihen 1 und 2: Uranin-Lösung in Wasser.....	42
5.2. Versuchsreihe 3 und 4: Uranin-Lösung.....	46
6. Diskussion und Bewertung	59
6.1. Kritische Betrachtung und Bewertung der Randbedingungen	59
6.2. Fehlerbetrachtung	63
6.3. Diskussion der Ergebnisse und des Modells.....	67
6.3.1. Vergleichbarkeit und Bewertung der Ergebnisse.....	67
6.3.2. Bewertung des Modells	69
7. Ausblick.....	73
7.1. Weiterführende Untersuchungen	73
7.2. Übertragung der Ergebnisse auf reale Problemstellungen	74
8. Literaturverzeichnis	78
9. Anhang	80

Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	22
Abbildung 2: Versuchsaufbau im Labor	22
Abbildung 3: Eingaben mit einer Spritze.....	24
Abbildung 4: Beispiel einer flächenhaften Eingabe.....	25
Abbildung 5: eingesetzte Keramik-Saugkerze	26
Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Saugkerze	27
Abbildung 7: Höhen der Probenentnahmen.....	33
Abbildung 8a-d: Uranin-Lösung in Wasser.....	35
Abbildung 9a-d: Uranin-Lösung in NaCl-H ₂ O-Lösung ähnlicher Dichte.....	38
Abbildung 10a-d: Uranin-Lösung in NaCl-H ₂ O-Lösung höherer Dichte	40
Abbildung 11a-d: geänderte Höhe der Saugkerze	41
Abbildung 12: Vergleich der Versuche 1.1 – 2.2	43
Abbildung 13: Vergleich der Versuche 3.1 – 4.1	48
Abbildung 14: Vergleich der Grenztiefen.....	51
Abbildung 15: elektrische Leitfähigkeit; Versuch 3.3.....	52
Abbildung 16: elektrische Leitfähigkeit; Versuch 3.4.....	54

Abbildung 17a/b: Uranin-Grenzbildung	57
Abbildung 18: Raum- und Wassertemperatur; Versuch 3.1	62
Abbildung 19: Uranin-Eingabe Sondenmodell	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: typische Diffusionsraten [vgl. CUSSLER (1984), S. 1].....	18
Tabelle 2: Konzentration/Dichte verwendeter Uranin-Lösungen.....	30
Tabelle 3: Uranin-Lösung (60mg/ml) in Wasser	31
Tabelle 4: Uranin-Lösung (40mg/ml) in Wasser	31
Tabelle 5: Uranin-Lösung (60mg/ml) in NaCl-Wasser-Lösung.....	32
Tabelle 6: Ermittelte Werte der Probenentnahme.....	38

Anhangsverzeichnis

Anhang A: Verwendete Materialien

Anhang A I: Geräte und Gegenstände

Anhang A II: Uranin

Anhang A III: Natriumchlorid

Anhang B: Berechnungen

Anhang B I: Dichte der Uranin-Lösung

Anhang B II: Dichte der Natriumchlorid-Lösungen

Anhang B III: Dichte der entnommenen Proben

Anhang C: Daten und Diagramme

Anhang C I: Temperaturverläufe der Versuche zum Vergleich

Anhang C II: Wasserdichte verschiedener Temperaturen

Anhang C III: Datentabellen dargestellter Diagramme

Anhang C IV: Verzeichnisliste der CD

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen

H_2O	Wasser
NaCl	Natriumchlorid
s.	siehe
UV	ultraviolett

Verwendete Formelzeichen

c	[mg/ml]	Konzentration
d_a	[cm]	äußerer Durchmesser der Säule
d_i	[cm]	innerer Durchmesser der Säule
dc/dx	[mol/m ⁴]	Gradient der Konzentration
dc/dt	[-]	zeitliche Änderung der Konzentration
h	[cm]	Höhe der Säule
J	[mol/m ² ·s]	Teilchenstromdichte
k_B	[J/K]	Boltzmann-Konstante
m	[g]	Masse
R_0	[m]	hydrodynamischer Radius
T	[°C]	Temperatur

V	[ml]	Volumen
μ	[N · s/m ²]	dynamische Viskosität
π	[\cdot]	Pi
ρ	[g/ml]	Dichte
Σ	[\cdot]	Summenzeichen

Einheiten

cm	Zentimeter
g	Gramm
h	Stunde
J	Joule
K	Kelvin
l	Liter
m	Meter
mg	Milligramm
min	Minute
ml	Milliliter
mol	Mol
mS	Millisiemens

N	Newton
ppb	parts per billion
s	Sekunde
°C	Grad Celsius

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Bei meiner Familie möchte ich mich für moralische Unterstützung die ausführliche Korrekturarbeit bedanken. Für so manch hilfreichen Einfall und Ratschlag und die stets tatkräftige Unterstützung möchte ich meinem Studienkollegen Marius Risse und den Mitarbeitern des Lehrstuhls Thorsten Gökpinar und Oliver Schübbe meinen Dank aussprechen. Schließlich möchte ich mich auch für die hilfreiche und professionelle sowie freundliche Begleitung bei den Betreuern meiner Arbeit Marion Stemke und Prof. Dr. Stefan Wohnlich bedanken.

1. Einführung und Motivation

In den Zeiten der Energiewende, in denen Ziele gesetzt wurden, langfristig umweltfreundliche Alternativen zur Energieversorgung zu erforschen und auszubauen, und in dessen Folge bereits Atomkraftwerke abgeschaltet wurden bzw. werden und auch alte Kraftwerke auf Basis fossiler Brennstoffe abgeschaltet werden sollen, spielen Energiequellen mit erneuerbaren oder unerschöpflichen Ressourcen eine immer wichtigere Rolle. Als wahrscheinlich bekannteste Vertreter dieser Art sind die Wind- und die Wasserkraft wie auch die Sonnenenergie zu nennen.

Die Geothermie gilt in Deutschland noch als relativ junger Zweig dieser Alternativen, der bisher keinen bedeutenden Beitrag zur Energiegewinnung leistet. Seit 2003 wird an Geothermie-Projekten zur Stromerzeugung in Deutschland gearbeitet. 2008 wurde in Unterhaching das insgesamt dritte Geothermie-Heizwerk zur Stromerzeugung in Betrieb genommen. Weitere Standorte sind vor allem im süddeutschen Raum geplant. *[nach BÖHME et al. (2009) S. 9]*.

Für den Betrieb einer Erdwärmesonde, die für eine Tiefe von mehreren 100-1000 Metern ausgelegt werden kann, sind für gewöhnlich Bohrungen notwendig, um die erforderliche Tiefe zu erreichen. Bei der Annahme eines für Deutschland durchschnittlichen geothermischen Gradienten von etwa $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ sind bereits mehrere 100 Meter Tiefe erforderlich, um einen nennenswerten Wärmeentzug ermöglichen zu können. Diese Bohrungen sind zumeist mit hohen Kosten verbunden.

In ehemaligen Kohle- bzw. Erzabbauregionen wie dem Ruhrgebiet, dem Siegerland oder dem Sauerland befinden sich in der gegenwärtigen Zeit viele verlassene Bergwerke oder Gruben, deren Minenschächte oft oberflächlich bedeckt, aber

nicht immer verschüttet oder verfüllt wurden. Schächte, die noch intakt sind und nicht abgepumpt werden, werden durch eindringendes Grundwasser geflutet.

Diese Schächte bieten unter Umständen einen guten Standort für den Betrieb einer Erdwärmesonde, da sie im Prinzip eine große, mehrere 100 Meter tiefe Bohrung darstellen, in denen das eingedrungene Wasser durch Erdwärme aufgeheizt wird. Bei einem Betrieb der Sonde in einem verlassenen Schacht würde die kostenintensive Durchführung einer Bohrung wegfallen. Es wäre jedoch der Ausbau des Schachtes bzw. der Aufbau der gesamten Anlage rund um den Schacht notwendig. Bei einem solchen Vorhaben muss allerdings beachtet werden, dass die Wassertemperatur bzw. die Temperaturerhöhung in dem Schacht den Anforderungen der geplanten Anlage entsprechen. Der geplante Wärmeentzug aus dem Wasser würde durch eine Temperaturänderung auch eine Dichteänderung des Wassers zur Folge haben. Durch diese Änderungen, die dem Wärmeentzug entsprechend sukzessive voranschreiten, können Konvektionen im Wasser verursacht werden, die möglicherweise Einfluss auf die Effektivität der Erdwärmesonde nehmen. Zudem werden normalerweise stabile Dichteschichtungen, die oft in Grubenschächten zu finden sind, gestört und mit einander vermengt werden. Dies kann unter Umständen zu unvorhersehbaren chemischen Reaktionen führen, welche zum Beispiel die Effektivität der Sonde durch Korrosion etc. beeinträchtigen könnten.

Da die Wasserbewegungen nicht sichtbar sind, ist es notwendig einen Markierungsstoff einzusetzen, der während des Betriebs des Modells eingesetzt wird und die Bewegungen der Konvektion nachvollziehbar macht. Mit einer Kamera werden diese Bewegungen aufgenommen. Zusätzlich sollen unterschiedliche Uranin-Konzentrationen durch stetige Probennahmen nachgewiesen werden. Ziel dieser Arbeit ist es zunächst eine, für den Versuch mit der Sonde, geeignete Eingabemethode zu finden, die systematisch wiederholbar ist, um Einflüsse von Änderungen

des Systems, wie Änderungen der Wassertemperatur oder der Dichte, sichtbar zu machen. Es wird der Ablauf, der Verteilung einer Uranin-Lösung in einer Wassersäule mit hohen NaCl-Konzentrationen bei unterschiedlichen Dichteunterschieden zur Uranin-Lösung untersucht. Die getätigten Beobachtungen haben letztlich das Ziel, zu klären, ob ein Grubenschacht mit Uranin oder einem anderen Tracerstoff erkundet bzw. überwacht werden kann und ob sich diese Methode im Hinblick auf Genauigkeit und Erkenntnisgewinnung in einer realen Situation als effektiv herausstellen kann. In einem Schacht können dann eventuell Wasserbewegungen beobachtet werden, die zum Beispiel einen negativen oder positiven Einfluss auf die Effektivität der Sonde haben können.

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Diffusion und Konvektion sowie der Dichteströmung, erläutert. Es folgt eine Beschreibung der Versuchsmodelle sowie der Versuchsdurchführung. Dem folgt eine Analyse und Bewertung der Versuche und der gewonnenen Ergebnisse. Anschließend werden die vorherrschenden Versuchsbedingungen kritisch betrachtet und eine Bewertung des Modells hinsichtlich Fehleranfälligkeit und Ungenauigkeiten durchgeführt. Ein abschließender Ausblick, in dem Empfehlungen zu weiterführenden Untersuchungen gegeben sowie die Übertragung erlangter Erkenntnisse auf eine reale Situation und die Frage nach Effektivität und Zweckmäßigkeit des Einsatzes von Uranin oder anderen Tracerstoffen behandelt werden, schließen die Arbeit ab. Im Anhang befindet sich eine tabellarische Zusammenstellung aller genutzten Geräte und Materialien. Zusätzlich werden zwecks Nachvollzugs alle Rechnungen sowie weitere ergänzende Daten dargestellt. In der Anlage befindet sich eine DVD in der alle erlangten Beobachtungen der Versuchsreihen in Form von Videos aufgezeichnet sind.

2. Grundlagen

In dem folgenden Abschnitt werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit erläutert. Es wird ein Einblick auf die mathematischen und theoretischen Überlegungen im Hinblick auf Diffusion, Konvektion und Dichteströmung gegeben, um ein Grundverständnis der beobachteten Vorgänge, die während der Versuchsdurchführungen abgelaufen sind, zu gewährleisten. Diffusion und Konvektion oder auch diffusiver und konvektiver Fluss sind Bewegungen in Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen, die in vielen praktischen Problemen der Naturwissenschaften gemeinsam auftreten. Im Allgemeinen ist Diffusion als strömungsloser Stofftransport zu verstehen. Hingegen ist Konvektion ein auf Strömung basierender Stofftransport, bei dem auch Wärmetransport stattfindet. In bestimmten Fällen wird Konvektion auch durch Diffusion verursacht [vgl. CUSSLER (1984), S. 47].

2.1. Diffusion

Diffusion ist ein Mischungsprozess, der durch ständige, zufällige Bewegungen auf molekularer Ebene, der Brownschen Molekularbewegung, verursacht wird. Wenn sich am Boden eines mit Wasser gefüllten Behälters ein Farbstoff befindet, dann wird dieser Farbstoff sich über einen gewissen Zeitraum vollständig homogen verteilen, auch wenn keinerlei Strömungskräfte, die zu einer Vermischung führen könnten, vorhanden sind. Dieser Prozess führt dazu, dass sich ein Konzentrationsungleichgewicht innerhalb eines bestimmten Zeitraums in ein Konzentrationsgleichgewicht ändert. Dieser Ausgleich ist ein langsam fortschreitender Prozess, dessen Geschwindigkeit von dem Aggregatzustand der jeweiligen Stoffe abhängig ist. Tabelle 1 zeigt typische Diffusionsraten von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen [nach CUSSLER (1984), S. 1-2].

Tabelle 1: typische Diffusionsraten [vgl. CUSSLER (1984), S. 1]

Zustand	Diffusionsrate	Einheit
Gase	10	cm/min
Flüssigkeiten	$5 \cdot 10^{-2}$	cm/min
Feststoffe	$1 \cdot 10^{-5}$	cm/min

Von Gas zu Flüssigkeit zu Feststoff ist eine stark sinkende Tendenz der Diffusionsrate zu erkennen.

Der Diffusionsprozess in Gasen oder Flüssigkeiten kann mit der sichtbaren Bewegung, der Durchmischung der Stoffe, auftreten. Außerdem kann die Diffusion durch künstlich verursachte Bewegungen, wie zum Beispiel dem Rühren oder Schütteln der Flüssigkeiten oder Gase, beschleunigt werden, sodass eine homogene Verteilung, die natürlicherweise Tage, Wochen oder Monate dauert, bereits nach wenigen Minuten erreicht werden kann [nach CUSSLER (1984), S. 1-2]. Bei einer turbulenten Diffusion spricht man von der Eddy-Diffusion, die auch Wirbel- oder Streudiffusion genannt wird [vgl. OTTO (2014), S. 377]. Als wesentliches Merkmal der Eddy-Diffusion vollzieht sich der Prozess der Diffusion aufgrund der hohen Geschwindigkeit der turbulenten Strömung deutlich schneller als bei molekularer Diffusion [vgl. SINHA; DE (2012), S.47]. Der Effekt konnte in ähnlicher Weise während der verschiedenen Versuchsdurchführungen beobachtet werden. Aufgrund des schnelleren Ablaufs des Prozesses verliert bei der Eddy-Diffusion die molekulare Diffusion an Bedeutung und konvektive Strömungen bzw. Dichteströmungen treten in den Vordergrund.

1855 wurde von Adolf Fick eine mathematische Beschreibung der Diffusion aufgestellt, welches das 1. Ficksche Gesetz genannt wird. Nach

$$J = -D * \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (\text{Gl.2.1.1})$$

wird mit dem Diffusionskoeffizienten $D \left[\frac{m^2}{s} \right]$, und dem Konzentrationsgradienten $dc/dx \left[\frac{mol}{m^4} \right]$ die Teilchenstromdichte $J \left[\frac{mol}{m^2 * s} \right]$ berechnet. Durch Fick wurde mit diesem Gesetz eine Proportionalität zwischen dem Konzentrationsgradienten und einem Faktor, dem Diffusionskoeffizienten, festgestellt. Die Formel hat einen analogen Aufbau zu dem Gesetz nach Darcy.

Aus dem 1. Fickschen Gesetz kann über das Gesetz der Massenerhaltung das 2. Ficksche Gesetz, die Diffusionsgleichung, abgeleitet werden. Die Diffusionsgleichung, ausgedrückt

$$\frac{dc}{dt} = D * \frac{d^2 c}{dx^2} \quad (\text{Gl.2.1.2}),$$

stellt die zeitliche Änderung der Konzentration eines Stoffes dar.

Während der Konzentrationsgradient festgelegt wird, ist die Berechnung des Diffusionskoeffizienten mit der Stokes-Einstein-Gleichung möglich.

$$D = \frac{k_B * T}{6 * \pi * \mu * R_0} \quad (\text{Gl.2.1.3})$$

Die Berechnung erfolgt mit der Boltzmann-Konstante $k_B \left[\frac{J}{K} \right]$, der Temperatur $T [K]$, der dynamischen Viskosität $\mu \left[\frac{Ns}{m^2} \right]$ und dem hydrodynamischen Radius der diffundierenden Teilchen $R_0 [m]$. Aus den Formeln geht hervor, dass der Ausgleich eines Konzentrationsungleichgewichtes auf verschiedenen Variablen, die Temperatur, die Viskosität des Stoffes und die Größe der teilnehmenden Atome, zurückzuführen ist.

2.2. Konvektion

Anders als bei Diffusion findet bei der Konvektion der Stofftransport unter Einfluss einer Strömung statt, welche zum Beispiel durch einen Temperaturgradienten verursacht wird. Da Temperaturunterschiede fast immer in natürlichen Umgebungen auftreten, findet Konvektion auch in fast allen nicht isolierten Systemen von Gasen und Flüssigkeiten statt. Es gibt eine Unterscheidung zwischen der freien Konvektion und der erzwungenen Konvektion. Bei der freien Konvektion handelt es sich um Stofftransport, der nur durch die Temperaturunterschiede im System verursacht wird. Bei erzwungener Konvektion wird der Stofftransport zusätzlich durch äußere Einwirkungen beeinflusst, wie z.B. einer Pumpe, die eine Strömung erzeugt, oder anderen künstlichen Bewegungen. Im Rahmen der für diese Arbeit, durchgeführten Laborversuche ist die Konvektion ebenfalls von Bedeutung, da mit einem nicht isolierten System gearbeitet wird und dadurch die Temperaturschwankungen, die in dem Labor während der Versuche auftreten, die Ergebnisse der Versuche beeinflussen und ggf. Konvektion verursachen können.

2.3. Dichteströmung

Dichteströmungen entstehen, wenn zwei Flüssigkeiten oder Gase mit jeweils unterschiedlicher Dichte aufeinandertreffen. Bei einem einfachen Beispiel strömt das dichtere Medium unter dem Leichteren hinweg [*vgl. SCHIMMELS; MARKOFSKY (2007), S. 1 zit. nach SIMPSON (1987)*]. An der Grenzschicht der beiden Medien treten dabei Instabilitäten auf, die zu dem Effekt führen, dass es zu Einträgen von Teilmengen des leichteren Materials in das schwerere kommt. Durch diesen Effekt wird der Auftrieb des leichteren Mediums, der durch den Dichteunterschied verursacht wird, mit der Zeit immer geringer [*SCHIMMELS; MARKOFSKY (2007), S. 1*]. In letzter Konsequenz kann dies zu einer vollständigen Durchmischung der teilhabenden Medien führen.

3. Laborversuche

In diesem Kapitel rücken die Laborarbeiten in den Vordergrund. Zunächst wird der allgemeine Versuchsaufbau beschrieben. Es folgen eine Erörterung der im Vorfeld der Versuche durchgeführten Tests zu verschiedenen Eingabemethoden des Uranins sowie eine Begründung der Festlegung auf eine Methode. Abschließend werden die Abläufe der Versuchsdurchführungen beschrieben und die Parameter der jeweiligen Versuche aufgelistet. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Materialien sind in dem Anhang einzusehen.

3.1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau soll sich an dem Aufbau des Modells der Sonde und damit auch an die reale Situation in einem Schacht orientieren. Aus diesem Grund wurde eine zylinderförmige Säule aus Glas gewählt, die einen inneren Hohlraum aufweist. Zur Durchführung der Versuche wurde die Säule auf einer Glasplatte mit Silikonpaste befestigt und abgedichtet. Eine schematische Zeichnung sowie ein Bild des Versuchsaufbaus sind in Abbildung 1 dargestellt. Abbildung 2 veranschaulicht den Versuchsaufbau im Labor. Die Glassäule weist eine Länge von 50cm, einen äußeren Durchmesser von 16cm und einen inneren Durchmesser von 12,5cm auf. Ein Zentimeter-Maßstab wurde zur besseren Beobachtung des Fortschritts des Experiments an der Glassäule befestigt. Der Eingabebereich des Uranins befindet sich an dem offenen oberen Ende der Säule. Im Vorfeld der Versuchsreihen wurden verschiedene Methoden zur Eingabe des Uranins getestet.

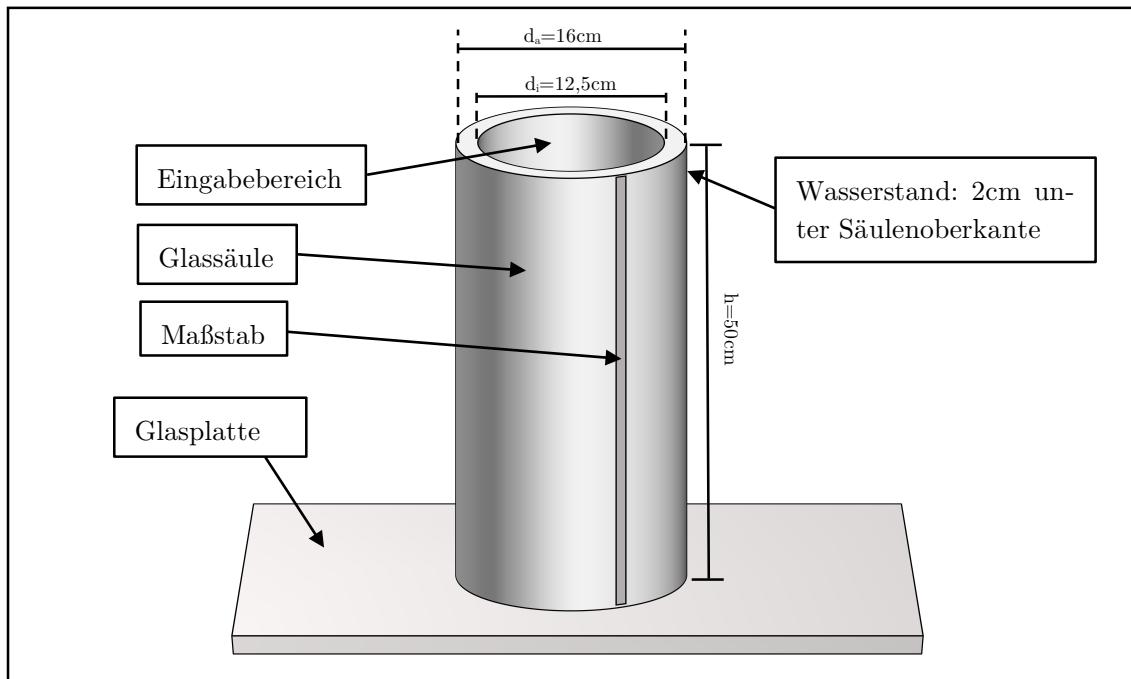


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus



Abbildung 2: Versuchsaufbau im Labor

3.2. Verschiedene Eingabemethoden

Dieser Abschnitt bezieht sich insbesondere auf die verschiedenen Eingabemethoden des Uranins in das System, da die Uranin-Eingabe der initiale Impuls der Versuche ist und darüber hinaus für Versuche an dem Modell der Sonde von Bedeutung ist.

Bei den getesteten Methoden kann zwischen zwischen punktueller und flächenhafter Eingabe unterschieden werden. Zunächst wurden flächenhafte und punktuelle Eingaben in einem kleineren System, einem Becher, getestet. Statt der Säule wurde ein Becher als Ersatz benutzt, da zunächst nur die direkte Umgebung der Eingabe im Wasser von Interesse war. Hiermit sollte ebenfalls die aufwendige Abdichtung, Befüllung und anschließende Entleerung der größeren Säule zu verhindern werden.

3.2.1. Punktuelle Eingabe

Zuerst wurde die einfachste Möglichkeit der Eingabe getestet, bei der die Uranin-Lösung an einem einzigen Punkt an der Wasseroberfläche eingegeben wird. Als Mittel zur Eingabe wurde zunächst eine herkömmliche Spritze mit Kanüle genommen, so dass die Uranin-Lösungsmenge (1ml) möglichst exakt dosiert werden konnte. Die Tests haben jedoch ergeben, dass aufgrund des hohen Drucks, mit dem die Uranin-Lösung durch die Spritze eingegeben wird, die verschiedenen Eingaben einen hohen Unterschied zueinander aufweisen. Die systematische Reproduktion einer identischen Eingabe ist somit nicht möglich. Um den hohen Druck während der Eingabe zu vermeiden wurde eine Pipette mit 1ml Uranin-Lösung getestet. Da hierbei die Eingabe nur über die Entlassung des Unterdrucks aus der Pipette erfolgt, besteht nur der Druck der durch die Schwerkraft der Uranin-Lösung selber ausgeübt wird. Die Tests haben jedoch ergeben, dass auch hierbei

eine hohe Variabilität der Eingabeergebnisse besteht und eine Reproduktion gleicher Eingaben nicht möglich ist. Abbildung 3 zeigt zwei verschiedene Eingabesituationen mit einer Spritze.

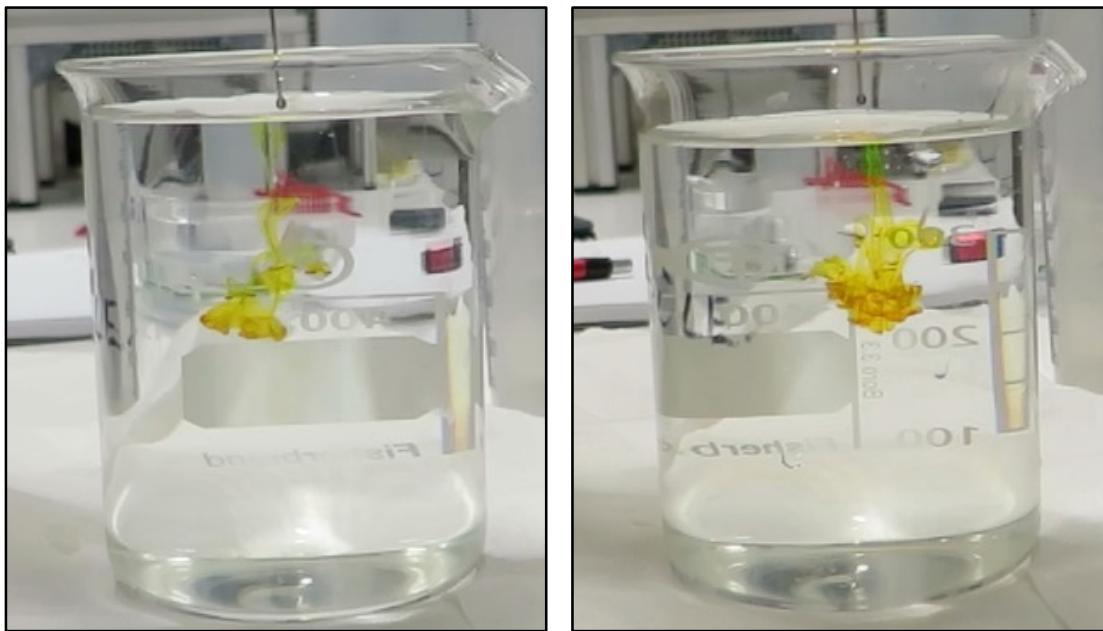


Abbildung 3: Eingaben mit einer Spritze

Zu sehen ist, dass bei zwei unterschiedlichen Eingaben mit derselben Spritze und der gleichen Uraninmenge von 1ml die Ausbreitung der Uranin-Lösung unterschiedlich erfolgt. Aufgrund des hohen Eingabedrucks entsteht eine „Uranin-Wolke“ im Wasser, die sich auf unterschiedliche Weise schnell ausbreitet. Für diese Arbeit und auch für das Modell der Sonde ist jedoch eine Eingabe erforderlich, die eine langsame, möglichst gleichmäßige und reproduzierbare Ausbreitung möglich macht, da nur so Änderungen im Strömungsverhalten des Wassers erkennbar werden können. Ähnliche Ergebnisse wurden mit einer Pipette erzielt. Aufgrund dieser Erkenntnisse sind sowohl Spritzen als auch Pipetten als Eingabemittel für diese Arbeit ungeeignet.

3.2.2. Flächenhafte Eingabe

Als eine weitere Möglichkeit wurde die Eingabe der Uranin-Lösung über die gesamte Querschnittsfläche der Glassäule in Betracht gezogen. Hierbei hätte man

die Möglichkeit bei einem gleichmäßigen Absinken der Uranin-Lösung Unterschiede in der Geschwindigkeit des Absinkens bei Änderung verschiedener Parameter beobachten können. Hierzu wurde eine gleichmäßig durchlöcherte Plastikoberfläche auf die Wasseroberfläche gelegt. Die Uranin-Lösung wurde anschließend über die Plastikoberfläche eingegeben und ist über die Löcher in die Säule abgesunken. Allerdings erfolgt auch bei dieser Methode die Ausbreitung der Uranin-Lösung in dem Wasser ungleichmäßig und ist nicht reproduzierbar. In Abbildung 4 ist zu sehen, dass sich die Uranin-Lösung bei dieser Methode ähnlich wie bei der Eingabe mit der Spritze verhält. Die Verteilung der Uranin-Lösung erfolgt nur über kleinere „Uranin-Wolken“, die sich jedoch ebenfalls schnell und unregelmäßig ausbreiten.

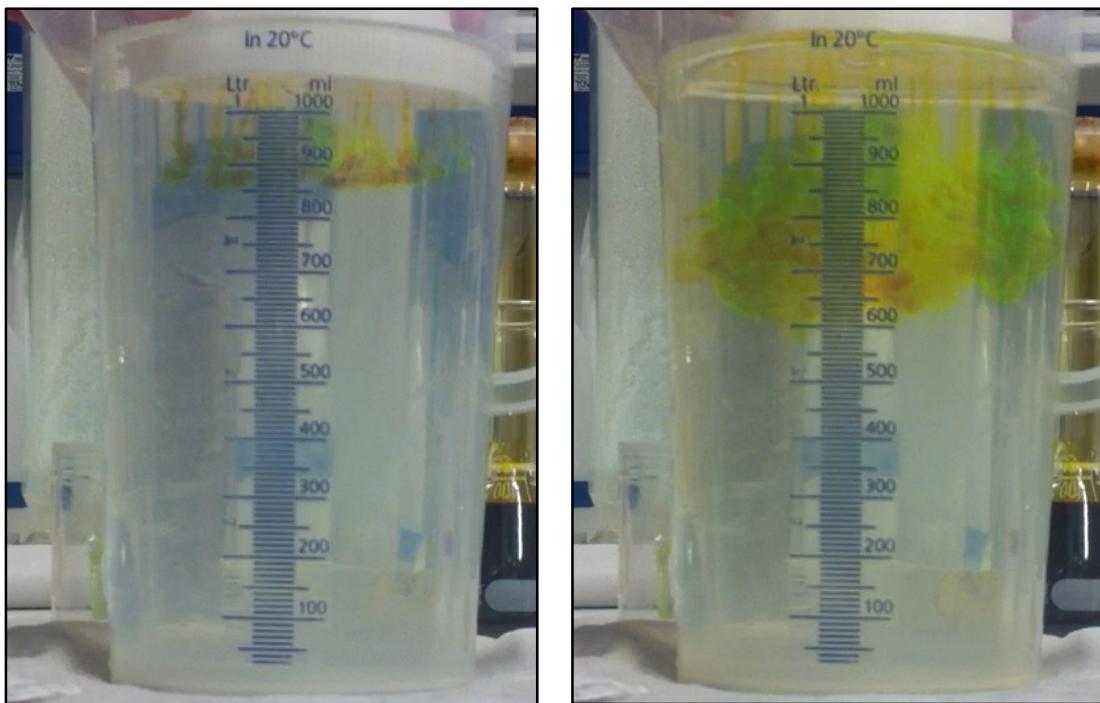


Abbildung 4: Beispiel einer flächenhaften Eingabe

Daher ist auch die untersuchte flächenhafte Eingabe für diese Arbeit und für eine Anwendung auf das Modell der Sonde nicht geeignet, da der gleichzeitige Energieeintrag in das System zu hoch ist.

3.2.3. Eingabe über eine Saugkerze

Als dritte Möglichkeit wurde eine Saugkerze getestet. Diese Methode entspricht von ihrer Art her einer punktuellen Eingabe. Die Saugkerze ist ein Teilstück der Saugsonde. Die Saugsonde ist ein Instrument, das zur Entnahme von Bodenlösungen aus einem Boden dient. Sie besteht in der Regel aus einer Saugkerze, einem Schlauch und einem Unterdruckgerät, welches mit dem Schlauch an die Saugkerze angeschlossen ist. Durch Unterdruck können über die Saugkerze Bodenlösungen aus einem Boden herausgesaugt und analysiert werden. Die Saugkerze besteht aus einem semipermeablen Material wie zum Beispiel Keramik oder Teflon. In Rahmen dieser Arbeit wurde eine Saugkerze aus Keramik verwendet. Abbildung 5 zeigt diese in Detailaufnahme.

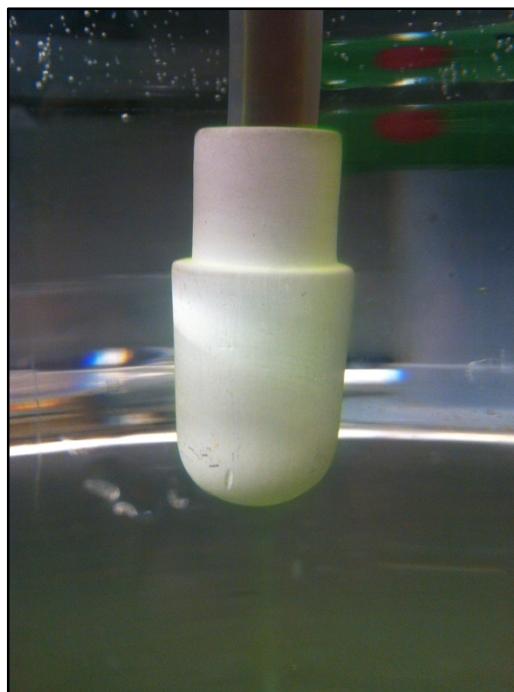


Abbildung 5: eingesetzte Keramik-Saugkerze

Die Saugkerze hat sich als geeignetes Eingabemittel bewährt, da mit ihr eine langsame und gleichmäßige Eingabe möglich ist und der Energieeintrag in das System sehr gering ist. Die Uranin-Lösung muss dabei zunächst durch die Keramik diffundieren, bevor es in das Wasser gelangt. Bei Befestigung der Saugkerze

an einer Position hat sich diese Eingabemethode auch als systematisch wiederholbar herausgestellt. Für die folgenden Versuche wurde die Saugkerze mit einem Schlauch verbunden und in der Mitte des Eingabebereichs der Glassäule mit einem Deckel 9cm eingehängt. Abbildung 6 verdeutlicht den kompletten Versuchsaufbau mit Saugkerze.

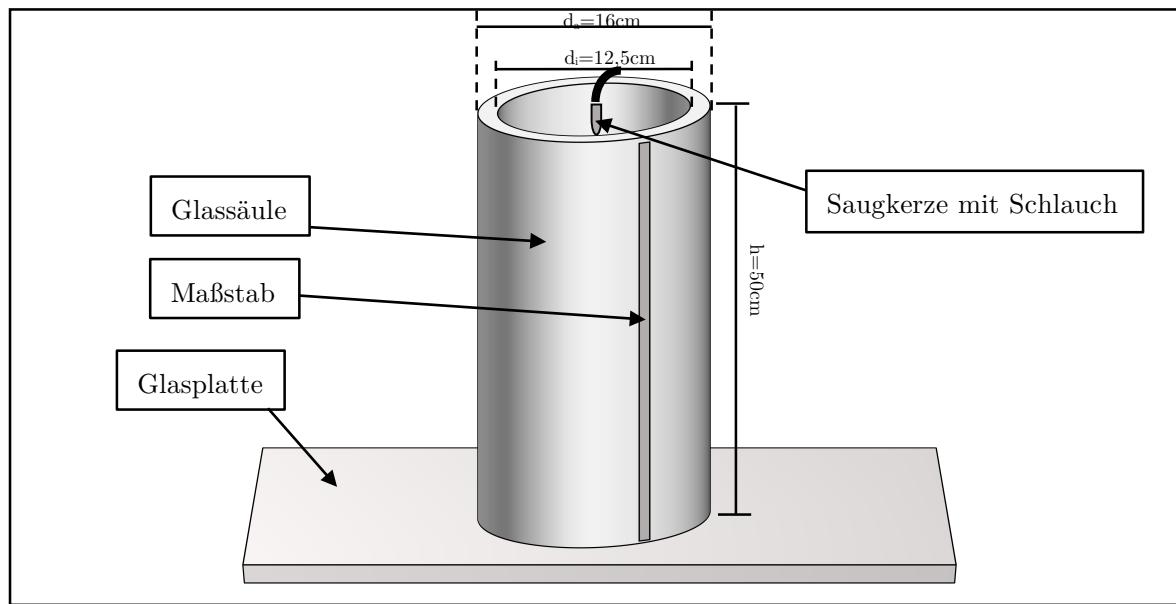


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Saugkerze

3.3. Versuchsdurchführungen

Da sich bei den Tests zu verschiedenen Eingabemethoden der Uranin-Lösung die Saugkerze als geeignetes Mittel erwiesen hat, wurden sämtliche folgenden Versuche nach dem Aufbau, der in Abbildung 6 dargestellt ist, durchgeführt. Es wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, bei denen jeweils Änderungen an verschiedenen Parametern vorgenommen wurden. Jede Versuchsreihe umfasst mehrere Einzelversuche unter möglichst gleichen Bedingungen, um eine Zufälligkeit der Ergebnisse ausschließen zu können. In allen Versuchen wurde 1ml Uranin-Wasser-Lösung als Eingabemedium und ca. 6400ml Wasser als Füllung der Glassäule verwendet. In den ersten beiden Versuchsreihen wurde die Uranin-Lösung in die mit Leitungswasser gefüllte Säule eingegeben. Hierbei wurde vor allem ein syste-

matisches Vorgehen an dem eigentlichen Modell entwickelt. Die beiden Versuchsreihen unterscheiden sich vor allem in der Konzentration der eingegebenen Uranin-Lösung. In einer dritten Versuchsreihe erfolgte die Eingabe der Uranin-Lösung einer Konzentration in die mit einer NaCl-Wasser-Lösung gefüllten Säule. Somit konnte der diffusive Transport bei unterschiedlichen Dichteverhältnissen, sowie bei „Grubenschacht-ähnlichen“ Bedingungen untersucht werden. Die Versuchsreihe wurde mit verschiedenen Konzentrationen der NaCl-Wasser-Lösung wiederholt.

In Tabelle 2 sind die verwendeten Uranin-Lösung-Konzentrationen und ihre zugehörige Dichten aufgelistet. Die Dichte der Uranin-Lösungen wurde im Vorfeld der Versuche durch Einwiegen eines definierten Volumens der Lösung und anschließender Berechnung nach dem Masse/Volumen-Verhältnis bestimmt. Hierzu ist die Dichte ρ $\left[\frac{g}{ml}\right]$ mit der Formel

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Gl.3.3.1})$$

mit der Masse der Lösung m $[g]$ und dem Volumen der Lösung V $[ml]$ berechnet worden. Dabei ist anzumerken, dass diese Bestimmungsmethode keine hohe Genauigkeit aufweist, da sie von unberechenbaren Faktoren abhängig ist. Die Temperatur der jeweiligen Lösung zum Zeitpunkt der Messung hat Einfluss auf die zu messende Dichte. Zudem können Ungenauigkeiten bei der Abmessung des Volumens zu ungenauen Einwaagen führen, wodurch letztlich nur ungenaue Dichten berechnet werden können. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit der Lösungen konnten jedoch keine anderen Messgeräte, wie zum Beispiel ein Aräometer, die eine exaktere Bestimmung der Dichte ermöglicht hätten, verwendet werden. Auch ein Pyknometer war zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar. Eine detaillierte Aufzeichnung der Messungen und Berechnungen dazu ist in *Anhang B I* enthalten.

Die blau markierten Werte sind die Dichten, die über die Summe der Massenkonzentration berechnet wurden. Diese Berechnung drückt sich in der Formel

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i * V_i)}{V_L} \quad (\text{Gl.3.3.2})$$

aus. Es wird hier die Dichte ρ $\left[\frac{g}{ml}\right]$ mit dem Quotienten aus der Summe der Massen der Mischungspartner m_i $[g]$ und des Volumens V_L $[ml]$ errechnet. Die einzelnen Massen m_i können zudem aus dem Produkt der jeweiligen Dichte ρ_i $\left[\frac{g}{ml}\right]$ und des entsprechenden Volumens V_i $[ml]$ ermittelt werden. Bei dieser Berechnung muss jedoch beachtet werden, dass die Volumenkontraktion, die z.B. bei dem Mischen von Salz und Wasser auftritt, nicht berücksichtigt wird. Es kommt bei der Mischung zu einer Volumenverringerung, das heißt, dass das Volumen der Lösung geringer ist als die Summe der eingesetzten Volumina des Salzes und des Wassers [vgl. MORTIMER (2007), S. 210]. Dieser Effekt wird durch bei der Mischung entstehenden Verbindungen zwischen den Wassermolekülen und der gelösten Salzmoleküle hervorgerufen [nach Internetauftritt Lexikon der Chemie (1998)]. Um bei dieser Berechnung der Volumenkontraktion entgegenzuwirken müsste man mehr Volumen V_i der Mischungspartner einrechnen, um das Volumen der Lösung V_L tatsächlich zu erreichen. Dies kann jedoch nicht berücksichtigt werden, da das Ausmaß der Volumenkontraktion nicht bekannt ist. Die berechnete Dichte ist also vermutlich geringer als die tatsächliche Dichte. Die vollständige Berechnung sowie Erklärungen dazu sind ebenfalls in *Anhang B I* enthalten. Die ermittelten Dichten der Uranin-Lösungen beider Verfahren stellen also nur Näherungswerte da, die aufgrund der genannten möglichen Ungenauigkeiten fehlerbehaftet sind.

Tabelle 2: Konzentration/Dichte verwendeter Uranin-Lösungen

Konzentration [mg/ml]	Dichte [g/ml]
60	$\approx 1,022$
	$\approx 1,00023$
40	$\approx 1,013$
	$\approx 1,00015$

Bei der Festlegung der Uranin-Konzentration mussten die Sichtbarkeitsgrenze des Uranins und die planmäßig einzusetzende Wassermenge in der Glassäule beachtet werden, um sichtbare Ergebnisse erhalten zu können. Dazu musste ebenfalls berücksichtigt werden, dass eine Kamera, eingesetzt für spätere optische Analysen, bei Aufzeichnung der Versuche eine schlechtere Aufnahmefähigkeit besitzt als das menschliche Auge. Daher musste eine Konzentration gewählt werden, die sicherheitshalber weit über der Sichtbarkeitsgrenze von Uranin liegt. Nach den allgemeinen Informationen zu Uranin, siehe *Anhang A II*, liegt die Sichtbarkeitsgrenze einer Uranin-Lösung, die in 6,4l Wasser eingesetzt werden soll, bei 0,06 mg/ml. Um auch eine gute Sichtbarkeit für die Kamera sicherstellen zu können, wurde diese Konzentration 1000fach erhöht. Die Erstellung der Uranin-Lösung wurde durch einen Laboranten durchgeführt.

Die Parameter und Randbedingungen der jeweiligen Versuchsreihen sind zur Übersicht in den folgenden Tabellen aufgelistet. Tabelle 3 und Tabelle 4 beinhalten die Parameter der ersten und zweiten Versuchsreihe, während in

Tabelle 5 die der dritten Versuchsreihe und der Versuch der vierten Reihe aufgelistet sind.

Tabelle 3: Uranin-Lösung (60mg/ml) in Wasser

Versuchsnummer	Versuchsdauer	Temperatur Wasser		Dichte Wasser	Temperatur Laborraum
[-]	[hh:mm:ss]	[°C]		[g/ml]	[°C]
1.1	120:35:03	Beginn:	21,7	≈0,997	26,7
		Ende:	27,0	≈0,996	27,5
1.2	71:14:32	Beginn:	22,9	≈0,997	27,1
		Ende:	26,4	≈0,996	26,8
1.3	44:50:10	Beginn:	24,2	≈0,997	26,1
		Ende:	25,5	≈0,996	26,0
1.4	96:12:40	Beginn:	20,4	≈0,998	21,9
		Ende:	21,5	≈0,997	21,9

Tabelle 4: Uranin-Lösung (40mg/ml) in Wasser

Versuchsnummer	Versuchsdauer	Temperatur Wasser		Dichte Wasser	Temperatur Laborraum
[-]	[hh:mm:ss]	[°C]		[g/ml]	[°C]
2.1	45:56:09	Beginn:	23,7	≈0,997	27,5
		Ende:	27,0	≈0,996	27,8
2.2	34:08:07	Beginn:	23,0	≈0,997	24,0
		Ende:	25,0	≈0,997	25,4

Tabelle 5: Uranin-Lösung (60mg/ml) in NaCl-Wasser-Lösung

Versuchsnummer	Versuchsdauer	Konz. NaCl-Wasser	Temp. NaCl-Wasser		Dichte NaCl-Wasser	Temperatur Laborraum
[·]	[hh:mm:ss]	[g/l]	[°C]		[g/ml]	[°C]
3.1	165:44:39	30,625	Beginn: Ende:	21,6 22,1	≈1,021	22,9 22,3
3.2	45:06:12	30,625	Beginn: Ende:	20,7 22,0	≈1,020	21,7 22,4
3.3	47:00:11	30,625	Beginn: Ende:	20,8 21,8	≈1,02	21,7 22,0
3.4	69:48:00	30,625	Beginn: Ende:	21,8 21,2	≈1,02	22,9 21,9
3.5	165:38:40	73,44	Beginn: Ende:	19,5 21,9	≈1,050	21,5 22,4
4.1	93:43:10	30,625	Beginn: Ende:	21,3 21,5	≈1,02	22,6 22,3

Für die Versuche 3.1 und 3.2 wurde die Dichte der NaCl-H₂O-Lösung mit einem Aräometer bestimmt. Für die darauffolgenden Versuche war das Aräometer nicht mehr verfügbar. Deshalb wurden die Dichten dieser NaCl-Wasser-Lösungen anhand von Tabellenwerten abgeschätzt. Ein Vergleich der selbst bestimmten Werten der Versuche 3.1 und 3.2 mit Tabellenwerten hat eine hohe Ähnlichkeit ergeben, weshalb man die Dichten, die nur mit Tabellen abgeschätzt wurden, als passend bezeichnen kann. Eine detaillierte Mitschrift der Dichtebestimmung durch das Aräometer ist in *Anhang B II* gegeben. Bei den Versuchen 3.1 und 3.2

wurde die Dichte der NaCl-H₂O-Lösung auf die Dichte der Uranin-Lösung abgestimmt, um einen möglichst geringen Dichteunterschied zu erhalten. Für Versuch 3.3 wurde nochmals das Dichteverhältnis der vorherigen Versuche verwendet. Zusätzlich wurden Proben aus den obersten Schichten entnommen, um so mögliche Dichte- bzw. Uranin-Konzentrationsunterschiede nachweisen zu können. Die Probenentnahme wurde mit Schläuchen, die vor dem Versuch auf der mutmaßlichen Höhe der jeweiligen Schicht angelegt wurden, ermöglicht. Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit an dem Maßstab markierten Stellen der Probenentnahme.

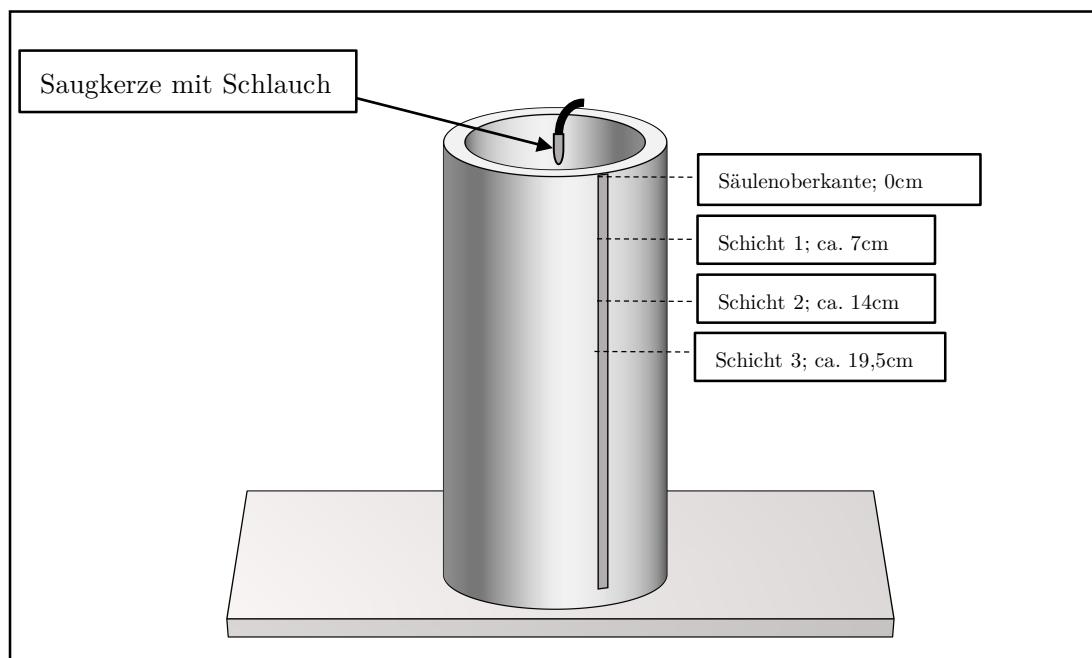


Abbildung 7: Höhen der Probenentnahmen

Versuch 3.4 wurde ebenfalls mit einem möglichst gleichen Dichteverhältnis wie in den Versuchen 3.1– 3.3 durchgeführt. Hier wurde jedoch die Eingabe der Uranin-Lösung erst 3 Wochen nach der Einstellung der NaCl-Lösung in der Säule ausgeführt. Bei Versuch 3.5 dagegen wurde die Konzentration der NaCl-Wasser-Lösung deutlich erhöht, um ein umgekehrtes Dichteverhältnis zu erreichen. Bei Versuch 4.1 wurde die Saugkerze auf etwa die Hälfte der Säulenhöhe gehängt und das Dichteverhältnis der Versuche 3.1-3.4 verwendet.

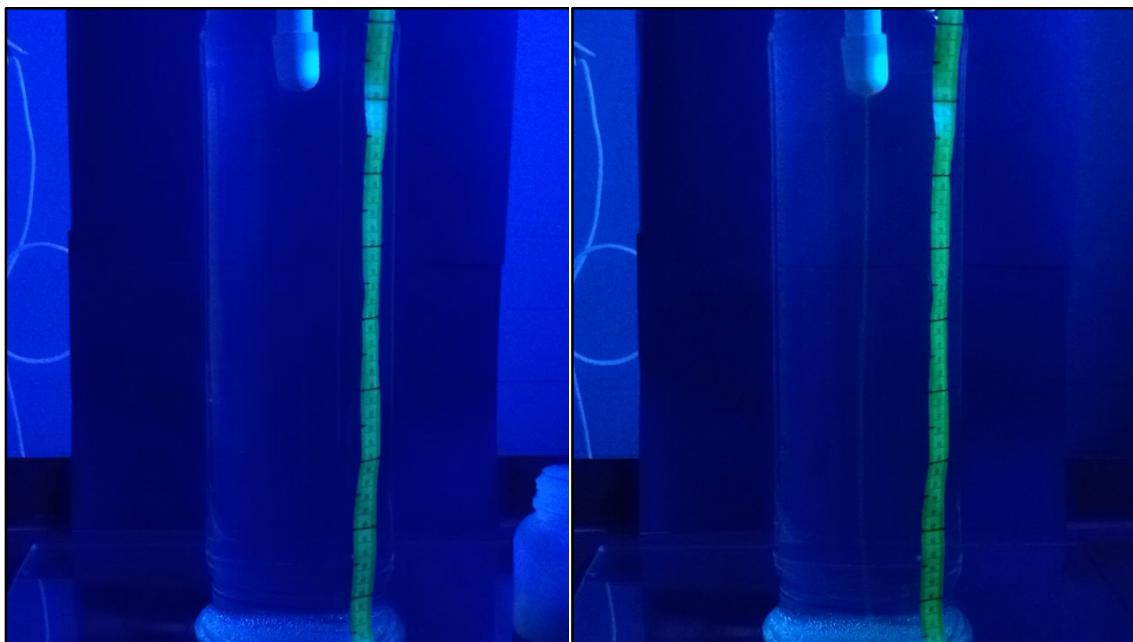
4. Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse nach Versuchsreihen sortiert dargestellt. Für jede Versuchsreihe werden beispielhaft Kameraaufnahmen eines Versuches gezeigt, um so den Fortlauf der Ausbreitung der Uranin-Lösung zu präsentieren und die spezifischen Charakteristika der jeweiligen Versuchsreihe aufzuzeigen. Alle aufgezeichneten Videos der Versuche befinden sich auf der DVD in der Anlage dieser Arbeit.

4.1. Uranin-Lösung in Wasser

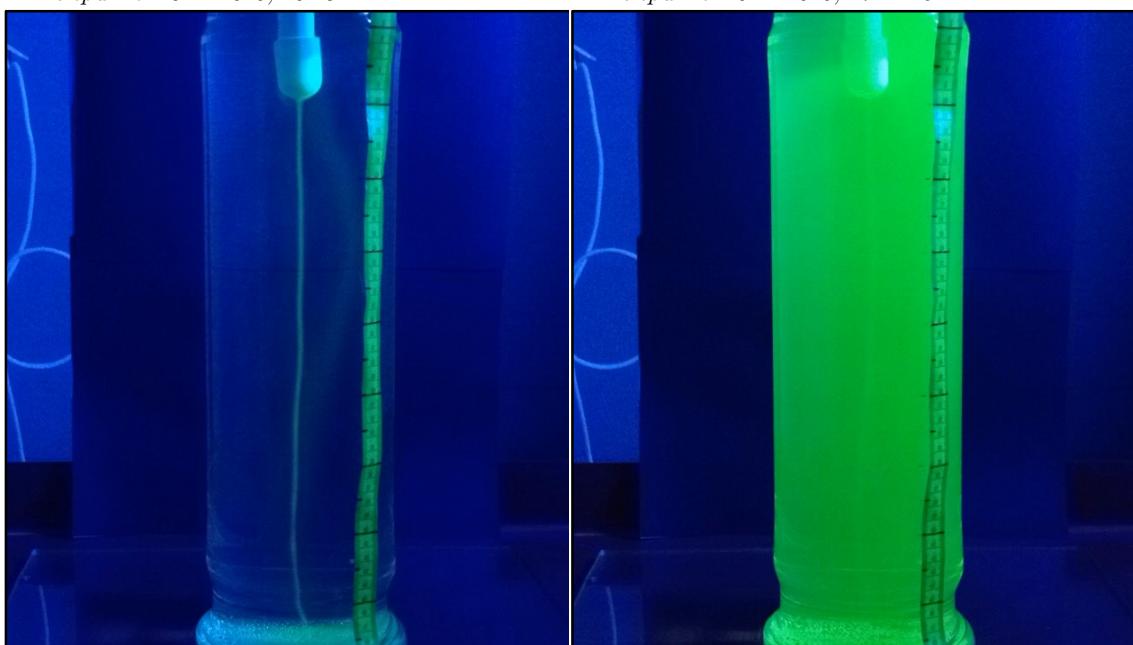
Die Versuchsreihen 1 und 2, in denen Uranin-Lösung in Wasser eingegeben wurde, zeigen zueinander ähnliche Ergebnisse. Abbildung 8a und Abbildung 8b zeigen beispielhaft den Verlauf des Versuches 1.4. Zwecks einer möglichen Verbesserung der Sichtbarkeit des Uranins wurde eine UV-Lampe genutzt, da Uranin unter Einwirkung von UV-Strahlung fluoreszierend reagiert. Der Umstand, dass Uranin unter Einfluss von UV-Strahlung abgebaut wird, konnte an dieser Stelle vernachlässigt werden, da hier nur die sichtbare Verbreitung des Uranins untersucht werden sollte und die Uranin-Konzentration irrelevant gewesen ist. Die Ergebnisse der anderen Versuche der beiden Versuchsreihen sind nahezu identisch. Es hat sich herausgestellt, dass der Eintritt der Uranin-Lösung in das Wasser erst einige Zeit nach ihrer Eingabe in die Saugkerze erfolgt ist. Die Zeit zwischen Eingabe und Eintritt hat bei jedem Versuch variiert, da sie von der Zeit der Wässerung der Saugkerze abhängig ist. Je länger die Wässerung der Saugkerze gedauert hat, desto kürzer ist die Zeit zwischen Eingabe und Eintritt gewesen, da bei längerer Wässerungszeit die Luft vollständig aus dem Material der Saugkerze entweichen konnte. Nach Eintritt in das Wasser konnte ein Absinken der Lösung in einer geraden Linie aus der Spitze der Saugkerze bis zum Boden der Säule festgestellt werden. Das Uranin hat sich anschließend zunächst am Boden ausgebreitet. Im

weiteren Verlauf ist das Uranin vom Boden der Säule an den Seiten aufgestiegen und hat sich sukzessive auf das gesamte Volumen der Säule verteilt. Zeitgleich ist aus den Seiten der Saugkerze Uranin-Lösung ausgetreten, welche sich allmählich in der Säule ausgebreitet hat. Diese Prozesse haben sich fortgesetzt, bis eine homogene Verteilung des Uranins in dem Wasser erreicht wurde.



8a: Versuchsbeginn;
Zeitpunkt: 10.12.2015, 10:23:14

8b: Anfangsstadium;
Zeitpunkt: 10.12.2015, 17:11:16



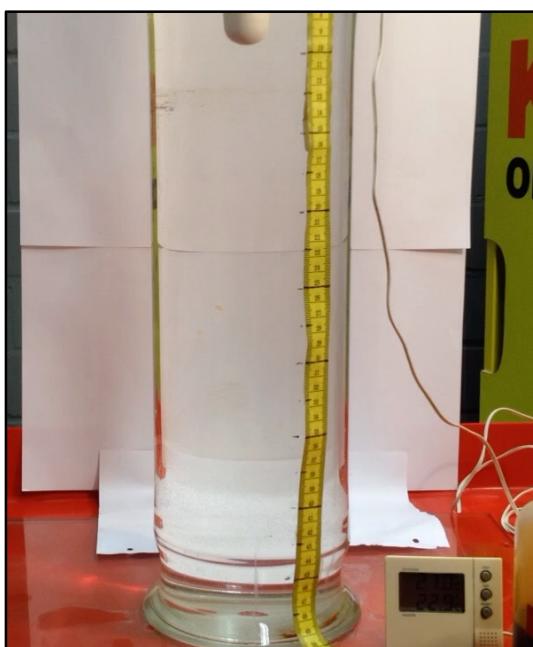
8c: Verteilung am Boden;
Zeitpunkt: 10.12.2015, 22:31:17
Abbildung 8a-d: Uranin-Lösung in Wasser

8d: homogene Verteilung;
Zeitpunkt: 14.12.2015, 10:25:34 (Versuchsende)

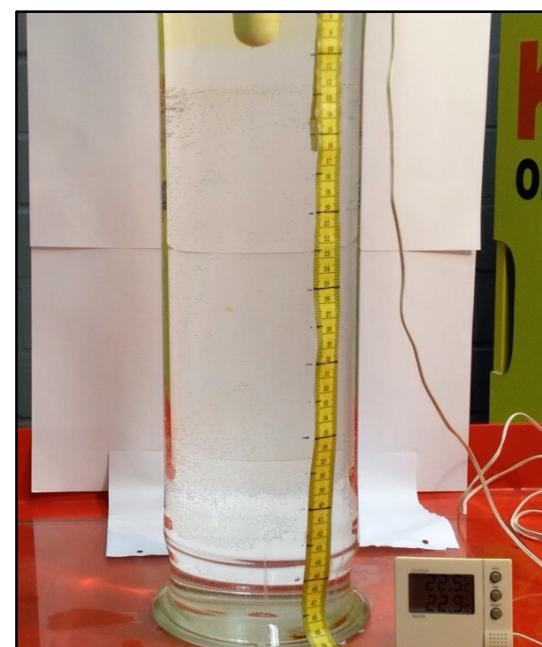
4.2. Uranin-Lösung in NaCl-Lösung

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 3, bei der Uranin in eine NaCl-Wasser-Lösung gegeben wurde, unterscheiden sich klar von denen der ersten und zweiten Versuchsreihe. Da sich die Ergebnisse der Versuche 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4 im Wesentlichen ähneln, ist in Abbildung 9 beispielhaft Versuch 3.1 dargestellt. In dem ersten Teil der dritten Versuchsreihe wurde das Verhalten der Uranin-Lösung bei einem möglichst geringen Dichteunterschied zwischen den Fluiden untersucht. Da die Dichteänderung des Wassers bei der höchstmöglichen Temperaturverringerung von 20 °C auf 0 °C mit einer Dichteänderung von 0,998 g/ml auf 0,999 g/ml [Anhang C II] zu gering ausfällt, um einen möglichst geringen Dichteunterschied zu der Uranin-Lösung zu erreichen, wurde hier mit NaCl die Dichte des Wassers in der Säule entsprechend der Uranin-Lösung angehoben. Des Weiteren konnte so auch eine mögliche Situation in einem Grubenschacht simuliert werden, deren Wasser ebenfalls hohe, z.T. auch deutlich höhere Salinitäten aufweisen können. In den Versuchen wurde allerdings ausschließlich NaCl verwendet, wogegen in einer realen Situation deutlich mehr Salzarten zu erwarten sind. Somit ist dies also nur als eine grobe Annäherung zu betrachten. Die tatsächliche Aussagekraft dieser Möglichkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht überprüft werden. Wie bei den Versuchen der ersten beiden Versuchsreihen konnte der eigentliche Eintritt der Uranin-Lösung in die NaCl-Wasser-Lösung erst einige Zeit nach Versuchsbeginn beobachtet werden. Es wurden bei diesen Versuchen sogar deutlich größere Zeitabstände festgestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen konnte die Bildung einer Linie nicht beobachtet werden. Stattdessen konnte, wie in Abbildung 8b ersichtlich, bei der ersten Sichtbarkeit eine Ansammlung des Uranins auf der Höhe der Saugkerze festgestellt werden. Darüber hinaus hat sich eine deutliche Grenze, eine sogenannte Schichtgrenze, gebildet unter der die NaCl-Wasser-Lösung von der Uranin-Lösung nicht verfärbt wurde. Es hat

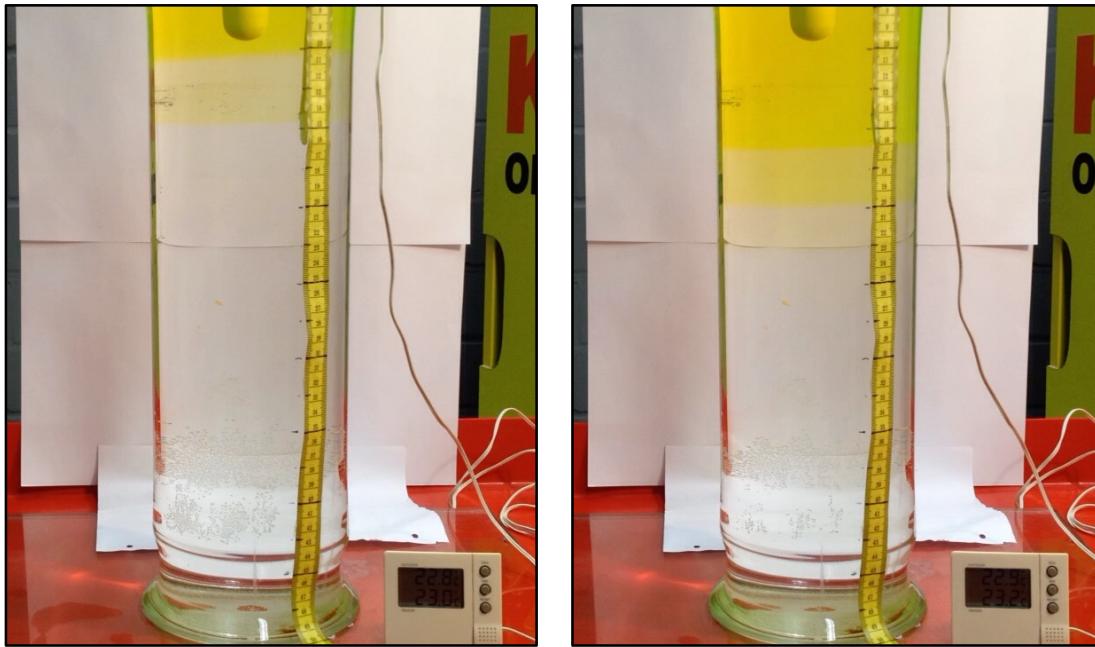
sich hier eine Art Schichtgrenze gebildet. Der Austritt der Uranin-Lösung erfolgte außerdem in erster Linie nicht über die Spitze der Saugkerze, sondern nahezu gleichmäßig verteilt über die gesamte Kerze. In den Abbildungen 9c und 9d, mit denen der weitere Versuchsablauf gezeigt wird, ist zu sehen, dass sich weitere „Uranin-Schichten“ von oben nach unten gebildet haben. Diese Schichten sind durch einen deutlichen Unterschied der Intensität der Verfärbung gekennzeichnet, wobei die Intensität der nachfolgenden Schicht immer geringer ist als die der vorhergegangenen. Alle Schichten weisen außerdem scharf ausgebildete Grenzen auf. Allerdings verschwinden die zuvor deutlichen Grenzen der oberen Schichten im weiteren Verlauf des Versuches. In Abbildung 9d ist zu sehen, dass der noch in Abbildung 9c deutlich sichtbare Unterschied der oberen Schichten verschwunden ist und dass sich hier eine nahezu homogene Verfärbung und Verteilung eingestellt hat. In dem weiteren Ablauf hat sich gezeigt, dass jeder anfängliche Unterschied einer neuen Schicht nach einer gewissen Zeit durch die homogene Verteilung aufgelöst wurde. Die Uranin-Lösung hat sich also schichtenweise in der Säule abwärts bewegt und erst im Nachzug gleichmäßig verteilt.



9a: Versuchsbeginn;
Zeitpunkt: 14.09.2015, 13:25:33



9b: Anfangsstadium;
Zeitpunkt: 14.09.2015, 23:33:36



9c: Bildung der ersten Schichten;

Zeitpunkt: 15.09.2015, 21:27:41

Abbildung 9a-d: Uranin-Lösung in NaCl-H₂O-Lösung ähnlicher Dichte

9d: schichtenweises Ausbreiten des Uranins;

Zeitpunkt: 17.09.2015, 20:29:52

Zu den entnommenen Proben von Versuch 3.3 wurden mittels des Masse-Volumen-Verhältnis die jeweilige Dichten abgeschätzt und mit photometrischem Analyseverfahren die Uranin-Konzentration bestimmt. In Tabelle 6 sind die ermittelten Dichten und Konzentrationen aufgelistet. Auch hier sind die in blau geschriebenen Werte Dichten, die nach Gleichung 3.3.2 berechnet sind. Die zuvor erläuterten Einschränkungen dieser Berechnung gelten hier ebenfalls.

Tabelle 6: Ermittelte Werte der Probenentnahme

Probe [-]	Dichte [g/ml]	Uranin-Konzentration [ppb]
Schicht 1 (7cm)	1,017 ≈1,0002	19,5
Schicht 2 (14cm)	1,015 ≈1,0002	1050
Schicht 3 (19,5cm)	1,016 ≈1,0002	6000

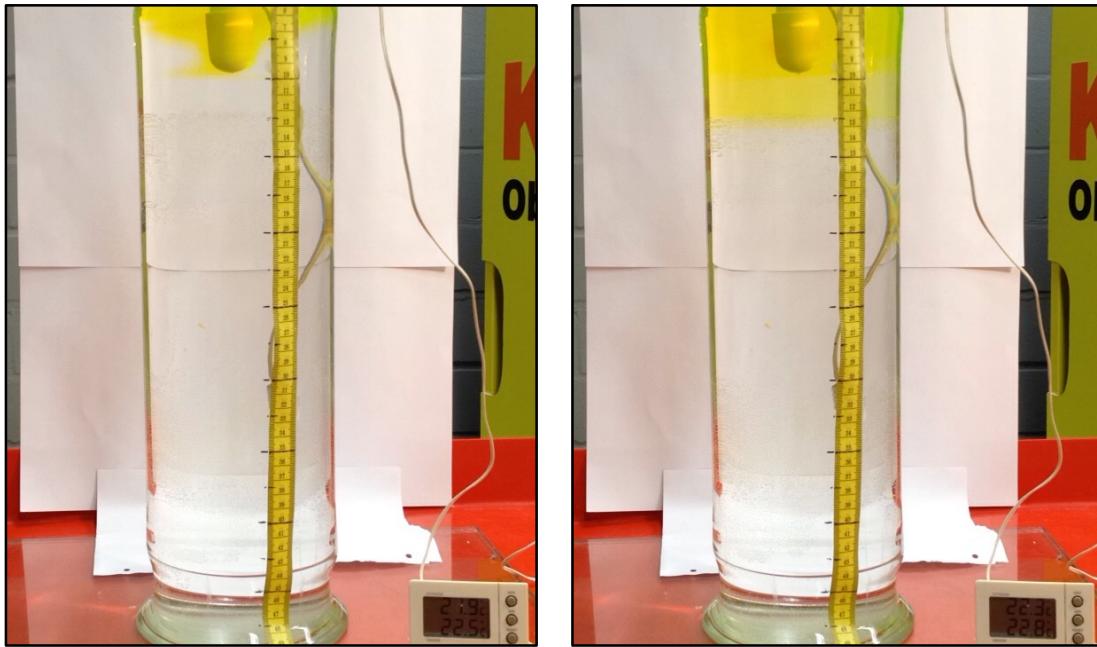
Um den Dichteunterschied in entgegengesetzter Richtung zu erhöhen, das heißt, um die Uranin-Lösung in ein leicht dichteres Fluid in der Säule eingeben zu können, wurde in einem neuen Versuch die NaCl-Wasser-Lösung auf ca. 1,05 g/ml eingestellt. Es wurde hier nur eine relativ geringe Erhöhung der Dichte der NaCl-Wasser-Lösung gewählt, um einen ungefähr gleich großen Dichteunterschied wie in den Versuchen 1.1– 2.2 zu erhalten. Der Versuchsablauf von Versuch 3.5 wird in Abbildung 10 gezeigt. Die Wahl der gleichen Zeitabstände von Versuchsbeginn an, die auch in Abbildung 9 gewählt wurden, ermöglichen hier einen direkten Vergleich der beiden Versuche miteinander. Bei Versuch 3.5 breitet sich die Uranin-Lösung, ähnlich wie in Versuch 3.1, zunächst in der Umgebung der Saugkerze aus, wobei hier die Verbreitung deutlich begrenzter auftritt (*vgl. Abbildung 9b und Abbildung 10b*). Der weitere Ablauf, siehe Abbildung 10c und 10d bzw. 8c und 8d, zeigt eine ebenfalls deutlich langsamere Ausbreitung der Uranin-Lösung als in Versuch 3.1. Es folgt gleichermaßen ein schichtenweises Absinken der Uranin-Lösung, jedoch in einem signifikant längeren Zeitraum.



10a: Versuchsbeginn;
Zeitpunkt: 28.09.2015, 13:12:04



10b: Anfangsstadium;
Zeitpunkt: 28.09.2015, 23:20:07



10c: weitere Ausbreitung;

Zeitpunkt: 29.09.2015, 21:14:12

10d: Bildung der ersten Schicht;

Zeitpunkt: 01.10.2015, 20:16.23

Abbildung 10a-d: Uranin-Lösung in NaCl-H₂O-Lösung höherer Dichte

Die Ergebnisse des Versuchs 4.1 werden in Abbildung 11 gezeigt. Während sich der Versuchsbeginn stark von denen der anderen Versuche unterscheidet, konnte zum Ende hin eine ähnliche schichtenweise Ausbreitung der Uranin-Lösung beobachtet werden. Der Austritt erfolgte nicht nur über die Saugkerze, sondern auch über einzelne Schlauchverbindungen, was auf mangelnde Möglichkeiten zur Abdichtung der Verbindungen zurückzuführen ist. Des Weiteren ist zu bemerken, dass die Uranin-Lösung nach der Eingabe in die Saugkerze und vor dem Austritt in die Säule zunächst in dem verlängerten Schlauch nach oben ansteigt (Abbildung 11b). Wie in Abbildung 11c zu sehen ist, konnte außerdem beobachtet werden, dass die Uranin-Lösung auch nach dem Austritt, auch aus der Saugkerze, in der NaCl-H₂O-Lösung sich zuerst oberhalb der Spitze der Saugkerze homogen verteilt. Des Weiteren steigt die Uranin-Lösung zunächst in Fahnen auf. Diese Beobachtung kann jedoch auf den Einzelbildern nicht erkannt werden. Erst zum

Schluss findet die schichtenweise Ausbreitung nach unten hin statt (*siehe Abbildung 11d*). Diese Ausbreitung nach unten hin weist die selben Merkmale auf wie die Ausbreitungen in den anderen Versuchen.



11a: Versuchsbild am Anfang des Versuchs;

Zeitpunkt: 08.10.2015, 12:24:52



11b: Anstieg in Schlauch

Zeitpunkt: 08.10.2015, 13:20:52



11c: Verbreitung oberhalb der Saugkerze

Zeitpunkt: 09.10.2015, 04:24:55

Abbildung 11a-d: geänderte Höhe der Saugkerze



11d: Verbreitung unterhalb der Saugkerze

Zeitpunkt: 10.10.2015, 09:25:02

5. Interpretation der Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte umfassen die Interpretationen der Ergebnisse. Wenn möglich werden die Versuche nach festgelegten Kategorien verglichen, um so Ähnlichkeiten oder Abweichungen aufzuzeigen. Plausible Erklärungen für die zuvor erlangten Daten und dargestellten Ergebnisse sollen gegeben und diese mit Theorien und Beweisen erklärt werden. Die Interpretationen folgen der gleichen Reihenfolge, die bei den Präsentationen der Ergebnisse vorgenommen wurde. Ebenso sollen auch Verbindungen zwischen den unterschiedlichen Versuchen hergestellt werden. Es soll zudem erläutert werden, inwiefern Diffusions- bzw. Konvektionsprozesse Einfluss auf die Ergebnisse nehmen oder ob auch andere Prozesse oder Kräfte Einwirkung zeigen. Falls dies der Fall sein sollte, soll erklärt werden, welcher der teilhabenden Prozesse bzw. Kräfte den bedeutendsten Einfluss ausübt.

5.1. Versuchsreihen 1 und 2: Uranin-Lösung in Wasser

In Abbildung 12 werden die Versuche der ersten und zweiten Versuchsreihe grafisch miteinander verglichen. Hier sind verschiedene sichtbare Ereignisse der einzelnen Versuche gegen den jeweiligen Zeitpunkt des Eintretens aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass die dokumentierten Ereignisse der jeweiligen Versuche in ähnlichen Zeiträumen ablaufen. Während die Versuche 1.1, 1.3 (60 mg/ml Uranin) und 2.1 (40 mg/ml Uranin) in nahezu übereinstimmenden Zeiträumen ablaufen, weisen Versuch 1.2 (60 mg/ml Uranin), mit einem schnelleren Ablauf, und Versuch 2.2 (40 mg/ml Uranin), mit einem langsameren Ablauf, eine deutliche Abweichung auf. Der schnellere Ablauf in Versuch 1.2 lässt sich mit einer während der Versuchsdurchführung aufgetretenen Undichtigkeit der Säule erklären, die zum Auslauf des Wassers geführt hat. Mit Auslaufen des Wassers ist auch das Uranin ausgelaufen, was ein schnelleres Absinken und damit den beobachteten schnelleren Ablauf zur Folge hatte. Für die langsamere Abfolge in Versuch

2.2 konnte keine offensichtliche Erklärung gefunden werden. An dieser Stelle muss jedoch beachtet werden, dass durch die reine optische Auswertung Fehlinterpretationen durch subjektive Wahrnehmung verursacht werden können. So besteht bei der zeitlichen Einordnung der sichtbaren Ereignisse das Risiko sie zu früh oder zu spät festzulegen. Da die Abweichungen nicht stark ausfallen, beweist Abbildung 12, trotz der genannten Unsicherheit des Auswerteverfahrens, die systematische Wiederholbarkeit der Eingabe der Uranin-Lösung mit einer Saugkerze. Versuch 1.4 (60 mg/ml Uranin) hebt sich in dieser Darstellung zum Ende hin deutlich von den anderen ab. Hierbei wurde eine UV-Lampe genutzt wurde. Sie sollte zu einer Verbesserung der Sichtbarkeit des unter UV-Strahlung fluoreszierenden Uranins führen. Zum Zeitpunkt des ersten sichtbaren Auftretens und der allgemeinen Verteilung konnte dies jedoch nur bedingt erreicht werden, da das Uranin in schwach konzentrierter Form kaum fluoresziert und somit mit der Kamera kaum bis gar nicht besser erfasst werden konnte. Zum Ende des Versuchs hin konnte jedoch die Fluoreszenz dazu genutzt werden, deutlich länger zwischen homogener und noch inhomogener Verteilung zu unterscheiden.

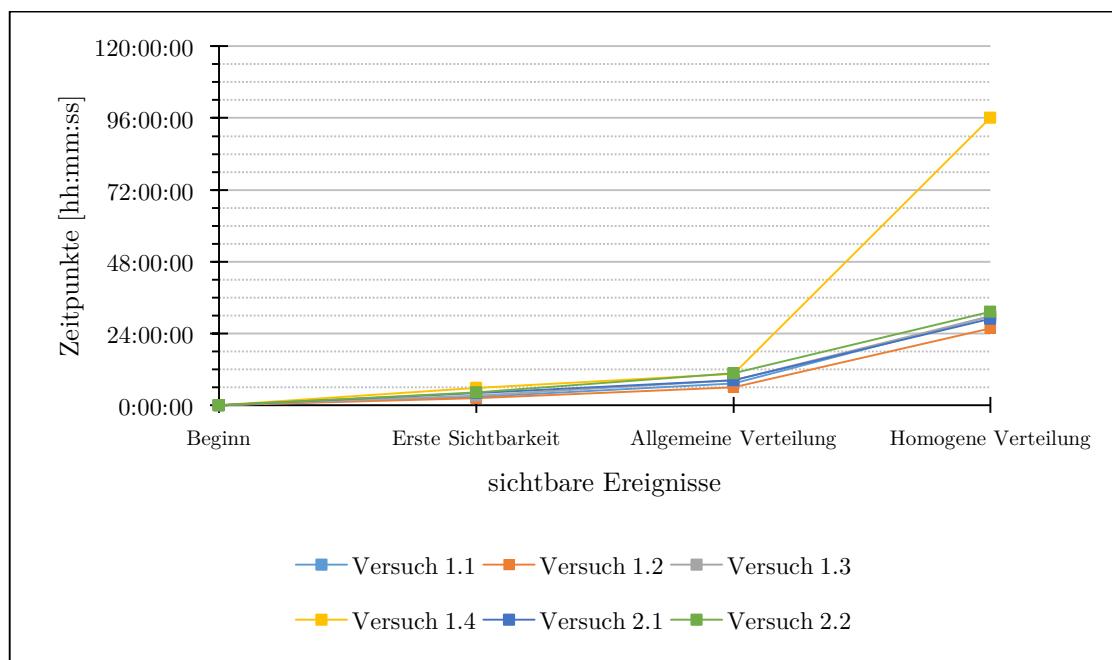


Abbildung 12: Vergleich der Versuche 1.1 – 2.2

Das von Beginn an auffälligste Merkmal der ersten und zweiten Versuchsreihe, in Abbildung 8 beispielhaft dargestellt, ist der hohe Dichter Unterschied zwischen der Uranin-Lösung und dem in der Säule befindlichen Wasser. Man kann zu Beginn bereits davon ausgehen, dass dieser Unterschied Einfluss auf das Ergebnis haben muss, da die Dichte von Fluiden entscheidend darüber ist, inwieweit das Fluid von der Gravitation der Erde beeinflusst wird. Folglich ist auch der Dichteunterschied zwischen zwei Fluiden entscheidend darüber, wie hoch der Einfluss der Gravitation bei einer Vermischung ist. Je größer der Dichteunterschied, desto stärker der Einfluss der Gravitation auf die schwerere Flüssigkeit. Wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt, handelt es sich bei der reinen Diffusion um einen Prozess, der auf molekularer Ebene stattfindet und durch äußere Krafteinwirkung begünstigt und somit beschleunigt werden kann. Diese Krafteinwirkung muss nicht zwangsläufig künstlichen Ursprungs sein, wie es bei Schütteln oder Rühren der Fall wäre, sondern kann auch natürlicherweise vorkommen. Die Gravitation ist als eine solche natürliche Krafteinwirkung zu verstehen, die über die Dichte und den Dichteunterschied unmittelbaren Einfluss auf den diffusiven Transport nimmt. In den Versuchen wird dies durch den Verlauf der Uranin-Lösung in dem Wasser erkennbar. Das Uranin sinkt zunächst in einer geraden Linie ab und verteilt sich dann am Boden, da der Dichteunterschied so hoch ist, dass die schwerere Uranin-Lösung direkt von der Gravitation nach unten gezogen wird. Das Absinken der Lösung in Form einer geraden Linie ist dadurch zu erklären, dass die Saugkerze als zylindrisches Objekt die Form vorgibt, in der die Uranin-Lösung zunächst angesammelt wird und dann erst sukzessive in das Wasser gelangt. In Abbildung 8c ist diese Linie nicht gerade, da bereits kleinere Erschütterungen des Bodens Bewegungen in dem Wasser auslösen können, die dementsprechend auch zu sichtbaren Bewegungen der Uanin-Lösung führen. Der Austritt der Lösung erfolgt zunächst nur über die Spitze der Saugkerze, da sich hier der tiefste Punkt der Lösung in der Kerze befindet und somit der höchste Druck vorherrscht. Erst

im Nachhinein tritt Uranin-Lösung auch durch die höhergelegenen Seitenwände der Saugkerze in das Säulenwasser aus. Die anschließende vorläufige Verteilung am Boden der Säule ist ebenfalls durch die höhere Dichte der Uranin-Lösung zu erklären. Da die Säule nur begrenzten Platz bietet, steigt die Uranin-Lösung in dem Wasser auf, was mit weiterem Fortschritt des Versuchs zu einer mächtiger werdenden Zone höherer Uranin-Konzentration am Boden geführt hat. Während des Absinkens und der Verteilung am Boden konnten Verschlierungen der Uranin-Lösung erkannt werden. Mit der Kamera konnten diese nur sehr schwach erkennbar aufgenommen werden konnten. Der Einsatz einer UV-Lampe hat dabei zu einer deutlich verbesserten Erkennbarkeit geführt. Diese Schlieren sind durch geringe Bewegungen, die bei dem Absinken der Uranin-Lösung entstehen, zu erklären. Es ist der Effekt der Eddy-Diffusion, also der turbulenten Diffusion, beobachtbar. Man kann dies ebenfalls durch den hohen Dichteunterschied, der zwischen der Uranin-Lösung und dem Wasser der Säule besteht, erklären. Die Uranin-Lösung wird durch den hohen Unterschied so stark erfasst, dass sie mit relativ hoher Geschwindigkeit absinkt und Turbulenzen entstehen können. Die abschließende homogene Verteilung der Uranin-Lösung in der Säule ist durch die weitere Verteilung von unten und durch Absinken der aus den Seiten der Saugkerze ausgetretenen Uranin-Lösung entstanden. Wie in Tabelle 3 und Tabelle 4 ersichtlich treten während der Versuche mehr oder minder starke Temperaturerhöhungen auf. Diese sind durch die zu der Zeit vorherrschenden sommerlichen Bedingungen verursacht worden, die direkten Einfluss auf die Raumtemperatur des Labors hatten. Durch die relativ hohe Raumtemperatur wurde das kühlere Wasser in der Säule erwärmt. Dabei konnten Temperaturerhöhungen von minimal 1,4 °C (Versuch 1.3) bis maximal 5,9 °C (Versuch 1.1) festgestellt werden. Die voneinander abweichenden Temperaturerhöhungen während der Versuche sind dadurch zu stande gekommen, dass zunächst die Temperaturänderungen in den Versuchen 1.1 und 1.2 nicht berücksichtigt wurde und die Versuche ohne eine Anpassung

der Wassertemperatur an die Raumtemperatur nach Befüllung der Säule gestartet wurden. In den Versuchen 1.3, 1.4 und 2.1 wurde diese Anpassung jedoch weitestgehend beachtet und abgewartet. Ein Vergleich der Versuchsergebnisse der ersten und zweiten Versuchsreihe zeigt, dass die Temperaturerhöhungen zu kleinen ersichtlichen Änderungen des Diffusionsverhaltens der Uranin-Lösung geführt haben. Der Dichteunterschied zwischen der Uranin-Lösung und dem Wasser ist zu hoch, als dass es zu sichtbaren Auswirkungen der Temperaturänderungen kommen kann, da sich die Dichte des Wassers in der dritten Dezimalstelle ändert, während der Dichteunterschied der beiden Fluide deutlich höher ist. Der Dichteunterschied ist also zu hoch bzw. die Dichteerhöhung des Wassers zu gering.

5.2. Versuchsreihe 3 und 4: Uranin-Lösung in NaCl-Lösung

In Abbildung 13 werden die Entstehungen der einzelnen Schichten der Versuche der dritten und vierten Versuchsreihe nach der Zeit miteinander verglichen. Die in Abbildung 13 dargestellten Versuche zeigen als Gemeinsamkeit eine zum Säulenboden hin schichtweise Ausbreitung der Uranin-Lösung. Daher wird auf der x-Achse die Entstehung der einzelnen Schicht gegen den jeweiligen Entstehungszeitpunkt aufgezeichnet. Die Versuche 3.1–3.4 wurden alle mit einem möglichst geringen Dichteunterschied zwischen NaCl-Lösung der Säule und der Uranin-Lösung unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt. Daher müssten sie in einem direkten Vergleich einen nahezu identischen Verlauf aufweisen. Die Verläufe von Versuch 3.1 und 3.3 erfüllen diese Erwartungen bis auf geringe Abweichungen sehr gut. Diese Abweichungen können hier ebenfalls durch die zuvor genannten Unsicherheiten bei der optischen Wahrnehmung erklärt werden. Versuch 3.4, bei dem die Uranin-Eingabe erst 3 Wochen nach der Eingabe des NaCl in das Wasser der Säule getätigt wurde, weist die mit Abstand schnellste Ausbildung der Schichtgrenzen auf. Zudem ist es hier nur zur Ausbildung von 2 Grenzen gekommen. Mit der Wartezeit bis zur Eingabe der Uranin-Lösung sollte überprüft

werden, ob es nach dieser Zeit zu Veränderungen der NaCl-Verteilung in dem Wasser der Säule kommt und ob dies evtl. Auswirkungen auf die Verteilung der Uranin-Lösung nimmt. Der Versuch weist klare Veränderungen auf. Auf die Verteilung der NaCl-Lösung in der Säule wird jedoch noch an einem späteren Punkt in der Arbeit eingegangen. Versuch 3.2 weist ebenfalls eine schnelle Verteilung der Uranin-Lösung auf. Da hier jedoch das Vorgehen von Versuch 3.1 übernommen wurde, sollten keine hohen Abweichungen auftreten. Für diese Abweichungen konnte keine präzise Erklärung gefunden werden. Möglicherweise sind hier bei der Durchführung bzw. Vorbereitung des Versuches Fehler unterlaufen, die nicht zurückverfolgt werden können. Des Weiteren zeigt die Auswertung, dass Versuch 3.5 den langsamsten Ablauf aufweist. Mit einer zunächst nur geringen Abweichung zeigt sich diese bei der Entstehung der dritten Schicht am deutlichsten. Hier liegt eine zeitliche Differenz von fast 24 Stunden vor. Dieses Verhalten lässt sich durch den hier eingestellten Dichteunterschied erklären. Die Dichte der NaCl-Lösung in der Säule ist mit 1,0 g/ml leicht höher als die Dichte der Uranin-Lösung mit 1,022 g/ml. Eigentlich würde das bedeuten, dass die Uranin-Lösung gar nicht absinken kann. Der Dichteunterschied ist jedoch mit 0,028g/ml nicht besonders hoch, wodurch bereits kleine Abweichungen bei der Dichtebestimmung der Uranin- bzw. NaCl-Lösung dazu führen können, dass der Dichteunterschied in der Versuchsdurchführung doch geringer ist als ursprünglich geplant. Ein weiterer Grund für das Absinken der vermeintlich leichteren Uranin-Lösung in die eigentlich schwerere NaCl-Lösung könnte eine inhomogene Verteilung des NaCl in dem Wasser der Säule sein. Dieser Umstand wird an nachfolgender Stelle näher erläutert. Versuch 4.1, bei dem die Saugkerze auf die halbe Höhe der Säule gehängt wurde, zeigt einen vergleichbaren zeitlichen Aufbau wie die Versuche 3.1 – 3.5. Die Ausbildung der Schichten, ebenfalls unterhalb der Saugkerze, liegt zwischen den Schichtausbildungen der Versuche 3.1 – 3.4 und dem Versuch 3.5. Im Vergleich mit Versuch 3.1 liegt ab der zweiten Schicht eine zeitliche Differenz von

ungefähr 10 Stunden vor, die zu den Versuchen 3.2, 3.3 und 3.4 kaum anders ausfällt. Auch in Anbetracht etwaiger Unsicherheiten der optischen Wahrnehmung fällt die Differenz zwischen Versuch 4.1 und den Versuchen 3.1 – 3.4 deutlich höher aus als die bereits diskutierten Unterschiede zwischen den Versuchen 3.1 – 3.4, obwohl auch in Versuch 4.1 der gleiche Dichteunterschied durch gleiche Mengen von NaCl und Wasser eingestellt wurde. Läge eine homogene Verteilung des NaCl in dem Wasser der Säule vor, müssten die Ausbildungen der Schichten dieser fünf Versuche nach der Zeit gleich bzw. sehr ähnlich sein.

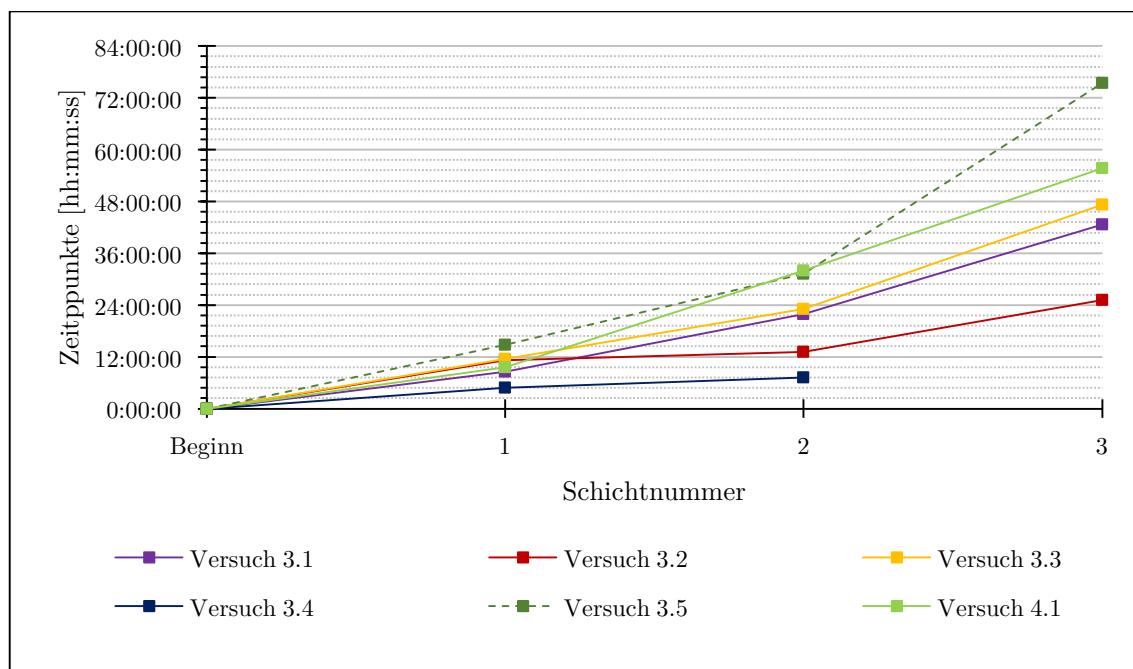


Abbildung 13: Vergleich der Versuche 3.1 – 4.1

Die Versuche 3.1 – 4.1 weisen also trotz verschieden eingestellter Parameter und Abläufe unterschiedlicher Geschwindigkeiten gewisse Ähnlichkeiten zueinander auf. Diese Gemeinsamkeiten drücken sich in der Art des Uranin-Absinkens und zum Teil in ihrer zeitlichen Abfolge aus. Allerdings sind die Schichtgrenzen nicht ortsgebunden. Zum einen konnte ein Absinken jeder Schichtgrenze während der Versuchsdauer um wenige Zentimeter beobachtet werden. Zum anderen bilden sich die Schichtgrenzen in den unterschiedlichen Versuchen auf unterschiedlichen

Höhen aus. So bildet sich zum Beispiel die erste Schichtgrenze in Versuch 3.1 bei etwa 10cm unterhalb der Säulenoberkante, während die Grenze in Versuch 3.3 bei 12cm unter Säulenoberkante gebildet wird.

Für das Absinken der Uranin-Lösung in Form einzelner Schichten können mehrere Erklärungen gegeben werden. Betrachtet man die Versuche 3.1 – 3.4 und 4.1 könnte man diese Art des Absinkens auf den geringen Dichteunterschied zurückführen. Die Gravitation hat dadurch einen deutlich geringeren Einfluss auf das Absinken der Uranin-Lösung bzw. der statische Auftrieb der Uranin-Lösung ist größer als bei den Versuchen der ersten und zweiten Versuchsreihe. Die eigentliche Entwicklung der einzelnen Schichten könnte man mit folgenden Vorgängen erklären. Die Dichte der Uranin-Lösung ist möglicherweise aufgrund von Messfehlern höher als berechnet und somit deutlich höher als die der NaCl-Lösung. Die Uranin-Lösung tritt daher zu Beginn eines Versuches zunächst in nicht sichtbaren Konzentrationen aus der Saugkerze aus und sinkt wenige Zentimeter ab. Durch das Absinken wird die Uranin-Lösung weiter verdünnt bis zu der NaCl-Lösung ein Dichteverhältnis erreicht wird, an dem weiteres Absinken nicht mehr möglich ist. Gleichzeitig sinkt weitere Uranin-Lösung bis zu jenem Punkt ab. Oberhalb dieser Grenze kommt es zu einer Erhöhung der Uranin-Konzentration in den sichtbaren Bereich und eine erste scharfe Grenze bildet sich aus. Darüber entsteht die erste mit Uranin gefärbte Schicht. Zeitgleich wird an der Schichtgrenze wieder ein Dichtepunkt überschritten, ab dem wieder Uranin im nicht sichtbaren Bereich absinken kann, bis die Verdünnung wieder zu groß ist. Durch sukzessives weiteres Absinken aus der ersten Schicht wird die zweite Schicht sichtbar. Durch eine ständige Wiederholung dieser Prozesse könnte die Uranin-Lösung bis zu dem Boden der Säule schichtenweise absinken. Proben, die aus den drei Schichten eines Versuches entnommen wurden, wurden auf Dichte und Uranin-Konzentration untersucht und in Tabelle 6 aufgelistet. Neben einer nur leichten

Änderung der Dichte von 0,001 – 0,002g/ml haben die Untersuchungen deutliche Konzentrationsunterschiede des Uranins ergeben, die bereits an der unterschiedlich starken Einfärbung der jeweiligen Schichten erkannt werden konnten. Die starke Ausbildung der Schichtgrenzen lässt hier vermuten, dass der Übergang der Konzentrationsänderung ebenfalls sehr prägnant ausfällt.

Versuch 3.5, bei dem eigentlich ein Dichteverhältnis mit einer dichteren NaCl-Lösung eingestellt werden sollte, zeigt eine ähnliche Verteilung der Uranin-Lösung wie die vorherigen Versuche der dritten Versuchsreihe. Hier verläuft die Ausbreitung jedoch deutlich langsamer ab. Wäre die Dichte der NaCl-Lösung jedoch tatsächlich höher als die der Uranin-Lösung, dürfte es zu gar keinem Absinken der Uranin-Lösung kommen. Dennoch verläuft diese auch schichtenweise ab. Ein Grund dafür könnte ebenfalls eine fehlerhafte Ermittlung der Dichte der Uranin-Lösung bzw. der NaCl-Lösung sein. Ist dies der Fall, könnte ein ähnliches, wahrscheinlich etwas geringeres Dichteverhältnis wie bei den Versuchen 3.1 – 3.4 vorliegen. Dabei könnten dann die bereits beschriebenen Vorgänge zur Verteilung der Uranin-Lösung entstehen. Fehler bei der Bestimmung bzw. Einstellung der Dichten der verschiedenen Fluide können nicht ausgeschlossen werden. Diese Problematik wird jedoch in Abschnitt 6.2 „Fehlerbetrachtung“ näher erläutert.

Als eine weitere Ursache für das schichtenweise Absinken der Uranin-Lösung könnte eine inhomogene bzw. schichtenweise Verbreitung des NaCl in dem Säulenwasser sein. Hierzu gibt es verschiedene Anhaltspunkte und Messungen, die im Folgenden erläutert und diskutiert werden.

Die Tiefen, von der Säulenoberkante aus gemessen, in der die einzelnen Schichtgrenzen ausgebildet wurden, variieren von Versuch zu Versuch. Während die Versuche 3.1 und 3.3 aufgrund gleichen Vorgehens vergleichbare Tiefen und Zeiten

der Grenzbildung aufweisen und Versuch 3.2 zwar ähnliche Tiefen aber aus unbekannten Gründen einen schnelleren Ablauf aufweist, konnte dagegen in Versuch 3.4 die Ausbildung von zunächst zwei, anschließend jedoch nur noch einer Schichtgrenze beobachtet werden, die zu dem eine deutliche größere Tiefe aufweisen. Zur Veranschaulichung werden in Abbildung 14 die Tiefen der verschiedenen Schichtgrenzen der Versuche graphisch zueinander dargestellt.

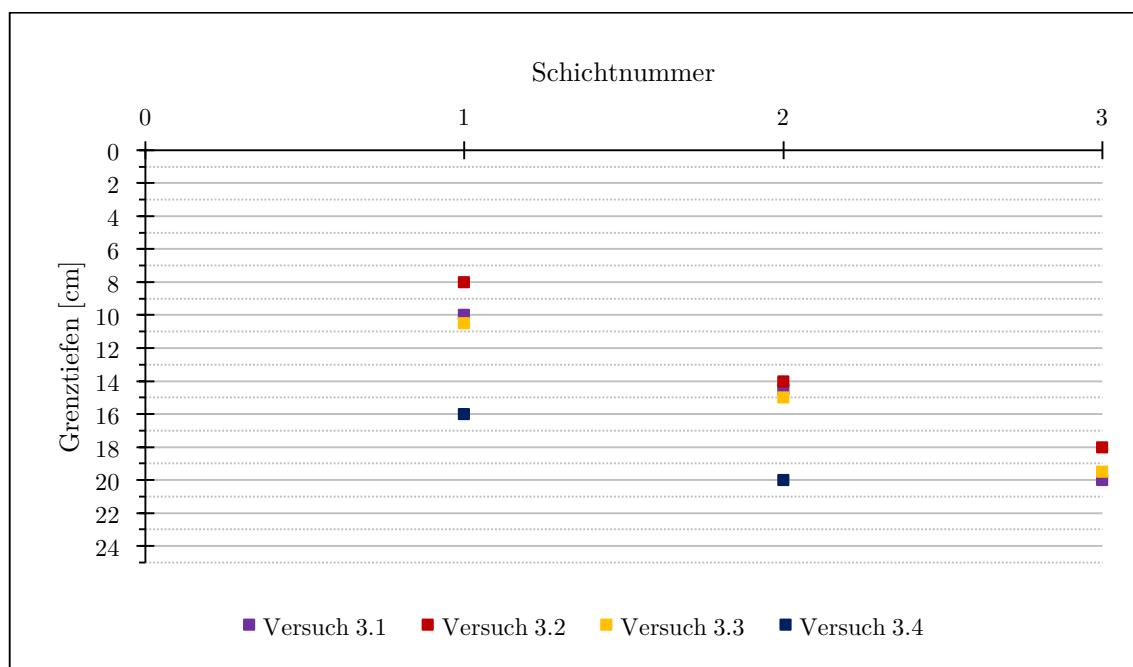


Abbildung 14: Vergleich der Grenztiefen

Der Grund für die in Versuch 3.4 auftretenden Unterschiede liegt vermutlich darin, dass die Eingabe der Uranin-Lösung erst 3 Wochen nach der Herstellung der NaCl-Lösung erfolgte. Nähere Hinweise für die Ursache dieses Unterschiedes haben Messungen der elektrischen Leitfähigkeit bei den Versuchen 3.3 und 3.4 ergeben. Die Höhe der elektrischen Leitfähigkeit wird über die Menge der vorhandenen Ionen, maßgeblich Chlorid-Ionen, bestimmt und ist somit ein guter Indikator für die vor Ort tatsächlich vorhandene NaCl-Konzentration bzw. Dichte der Lösung. In Versuch 3.3 wurde die erste Messung einige Stunden nach Erstellung der NaCl-Lösung und direkt vor Eingabe der Uranin-Lösung und die zweite Messung direkt nach Beendigung des Versuches durchgeführt. In Versuch 3.4 wurden

sowohl mehrere Messungen in Abstand von jeweils einigen Tagen als auch jeweils eine Messung direkt vor der Eingabe der Uranin-Lösung und der Beendigung des Versuches getätigt. Die Wahl der Messtiefen hat sich dabei an den Tiefen, in denen sich bei den vorherigen Versuchen Schichten gebildet haben, orientiert. Die ermittelten elektrischen Leitfähigkeiten des Versuches 3.3 sind in Abbildung 15 dargestellt. Der Versuch zeigt sowohl bei Versuchsbeginn als auch bei Versuchsende eine deutliche Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit mit zunehmender Tiefe der Säule. Die Konzentration des Natriumchlorids und somit die Dichte der Lösung steigt also mit zunehmender Tiefe. Die Messreihen von Beginn und Ende des Versuches unterscheiden sich dabei nur gering voneinander, wobei die Messungen an dem unteren Ende der Säule höhere Leitfähigkeiten aufweisen, während die Messung im oberen Teil der Säule deutlich geringere Leitfähigkeiten ergeben haben.

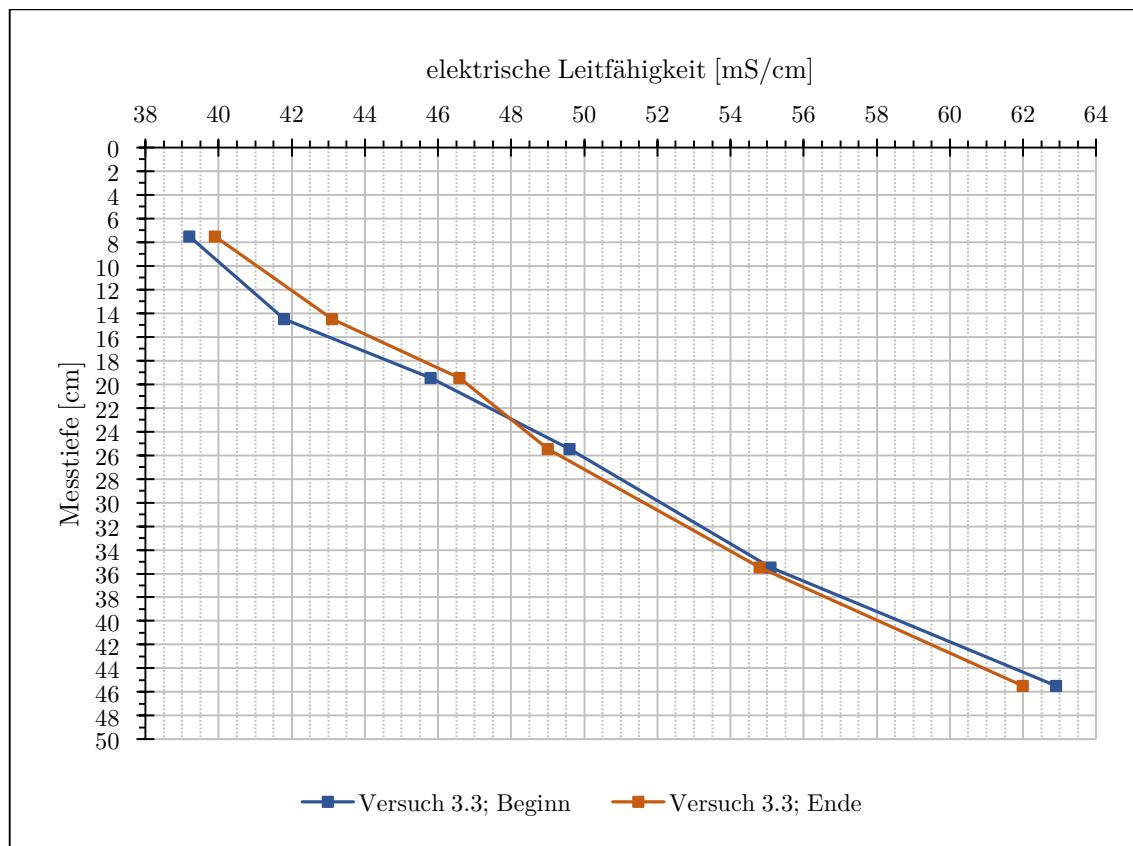


Abbildung 15: elektrische Leitfähigkeit; Versuch 3.3

Ein Vergleich der Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigt, dass mit zunehmender elektrischer Leitfähigkeit die beobachteten Schichtgrenzen auftauchen, wobei das Uranin nur bis zur dritten Messstelle abgesunken ist. Dies ist ein erster Hinweis darauf, dass sich die Ausbreitung der Uranin-Lösung an der Konzentration des Natriumchlorids und somit an der Dichte orientiert und dass die NaCl-Lösung schichtförmig aufgebaut ist.

Abbildung 16 zeigt die gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten von Versuch 3.4. Messung 1 wurde einige Zeit nach der Erstellung der NaCl-Lösung in der Säule, nachdem das Natriumchlorid vollständig gelöst wurde, durchgeführt. Die Eingabe der Uranin-Lösung erfolgte direkt nach Messung 4 und der Versuch wurde mit Messung 5 beendet. Die Abbildung stellt klar, dass bei diesem Versuch ebenfalls ein Gradient der elektrischen Leitfähigkeit entsteht, wobei die Leitfähigkeit und damit die Dichte der Lösung mit der Tiefe zunimmt. Während bei Messung 1 noch die stärkste Zunahme der Leitfähigkeit zu verzeichnen ist, ist diese in darauffolgenden Messungen in stetig geringerem Maße festzustellen. Messung 5 weist letztlich den geringsten Gradienten auf. Der Gradient der elektrischen Leitfähigkeit erfährt also mit fortschreitender Zeit, in der die NaCl-Wasser-Lösung in der Säule steht, einen Ausgleich. Die hohen Werte der Leitfähigkeit am Boden werden geringer und die niedrigen Werte am oberen Ende der Säule steigen an.

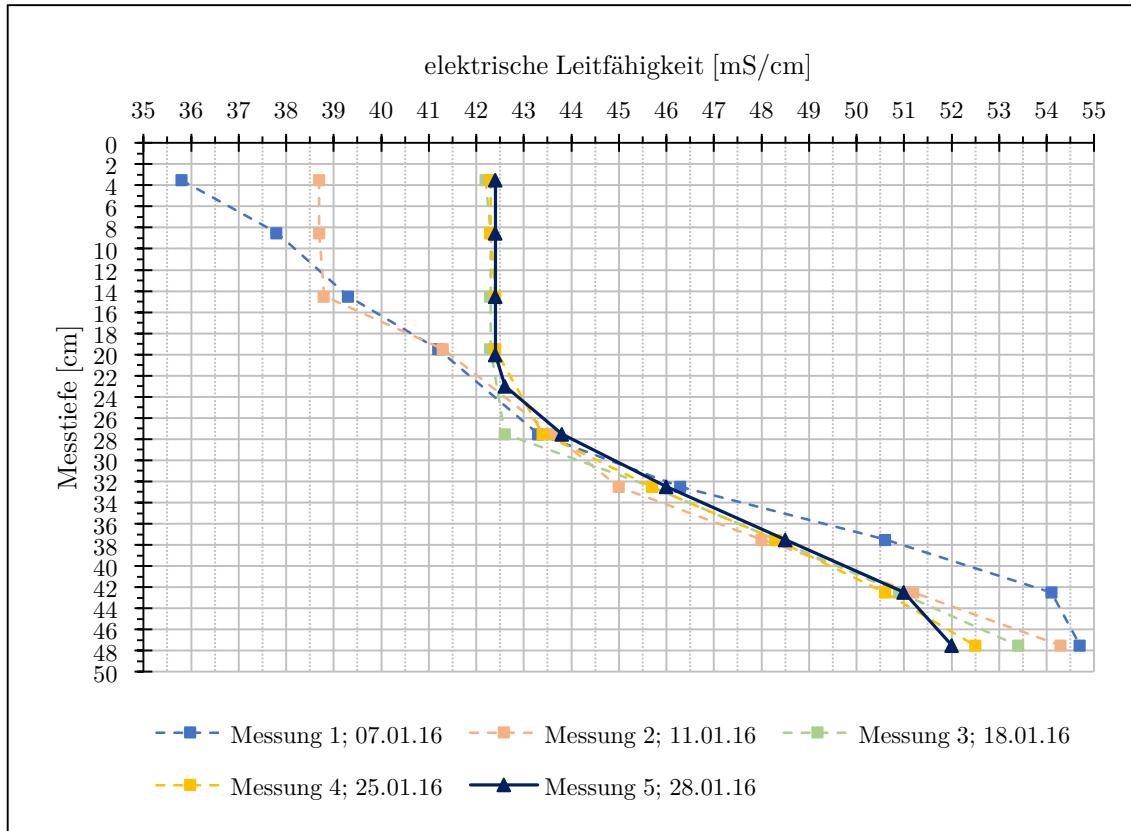


Abbildung 16: elektrische Leitfähigkeit; Versuch 3.4

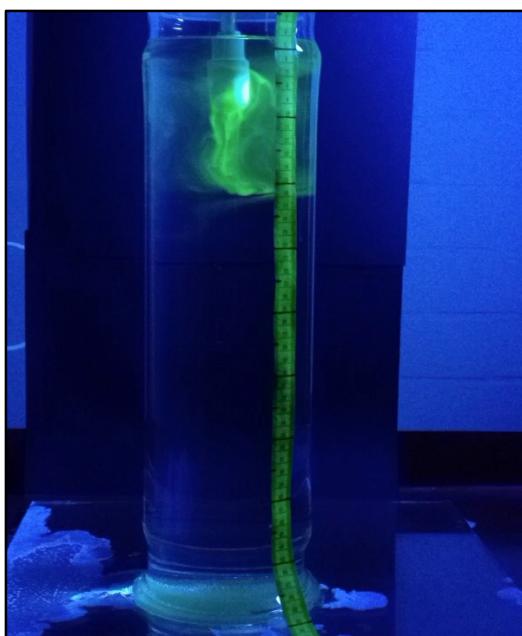
Im Vergleich der Abbildung 14 zu Abbildung 16 fällt auf, dass die Ausbildung der zweiten Schichtgrenze von Versuch 3.4 (*Abbildung 14*) auf der gleichen Tiefe, 20cm, stattgefunden hat, in der in Messung 4 (*Abbildung 16*), die direkt vor Eingabe der Uranin-Lösung getätigt wurde, ein erster Anstieg der elektrischen Leitfähigkeit verzeichnet werden konnte. Die Videoaufzeichnung zu diesem Versuch zeigt, dass diese zweite Schichtgrenze sich bei etwa 20cm Tiefe ausbildet, dann bis etwa 22,5cm absinkt und anschließend stabil bleibt. Wie in Abbildung 14 ersichtlich konnte in diesem Versuch in geringerer Tiefe, 16cm, die Bildung einer ersten Schichtgrenze beobachtet werden. In der Videoaufzeichnung ist zu sehen, dass sich bei 16cm die erste Schichtgrenze zwar gebildet hat, diese jedoch nach relativ kurzer Zeit, ca. 1 Stunde, durchbrochen wird. In einer einzigen größeren Schliere sinkt das Uranin dann bis zur Bildung der zweiten Schichtgrenze ab (vgl. Abbildung 17). Zu dieser Grenze kann jedoch keine Korrelation zu Abbildung 16 hergestellt werden, da in dieser Tiefe kein Anstieg der elektrischen

Leitfähigkeit festgestellt werden konnte. Dieser Umstand könnte die Theorie, dass sich die Ausbreitung der Uranin-Lösung an der Dichteschichtung des NaCl-Wasser-Gemischs orientiert, entkräften. Es sind jedoch auch noch andere Möglichkeiten denkbar, die zu dieser Auffälligkeit geführt haben. Zum einen ist es möglich, dass die Messung der elektrischen Leitfähigkeit fehlerhaft ist. Da das eingesetzte Gerät jedoch gut kalibriert und auch in hohen Messbereichen eine hohe Genauigkeit aufweist, ist dies eher als unwahrscheinlich einzuschätzen. Mit dem verwendeten Messgerät wurde jedoch nur punktuell an einer Stelle gemessen. Das heißt die Auflösung der Messung ist gering. Es wäre möglich, dass sehr begrenzte Schwankungen der elektrischen Leitfähigkeit in der Messung nicht registriert wurden. Um dies ausschließen zu können müsste an dieser Stelle ein Sensornetz für Leitfähigkeiten in der Säule aufgebaut werden, um die Zuverlässigkeit der Messungen zu erhöhen. Ebenso muss in Betracht gezogen werden, dass zum Beispiel geringe lokale Temperaturschwankungen das vorgefundene Verhalten der Uranin-Ausbreitung verursacht haben. Es wurden zwar neben den Raumtemperaturen auch die Wassertemperaturen in der Säule gemessen, sie wurden jedoch nur mit jeweils einem einzigen Sensor aufgenommen. Dadurch konnten auch hier, wie bei der elektrischen Leitfähigkeit, nur punktuell Daten gewonnen werden, wodurch die Auflösung der Temperaturaufzeichnung zu gering ist, um lokale Phänomene feststellen zu können. Diese Problematik könnte ebenfalls durch ein in der Säule angebrachtes Sensornetz behoben werden. Allerdings ist anzunehmen, dass die schwankenden Raumtemperaturen zu gering sind, um derartig bemerkenswerte Phänomene in der Ausbreitung der Uranin-Lösung zu verursachen (vgl. Abbildung 18), da reines Wasser selbst bei Temperaturänderungen von 10°C nur geringe Dichteänderungen zeigt (vgl. Anhang C II). Es liegt allerdings der Verdacht nahe, dass der Einsatz der UV-Lampe die Ursache für die Bildung der ersten Grenzschicht ist. Abbildung 17 veranschaulicht den nun folgenden Erklärungsversuch. Dieser berücksichtigt außerdem, neben dem geringen Dichteunterschied

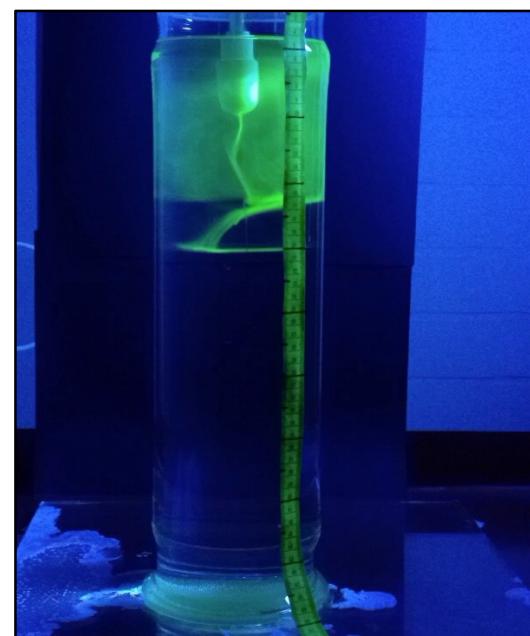
zwischen den zwei teilnehmenden Lösungen, die Feststellung, dass das Natriumchlorid in der Säule schichtförmig konzentriert ist.

Vorausgesetzt das die Dichtebestimmungen der Lösungen korrekt sind, besteht zwischen der Uranin-Lösung ($\rho=1,022\text{g/ml}$) und der NaCl-Lösung ($\rho\approx1,02\text{g/ml}$) ein Dichteunterschied von $\rho=0,002\text{g/ml}$. Wahrscheinlich ist der Unterschied aufgrund der erläuterten Messungenauigkeiten bei der Dichtebestimmung leicht höher. Dies führt jedoch zu keiner Änderung der zu erläuternden Vorgänge bzw. Ursachen, da trotz allem ein sehr geringer Dichteunterschied zu erwarten ist. Das Prinzip, das höchstwahrscheinlich zu der Bildung der zweiten Schichtgrenze geführt hat, ähnelt dem wie es bereits auf Seite 48f. erläutert wurde. Dabei wurde jedoch eine schichtförmige Verteilung des Natriumchlorids in der Säule, bei dem die Dichte im oberen Bereich deutlich geringer ist und mit der Tiefe zunimmt, nicht in Betracht gezogen. Das Absinken der Uranin-Lösung ist bis zu dem Punkt möglich, an dem die Dichte der NaCl-Lösung zu hoch wird, sodass weiteres Absinken nicht mehr möglich ist. Dadurch bildet sich die zweite Schichtgrenze, die stabil bleibt und aufgrund von etwas diffusiven Austausch wenige Zentimeter absinkt. Ab dem Punkt ist die Dichte der NaCl-Lösung zu hoch, um ein weiteres Absinken der Uranin-Lösung zu ermöglichen. Die Bildung der ersten Schichtgrenze, die instabil ist, resultiert höchstwahrscheinlich aus einer anderen Ursache bzw. eines anderen Einflusses, da die Messung der elektrischen Leitfähigkeit in jener Tiefe der Ausbildung keine Erhöhung der NaCl-Konzentration bzw. der Dichte der NaCl-Lösung zulässt. In der Videoaufzeichnung des Versuches 3.4 ist zu beobachten, dass kurz vor der Ausbildung der ersten Schichtgrenze das tiefere Absinken von wenig Uranin-Lösung möglich gewesen ist. Es bildet sich eine zur rechten Säulenwand drängende Strömung, aus der eine Art kreisförmiger, zur Wasseroberfläche hin gerichteter „Konvektion“ entsteht. Die Strömung scheint für eine gewisse Zeit ein weiteres Absinken der Uranin-Lösung zu verhindern und

sorgt somit für die Entstehung der ersten Schichtgrenze. Oberhalb der Schichtgrenze erhöht sich nun die Uranin-Konzentration bis zu einem Umschlagpunkt, an dem die Konzentration, und damit die Dichte, so hoch ist, dass die Schichtgrenze durchbrochen wird. Die absinkende Uranin-Lösung folgt im Wesentlichen der vor der Grenzbildung abgesunkenen Lösung. Der einzige Grund für die entstandene Konvektion kann an dieser Stelle in dem Einsatz der UV-Lampe gefunden werden. Unter UV-Strahlung kommt es zur Zersetzung des Uranins *[nach ZÖTL (1974) S. 53]*. Außerdem konnte während des Versuches eine deutliche Erwärmung der UV-Lampe festgestellt werden. Das Experiment wurde von der rechten Seite der Säule beleuchtet. In Folge dessen ist es denkbar, dass die zum rechten Seitenrand hin gerichtete Strömung durch eine Kombination der von der UV-Lampe bewirkten Effekte ausgelöst worden ist. Diese Effekte sind in dem Falle die Reaktion des Uranins auf die UV-Strahlung und eine lokale Erwärmung des Wassers durch die dauerhafte Beleuchtung mit der UV-Lampe.



17a: Bildung der ersten Grenze
Abbildung 17a/b: Uranin-Grenzbildung



17b: Bildung der zweiten Grenze

Die soeben erläuterten Erklärungen zu den beobachteten Phänomenen, die in den Versuchen aufgetaucht sind, sind als Theorien zu verstehen, die in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden konnten. Aufgrund der schwer zu erfassenden Daten,

der kaum zugänglichen Schichtgrenzen, sowie der hohen Anzahl an kaum abschätzbaren Einflüssen auf das Experiment, sind keine detaillierteren Berechnungen oder beweisbare Schlussfolgerungen möglich.

6. Diskussion und Bewertung

6.1. Kritische Betrachtung und Bewertung der Randbedingungen

Bei dem Versuchsmodell, das für diese Arbeit erstellt und genutzt wurde, handelt es sich um ein offenes System. Das heißt, dass der Austausch von stofflicher als auch energetischer Materie möglich ist. Daher gibt es bestimmte Randbedingungen, die mehr oder weniger Einfluss auf das System haben können. Diese werden an dieser Stelle genauer betrachtet und unter dem Gesichtspunkt ihrer Einflussnahme auf das System diskutiert und bewertet.

Da bei den Versuchsreihen z.B. keinerlei künstliche Temperaturänderungen vorgenommen werden und das Wasser-System sich immer an das in dem Raum vorherrschende Klima angepasst hat, kann zumindest der Austausch stofflicher Materie in Form von beispielsweise Wasserdampf ausgeschlossen bzw. ignoriert werden. Anders verhält sich dies allerdings bei energetischem Einfluss, wie Temperatureinflüssen. Die Versuche haben Beobachtungen zum Ziel, die von Dichteverhältnissen der teilnehmenden Fluide beeinflusst werden. Diese wiederum werden von den Temperaturverhältnissen in dem System, welche ihrerseits von den Temperaturverhältnissen des Laborraums beeinflusst werden. Der Laborraum ist nicht gleichbleibend klimatisiert, weshalb es zu Temperaturschwankungen kommt, die von der Witterung des jeweils aktuellen Klimas bestimmt werden. Es kommt also ständig zu Änderungen der allgemeinen Randbedingung Temperatur während der Versuchsdurchführungen. Wie in den Tabellen 3 – 5 ersichtlich wird, ist es bei allen Versuchen zu Temperaturschwankungen gekommen. Bemerkenswert ist hier, dass die Raumtemperaturen in den Versuchsreihen 1 und 2, ausgenommen Versuch 1.4, mit bis zu 5°C höher liegen, als in den restlichen Versuchen. Dies röhrt daher, dass diese Versuche an Sommertagen durchgeführt wurden, die von zum Teil sehr warmem Wetter bestimmt wurden. Die Versuche mit kühleren

Raumtemperaturen wurden an Herbst- bzw. Wintertagen durchgeführt. Aus den Tabellen wird ebenfalls ersichtlich, dass die Wassertemperaturen der Versuchssysteme maßgeblich von den Raumtemperaturen beeinflusst wurden. Die Wassertemperaturen haben sich bei allen Versuchen auf weniger als ein halbes Grad Celsius der Raumtemperatur angepasst. Grundsätzlich muss daher von Temperatureinflüssen auf die Versuche und somit auch auf die Ergebnisse ausgegangen werden. Das Säulenwasser ist direkt nach Befüllung der Säule immer kühler gewesen als die Raumtemperatur und hat sich dann allmählich der Temperatur des Raumes angepasst. In den Versuchen 1.1, 1.2 und 2.1 wurde die Eingabe der Uranin-Lösung dennoch unmittelbar nach Befüllung der Säule durchgeführt, so dass die Temperaturanpassungen des Wassers während der Versuchsabläufe geschehen ist. Bei den übrigen Versuchen wurden Eingaben erst nach der Anpassung ausgeführt. Ein Vergleich der Versuche der Versuchsreihen 1 und 2 konnte somit Aufschluss darüber geben, inwiefern die Temperaturänderungen des Wassers die sichtbaren Ergebnisse verändern. Es konnten an dieser Stelle keine Veränderungen der Ergebnisse infolge der natürlichen Temperaturänderungen festgestellt werden. Der Grund für die fehlende Ergebnisänderung ist das jeweilige Dichtevehältnis der teilnehmenden Fluide, welches am Ende von Abschnitt 5.1 auf Seite 44f bereits ausführlich erläutert wurde. In Versuchsreihe 3 ist das Dichtevehältnis jedoch deutlich geringer, wodurch der Einfluss der Temperaturschwankungen größer wird. In dieser Versuchsreihe wurde daher die Temperaturanpassung der NaCl-Wasser-Lösung immer abgewartet, um unnötige Schwankungen während der Versuchsabläufe zu vermeiden. Ein Thermometer hat jedoch gezeigt, dass auch während der Versuchsläufe Temperaturschwankungen aufgetreten sind, die jedoch nur wenige Dezimale und nur selten mehr als 1°C umfassen. Diese leichten Temperaturschwankungen können entweder auf die Unvollkommenheit des Thermometers oder auf schwankende Wetterbedingungen zurückgeführt werden. Ein Zusammenhang mit dem Tag-Nacht-Zyklus konnte an dieser

Stelle nur bedingt hergestellt werden. Abbildung 18 zeigt beispielhaft den Temperaturverlauf im Laborraum und im Säulenwasser für Versuch 3.1, wobei das Intervall der Ablesung der Temperatur hier auf 2 Stunden gesetzt wurde. Die Abbildung verdeutlicht die Abhängigkeit der Wassertemperatur von der Raumtemperatur. An den Peaks, die jeweils um ca. 21:25 Uhr auftreten, kann man den Zusammenhang der Raumtemperatur mit dem Tag-Nacht-Zyklus vermuten. Die Temperaturschwankungen im Wasser folgen dabei zeitverzögert den Schwankungen der Temperaturen des Raumes. Der Zusammenhang von Raumtemperatur und Tag-Nacht-Zyklus kann allerdings allenfalls als Theorie angesehen werden, da die Temperaturschwankungen mit unter $0,5^{\circ}\text{C}$ sehr gering ausfallen und dieses Verhalten nur bei zwei Versuchen, bei denen die Temperatur aufgezeichnet wurde, beobachtet wird. Die Temperaturen konnten nicht bei allen Versuchen aufgezeichnet werden, da sich während mancher Versuche technische Probleme mit dem Thermometer ergeben haben. Aufgrund der geringen Höhe der Schwankungen werden diese als vernachlässigbar angesehen, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Schwankungen innerhalb des Messschwankungsbereichs des Thermometers liegen. Zudem sind die Temperaturschwankungen nicht groß genug, um nennenswerte Änderungen der Fluideigenschaften zu verursachen (*vgl. Anhang C II*). Das allgemeine Absinken der Temperatur zum Ende des Versuches hin ist mit einer Abkühlung des Wetters außerhalb des Gebäudes zu erklären.

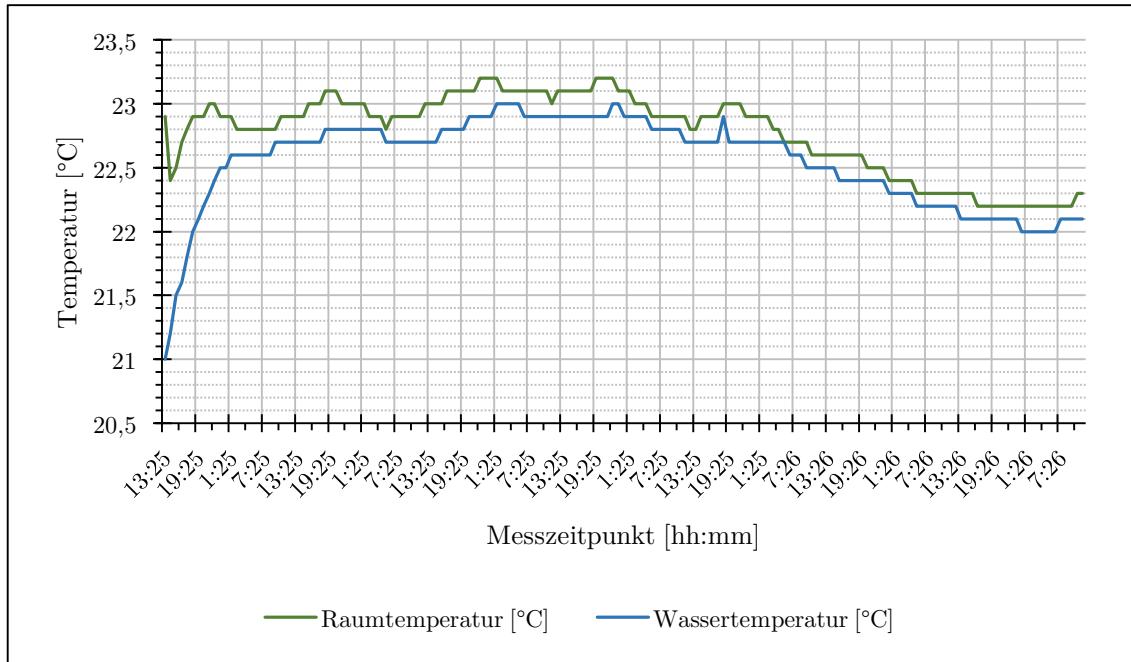


Abbildung 18: Raum- und Wassertemperatur; Versuch 3.1

Abbildung 18 steht nur beispielhaft für einen Versuch. Für weitere Vergleiche sind in *Anhang C I* die Temperaturverläufe der anderen Versuche dargestellt.

Zum Abschluss dieses Abschnitts ist festzustellen, dass die Temperatur des Laborraums ständigen Änderungen und kleineren Schwankungen unterliegt und als Randbedingung der Versuche gesehen werden muss, die direkten Einfluss auf die Wassertemperatur der Säule hat. Es konnte jedoch nicht festgestellt oder überprüft werden, inwiefern die Temperaturschwankungen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Zum einen sind die Dichteunterschiede zu groß gewesen, zum anderen sind die Temperaturschwankungen bei keinem der Versuche identisch zueinander aufgetreten. Daher lässt sich im Hinblick auf die Beeinflussung der Ergebnisse durch die Randbedingung Temperatur nur bedingt ein Vergleich anstellen. Es lässt sich allerdings sagen, dass sich die erlangten Ergebnisse trotz unterschiedlicher Temperaturänderungen sehr ähneln. Es lässt sich jedoch nicht eindeutig klären, wie die Ergebnisse ohne die Temperaturschwankungen aussehen würden. Betrachtet man allgemeine Dichtetabellen von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur (*s. Anhang C II*) und die Ähnlichkeit der Ergebnisse, liegt die Vermutung nahe, dass

die Temperaturschwankungen nicht groß genug sind, um Dichteänderungen hervorzurufen, die grundlegende Unterschiede der Ergebnisse verursachen können. Sie könnten jedoch eventuell ausreichen um bestimmte Phänomene wie jenes, welches in Versuch 3.4 beobachtet werden konnte (*s. Abschnitt 5.2 Seite 53ff.*), zu verursachen. Um die genannten Umstände vollständig klären zu können, müsste man ein vollkommen isoliertes Modell erstellen, das von äußerlichen Temperaturschwankungen unabhängig ist. Dies ist jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich gewesen, da jeder einzelne Versuch bereits zeitintensiv gewesen ist.

6.2. Fehlerbetrachtung

Bei allen experimentellen Versuchen können früher oder später Fehlerquellen auftreten, die Auswirkungen auf die Durchführung oder die Ergebnisse der Versuche haben können. So müssen auch bei den Versuchsreihen dieser Arbeit eventuell auftretende Fehler betrachtet und bewertet werden. Die Fehler können hier in den verschiedenen Arbeitsschritten der Experimente, also in der Vorbereitung, der Durchführung und der Auswertung, auftreten und sowohl systematischer als auch zufälliger Natur sein.

In der Vorbereitungsphase können Fehler bei der Erstellung der Uranin- bzw. NaCl-Lösung entstanden sein. Bei einer der gewünschten Konzentration gemäß korrekten Einwaage können hier systematische Fehler durch Messungenauigkeiten der Waage nicht ausgeschlossen aber auch nicht vermieden werden. Die beiden Uranin-Lösungen ($c=60\text{mg}/\text{ml}$ bzw. $c=40\text{mg}/\text{ml}$) wurden von einem Laboranten hergestellt. Diese Lösungen wurden in sämtlichen Versuchen genutzt. Falls bei der Herstellung der Lösungen Messfehlern aufgetreten sind, sind diese nicht mehr zurückzuverfolgen, da sie nicht eigens hergestellt wurden. Da jedoch

überall gleiche Lösungen in gleicher Menge verwendet wurden, würde ein möglicher Messfehler jedes Ergebnis gleich beeinflussen, was somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht beeinträchtigt.

Bei der Einwaage des Natriumchlorids wurde stets die gleiche Waage genutzt. Durch die Waage bedingte systematische Fehler können hier zwar auch nicht ausgeschlossen werden, würden jedoch ebenfalls die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht beeinflussen, da sich der Fehler der Waage dann in allen Ergebnissen niederschlagen würde.

Die Säule wurde bei jedem Versuch mit dem gleichen Messbecher bis zu einer bestimmten Markierung befüllt, um so stets die gleiche Wassermenge zu erhalten. Dadurch ist an dieser Stelle ein Fehler durch unterschiedlich genutzte Wassermengen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit auszuschließen bzw. als nur gering und somit vernachlässigbar einzuschätzen.

Bei der Dichtebestimmung der NaCl-Lösung wurde durch das beschriebene Vorgehen mit einem Aräometer versucht mögliche Unsicherheiten z.B. durch Ablesefehler gering zu halten.

Die Dichtebestimmung der Uranin-Lösung ist dagegen jedoch als stark fehleranfällig einzustufen. Selbst geringe Abweichungen in der Volumenabmessung können hier zu starken Variationen des Dichteergebnisses führen. Aufgrund mangelnder technischer Möglichkeiten konnte zu der Zeit der Messung keine andere Dichtebestimmung, wie zum Beispiel mittels eines Pyknometers, durchgeführt werden.

In der eigentlichen Versuchsdurchführung können die im vorherigen Abschnitt erörterten Temperaturschwankungen als Randbedingung des Versuchsmodells und als zufällige Fehler betrachtet werden. Die Temperaturschwankungen während der Versuchsläufe sind, wie bereits erläutert, aufgrund der vorherrschenden

Wetterbedingungen, die wiederum die Raumtemperatur beeinflussen, nicht kontrollierbar und im gewissen Maße zufälliger Natur. Im Rahmen des Modellaufbaus lassen sich diese Einflüsse nicht vermeiden. Um diese Unsicherheiten zu minimieren müsste ein komplett isoliertes Modell entwickelt werden, dass dahingehend nicht beeinflusst werden kann. Die Wiederholung der Versuche mit gleichen Parametern sollte zu einer Statistik führen, die eine Aussage über den Einfluss der Temperaturschwankungen zulässt. Am Ende von Abschnitt 6.1 auf Seite 61f wurde dies bereits abschließend erläutert.

Eine weitere Unsicherheit, die als zufälliger Fehler eingestuft werden kann und sowohl bereits in der Vorbereitung als auch in der Durchführung auftritt, ist die Verteilung des Natriumchlorids in der Säule. In dem letzten Teil von Abschnitt 5.2 wird erörtert, dass sich die Verteilung des Natriumchlorids in der Säule in den verschiedenen Versuchen voneinander unterscheidet und dass dies vermutlich Auswirkungen auf die Verteilung der Uranin-Lösung hat. Da die Verteilung davon abhängt wie die Lösung in die Säule eingegeben wird und wie viel Zeit zwischen Eingabe und Versuchsstart liegt, gibt es hier Abweichungen zu beobachten. Auch ein Einfluss der Temperatur kann an dieser Stelle wiederum nicht ausgeschlossen werden. Der Fehler kann wahrscheinlich nur minimiert werden, indem zwischen Erstellung der NaCl-Lösung und Eingabe der Uranin-Lösung eine längere Zeit abgewartet wird, damit es zu einer homogenen Verteilung des Natriumchlorids kommen kann. Dies beansprucht jedoch mit mehreren Wochen einen relativ langen Wartezeitraum. Es konnte nicht hinreichend geklärt werden, ob es zu einer vollständig homogenen Verteilung kommen kann oder ob Gravitation und in der Säule unterschiedlich vorkommende Druckbedingungen dies verhindern. Hier ist zusammenfassend festzustellen, dass dieser Fehler unterschiedlich auftritt und von verschiedenen Ereignissen beeinflusst wird. Anscheinend wird die Verteilung der Uranin-Lösung und damit das Endergebnis erheblich beeinflusst.

Auch bei der Ergebnisauswertung sind Unsicherheiten in Form von zufälligen Fehlern festzustellen. Das für diese Arbeit ausgewählte Auswerteverfahren in Form einer optischen Analyse der sichtbaren Uranin-Verbreitung weist von Natur aus eine Fehleranfälligkeit auf. Diese Analyseform ist zwar simpel und unkompliziert auszuführen, hängt jedoch stark von der Wahrnehmung des auswertenden Beobachters ab. So ist es zum Beispiel möglich, dass einem Beobachter eine Besonderheit auffällt, die einem anderen Beobachter entgeht. Da die Auswertungen allerdings von lediglich einem Beobachter ausgeführt wurden, besteht hier eine gewisse Unsicherheit, dass Besonderheiten in den Versuchen nicht bemerkt wurden. Eine Verringerung dieser Unsicherheit ist an dieser Stelle nur durch eine Verbesserung der Sichtbarkeit durch UV-Licht möglich. Die Unsicherheit bleibt dennoch bestehen, da das UV-Licht erst bei stärkeren Uranin-Konzentrationen zu einer verbesserten Sichtbarkeit führt. Des Weiteren kann durch die optische Auswertung nur die sichtbare Uranin-Verteilung analysiert werden. Die nicht sichtbare Verteilung kann in keinem Fall beobachtet werden. Die Auswertung der entnommenen Proben im Hinblick auf die Dichteuntersuchung ist aus dem gleichen Grund stark fehleranfällig, der bereits bei der Dichtebestimmung der Uranin-Lösung benannt wurde. Die Bestimmung der Uranin-Konzentration dagegen, die von einem Laboranten durchgeführt wurde, kann aufgrund der hohen Genauigkeit des Fluoreszenz-Spektrometers und der guten Kalibrierbarkeit nahezu als fehlerfrei eingeschätzt werden. Durch die mögliche Unvollkommenheit des Messgerätes können hier statistische Fehler allerdings auch nicht ausgeschlossen werden. Diese können jedoch nicht vermieden werden und müssen daher vernachlässigt werden.

Abschließend muss festgestellt werden, dass das für diese Arbeit entwickelte und genutzte Modell an vielen Stellen Fehleranfälligkeiten aufweist. Einerseits beru-

hen Fehlerquellen, wie die Dichtebestimmung, auf mangelnden technischen Möglichkeiten, anderseits sind einige Fehler, wie die Temperaturschwankungen, von der Art des Modells her nicht vermeidbar. Da sich es sich bei dem Modell um eine Erstentwicklung handelt und demzufolge keine Referenzergebnisse bekannt sind, sind die meisten Fehler nur schwer einzuschätzen. An dieser Stelle wird auf Abschnitt 6.3 erwiesen, in dem weiter auf diese Punkte eingegangen wird.

6.3. Diskussion der Ergebnisse und des Modells

Nun erfolgt die abschließende Diskussion aller Ergebnisse, die unter anderem eine kurze Zusammenfassung der Gründe für die Versuchsaufstellungen und den daraus erlangten Erkenntnissen beinhaltet. Anschließend wird die Vergleichbarkeit der Versuchsreihen bewertet und eine qualifizierte Aussage über das Versuchsmo-
dell formuliert, welche die vorhergegangene Fehlerbetrachtung mit einbezieht.

6.3.1. Vergleichbarkeit und Bewertung der Ergebnisse

Die Versuche der ersten und zweiten Versuchsreihe zeigen eine gute Vergleichbarkeit, da sie, bis auf die unterschiedliche Konzentration der Uranin-Lösung, mit gleichen Parametern durchgeführt wurden. Die Versuchsläufe haben im Sommer stattgefunden, weshalb sie auch vergleichbare Temperatur-
bedingungen aufweisen. Dies spiegelt sich in der Ähnlichkeit ihrer Ergebnisse wieder. Diese Versuche dienten dem Zweck einen standardisierten Versuchsaufbau und eine geeignete Vorgehensweise zu entwickeln.

Um die Dichte des Säulenwassers der Dichte der Uranin-Lösung anzupassen und mit der Absicht die Verhältnisse von zum Teil hochsalinarem Grubenwasser nachzuahmen, wurde in der dritten und vierten Versuchsreihe die Säule mit NaCl-
angereichertem Wasser gefüllt. Dies hat jedoch dazu geführt, dass die Ergebnisse dieser beiden Versuchsreihen mit denjenigen der ersten und zweiten Versuchsreihe nur noch bedingt vergleichbar sind. Durch die Zugabe von Natriumchlorid in das

Säulenwasser ist nicht nur die Dichte erhöht worden, wie es bei einer rein temperaturgesteuerten Dichteänderung geschehen wäre, sondern es wurden auch mehr Moleküle, in gelöster Form Natrium- und Chlorid-Atome, hinzugefügt. Diese liegen zwar, da es sich nicht um destilliertes Wasser, sondern um Trinkwasser handelt, bereits von Natur aus in dem Wasser vor, jedoch nicht in so hohen Konzentrationen. Da die Ausbreitung des Uranins auf den diffusiven Transport basiert und dieser von den Molekül-/Atomgrößen abhängig ist, wird die Ausbreitung von der Anwesenheit der gelösten Natriumchlorid-Atome beeinflusst. Es besteht hier also eine deutlich stärkere Beeinflussung der Uranin-Ausbreitung als bei der ersten und zweiten Versuchsreihe, bei denen die Konzentration der Natrium- und Chlorid-Atome deutlich geringer ist. Durch diese unterschiedliche Beeinflussung wird die Vergleichbarkeit der Versuchsreihen-Paare zueinander verringert. Außerdem würde bei einer Dichteerhöhung des Leitungswassers, die rein auf einer Temperatursenkung basiert, wahrscheinlich keine Schichtung auftreten, wie es bei Zugabe von Natriumchlorid geschehen ist. Um also eine gute Vergleichbarkeit zu erlangen, müssten gleiche Dichteverhältnisse geschaffen werden, ohne dabei die Art des Säulenwassers zu verändern. Dies ist aber nur machbar, indem z.B. die Eingabe einer leichteren Uranin-Lösung in Leitungswasser getätigt wird. Dies ist aber im Laufe dieser Arbeit nicht mehr möglich gewesen, da keine weitere Uranin-Lösung einer anderen Dichte verfügbar gewesen ist.

Die Vorgehensweise der dritten und vierten Versuchsreihe mit den dabei eingestellten Dichteverhältnissen zeigt allerdings auch Vorteile. Die Beobachtung der Verbreitung des Uranins in einer nach der Dichte geschichteten Wassersäule konnte ermöglicht werden. Solche Dichteschichtungen konnten in gefluteten Grubenschächten ebenfalls beobachtet werden [KRAMER, *Master-Arbeit (2016)*]. So mit kann man über das bei diesen Versuchen beobachtete Verbreitungsverhalten der Uranin-Lösung bei einer Dichteschichtung den Rückschluss ziehen, dass sich

eine Uranin-Eingabe in einem wassergefüllten Grubenschacht mit einer Dichteschichtung ähnlich verhalten wird. Mit dem Rückschluss ist es somit möglich, das Erscheinen von Uranin in einem Schacht in begrenzter Weise vorherzusagen und dementsprechend die Aufstellung von z.B. Sensoren zur Messung der Uranin-Konzentration zu installieren. Allerdings muss bei den Ergebnissen der Laborversuche die klare Einschränkung gemacht werden, dass hier nur eine Schichtung mit zunehmender Dichte bei zunehmender Tiefe unter ähnlichen chemischen Bedingungen erreicht werden konnte und dass sich die Dichteabgrenzungen im Laufe der Zeit abgeschwächt bzw. aufgelöst haben. In einem gefluteten Grubenschacht dagegen konnten Dichteschichtungen mit unterschiedlichen chemischen Bedingungen festgestellt werden, die auch eine gewisse Beständigkeit aufweisen [*KRAMER, Master-Arbeit (2016)*]. Eine annehmbare Übertragung der Laborergebnisse wäre in diesem Falle nur möglich, wenn in dem Grubenschacht eine Schichtung mit gleichen chemischen Bedingungen vorläge, wobei eine Abschwächung der Dichtegrenzen erreicht werden müsste. Bei einer konstant bleibenden Dichteschichtung könnte die Überwindung der Schichtgrenze nur durch Erhöhung der Dichte der eingesetzten Uranin-Lösung an der Schichtgrenze erreicht werden. Die Versuche haben außerdem gezeigt, dass bereits in kleinem Maßstab eine Vielzahl unterschiedlicher, kaum einzuschätzender Prozesse starke Auswirkungen auf das Verhalten der Uranin-Lösung bei der Ausbreitung haben können. Dieser Umstand schränkt die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf eine reale Situation stark ein, da diese in der Realität noch viel weniger einzuschätzen sind.

6.3.2. Bewertung des Modells

Bei Betrachtung des entwickelten Modells im Vergleich zu einem Grubenschacht ist festzustellen, dass es Parameter in einer realen Situation gibt, die durch dieses Modell nicht simuliert werden konnten. Zum einen ist hier die bereits diskutierte Art der Dichteschichtung, die in einem Grubenschacht auftreten kann und in dem

Modell nur annäherungsweise nachgestellt werden konnte, zu nennen. Zum anderen können in einem Grubenschacht durch die Klüftung des umgebenen Gesteins bzw. von dem Schacht abgehende Stollen Wasserabläufe vorkommen. Gleichmaßen können z.B. durch Grundwasserneubildung Wasserzuläufe entstehen. Zu- und Abläufe in einem Schacht führen sowohl zu nicht direkt nachvollziehbaren Wasserbewegungen als auch zu zusätzlichen Temperaturunterschieden in dem Grubengewässer. Solche Wasserzuläufe bzw. -abläufe wurden in dem bisherigen Modell nicht realisiert. Außerdem konnten die realen Temperaturbedingungen, die in einem Schacht vorherrschen, nicht auf das Modell übertragen werden. Diese müssten zunächst in der Realität untersucht werden und dann bei den Modellversuchen berücksichtigt werden. Allerdings müsste das Modell dahingehend verändert werden, dass die Randbedingung Temperatur gesteuert werden kann.

Ein weiterer entscheidender Punkt, der bei der Bewertung des Modells berücksichtigt werden muss, ist das Größenverhältnis des Modells. Für das hier entwickelte Modell ist einerseits aufgrund fehlender Materialien, andererseits zwecks einer einfachen Handhabung und somit zügigen Wiederholbarkeit der Einzelversuche eine Säule mit relativ geringer Größe verwendet worden. Aufgrund von verschiedener Tests, die für eine andere Master-Arbeit gemacht wurden, wurden die Eingaben der Uranin-Lösung, die auch in dieser Arbeit verwendet wurde, in die wassergefüllte Glassäule des Modells einer geothermischen Sonde getätigt [*RISSE, Master-Arbeit (2016)*]. Die dabei verwendete Glassäule ist um ein Vielfaches größer, als die in dieser Arbeit genutzte Säule. In Abbildung 19 wird die Eingabe der Uranin-Lösung in die wassergefüllte Säule des Sondenmodells gezeigt, wobei die Sonde außer Betrieb gesetzt wurde, um eine künstliche Beeinflussung der Uranin-Ausbreitung auszuschließen. Somit sind hier die Voraussetzungen stark mit denen der Versuchsreihen 1 und 2, mit Ausnahme des Größenverhältnisses des Versuchsaufbaus, vergleichbar. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung

der Uranin-Lösung, entlang des in der Mitte platzierten Kupferrohrs der Sonde, zunächst ein sehr ähnliches Verhalten wie in der ersten und zweiten Versuchsreihe zeigt, indem die Uranin-Lösung in einer geraden Linie absinkt. Dann jedoch weist die Verteilung ein Aufsplitten der Uranin-Lösung auf und es findet eine unregelmäßige Verteilung zu allen Seiten hin statt. Die Länge der ähnlichen Verteilung weist mit ungefähr 40cm in etwa die gleiche Länge wie die der in dieser Arbeit verwendeten Säule auf.

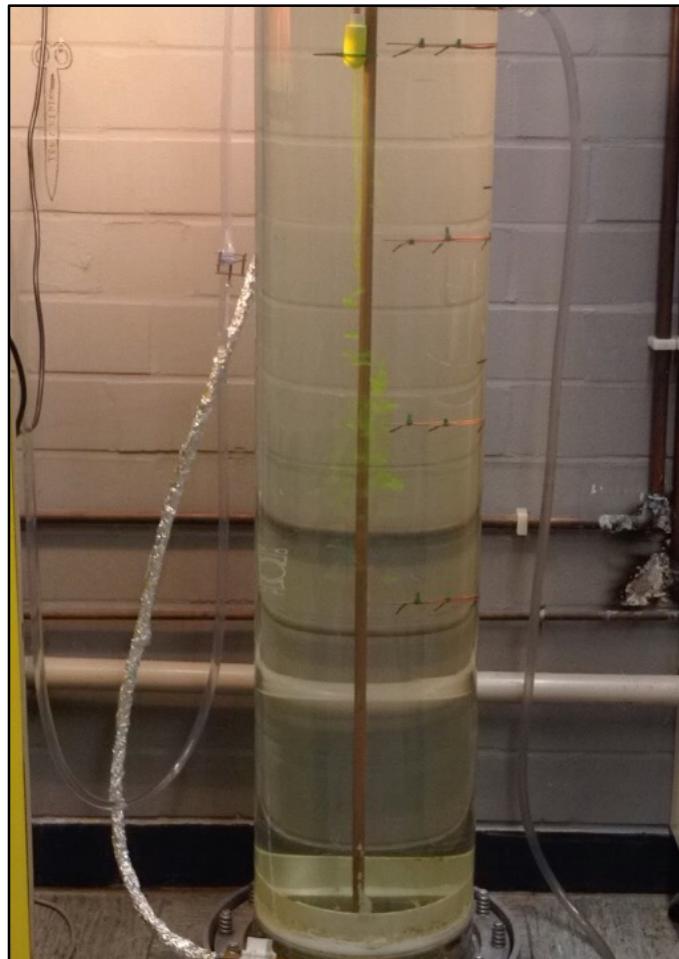


Abbildung 19: Uranin-Eingabe Sondenmodell

Eine Erklärung für die unregelmäßige Verteilung der Uranin-Lösung kann in der Eigenart des diffusiven Transports der Uranin-Lösung gefunden werden, da dieser nach Fick auf den zufälligen Bewegungen der Moleküle basiert. Das vorhergehende Absinken in einer geraden Linie kann dadurch erklärt werden, dass bis zu dem Punkt, an dem die Uranin-Lösung aufgesplittet wird, die Konzentration und

damit die Dichte der Lösung noch so viel höher ist, dass die Gravitation als stärkste Kraft alle anderen Einflüsse, wie zufällige Molekülbewegungen und statischer Auftrieb, übertrifft. Die anderen Transportprozesse spielen dabei nur eine untergeordnete Rolle. Erst ab dem Punkt der unregelmäßigen Verteilung ist der Einfluss der Gravitation so weit gesunken, dass andere Prozesse bemerkbare Auswirkungen zeigen. Weitere Gründe für die unregelmäßige Verteilung können allerdings auch unbeabsichtigte Bewegungen des Wassers sein, die durch Stöße, Vibrationen oder Unregelmäßigkeiten in der Temperaturverteilung verursacht wurden, sein. Eine genaue Untersuchung des Phänomens ist an dieser Stelle jedoch nicht möglich gewesen, da primär mit der kleineren Säule gearbeitet und das Sondenmodell für andere Experimente benötigt wurde. In Hinblick auf eine reale Situation in einem Grubenschacht muss festgestellt werden, dass die genannten eventuellen Störungen natürlicherweise und in viel stärkerem Ausmaß auftreten werden und diese in Laborversuchen als unvermeidbar und realitätsnah angesehen werden sollten. Es muss an dieser Stelle jedoch bezweifelt werden, ob die für diese Arbeit verwendete Säule ausreichend ist, um weitere detailliertere Untersuchungen der Ausbreitung einer Uranin-Lösung in einer Wassersäule durchzuführen. Bei Betrachtung der Größe der in dieser Arbeit verwendeten Säule und der Ausmaße der Verteilung in der großen Säule muss die Vermutung aufgestellt werden, dass die kleine Säule nur den Ausschnitt der Verteilung in einer großen Säule zeigt und somit nicht groß genug ist, um weitere Untersuchungen durchzuführen.

7. Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden in einem Ausblick mögliche nachfolgende Schritte erläutert. Zum einen werden mögliche weitere Schritte erörtert, die zu einer weiterführenden Erforschung des behandelten Themas beitragen können. Zum anderen wird ein Überblick gegeben, inwiefern bereits erlangte Erkenntnisse, bzw. welche gewonnenen Ergebnisse, in einer realen Situation umgesetzt werden können. Abschließend wird die Frage geklärt, ob der Einsatz von Uranin zwecks Erkundung eines Grubenschachtes empfehlenswert ist oder nicht. Für die Beurteilung werden die bisher erlangten Kenntnisse sowie die miteinzubeziehenden Bedingungen berücksichtigt.

7.1. Weiterführende Untersuchungen

Da es sich bei dem hier genutzten Modell um eine Erstentwicklung handelt, hat es sich in einigen Punkten, die in Abschnitt 6.3.2 „Bewertung des Modells“ ausführlich diskutiert wurden, als fehleranfällig und verbesserungswürdig erwiesen. Diese Punkte können in Form von weiterführenden Untersuchungen und Entwicklungen behoben und ausgebessert werden. Zur Verbesserung des Modells sollte grundsätzlich in Betracht gezogen werden, den Maßstab des Modells zu vergrößern, da die Größe des Modells dieser Arbeit aus den in Punkt 6.3.2 genannten Gründen fragwürdig ist. Um das Modell unabhängiger von nicht vorhersehbaren äußerlichen Einwirkungen wie Temperaturschwankungen zu gestalten, sollte das Modell isoliert oder in einem gut klimatisierten Raum aufgebaut werden. Somit könnte man Temperaturänderungen systematisch ändern. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass durch eine Isolation des Modells die Sicht auf das Modell beeinträchtigt oder komplett verhindert werden kann und somit eine optische Beobachtung des Uranins unter Umständen nicht mehr möglich ist.

Das Hauptziel weiterer Untersuchungen könnte die detaillierte Entwicklung des Modells zu realen Bedingungen eines wassergefüllten Grubenschachtes sein. Das Augenmerk sollte dabei zum einen auf den Aufbau von Dichteschichtungen in der Wassersäule, wie sie in einem Schacht beobachtet werden können, liegen. Dabei sollte das Wasser auch in chemischer Zusammensetzung einem Grubenschacht nachempfunden werden. Eventuell könnte dies mit Wasserproben aus einem Schacht realisiert werden. Zum anderen könnte das Modell um Zu- und Abläufe von zusätzlichem Wasser erweitert werden, um so das Bewegungsverhalten von Tracerstoffen unter Einfluss direkter wärmerer oder kälterer Wasserbewegungen, die durch solche Zu- oder Abläufe verursacht werden, beobachten zu können.

Abgesehen von weiteren experimentellen Versuchen wäre es wichtig mit Hilfe eines Simulationsprogramms ein computergestütztes Modell zu entwickeln. Dieses Vorhaben konnte in dieser Arbeit mangels technischer Möglichkeiten und daraus resultierenden Zeitgründen nicht mehr realisiert werden. Die Entwicklung eines Modells an einem Computer hat den Vorteil, dass die in den Versuchen zu beobachtenden Vorgänge leichter nachzuvollziehen sind und über die Einstellung von Parametern und Randbedingungen kontrolliert werden können. Letztlich würde ein zuverlässiges Computermodell Vorhersagen, Uranin-Eingaben in einem Grubenschacht betreffend, ermöglichen.

7.2. Übertragung der Ergebnisse auf reale Problemstellungen

Trotz der in den vorherigen Unterabschnitten festgestellten Mängel und Einschränkungen des Versuchsaufbaus gibt es Erkenntnisse, die man auf eine reale Situation in einem Grubenschacht übertragen könnte. Da hier jedoch vor allem Experimente entwickelt wurden, mit denen grundlegende Vorgehensweisen getestet und Vorgänge beobachtet werden sollten, können nur wenige Ergebnisse direkt in die Realität umgesetzt werden. Man könnte die Eingabe einer Uranin-Lösung

über eine semipermeable Membran, wie in dem Labor die Saugkerze aus Keramik, auch in einem Grubenschacht anwenden. Mit dieser Methode wäre die gleichmäßige Eingabe der Uranin-Lösung sichergestellt und die Beobachtung von Bewegungen des Wassers mit Hilfe von in dem Schacht angebrachten Sensoren und regelmäßiger Probenahme wäre möglich. Allerdings muss hier selbstverständlich in viel größeren Dimensionen gerechnet werden, da die tatsächliche Größe eines Schachtes in einem Labor nicht berücksichtigt werden kann. Die Dimensionen eines Schachtes, z.B. 6m Durchmesser könnten, unter Umständen sowohl technische, als auch bauliche Schwierigkeiten hervorrufen. Die Versuche konnten zudem in einer groben Annäherung zeigen, welches Verhalten die Ausbreitung einer Uranin-Lösung in einer nach der Dichte geschichteten Wassersäule vermutlich aufweisen wird.

Schlussendlich muss noch die generelle Frage behandelt werden, ob der Einsatz von Uranin zur Erkundung eines Grubenschachtes als zweckmäßig bzw. sinnvoll eingeschätzt werden kann. Dabei wird eine Unterscheidung zwischen den angestrebten Zielen - die Lokalisierung von Dichteschichtungen und das Beobachten von neu entstehenden bzw. sich ändernden Wasserbewegungen - gemacht.

Wie die bisherigen Versuche gezeigt haben (*s. Auswertung und Filme der Versuche*) unterliegt die Ausbreitung einer Uranin-Eingabe bereits bei einem einfachen Modell im kleinen Maßstab einigen Einwirkungen, die mehr oder weniger starken Einfluss auf den Transport des Uranins nehmen. Diese Einwirkungen treten zudem in den verschiedenen Versuchen stets in unterschiedlicher Art und Stärke auf und sind bisher kaum bis gar nicht einzuschätzen. Selbst ein einfacher Laborversuch obliegt bereits Einflüssen, welche die Ergebnisse stark verändern können. Bei Übertragung dieser Szenarien auf eine reale Situation in einem Grubenschacht muss daher angenommen werden, dass das Ausbreitungsverhalten eines Tracerstoffes wie Uranin ebenfalls verschiedenen, mehr oder weniger starken Einflüssen

unterliegt. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass ein Grubenschacht deutlich komplexere Strukturen aufweist, als das vereinfachte Versuchsmodell. Einige Aspekte, wie zum Beispiel Zu- und Abläufe von Grundwasser in den bzw. aus dem gefluteten Grubenschacht, sowie mögliche unterschiedliche chemische Milieus des Grubenwassers, wurden bereits genannt. Außerdem ist zu erwarten, dass die Temperaturschwankungen, die in den Laborversuchen nur in geringem Maße gemessen werden konnten, bei einer Erkundung eines Grubenschachtes deutlich höher auftreten werden. Sie könnten z.B. durch zulaufendes Grundwasser oder den allgemeinen Witterungsbedingungen verursacht werden. Zu- und Abflüsse können zudem zusätzliche Wasserbewegungen in dem Grubenschacht verursachen, die wiederum das Ausbreitungsverhalten einer Uranin-Lösung beträchtlich beeinflussen können. Bei Betrachtung der genannten Möglichkeiten ist zu erwarten, dass diese in deutlich stärkerem Maße auftreten als in einer Laborumgebung.

Nach den bisherigen Erkenntnissen und unter Beachtung der beiden unterschiedlichen Zielsetzungen kann einerseits festgestellt werden, dass zur Lokalisierung von Dichteschichtungen der Einsatz von Uranin als durchaus zielführend angesehen werden kann. Die Versuche haben gezeigt, dass sich die Uranin-Lösung an der Dichteschichtung orientiert hat und diese sichtbar gemacht werden konnte. Bei einem solchen Verhalten in einem Grubenschacht könnten zum Beispiel mittels Sensoren oder Probenahmen des Grubenwassers auf unterschiedlichen Tiefen Dichtegrenzen über die unterschiedlich auftretenden Uranin-Konzentrationen ermittelt werden.

Andererseits hat sich nach bisherigem Kenntnisstand herausgestellt, dass der Uranin-Einsatz zur Beobachtung von Wasserbewegungen in einem Grubenschacht bzw. zu Detektion von Änderungen der Wasserbewegungen als nicht sinnvoll oder nicht zielführend betrachtet werden muss. Schon die Laborversuche haben, wie bereits ausgeführt, eine hohe Beinflussbarkeit des Ausbreitungsverhaltens von

Uranin gezeigt. Da in einer realen Situation mehrere und stärkere Einflüsse, die das Ausbreitungsverhalten einer Uranin-Lösung beeinflussen können, zu erwarten sind, sind auch in höherem Maße Variationen in der Ausbreitung der Uranin-Lösung zu vermuten. Zudem kommt die Schwierigkeit hinzu, dass die Uranin-Lösung in einem Grubenschacht nicht direkt beobachtet werden kann. Schlussfolgerungen über eine Änderung des Ausbreitungsverhaltens der Uranin-Lösung und somit einer Änderung der Wasserbewegungen sind nur über Probennahmen oder ein Sensornetz zu realisieren, wobei die einfachste und praktischste Methode eine regelmäßige Probennahme sein wird. Ein Sensornetz könnte evtl. aufgrund mangelnden Platzes durch den Betrieb einer geothermischen Sonde in einem Grubenschacht nicht aufgebaut werden. Auf diese mögliche Problematik kann und wird in dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen. Eine regelmäßige Probennahme des Grubenwassers hat den Nachteil, dass sie auf Änderungen der Wasserbewegungen stets verzögert erfolgt. Somit ist es höchst unwahrscheinlich, dass plötzliche unerwartete Änderungen in dem Grubenwasser rechtzeitig oder überhaupt festgestellt werden können. Könnten dennoch Wasserbewegungen bzw. die Änderung der Wasserbewegungen, z.B. ausgelöst durch den Betrieb einer geothermischen Sonde, entdeckt werden, wird eine genaue Zuordnung zu einer bestimmten Ursache sehr schwierig werden, da im Gesamten die Wechselwirkungen aller Prozesse komplex und kaum bekannt sind. Außerdem ist von Anfang an nicht bekannt, wann in welchen Tiefen Proben entnommen werden müssen, um Uranin detektieren zu können. Eine direkte Übertragung der Erkenntnisse von Laborversuchen wird hier nicht möglich sein, da dazu die genauen Parameter *in situ* bekannt sein und anschließend nachgestellt werden müssen. Auch mit regelmäßigen Probennahmen wird es nach bisherigen Erkenntnissen nicht oder kaum möglich sein, Änderungen von Wasserbewegungen einem bestimmten Einfluss zuordnen zu können.

8. Literaturverzeichnis

BÖHME, D. et al. (2009). Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung. *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.* (1. Aufl., Stand Juni 2008), S. 9 und 16

CUSSLER, E. L. (1984). Diffusion. Mass transfer in fluid systems. *Cambridge University Press, Cambridge*

INTERNETCHEMIELEXIKON. Wasserdichte verschiedener Temperaturen.
<http://www.internetchemie.info/chemiewiki/index.php?title=Wasser-Dichtetabelle> (zuletzt geprüft am 26.01.2016)

KÄSS, W. et al. (2004). Geohydrologische Markierungstechnik. *Borntraeger, Berlin.* (2. überab. Auflage), S. 18 und 106

KRAMER, A. (2016). Gesamthydraulische Charakterisierung eines aufgelassenen Erzbergwerkschachts (unveröffentlicht)

MORTIMER, C. E. et al. (2007). Chemie. Das Basiswissen der Chemie. *Thieme, Stuttgart.* (9. überarb. Aufl.), S. 210-211

OTTO, M. (2014). Analytische Chemie. *Wiley-VCH, Weinheim.* (4. überab. Aufl.), S. 377

RISSE, M. (2016). Ermittlung von Diffusions- und Konvektionsströmungen in einer Säule verursacht durch Wärmeentzug und -zuführung durch eine Testsonde. (unveröffentlicht)

SCHIMMELS, S.; MARKOFSKY, M. (2007). Dichteströmungen unter dem Einfluss von Bauwerken. *Hannover.* S. 1

- SEILNACHT, T. (2016). Informationen zu Fluorecein-Natrium, Uranin. <http://www.seilnacht.com/Chemie/fnatrium.htm> (zuletzt geprüft am 26.01.2016)
- SEILNACHT, T. (2016). Informationen zu Natriumchlorid. http://www.seilnacht.com/Chemie/ch_nacl.htm (zuletzt geprüft am 26.01.2016)
- SINHA, A. P.; DE, P. (2012). Mass transfer. Principles and operations. *PHI Learning, New Delhi*. S. 47
- SPEKTRUM (1998). Eintrag zu Volumenkontraktion. *Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg*. <http://www.spektrum.de/lexikon/chemie/volumenkontraktion/9827> (zuletzt geprüft am 26.01.2016)
- TYRREL, H. J. V.; HARRIS, K. R. (1984). Diffusion in liquids. A theoretical and experimental study. *Butterworths, London/Boston*.
- ZÖTL, J. G. (1974). Karsthydrogeologie. Springer Verlag, Wien/New York

9. Anhang

Anhang A: Verwendete Materialien

Anhang A I: Geräte und Gegenstände

Versuchsaufbau

Material/Objekt	Produkt/Hersteller	Bemerkungen
Glassäule		$d_a=16\text{cm}$ $d_i=12,5\text{cm}$ $h=50\text{cm}$ $h_w=48\text{cm}$
Glasplatte		$a=45\text{cm}$ $b=41\text{cm}$ $h=1\text{cm}$
Abdichtmittel (Silikon)	Baysilone-Paste; GE Bayer Silicones	Hochviskos
Maßband		cm-Einteilung; min. 50cm
Saugkerze (Keramik)		$h=6\text{cm}$ $d_{a1}=1,8\text{cm}$ $d_{i2}=1,5\text{cm}$ $d_{a2}=2,5\text{cm}$ $d_{i2}=2,2\text{cm}$
Eingabeschlauch		$l=7,5\text{cm}$ $d_a=1,7\text{cm}$ $d_i=1,5\text{cm}$
Pipette (Kunststoff)		Fassung: $V=3\text{ml}$ Austritt: $d_a=4\text{mm}$ $d_i=2\text{mm}$

Kamera	iPhone 4s; Apple Inc.	8-Megapixel-iSight-Kamera in Verbindung mit Zeitraffer-Applikation „Lapse It“
Zeitraffer-Applikation	Lapse It; Interactive Universe	Aufnahme 1Bild/2min
Kamerastativ	Joby JB01256 GRIP Tight Gorillapod; Joby	
Hintergrund	Tonpapier	Weiß bei Normallicht; Schwarz bei UV-Licht

Probennahme

Material/Objekt	Produkt/Hersteller	Bemerkungen
Spritzen; 3 Stück	BD Plastipak; BD Medical	Fassung: 60ml Austritt: $d_a=4\text{mm}$ $d_i=2\text{mm}$
Schläuche; 3 Stück (Kunststoff)		$d_a=4\text{mm}$ $d_i=2\text{mm}$

Messgeräte

Material/Objekt	Produkt/Hersteller	Bemerkungen
Leitfähigkeitsmessgerät	pH/Cond 340i; WTW	
Aräometer		
Waage		geeicht; Gramm bzw. Milligramm Einwaage
Fluoreszenz-Spektrometer	LS 55; PerkinElmer	

Anhang A II: Uranin

Uranin ist das mit Natrium versetzte Salz des Fluoresceins und im Gegenteil dazu stark wasserlöslich. In Wasser gelöst zeigt es eine grünliche, bei UV-Licht bestimmter Wellenlänge fluoreszierende Farbe. Mit höherer Konzentration des Uranins in Wasser ändert sich die Farbe von Grün zu Orange zu Dunkelrot. Uranin ist gesundheitlich unbedenklich und wird unter Einfluss von UV-Strahlung abgebaut. In der Hydrogeologie wird Uranin aufgrund der genannten Eigenschaften als Tracer zur Entdeckung und Kontrolle unterirdischer Fließsysteme genutzt.

chemische/physikalische Informationen

Summenformel	$C_{20}H_{10}Na_2O_5$
Molmasse	376,28g/mol
Wasserlöslichkeit [20°C]	>600g/l
Dichte	1,601g/ml
Absorptionsmaxima	491nm (Hauptabsorption) 322nm (Nebenmaximum)
Fluoreszenzmaximum	512nm
Sichtbarkeitsgrenze	

Anhang A III: Natriumchlorid

Natriumchlorid findet in vielen Bereichen Anwendung. Das gut wasserlösliche Salz bildet in Wasser gelöst eine klare Lösung. Es wird in der Hydrogeologie, ebenfalls wie Uranin, als Tracerstoff verwendet. Dabei wird die gut messbare Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit genutzt um es zu detektieren.

chemische/physikalische Informationen

Summenformel	NaCl
Molmasse	58,44g/mol

Wasserlöslichkeit [20°C]	358g/l
Dichte	2,16g/ml

Anhang B: Berechnungen

Anhang B I: Dichte der Uranin-Lösung

Dichte der Uranin-Lösung; $c_{Lösung}=40\text{mg/ml}$

Bestimmung nach Massen/Volumen-Verhältnis

$$\rho = \frac{m_{Lösung}}{V_{Lösung}} \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right] \quad V_{Lösung}=50\text{ml}$$

$$m_{Lösung}=50,64\text{g}$$

$$\rho = \frac{50,64\text{g}}{50\text{ml}} = \mathbf{1,0128 \frac{g}{ml}}$$

Berechnung nach der Massenkonzentration

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i \cdot V_i)}{V_L}$$

$$m_{\text{Uranin}}=40\text{mg}=0,04\text{g}$$

$$\rho = \frac{(m_{\text{Uranin}} + m_{\text{Wasser}})}{V_{Lösung}} \quad \rho_{\text{Uranin}}=1,601\text{g/ml}$$

$$\rightarrow V_{\text{Uranin}} = \frac{0,04\text{g}}{1,601 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = 0,025\text{ml}$$

$$V_{Lösung}=100\text{ml}$$

$$\rightarrow V_{\text{Wasser}} = 100\text{ml} - 0,025\text{ml} = 99,975\text{ml}$$

$$\rho_{\text{Wasser}}=1\text{g/ml}$$

$$\rightarrow m_{\text{Wasser}} = 99,975\text{ml} \cdot 1 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 99,975\text{g}$$

$$\rho = \frac{(0,04\text{g} + 99,975\text{g})}{100\text{ml}}$$

$$= \mathbf{1,00015 \frac{g}{ml}}$$

Dichte der Uranin-Lösung; $c_{Lösung}=60\text{mg/ml}$

Bestimmung nach Massen/Volumen-Verhältnis

$$\rho = \frac{m_{Lösung}}{V_{Lösung}} \left[\frac{g}{ml} \right]$$

V_{Lösung}=50ml
m_{Lösung}=51,098g

$$\rho = \frac{51,098g}{50ml} = \mathbf{1,022 \frac{g}{ml}}$$

Berechnung nach der Massenkonzentration

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i \cdot V_i)}{V_L}$$

$$m_{Uranin}=60mg=0,06g$$

$$\rho = \frac{(m_{Uranin} + m_{Wasser})}{V_{Lösung}}$$

ρ_{Uranin}=1,601g/ml
→ V_{Uranin} = $\frac{0,06g}{1,601 \frac{g}{ml}} = 0,037ml$

$$V_{Lösung}=100ml$$

$$\rightarrow V_{Wasser} = 100ml - 0,037ml = 99,963ml$$

$$\rho_{Wasser}=1g/ml$$

$$\rightarrow m_{Wasser} = 99,963ml \cdot 1 \frac{g}{ml} = 99,963g$$

$$\rho = \frac{(0,06g + 99,963g)}{100ml}$$

$$= \mathbf{1,00023 \frac{g}{ml}}$$

Anhang B II: Dichte der Natriumchlorid-Lösungen

Aräometer-Dichtebestimmung: Versuch 3.1; $c_{Lösung} = 196\text{g}/6,4\text{l} = 30,625\text{g/l}$
 $(21,0^{\circ}\text{C})$

ρ' : Aräometer-Ablesung

$R' = (\rho' - 1) \cdot 10^3$: Hilfswert

$R = R' + c_m$: verbesserter Hilfswert

C_m : Meniskuskorrektur

$\rho = 1 + 10^{-3} \cdot R$: Dichte der Lösung

$$\rho'_1 = 1,0205\text{g/cm}^3$$

$$\rho'_2 = 1,0204\text{g/cm}^3$$

$$\rho'_3 = 1,0204\text{g/cm}^3$$

$$\rho'_4 = 1,0204\text{g/cm}^3$$

$$\rho'_5 = 1,0203\text{g/cm}^3$$

$$\mathcal{O}\rho' = 1,02043\text{g/cm}^3$$

$$R' = (1,02043\text{g/cm}^3 - 1) \cdot 10^3 = 20,43$$

$$R = 20,43 + 1,1 = 21,53$$

$$c_m: 1,1$$

$$\rho = 1 + 10^{-3} \cdot 21,53 = 1,02153\text{g/cm}^3 \text{ (g/ml)}$$

Aräometer-Dichtebestimmung: Versuch 3.2; $c_{Lösung} = 196 \text{ g}/6,4 \text{ l} = 30,625 \text{ g/l}$
 $(20,5^\circ\text{C})$

ρ' : Aräometer-Ablesung

$R' = (\rho' - 1) \cdot 10^3$: Hilfswert

$R = R' + c_m$: verbesselter Hilfswert

C_m : Meniskuskorrektur

$\rho = 1 + 10^{-3} \cdot R$: Dichte der Lösung

$$\rho'_1 = 1,0197 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\rho'_2 = 1,0195 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\rho'_3 = 1,0195 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\rho'_4 = 1,0195 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\rho'_5 = 1,0195 \text{ g}/\text{cm}^3$$

$$\underline{\mathcal{O}\rho' = 1,01954 \text{ g}/\text{cm}^3}$$

$$R' = (1,01954 \text{ g}/\text{cm}^3 - 1) \cdot 10^3 = 19,54$$

$$R = 20,43 + 1,1 = 20,64$$

$$c_m: 1,1$$

$$\rho = 1 + 10^{-3} \cdot 20,64 = 1,02064 \text{ g}/\text{cm}^3 \text{ (g/ml)}$$

Anhang B III: Dichte der entnommenen Proben

Dichte Probe 1, Schicht 1; $c_{Uranin} = 6000 \text{ ppb} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ g/ml}$; $c_{NaCl} = 0,030625 \text{ g/ml}$

Bestimmung nach Massen/Volumen-Verhältnis

$$\rho = \frac{m_{Probe\ 1}}{V_{Probe\ 1}} \left[\frac{\text{g}}{\text{ml}} \right] \quad V_{Probe\ 1} = 50 \text{ ml}$$

$$m_{Probe\ 1} = 50,8486 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{50,8486 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = 1,0016972 \text{ g/ml}$$

Berechnung nach der Massenkonzentration

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i \cdot V_i)}{V_L}$$

$$m_{Uranin} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ g}$$

$$\rho = \frac{(m_{Uranin} + m_{NaCl} + m_{Wasser})}{V_{Lösung}} \quad \rho_{Uranin} = 1,601 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \text{ g}}{1,601 \text{ g/ml}} = 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ ml}$$

$$m_{NaCl} = 0,030625 \text{ g}$$

$$\rho_{NaCl} = 2,16 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{0,030625 \text{ g}}{2,16 \text{ g/ml}} = 0,014 \text{ ml}$$

$$V_{Lösung} = 100 \text{ ml}$$

$$\rightarrow V_{Wasser} = 100 \text{ ml} - 3,75 \cdot 10^{-6} \text{ ml} - 0,014 \text{ ml} = 99,99 \text{ ml}$$

$$\rho_{Wasser} = 1 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow m_{Wasser} = 99,99 \text{ ml} \cdot 1 \text{ g/ml} = 99,99 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{(6 \cdot 10^{-6} \text{ g} + 0,030625 \text{ g} + 99,99 \text{ g})}{100 \text{ ml}}$$

$$= 1,0002 \text{ g/ml}$$

Dichte Probe 2, Schicht 2; $c_{Uranin} = 1050 \text{ ppb} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ g/ml}$; $c_{NaCl} = 0,030625 \text{ g/ml}$

Bestimmung nach Massen/Volumen-Verhältnis

$$\rho = \frac{m_{Probe\ 2}}{V_{Probe\ 2}} \left[\text{g/ml} \right] \quad V_{Probe\ 2} = 50 \text{ ml}$$

$$m_{Probe\ 2} = 50,7516 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{50,7516 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = 1,0015032 \text{ g/ml}$$

Berechnung nach der Massenkonzentration

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i \cdot V_i)}{V_L}$$

$$m_{Uranin} = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ g}$$

$$\rho = \frac{(m_{Uranin} + m_{NaCl} + m_{Wasser})}{V_{Lösung}} \quad \rho_{Uranin} = 1,601 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{1,05 \cdot 10^{-6} \text{ g}}{1,601 \text{ g/ml}} = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ ml}$$

$$m_{NaCl} = 0,030625 \text{ g}$$

$$\rho_{NaCl} = 2,16 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{0,030625 \text{ g}}{2,16 \text{ g/ml}} = 0,014 \text{ ml}$$

$$V_{Lösung} = 100 \text{ ml}$$

$$\rightarrow V_{Wasser} = 100 \text{ ml} - 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ ml} - 0,014 \text{ ml} = 99,99 \text{ ml}$$

$$\rho_{Wasser} = 1 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow m_{Wasser} = 99,99 \text{ ml} \cdot 1 \text{ g/ml} = 99,99 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{(1,05 \cdot 10^{-6} \text{ g} + 0,030625 \text{ g} + 99,99 \text{ g})}{100 \text{ ml}}$$

$$= 1,0002 \text{ g/ml}$$

Dichte Probe 3, Schicht 3; $c_{Uranin} = 19,5 \text{ ppb} = 1,95 \cdot 10^{-8} \text{ g/ml}$; $c_{NaCl} = 0,030625 \text{ g/ml}$

Bestimmung nach Massen/Volumen-Verhältnis

$$\rho = \frac{m_{Probe\ 3}}{V_{Probe\ 3}} \left[\text{g/ml} \right] \quad V_{Probe\ 3} = 50 \text{ ml}$$

$$m_{Probe\ 3} = 50,8130 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{50,8130 \text{ g}}{50 \text{ ml}} = \mathbf{1,001626 \text{ g/ml}}$$

Berechnung nach der Massenkonzentration

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^i m_i}{V_L} = \frac{\sum_{i=1}^i (\rho_i \cdot V_i)}{V_L}$$

$$m_{Uranin} = 1,59 \cdot 10^{-8} \text{ g}$$

$$\rho = \frac{(m_{Uranin} + m_{NaCl} + m_{Wasser})}{V_{Lösung}} \quad \rho_{Uranin} = 1,601 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{1,59 \cdot 10^{-8} \text{ g}}{1,601 \text{ g/ml}} = 1,22 \cdot 10^{-8} \text{ ml}$$

$$m_{NaCl} = 0,030625 \text{ g}$$

$$\rho_{NaCl} = 2,16 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow V_{Uranin} = \frac{0,030625 \text{ g}}{2,16 \text{ g/ml}} = 0,014 \text{ ml}$$

$$V_{Lösung} = 100 \text{ ml}$$

$$\rightarrow V_{Wasser} = 100 \text{ ml} - 1,22 \cdot 10^{-8} \text{ ml} - 0,014 \text{ ml} = 99,998 \text{ ml}$$

$$\rho_{Wasser} = 1 \text{ g/ml}$$

$$\rightarrow m_{Wasser} = 99,998 \text{ ml} \cdot 1 \text{ g/ml} = 99,998 \text{ g}$$

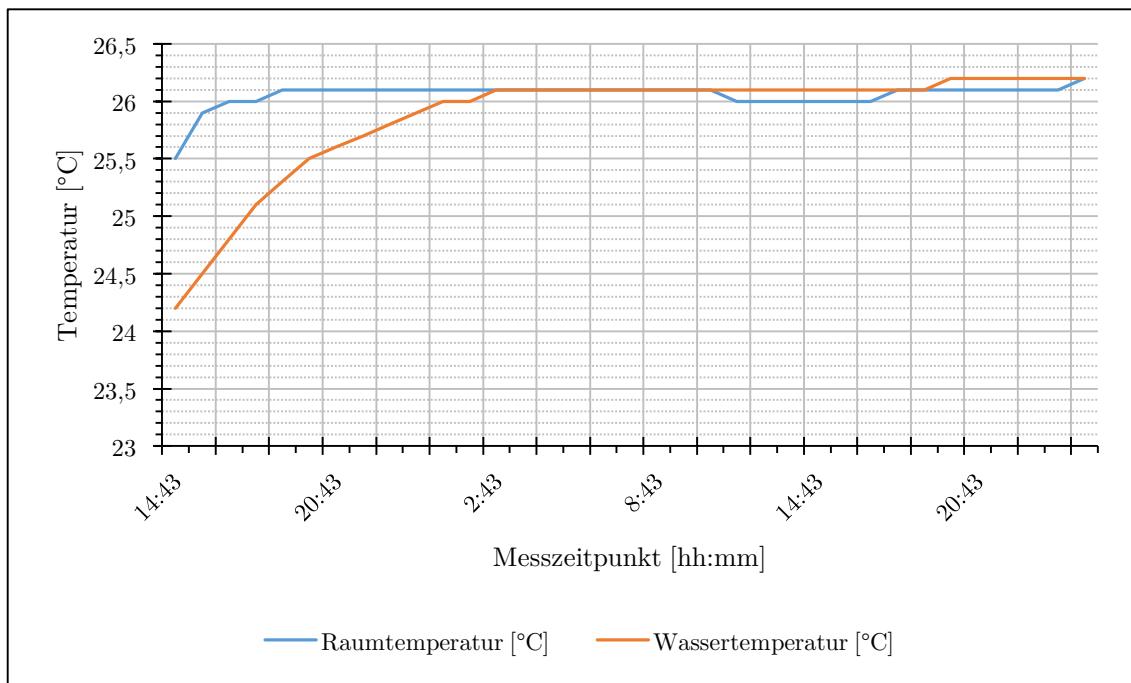
$$\rho = \frac{(1,59 \cdot 10^{-8} \text{ g} + 0,030625 \text{ g} + 99,998 \text{ g})}{100 \text{ ml}}$$

$$= \mathbf{1,0002 \text{ g/ml}}$$

Anhang C: genutzte Datenreihen und Diagramme im Vergleich

Anhang C I: Temperaturverläufe zum Vergleich

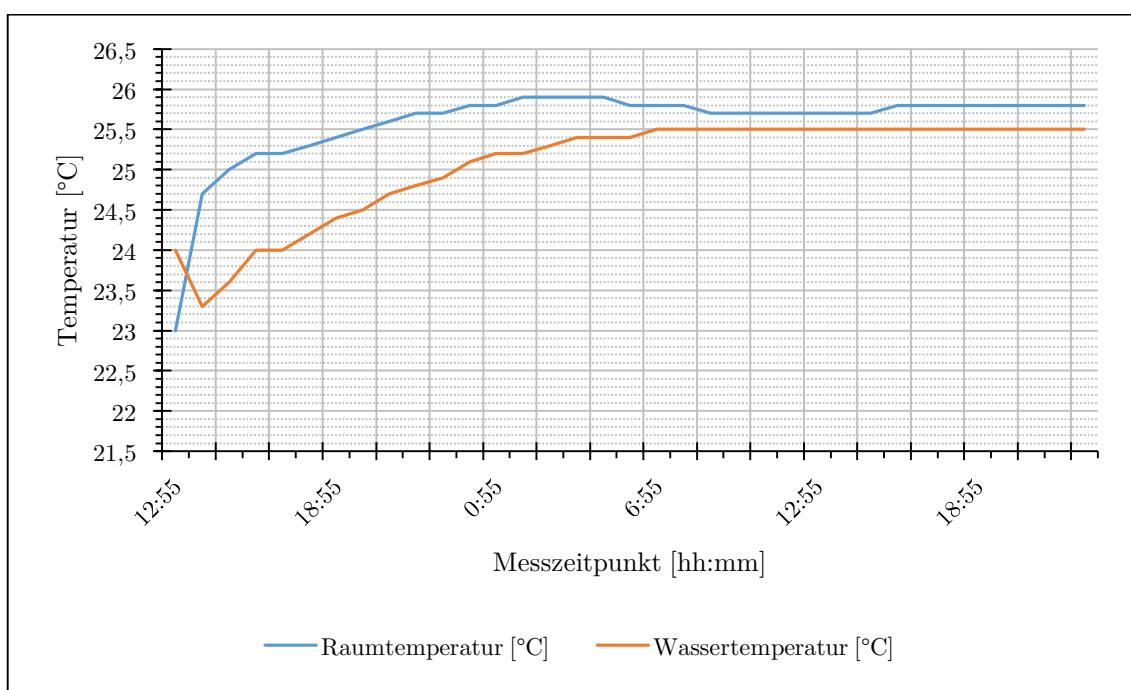
Temperaturverlauf Versuch 1.3



Messzeitpunkt [hh:mm:ss]	Raumtemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]	Datum
14:43:37	25,5	24,2	16.07.15
15:43:37	25,9	24,5	
16:43:37	26,0	24,8	
17:43:37	26,0	25,1	
18:43:38	26,1	25,3	
19:43:38	26,1	25,5	
20:43:38	26,1	25,6	
21:43:38	26,1	25,7	
22:43:39	26,1	25,8	
23:43:39	26,1	25,9	
00:43:39	26,1	26,0	17.07.15
01:43:39	26,1	26,0	
02:43:39	26,1	26,1	
03:43:40	26,1	26,1	
04:43:40	26,1	26,1	
05:43:40	26,1	26,1	
06:43:40	26,1	26,1	
07:43:41	26,1	26,1	
08:43:41	26,1	26,1	
09:43:41	26,1	26,1	

10:43:41	26,1	26,1	
11:43:41	26,0	26,1	
12:43:42	26,0	26,1	
13:43:42	26,0	26,1	
14:43:42	26,0	26,1	
15:43:42	26,0	26,1	
16:43:42	26,0	26,1	
17:43:43	26,1	26,1	
18:43:43	26,1	26,1	
19:43:43	26,1	26,2	
20:43:43	26,1	26,2	
21:43:44	26,1	26,2	
22:43:44	26,1	26,2	
23:43:44	26,1	26,2	
00:43:44	26,2	26,2	18.07.15

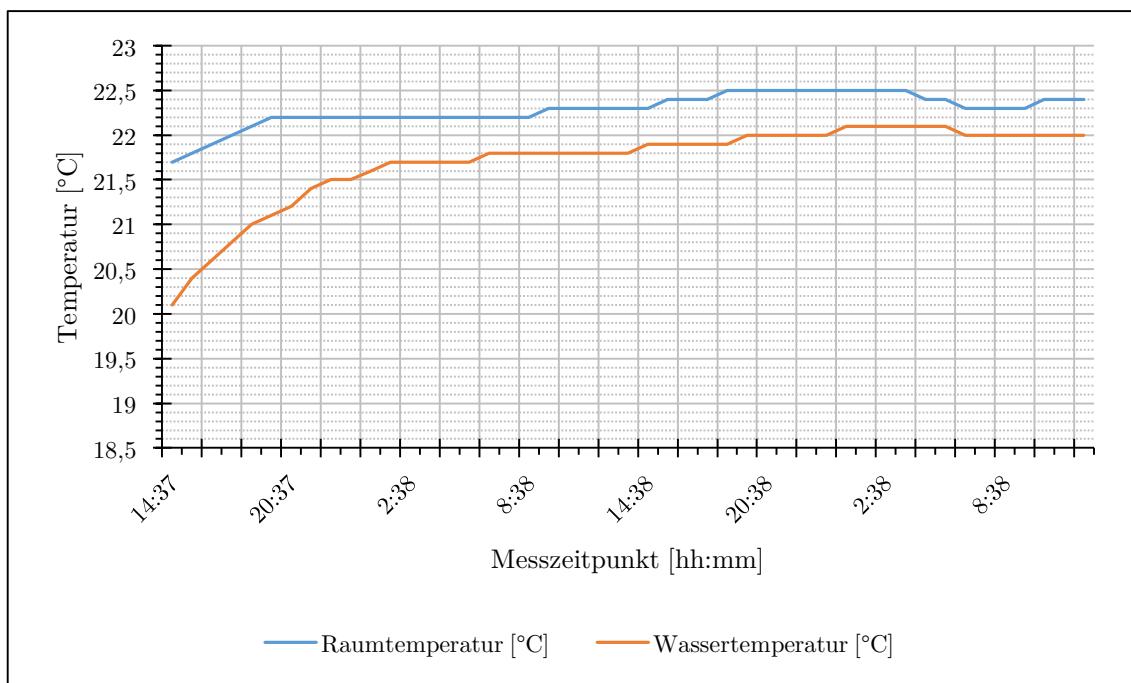
Temperaturverlauf Versuch 2.2



Messzeitpunkt [hh:mm:ss]	Raumtemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]	Datum
12:55:01	23,0	24,0	17.07.15
13:55:01	24,7	23,3	
14:55:01	25,0	23,6	
16:55:02	25,2	24,0	
16:55:02	25,2	24,0	
17:55:02	25,3	24,2	
18:55:02	25,4	24,4	

19:55:02	25,5	24,5	
20:55:03	25,6	24,7	
21:55:03	25,7	24,8	
22:55:03	25,7	24,9	
23:55:03	25,8	25,1	
00:55:04	25,8	25,2	18.07.15
01:55:04	25,9	25,2	
02:55:04	25,9	25,3	
03:55:04	25,9	25,4	
04:55:04	25,9	25,4	
05:55:05	25,8	25,4	
06:55:05	25,8	25,5	
07:55:05	25,8	25,5	
08:55:05	25,7	25,5	
09:55:05	25,7	25,5	
10:55:06	25,7	25,5	
11:55:06	25,7	25,5	
12:55:06	25,7	25,5	
13:55:06	25,7	25,5	
14:55:07	25,7	25,5	
15:55:07	25,8	25,5	
16:55:07	25,8	25,5	
17:55:07	25,8	25,5	
18:55:07	25,8	25,5	
19:55:08	25,8	25,5	
20:55:08	25,8	25,5	
21:55:08	25,8	25,5	
22:55:08	25,8	25,5	

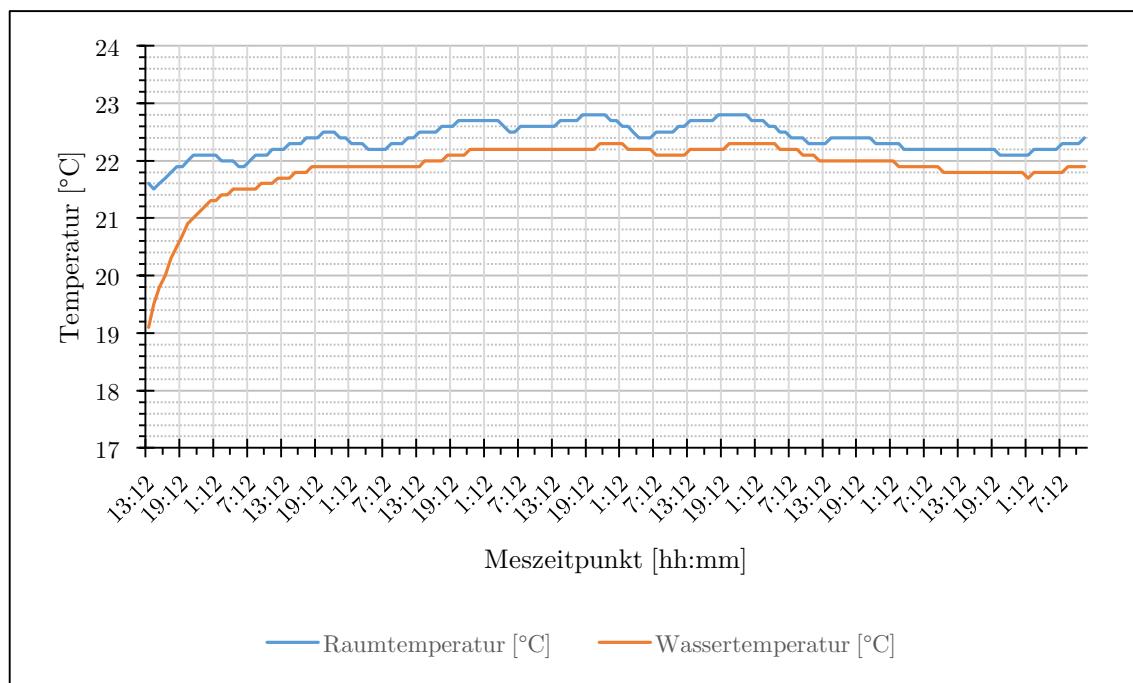
Temperaturverlauf Versuch 3.2



Messzeitpunkt [hh:mm:ss]	Raumtemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]	Datum
14:37:57	21,7	20,1	22.09.15
15:37:58	21,8	20,4	
16:37:58	21,9	20,6	
17:37:59	22,0	20,8	
18:37:59	22,1	21,0	
19:37:59	22,2	21,1	
20:37:59	22,2	21,2	
21:38:00	22,2	21,4	
22:38:00	22,2	21,5	
23:28:00	22,2	21,5	
00:38:00	22,2	21,6	23.09.15
01:38:01	22,2	21,7	
02:38:01	22,2	21,7	
03:38:01	22,2	21,7	
04:38:01	22,2	21,7	
05:38:02	22,2	21,7	
06:38:02	22,2	21,8	
01:38:02	22,2	21,8	
08:38:02	22,2	21,8	
09:38:03	22,3	21,8	
10:38:03	22,3	21,8	
11:38:03	22,3	21,8	
12:38:03	22,3	21,8	
13:38:04	22,3	21,8	

14:38:04	22,3	21,9	
15:38:04	22,4	21,9	
16:38:04	22,4	21,9	
17:38:04	22,4	21,9	
18:38:05	22,5	21,9	
19:38:05	22,5	22,0	
20:38:05	22,5	22,0	
21:38:06	22,5	22,0	
22:38:06	22,5	22,0	
23:38:06	22,5	22,0	
00:38:06	22,5	22,1	24.09.15
01:38:06	22,5	22,1	
02:38:07	22,5	22,1	
03:38:07	22,5	22,1	
04:38:07	22,4	22,1	
05:38:07	22,4	22,1	
06:38:08	22,3	22,0	
07:38:08	22,3	22,0	
08:38:08	22,3	22,0	
09:38:08	22,3	22,0	
10:38:09	22,4	22,0	
11:38:09	22,4	22,0	
12:38:09	22,4	22,0	

Temperaturverlauf Versuch 3.5



Messzeitpunkt [hh:mm:ss]	Raumtemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]	Datum
13:12:04	21,6	19,1	28.09.15
14:12:04	21,5	19,5	
15:12:05	21,6	19,8	
16:12:05	21,7	20,0	
17:12:05	21,8	20,3	
18:12:05	21,9	20,5	
19:12:06	21,9	20,7	
20:12:06	22,0	20,9	
21:12:06	22,1	21,0	
22:12:06	22,1	21,1	
23:12:07	22,1	21,2	
00:12:07	22,1	21,3	29.09.15
01:12:07	22,1	21,3	
02:12:07	22,0	21,4	
03:12:08	22,0	21,4	
04:12:08	22,0	21,5	
05:12:08	21,9	21,5	
06:12:08	21,9	21,5	
07:12:09	22,0	21,5	
08:12:09	22,1	21,5	
09:12:09	22,1	21,6	
10:12:09	22,1	21,6	
11:12:09	22,2	21,6	
12:12:10	22,2	21,7	

13:12:10	22,2	21,7	
14:12:10	22,3	21,7	
15:12:10	22,3	21,8	
16:12:11	22,3	21,8	
17:12:11	22,4	21,8	
18:12:11	22,4	21,9	
19:12:11	22,4	21,9	
20:12:12	22,5	21,9	
21:12:12	22,5	21,9	
22:12:12	22,5	21,9	
23:12:12	22,4	21,9	
00:12:13	22,4	21,9	30.09.15
01:12:13	22,3	21,9	
02:12:13	22,3	21,9	
03:12:13	22,3	21,9	
04:12:13	22,2	21,9	
05:12:14	22,2	21,9	
06:12:14	22,2	21,9	
07:12:14	22,2	21,9	
08:12:14	22,3	21,9	
09:12:15	22,3	21,9	
10:12:15	22,3	21,9	
11:12:15	22,4	21,9	
12:12:15	22,4	21,9	
13:12:16	22,5	21,9	
14:12:16	22,5	22,0	
15:12:16	22,5	22,0	
16:12:16	22,5	22,0	
17:12:17	22,6	22,0	
18:12:17	22,6	22,1	
19:12:17	22,6	22,1	
20:12:17	22,7	22,1	
21:12:17	22,7	22,1	
22:12:18	22,7	22,2	
23:12:18	22,7	22,2	
00:12:18	22,7	22,2	01.10.15
01:12:18	22,7	22,2	
02:12:19	22,7	22,2	
03:12:19	22,7	22,2	
04:12:19	22,6	22,2	
05:12:19	22,5	22,2	
06:12:20	22,5	22,2	

07:12:20	22,6	22,2	
09:12:20	22,6	22,2	
09:12:20	22,6	22,2	
10:12:21	22,6	22,2	
11:12:21	22,6	22,2	
12:12:21	22,6	22,2	
13:12:21	22,6	22,2	
14:12:22	22,7	22,2	
15:12:22	22,7	22,2	
16:12:22	22,7	22,2	
17:12:22	22,7	22,2	
18:12:22	22,8	22,2	
19:12:23	22,8	22,2	
20:12:23	22,8	22,2	
21:12:23	22,8	22,3	
22:12:23	22,8	22,3	
23:12:24	22,7	22,3	
00:12:24	22,7	22,3	02.10.15
01:12:24	22,6	22,3	
02:12:24	22,6	22,2	
03:12:25	22,5	22,2	
04:12:25	22,4	22,2	
05:12:25	22,4	22,2	
06:12:25	22,4	22,2	
07:12:25	22,5	22,1	
08:12:26	22,5	22,1	
09:12:26	22,5	22,1	
10:12:26	22,5	22,1	
11:12:26	22,6	22,1	
12:12:27	22,6	22,1	
13:12:27	22,7	22,2	
14:12:27	22,7	22,2	
15:12:27	22,7	22,2	
16:12:28	22,7	22,2	
17:12:28	22,7	22,2	
18:12:28	22,8	22,2	
19:12:28	22,8	22,2	
20:12:29	22,8	22,3	
21:12:29	22,8	22,3	
22:12:29	22,8	22,3	
23:12:29	22,8	22,3	
00:12:29	22,7	22,3	03.10.15

01:12:30	22,7	22,3
02:12:30	22,7	22,3
03:12:30	22,6	22,3
04:12:30	22,6	22,3
05:12:31	22,5	22,2
06:12:31	22,5	22,2
07:12:31	22,4	22,2
08:12:31	22,4	22,2
09:12:32	22,4	22,1
10:12:32	22,3	22,1
11:12:32	22,3	22,1
12:12:32	22,3	22,0
13:12:33	22,3	22,0
14:12:33	22,4	22,0
15:12:33	22,4	22,0
16:12:33	22,4	22,0
17:12:34	22,4	22,0
18:12:34	22,4	22,0
19:12:34	22,4	22,0
20:12:35	22,4	22,0
21:12:35	22,4	22,0
22:12:35	22,3	22,0
23:12:35	22,3	22,0
00:12:35	22,3	22,0
01:12:36	22,3	22,0
02:12:36	22,3	21,9
03:12:36	22,2	21,9
04:12:36	22,2	21,9
05:12:37	22,2	21,9
06:12:37	22,2	21,9
07:12:37	22,2	21,9
08:12:37	22,2	21,9
09:12:38	22,2	21,9
10:12:38	22,2	21,8
11:12:38	22,2	21,8
12:12:38	22,2	21,8
13:12:38	22,2	21,8
14:12:39	22,2	21,8
15:12:39	22,2	21,8
16:12:39	22,2	21,8
17:12:39	22,2	21,8
18:12:40	22,2	21,8

19:12:40	22,2	21,8	
20:12:40	22,1	21,8	
21:12:40	22,1	21,8	
22:12:41	22,1	21,8	
23:12:41	22,1	21,8	
00:12:41	22,1	21,8	05.10.15
01:12:41	22,1	21,7	
02:12:42	22,2	21,8	
03:12:42	22,2	21,8	
04:12:42	22,2	21,8	
05:12:42	22,2	21,8	
06:12:43	22,2	21,8	
07:12:43	22,3	21,8	
08:12:43	22,3	21,9	
09:12:43	22,3	21,9	
10:12:43	22,3	21,9	
11:12:43	22,4	21,9	

Anhang C II: Wasserdichte verschiedener Temperaturen

Auszug aus Internet-Chemielexikon: Dichte [g/ml] von reinem Wasser unter Normaldruck

°C	,0	,1	,2	,3	,4	,5	,6	,7	,8	,9
0	0,999843	0,999850	0,999856	0,999863	0,999869	0,999875	0,999880	0,999886	0,999892	0,999897
10	0,999702	0,999694	0,999685	0,999675	0,999666	0,999657	0,999647	0,999638	0,999628	0,999618
20	0,998207	0,998186	0,998166	0,998145	0,998124	0,998103	0,998081	0,998060	0,998039	0,998017
30	0,99565	0,99562	0,99559	0,99556	0,99553	0,99550	0,99547	0,99544	0,99541	0,99537

Anhang C III: Datentabellen dargestellter Diagramme

Abbildung 12: Vergleich der Versuche 1.1 – 2.2

Versuch 1.1	<i>Datum; Uhrzeit [hh:mm:ss]</i>	<i>Zeitpunkt [hh:mm:ss]</i>
<i>Beginn</i>	01.07.2015; 12:13:45	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	01.07.2015; 14:58:45	02:45:00
<i>Allgemeine Verteilung</i>	01.07.2015; 19:28:45	07:15:00
<i>Homogene Verteilung</i>	02.07.2015; 17:53:47	29:40:02
Versuch 1.2		
<i>Beginn</i>	10.07.2015; 14:17:46	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	10.07.2015; 16:27:47	02:10:01
<i>Allgemeine Verteilung</i>	10.07.2015; 20:13:48	05:56:02
<i>Homogene Verteilung</i>	11.07.2015; 15:51:54	25:34:08
Versuch 1.3		
<i>Beginn</i>	14.07.2015; 14:43:37	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	14.07.2015; 17:51:38	03:08:01
<i>Allgemeine Verteilung</i>	14.07.2015; 23:03:39	08:20:02
<i>Homogene Verteilung</i>	15.07.2015; 20:25:43	29:42:06
Versuch 1.4		
<i>Beginn</i>	10.12.2015; 10:23:14	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	10.12.2015; 16:09:16	05:46:02
<i>Allgemeine Verteilung</i>	10.12.2015; 20:47:17	10:24:03
<i>Homogene Verteilung</i>	14.12.2015; 10:25:34	96:12:20
Versuch 2.2		
<i>Beginn</i>	08.07.2015; 13:48:10	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	08.07.2015; 17:50:10	04:02:00
<i>Allgemeine Verteilung</i>	08.07.2015; 22:00:11	08:12:01
<i>Homogene Verteilung</i>	09.07.2015; 18:42:16	28:54:06
Versuch 2.2		
<i>Beginn</i>	17.07.2015; 12:55:01	00:00:00
<i>Erste Sichtbarkeit</i>	17.07.2015; 17:07:02	04:12:01
<i>Allgemeine Verteilung</i>	18.07.2015; 23:39:03	10:33:02
<i>Homogene Verteilung</i>	18.07.2015; 20:09:08	31:14:07

Abbildung 13: Vergleich der Versuche 3.1 – 41.

Versuch 3.1	<i>Datum; Uhrzeit [hh:mm:ss]</i>	<i>Zeitpunkt [hh:mm:ss]</i>
<i>Beginn</i>	14.09.2015; 13:25:33	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	14.09.2015; 22:01:35	08:36:02
<i>2. Schicht</i>	15.09.2015; 11:19:38	21:54:05
<i>3. Schicht</i>	16.09.2015; 08:01:43	42:36:10
Versuch 3.2		
<i>Beginn</i>	22.09.2015; 14:37:57	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	23.09.2015; 01:50:01	11:12:04
<i>2. Schicht</i>	23.09.2015; 03:50:01	13:12:04
<i>3. Schicht</i>	23.09.2015; 15:44:04	25:06:07
Versuch 3.3		
<i>Beginn</i>	26.09.2015; 12:45:36	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	27.09.2015; 00:15:39	11:30:03
<i>2. Schicht</i>	27.09.2015; 11:51:42	23:06:06
<i>3. Schicht</i>	28.09.2015; 11:59:48	47:14:12
Versuch 3.4		
<i>Beginn</i>	25.01.2016; 14:49:01	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	25.01.2016; 19:37:03	04:48:02
<i>2. Schicht</i>	25.01.2016; 21:57:03	07:08:02
<i>3. Schicht</i>	-	-
Versuch 3.5		
<i>Beginn</i>	28.09.2015; 13:12:04	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	29.09.2015; 03:56:13	14:44:09
<i>2. Schicht</i>	29.09.2015; 20:26:17	31:14:13
<i>3. Schicht</i>	01.10.2015; 16:36:34	75:24:30
Versuch 4.1		
<i>Beginn</i>	08.10.2015; 12:18:52	00:00:00
<i>1. Schicht</i>	08.10.2015; 21:52:54	09:34:02
<i>2. Schicht</i>	09.10.2015; 20:12:59	31:54:07
<i>3. Schicht</i>	10.10.2015; 20:03:05	55:44:13

Abbildung 14: Vergleich der Grenztiefen [cm]

<i>Schicht</i>	<i>Versuch 3.1</i>	<i>Versuch 3.2</i>	<i>Versuch 3.3</i>	<i>Versuch 3.4</i>
0	-	-	-	-
1	10	8	10,5	16
2	14,5	14	15	20
3	20	18	19,5	-

Abbildung 15: elektrische Leitfähigkeiten [mS/cm] Versuch 3.3

Versuch 3.3; Beginn	Versuch 3.3; Ende	Messhöhe [cm]
39,2	39,9	7,5
41,8	43,1	14,5
45,8	46,6	19,5
49,6	49,0	25,5
55,1	54,8	35,5
62,9	62,0	45,5

Abbildung 16: elektrische Leitfähigkeit [mS/cm] Versuch 3.4

Messtiefe [cm]	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
3,5	35,8	38,7	42,2	42,3	42,4
8,5	37,8	38,7	42,3	42,3	42,4
14,5	39,3	38,8	42,3	42,4	42,4
19,5	41,2	41,3	42,3	42,4	-
20,0	-	-	-	-	42,4
23,0	-	-	-	-	42,6
27,5	43,3	43,6	42,6	43,4	43,8
32,5	46,3	45,0	45,7	45,7	43,8
37,5	50,6	48,0	48,3	48,3	48,5
42,5	54,1	51,2	40,9	50,6	51,0
47,5	54,7	54,3	52,5	52,0	52,0

Abbildung 18: Raum- und Wassertemperatur; Versuch 3.1

Messzeitpunkt [hh:mm:ss]	Raumtemperatur [°C]	Wassertemperatur [°C]	Datum
13:25:33	22,9	21,0	14.09.15
14:25:33	22,4	21,2	
15:25:34	22,5	21,5	
16:25:34	22,7	21,6	
17:25:34	22,8	21,8	
18:25:34	22,9	22,0	
19:25:35	22,9	22,1	
20:25:35	22,9	22,2	
21:25:35	23,0	22,3	
22:25:35	23,0	22,4	
23:25:36	22,9	22,5	
00:25:36	22,9	22,5	15.09.15
01:25:36	22,9	22,6	
02:25:36	22,8	22,6	

03:25:37	22,8	22,6
04:25:37	22,8	22,6
05:25:37	22,8	22,6
06:25:37	22,8	22,6
07:25:37	22,8	22,6
08:25:38	22,8	22,6
09:25:38	22,8	22,7
10:25:38	22,9	22,7
11:25:38	22,9	22,7
12:25:38	22,9	22,7
13:25:39	22,9	22,7
14:25:39	22,9	22,7
15:25:39	23,0	22,7
16:25:40	23,0	22,7
17:25:40	23,0	22,7
18:25:40	23,1	22,8
19:25:40	23,1	22,8
20:25:41	23,1	22,8
21:25:41	23,0	22,8
22:25:41	23,0	22,8
23:25:41	23,0	22,8
00:25:41	23,0	22,8
01:25:42	23,0	22,8
02:25:42	22,9	22,8
03:25:42	22,9	22,8
04:25:42	22,9	22,8
05:25:43	22,8	22,7
06:25:43	22,9	22,7
07:25:43	22,9	22,7
08:25:43	22,9	22,7
09:25:44	22,9	22,7
10:25:44	22,9	22,7
11:25:44	22,9	22,7
12:25:44	23,0	22,7
13:25:44	23,0	22,7
14:25:44	23,0	22,7
15:25:45	23,0	22,8
16:25:45	23,1	22,8
17:25:45	23,1	22,8
18:25:46	23,1	22,8
19:25:46	23,1	22,8
20:25:46	23,1	22,9

21:25:46	23,1	22,9	
22:25:47	23,2	22,9	
23:25:47	23,2	22,9	
00:25:47	23,2	22,9	17.09.15
01:25:47	23,2	23,0	
02:25:47	23,1	23,0	
03:25:48	23,1	23,0	
04:25:48	23,1	23,0	
05:25:48	23,1	23,0	
06:25:48	23,1	22,9	
07:25:49	23,1	22,9	
08:25:49	23,1	22,9	
09:25:49	23,1	22,9	
10:25:49	23,1	22,9	
11:25:50	23,0	22,9	
12:25:50	23,1	22,9	
13:25:50	23,1	22,9	
14:25:50	23,1	22,9	
15:25:50	23,1	22,9	
16:25:51	23,1	22,9	
17:25:51	23,1	22,9	
18:25:51	23,1	22,9	
19:25:51	23,2	22,9	
20:25:52	23,2	22,9	
21:25:52	23,2	22,9	
22:25:52	23,2	23,0	
23:25:52	23,1	23,0	
00:25:53	23,1	22,9	18.09.15
01:25:53	23,1	22,9	
02:25:53	23,0	22,9	
03:25:53	23,0	22,9	
04:25:53	23,0	22,9	
05:25:54	22,9	22,8	
06:25:54	22,9	22,8	
07:25:54	22,9	22,8	
08:25:54	22,9	22,8	
09:25:55	22,9	22,8	
10:25:55	22,9	22,8	
11:25:55	22,9	22,7	
12:25:55	22,8	22,7	
13:25:56	22,8	22,7	
14:25:56	22,9	22,7	

15:25:56	22,9	22,7	
16:25:56	22,9	22,7	
17:25:57	22,9	22,7	
18:25:57	23,0	22,9	
19:25:57	23,0	22,7	
20:25:57	23,0	22,7	
21:25:58	23,0	22,7	
22:25:58	22,9	22,7	
23:25:58	22,9	22,7	
00:25:58	22,9	22,7	19.09.15
01:25:58	22,9	22,7	
02:25:58	22,9	22,7	
03:25:59	22,8	22,7	
04:25:59	22,8	22,7	
05:25:59	22,7	22,7	
06:26:00	22,7	22,6	
07:26:00	22,7	22,6	
08:26:00	22,7	22,6	
09:26:00	22,7	22,5	
10:26:01	22,6	22,5	
11:26:01	22,6	22,5	
12:26:01	22,6	22,5	
13:26:01	22,6	22,5	
14:26:02	22,6	22,5	
15:26:02	22,6	22,4	
16:26:02	22,6	22,4	
17:26:02	22,6	22,4	
18:26:03	22,6	22,4	
19:26:03	22,6	22,4	
20:26:03	22,5	22,4	
21:26:03	22,5	22,4	
22:26:03	22,5	22,4	
23:26:04	22,5	22,4	
00:26:04	22,4	22,3	20.09.15
01:26:04	22,4	22,3	
02:26:04	22,4	22,3	
03:26:05	22,4	22,3	
04:26:05	22,4	22,3	
05:26:05	22,3	22,2	
06:26:05	22,3	22,2	
07:26:06	22,3	22,2	
08:26:06	22,3	22,2	

09:26:06	22,3	22,2	
10:26:06	22,3	22,2	
11:26:07	22,3	22,2	
12:26:07	22,3	22,2	
13:26:07	22,3	22,1	
14:26:07	22,3	22,1	
15:26:07	22,3	22,1	
16:26:08	22,2	22,1	
17:26:08	22,2	22,1	
18:26:08	22,2	22,1	
19:26:08	22,2	22,1	
20:26:09	22,2	22,1	
21:26:09	22,2	22,1	
22:26:09	22,2	22,1	
23:26:09	22,2	22,1	
00:26:10	22,2	22,0	21.09.15
01:26:10	22,2	22,0	
02:26:10	22,2	22,0	
03:26:10	22,2	22,0	
04:26:11	22,2	22,0	
05:26:11	22,2	22,0	
06:26:11	22,2	22,0	
07:26:11	22,2	22,1	
08:26:12	22,2	22,1	
09:26:12	22,2	22,1	
10:26:12	22,3	22,1	
11:26:12	22,3	22,1	

Anhang C IV: Verzeichnisliste der CD

<i>Ordnername</i>	<i>Dateiname</i>
Uranin Eingabetests	Eingabe über Saugkerze a.jpg
	Eingabe über Saugkerze b.jpg
	Eingabe über Saugkerze c.jpg
	Flächenhafte Eingabe Versuch 1.m4v
	Flächenhafte Eingabe Versuch 2.m4v
	Punktuelle Eingabe Versuch 1.m4v
	Punktuelle Eingabe Versuch 2.m4v
Versuchsreihen 1 und 2	Uranin (40mg/ml) in Wasser Versuch 2.1.m4v
	Uranin (40mg/ml) in Wasser Versuch 2.2.m4v
	Uranin (60mg/ml) in Wasser Versuch 1.1.m4v
	Uranin (60mg/ml) in Wasser Versuch 1.2.m4v
	Uranin (60mg/ml) in Wasser Versuch 1.3.m4v
	Uranin (60mg/ml) in Wasser Versuch 1.4.m4v
Versuchsreihen 3 und 4	Uranin in Salz Versuch 3.1.m4v
	Uranin in Salz Versuch 3.2.m4v
	Uranin in Salz Versuch 3.3.m4v
	Uranin in Salz Versuch 3.4.m4v
	Uranin in Salz Versuch 3.5.m4v
	Uranin in Salz Versuch 4.1.m4v