

**Department of Physics and Astronomy
University of Heidelberg**

Bachelor Thesis in Physics
submitted by

Johannes Stefan Jacob Haux

born in Tübingen (Germany)

2015

This Bachelor Thesis has been carried out by Johannes Stefan Jacob Haux at the
Institute of Environmental Physics in Heidelberg
under the supervision of
Prof. Kurt Roth

Transport durch Dichtestabilitäten in einer Hele-Shaw Zelle

Johannes Haux

1.4.2015

abstract

In this work we will show the influence of density driven instabilities and their

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	4
2	Grundlagen	5
2.1	Poröse Medien	5
2.2	Hydraulik	5
3	Experimenteller Aufbau	6
3.0.1	Hele-Shaw Zelle	6
3.0.2	Kamera	6
3.0.3	Lichtquelle	7
3.1	Verdunstungsexperiment	8
3.2	CO ₂ -Experiment	8
3.3	CO ₂ Experiment mit porösen Medium.	9
4	Methoden	10
4.1	Bildanalyse	10
4.2	Detektion und Verfolgung des Tracers im Fall von Fingerbildung	11
4.2.1	Detektion	11
4.2.2	Länge	11
4.2.3	Wachstum	12
5	Results	13
5.1	Verdunstungsexperiment	13
5.2	CO ₂ -Experiment	13
5.3	CO ₂ Experiment im porösen Medium	14
6	Zusammenfassung	15
6.1	Verdunstungsexperiment	15
6.2	CO ₂ -Experiment	15

Abbildungsverzeichnis

3.2	Abmessungen der Hele-Shaw Zelle . Ansicht von oben und von der Seite. 1: Keil, 2: Dichtung und Abstandhalter, 3: Rahmen, 4: Glasplatte, 5: Füllung der Zelle.	6
3.1	Grundsätzlicher Aufbau der beiden durchgeführten Experimente. Zu sehen sind: 1: Hele-Shaw Zelle , 2: Lichtquelle, 3: Kasten, 4: Lüfter, 5: Computer, 6: CO ₂ -Behälter, 7: Pumpe, 8: Kamera, 9: 3-Wege-Ventil, 10: Reservoir zum Halten des Wasserspiegels bei langen Experimenten.	7
3.3	Die heterogene Struktur des aufgeschütteten porösen Mediums. Die verschiedenen Bereiche unterschiedlicher Kugelgröße lassen sich mit Hilfe von Tabelle 3.3 zuordnen. Die Ausbreitung des Tracers ist mit einer gestrichelten weißen Linie markiert.	8
3.4	Absorbierende Eigenschaften von Bromkresol Grün . Die Graphik ist eine Kopie der Version auf Wikipedia [Wikipedia, 2015]	9
5.1	Mit Hilfe der diskreten Fourieranalyse wird bestimmt wo sich die Finger befinden. Zusätzlich erhält man die dominierenden Abstände der Finger. Man kann gut erkennen, dass dieser bei $k = ??$ liegt. Das bereinigte Spektrum wird zur Fingerdetektion benutzt. . .	13
5.2	Um zu demonstrieren, dass die Methode zur Längenbestimmung funktioniert wurden in diesem Bild die Längen der Finger als Balken über ihre Position geplottet. Da die Finger aber nur in der Anfangsphase des Experiments gerade nach unten sinken kann man in Abbildung 5.3 ein Beispiel sehen, wo die Länge der Finger offensichtlich unterschätzt wird. 13	
5.3	Nach $t = 5 \text{ min}$ kann die Fingerlänge nicht mehr sinnvoll bestimmt werden.	13
5.4	Farbumschläge des Bromkresol Grün in Verbindung mit verschiedenen Substanzen. Bromkresol Grün (1) in neutraler Form, d. h. im Gleichgewicht mit der umgebenden Luft, (2) in Kombination mit CO ₂ . Man kann sehr gut den Ausschlag ins Gelbe erkennen. (3) mit den Glaskügelchen verschiedener Größen, (4) mit Glaskügelchen und CO ₂	14

Kapitel 1

Vorwort

Während der Durchführung meiner Bachelorarbeit entstanden zunächst Ideen zu einem Experiment, dass sich schließlich, für den zur Verfügung stehenden Zeitraum, als nicht durchführbar herausstellte. In Folge dessen kam die Idee zu einem weiteren, für die zur Verfügung stehende Zeit besser geeigneterem Experiment. Aus diesem Grund teilt sich diese Arbeit in jedem ihrer Abschnitte immer in inhaltlich dem einen, wie dem anderen Experiment zugehörigen Bereiche.

Grundlegend für alle Fragestellungen, die im Laufe dieser Arbeit aufkamen, sind Dichteinstabilitäten, die zur treibenden Kraft von Prozessen werden, die mit Hilfe einer Hele-Shaw Zelle beobachtet werden sollen.

Zunächst wird die Frage gestellt, wie sich Verdunstungsphänomene auf Stofftransport in gesättigten, heterogenen, porösen Medien auswirken und zu Stofftransport von der Oberfläche in tiefere Schichten führt. Als Beispiel kann man sich einen Salzsee vorstellen, der dabei ist auszutrocknen und dabei Salz in tiefere Erdschichten einlagert. Beobachtet werden soll hier, in welchem Zeitraum Verdunstung beobachtbar wird und wie stark sie das untersuchte System beeinflusst.

In einem zweiten Ansatz wird die Frage gestellt, wie sich in Wasser lösendes CO_2 für Dichteinstabilitäten sorgt, die schließlich das gelöste Gas in tiefer Wasserbereiche führt. Auch hier lässt sich wieder ein sehr anwendungsbezogenes Beispiel finden, wie schon ? treffend festgestellt hat: Das Einlagern von CO_2 in Gesteinsschichten setzt voraus, dass sich das CO_2 lange genug auf dem Gestein aufhält. Sorgt man dafür, dass unterirdische Wasserreservoirs mit CO_2 gesättigt werden kann man dieses Verhalten künstlich herbeiführen. Ein Verständnis dafür, wie sich CO_2 in Wasser löst und bewegt

ist dafür grundlegend. Hier soll beobachtet werden, wie sich Dichteinstabilitäten auf diese Weise in Wasser ausbilden und anschließend zu Durchmischung führen. Es wird erwartet, dass dabei Finger entstehen [cite](#), deren Beschreibung das beobachtete Phänomen gut charakterisieren kann.

Diese Arbeit ist gegliedert in folgende Teile: Zunächst soll in Teil 2 eine theoretische Grundlage geschaffen werden, zum Verständnis der folgenden Abschnitte. Anschließend erkläre die Teile 3 „Experimenteller Aufbau“ und 4 „Bildanalyse“ die Methoden, mit denen Messdaten beschaffen und ausgewertet wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen werden in Teil 5 „Ergebnisse“ präsentiert und diskutiert. Am Ende folgt eine Zusammenfassung mit Ausblick.

Kapitel 2

Grundlagen

Zur Beschreibung der beiden durchgeführten Hele-Shaw Zellen -Experimente sind zwei Themengebiete von Interesse: Zum einen wird ein Ansatz benötigt um poröse Medien zu charakterisieren, zum anderen muss verstanden werden, wie das Ausbilden von Dichteinstabilitäten von statten geht und wie sich beispielsweise dadurch Finger bilden.

Hierbei bezeichnet \vec{v} die Geschwindigkeit des betrachteten Partikels, ∇p den Druckgradienten und $\mu \nabla^2 \vec{v}$ den Reibungsterm. \vec{f} steht für äußere Kräfte, die auf das System wirken, wie zum Beispiel die Gravitationskraft. [Roth, 2012]

solute transport Konduktivität und Diffusivität =; Reynolds

2.1 Poröse Medien

Poröse Medien, wie beispielsweise Sand oder Ton, teilen den Raum, den sie füllen, in Matrix und Poren auf [Roth, 2012]. Matrix bezeichnet in diesem Fall die Bereiche, an dem sich das feste Medium befinden, der eigentliche Sand. Die Poren bilden den zunächst leeren Raum dazwischen. Als charakteristische Größen lassen sich die Porosität ϕ und die Raumdichte ρ_{bulk} definieren:

$$\phi = \frac{V_{pore}}{V_{tot}} \quad (2.1)$$

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{matrix}}{V_{tot}} = \frac{\phi}{1 - \phi} \quad (2.2)$$

V_{pore} und V_{tot} bezeichnen die Volumina, die von den Poren, bzw insgesamt eingenommen werden, m_{matrix} die Masse der Matrix.

navier + leitfähigkeit

2.2 Hydraulik

Die Bewegung inkompressibler Fluidpartikel wird durch die Navier-Stoke Gleichung beschrieben:

$$\rho \dot{\vec{v}} = \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (2.3)$$

Kapitel 3

Experimenteller Aufbau

Da für beide in Teil 1 beschriebenen Fragestellungen die Dynamik der betrachteten Systeme interessant ist, wird jeweils ein “Light Transmission Experiment” durchgeführt. Hierzu wird eine Hele-Shaw Zelle vor einer homogenen Lichtquelle platziert. Das Licht, dass die Zelle durchdringt wird von einer Digitalkamera aufgezeichnet und für die spätere Auswertung gespeichert. Größter Unterschied bei den beiden durchgeführten Experimenten ist vor Allem die Dauer. Während das Verdunstungsexperiment fast zwei Wochen dauert ist das CO_2 -Experiment auf maximal wenige Stunden ausgelegt. **sollte der letzte Satz sein? Gehört das hier hin?**

3.0.1 Hele-Shaw Zelle

Der Vorteil einer Hele-Shaw Zelle ist, dass man mit Ihr Beobachtungen zweidimensionaler Natur machen kann. Grundsätzlich besteht die Zelle aus zwei Glasplatten, die einem kleinen Abstand zueinander parallel angeordnet sind. Bei diesem Aufbau ist der Zwischenraum an drei der vier Seiten abgedichtet, sodass kein Wasser abfließen kann. Für Dichte wird gesorgt, indem die Glasplatten mit Hilfe von Keilen in einen Rahmen und gegen die Dichtgummis, welche auch als Abstandhalter dienen, gepresst werden. Die offene Seite der Zelle zeigt nach oben und am unteren Ende der Zelle befindet sich ein Ausfluss, über den die Zelle kontrolliert mit Wasser oder einer gewünschten Lösung befüllt werden kann. Die Abmessungen der verwendeten Zellen sind in Tabelle 3.1 festgehalten.

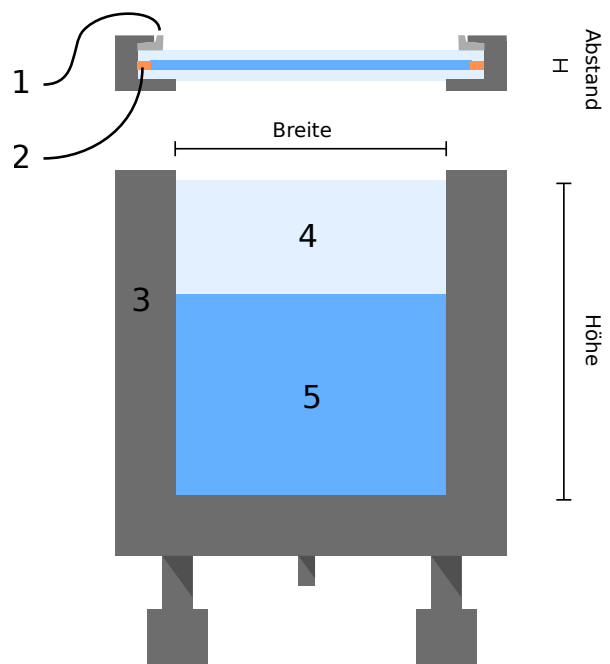


Abbildung 3.2: Abmessungen der Hele-Shaw Zelle . Ansicht von oben und von der Seite. 1: Keil, 2: Dichtung und Abstandhalter, 3: Rahmen, 4: Glasplatte, 5: Füllung der Zelle.

3.0.2 Kamera

Die Messung wird mit Hilfe einer **AVT Pike F-505B**-Kamera durchgeführt. Diese wurde **erst-mals** bei Heberle [2010] zum Einsatz gebracht und ausführlich beschrieben.

Die Daten in 3.2 sind aus dieser Arbeit sowie dem Internetauftritt des Herstellers [Allied-Vision,

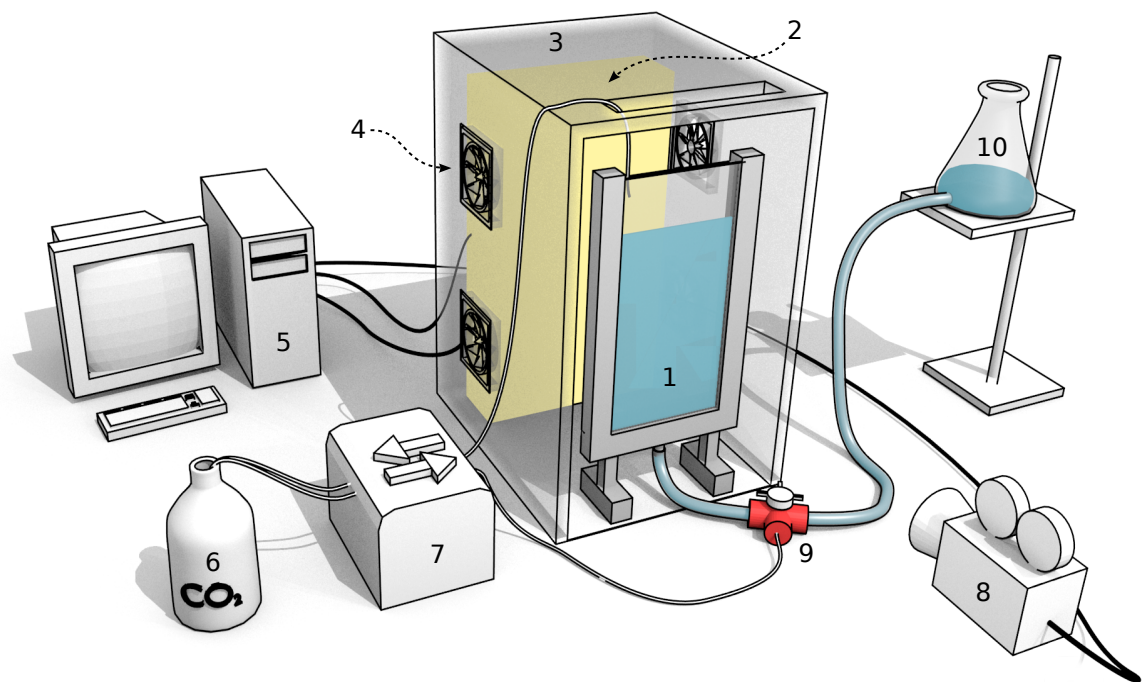


Abbildung 3.1: Grundsätzlicher Aufbau der beiden durchgeführten Experimente. Zu sehen sind: 1: Hele-Shaw Zelle , 2: Lichtquelle, 3: Kasten, 4: Lüfter, 5: Computer, 6: CO₂ -Behälter, 7: Pumpe, 8: Kamera, 9: 3-Wege-Ventil, 10: Reservoir zum Halten des Wasserspiegels bei langen Experimenten.

Aufbau	Höhe	Breite	Abstand
Verdunstungs-experiment	500 mm	273 mm	3 mm
CO ₂ - Experiment	250 mm	273 mm	2,1 mm
	500 mm	273 mm	2,1 mm

Tabelle 3.1: Dimensionierung der Hele-Shaw Zellen für die beiden durchgeführten Experimente. Siehe auch Abbildung 3.2.

2015] entnommen. Die Kamera kann über die Fire-wire Schnittstelle gesteuert und ausgelesen werden. Auch das Auswählen des benötigten Filters kann mit Hilfe eines Filterrads vom Computer aus gesehen.

3.0.3 Lichtquelle

Um eine möglichst gleichmäßige Durchleuchtung der Zelle zu bewerkstelligen wird ein Array aus LEDs der Farben Rot, Grün und Blau verwendet.

Komponente	Eigenschaft
Kamera	AVT Pike F-505B
Sensortyp	CCD
Farbtiefe	14 bit, monochrom
Auflösung	2452 · 2054 Pixel
Schnittstelle	IEEE1394-B
Objektiv	Fujinon HF50SA-1
Brennweite	50 mm
Filter 1	452 nm, FWHM 9 nm
Filter 2	632 nm, FWHM 11 nm

Tabelle 3.2: Herstellerangaben zur verwendeten Kamera, sowie des Objektives und der Filter.

Davor ist eine Diffusorfolie gespannt. Die Lichtquelle befindet sich zusätzlich in einem mit Alufolie ausgekleideten Kasten, in welchen auch Lüfter eingebaut sind. Per Computer lassen sich die LEDs zusammen mit der Lüftung ein und ausschalten. Auch hierzu finden sich wieder ausführliche Informationen bei Buchner [2009] und Heberle [2010].

3.1 Verdunstungsexperiment

Für den ersten Versuch wird ein bereits vorhandener Aufbau von Feustel [2014] gewählt, da die streng heterogenen Eigenschaften des aufgeschütteten porösen Mediums erwünscht sind. Hierbei ist die große Hele-Shaw Zelle mit Glaskügelchen verschiedener Größen gefüllt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die immer homogene Regionen entstehen, die sich nicht komplett über die gesamte Zellbreite erstrecken, wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist. Die Größen der verwendeten Kugeln (*SiLi-Beads*) der Firma *Sigmund-Lindner GmbH* sind in Tabelle 3.3 notiert.

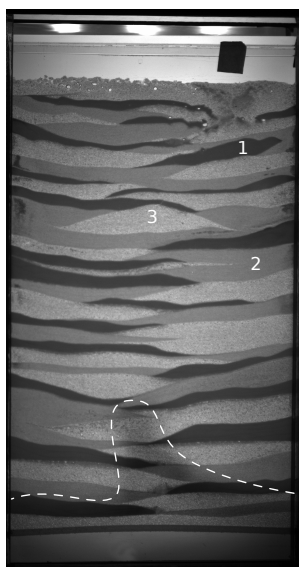


Abbildung 3.3: Die heterogene Struktur des aufgeschütteten porösen Mediums. Die verschiedenen Bereiche unterschiedlicher Kugelgröße lassen sich mit Hilfe von Tabelle 3.3 zuordnen. Die Ausbreitung des Tracers ist mit einer gestrichelten weißen Linie markiert.

Für dieses Experiment wurde der Zufluss so

	Durchmesser [mm]	Stdabw. d. Ø [mm]	Raumgewicht [kg dm ⁻³]
①	0,07 - 0,11	0,06	1,37
②	0,2 - 0,3	0,03	1,44
③	0,4 - 0,6	0,21	1,47

Tabelle 3.3: Daten der verwendeten *SiLi-Beads*. Die Materialdichte der Kugeln beträgt 2,5 kg dm⁻³. Entnommen aus Feustel [2014].

eingerrichtet, dass sowohl CO₂ als auch Wasser, bzw. gelöstes Brilliant Blue kontrolliert in die Zelle geleitet werden können. Brilliant Blue ist eine Nahrungsmittelfarbe, welche hier in einer Konzentration von 0,05 g L⁻¹. Er absorbiert im Wellenlängenbereich von 630 nm maximal. Eine Brilliant Blue Lösung kann also gut mit dem passenden Filter vor der Kamera verfolgt werden. Siehe auch hierzu Abbildung 3.3. Damit keine Luftblasen zwischen den Kügelchen zurückbleiben wird vor dem Fluten mit WasserCO₂ durch die Zelle gespült. Dazu wird eine Flasche mit etwas Trockeneis befüllt und anschließend das entstehende Gas in die Zelle geleitet. Da gasförmiges CO₂ schwerer ist als Luft kann man es einfach laufen lassen. Nach etwas ein bis zwei Stunden wird angenommen, dass die gesamte Luft aus der Zelle verdrängt wurde und es wird Wasser zugeführt. In diesem löst sich das Gas, sodass das poröse Medium komplett mit Wasser gefüllt ist. Um unerwartete Effekte zu vermeiden wird anschließend noch länger Wasser durch die Zelle gepumpt, damit im Wasser, dass letztendlich in der Zelle ist, möglichst kein gelöstes CO₂ ist. Zum Beginn des Experiments wird der Wasserspiegel auf Höhe der obersten Kugelschicht gesenkt und die Pumpschläuche entfernt. Die Kamera filmt das Experiment mit einer Bildrate von 1 Bild/h. Ein Skript steuert die Beleuchtung, sodass diese kurz vor der Bildaufnahme angeht und kurz darauf wieder aus.

3.2 CO₂ -Experiment

Für das zweite Experiment wurde die Hele-Shaw Zellen mit einer Bromkresol Grün Lösung von 3,5 mg L⁻¹ befüllt. Bromkresol Grün ist eine Indikatorlösung, die von blau zu gelb umschlägt in

einem pH-Bereich von 5,4 bis 3,9. Reines Wasser, dass nur mit Luft in Kontakt ist hat einen pH-Wert von 5,6, wohingegen Wasser in dem sich CO_2 gelöst hat einen pH-Wert von 3,9 annimmt. Der Farbumschlag des Bromkresol Grün führt dazu, dass die zunächst fast neutrale Lösung nicht mehr stark im 630 nm-Bereich absorbiert sondern bei 450 nm. Dieses Verhalten wird in Abbildung 3.4 deutlich gemacht.

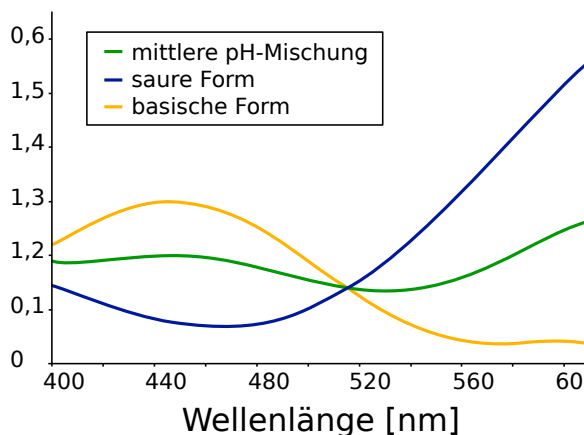


Abbildung 3.4: Absorbierende Eigenschaften von Bromkresol Grün . Die Graphik ist eine Kopie der Version auf Wikipedia [Wikipedia, 2015]

Diese Eigenschaft passt sehr gut zu den zur Verfügung stehenden Filtern und macht es möglich zu verfolgen wo CO_2 in Wasser gelöst ist. Die Kamera filmt wieder das Experiment, dieses mal jedoch mit einer sehr viel höheren Bildrate von ca. 1 Bildern/min. Es werden Aufnahmen mit dem 630 nm- und dem 450 nm-Filter gemacht, sowie Aufnahmen bei geschlossenem Objektiv, die

später zur Dunkelstromkorrektur verwendet werden sollen. Mit Start des Experiments, frühestens jedoch nach der ersten Aufnahme, wird von oben CO_2 in die Zelle geleitet. Auch hier geschieht dies mit Hilfe von Trockeneis, dieses Mal allerdings wird das freigesetzte Gas bei niedriger Rate gepumpt. Damit sich in dem Behältnis für das Gas wirklich nur CO_2 befindet, ist dieses nach oben hin geöffnet, sodass die leichtere Luft verdrängt wird. Zwischen Lösung und oberer Kante der Glasplatten wurde ausreichend Platz gelassen, sodass sich eine breitere CO_2 -Schicht bilden kann.

3.3 CO_2 Experiment mit porösen Medium.

Als zusätzliche Fragestellungen war geplant die durch gelöstes CO_2 verursachten Dichteinstabilitäten auch in Kombination mit einem porösen Medium zu untersuchen. Dazu ist die Zelle wieder mit Glaskügelchen befüllt, ähnlich wie in Aufbau 3.1. Die Durchführung ist ähnlich wie in 3.2. Beim Befüllen der Zelle wird allerdings darauf geachtet, dass diese sehr langsam befüllt wird um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Ein vorheriges Spülen mit CO_2 ist nicht möglich, da das Experiment dadurch systematisch beeinflusst würde. Als poröses Medium wurden neben den bekannten, in Teil 3.1 benutzten Kügelchen auch neue, aus Borosilikatglas verwendet. **Eigenschaften neue Kügelchen**

Kapitel 4

Methoden

Alle vorgenommenen Experimente wurden, wie in Kapitel 3 beschrieben, mit Hilfe einer Kamera aufgezeichnet. Die Auswertung beruht daher in einem ersten Schritt darin die gewünschten Informationen aus den Bildern zu gewinnen. In allen durchgeführten Experimenten ist dies die Verfolgung eines Tracers, welcher andere Absorptionseigenschaften hat, als das ihn umgebende Material. In einem nächsten Schritt werden die so gewonnenen Daten genommen und weiter ausgewertet um Informationen über das Verhalten der Beobachteten Phänomene zu erhalten.

Im folgenden werden häufig die Begriffe “Helligkeit”, “Grauwert” und “Intensität” benutzt. Sie bezeichnen alle die selbe Information: Den Grauwert $i \geq 0$ eines Pixels, bzw. die Grauwerte eines Pixelarrays.

4.1 Bildanalyse

Die vorgenommenen Bildanalysen wurden mit Hilfe von Python (Version 2.7) durchgeführt. Hauptsächlich wurden die Pakete OpenCV (Version 2, zum Laden der Bilder), numpy (Verarbeitung der Bilder, Matrixoperationen) und matplotlib (Darstellung/Speichern und Plotten) verwendet. Ein Bild, welches von OpenCV eingelesen wird besteht aus drei 8 bit Kanälen. Da die Kamera aber ein monochromes Bild aufgezeichnet hat, ist davon auszugehen, dass das eigentlich einkanalige Bild künstlich auf drei Kanäle umgerechnet wurde. Der Einfachheit halber wird über die Kanäle gemittelt und man erhält ein Array aus Grauwerten mit dem weiter gerechnet wird.

Zur Bestimmung der Position eines Tracers stehen verschiedene Möglichkeiten zu Verfügung. Un-

ter der Annahme, dass die aufgezeichneten Bilder \mathbf{B} zu allen Zeiten in allen Bereichen gleich belichtet sind, kann man einfach ein Referenzbild \mathbf{R} vom Rest der Bilder abziehen. Als Referenz wird das erste Bild der Messung, bei noch unverändertem Ausgangszustand gewählt. Als Ergebnis erhält man Matrizen \mathbf{C} , welche in unveränderten Bereichen den Wert Null annehmen, ansonsten aber ungleich null sind:

$$\mathbf{C} = \mathbf{B} - \mathbf{R} \quad (4.1)$$

Allerdings lässt sich leicht feststellen, dass die aufgezeichneten Bilder in ihrer Helligkeit schwanken. Bilder die früher aufgezeichnet wurden sind heller, als solche, die später gemacht wurden. Um diesem Effekt entgegenzuwirken wird ein Algorithmus implementiert, der einen Bildbereich betrachtet, dessen Helligkeit während der gesamten Messung konstant bleiben sollte. Sei \mathbf{B} ein beliebiges Bild der Messreihe und \mathbf{R} das Referenzbild. Dann sind $M(\mathbf{B})$ und $M(\mathbf{R})$ die Arrays aus N Pixeln, die den Bildbereich mit konstanter Intensität beschreiben. Aus allen Elementen wird der jeweilige Mittelwert dieser beiden Matrizen errechnet:

$$\mu_{\mathbf{B}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(\mathbf{B})_i \quad (4.2)$$

$$\mu_{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M(\mathbf{R})_i \quad (4.3)$$

Aus diesen Werten lässt sich nun ein Faktor f zur Korrektur des Bildes errechnen, da gilt:

$$\mu_{\mathbf{R}} = f \cdot \mu_{\mathbf{B}} \quad (4.4)$$

Damit lassen sich alle Grauwerte des Bildes auf den passenden Wert korrigieren ($\mathbf{B}_{neu} = f \cdot \mathbf{B}$) und

man erhält einen neuen Wert für die Differenzmatrix:

$$\mathbf{C} = f \cdot \mathbf{B} - \mathbf{R} \quad (4.5)$$

Neben der schwankenden Helligkeit fällt auch noch auf, dass die LED-Beleuchtung zu einer Vignettierung der Aufnahme führt, da diese dazu tendiert in der Mitte heller zu sein als nach außen hin. Ein einfaches substrahieren der Bilder führt also zu einer Unterschätzung der absoluten Grauwerte im Außenbereich, bzw. zu einer Überschätzung im Innenbereich des Bildes. Unter der Annahme, dass diese Vignettierung über den Zeitraum der Messung konstant bleibt, wird anstelle der Subtraktion eine Division durchgeführt, d. h. jedes Pixel \mathbf{b}_{nm} des untersuchten Bildes wird durch das Pixel \mathbf{r}_{nm} des Referenzbildes an selber Stelle geteilt, wobei gilt $\mathbf{B} = \mathbf{b}_{nm}$ und $\mathbf{R} = \mathbf{r}_{nm}$. Zusammen mit Gleichung 4.5 erhält man folgende Bildungsvorschrift für die Quotientenbilder:

$$\mathbf{C} = \mathbf{c}_{nm} = \frac{f * \mathbf{b}_{nm}}{\mathbf{r}_{nm}} \quad (4.6)$$

Die Werte von \mathbf{C} nehmen den Wert 1 überall dort an, wo Referenz- und betrachtetes Bild gleich sind. Der Tracer befindet sich also dort, wo gilt $\mathbf{c}_{nm} \neq 1$.

Zur leichteren Interpretation werden die Werte vor der graphischen Visualisierung auf einen Wertebereich von 0 bis 100 normiert.

4.2 Detektion und Verfolgung des Tracers im Fall von Fingerbildung

Im zweiten Versuchsaufbau wird beobachtet, dass sich herabsinkende Finger des schwereren Wasser, in dem sich zuvor CO_2 gelöst hat, bilden. Deren Position und Länge über den Zeitraum der Messung, bzw. der ersten Minuten, sind interessante Größen, die dabei helfen können das System zu beschreiben und zu verstehen.

Wird im folgenden von "Bild" gesprochen, so ist vom Quotientenbild nach Gleichung 4.6 die Rede. Mit anderen Worten bezeichnet "Bild" die räumlich aufgelöste Tracerkonzentration zu einem bestimmten Zeitpunkt der Messung.

4.2.1 Detektion

Zunächst wird ein Bereich der zu untersuchenden Bildes festgelegt in dem sich nur Indikatorflüssigkeit befindet. Nach Möglichkeit schließt die obere Kante genau mit der Wasserkante ab. Ein Herausragen über die Wasserkante wird vermieden, da die Hintergrundbeleuchtung für sehr helle Intensitätswerte sorgt. Da auch die Finger für höhere Intensitäten sorgen (siehe Teil 3.2) würde sonst die Messung systematisch beeinflusst. Der Bereich bleibt für alle Bilder gleich.

Aus dem so erhaltenen Array $\mathbf{C} = \mathbf{c}_{nm}$ ($n \in 1, \dots, N$ und $m \in 1, \dots, M$) wird von jeder Säule der Mittelwert genommen. Man erhält ein Array der mittleren Intensitäten $\mathbf{I} = \mathbf{i}_n$:

$$\mathbf{i}_n = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \mathbf{c}_{ni} \quad (4.7)$$

Für jedes Bild, bzw Zeitschritt erhält man so ein charakteristisches Signal. Unter der Annahme, dass die Finger sich gerade nach unten bewegen, befindet sich ein Finger an jedem lokalen Maximum von \mathbf{I} . Über die Richtigkeit dieser Annahme wird in Teil 5.2 diskutiert. Da sich einiges Rauschen auf dem Signal befindet wird mit Hilfe des Python Moduls numpy eine diskrete Fourieranalyse durchgeführt, um das Wellenzahlenspektrum zu erhalten, welches Aufschlüsse über die dominierenden Abstände, auch Wellenlängen bezeichnet, der Finger gibt. Bereinigt man dieses Spektrum von den Werten, die dem Rauschen zugeordnet werden und führt eine Rücktransformation in den ursprünglichen Raum durch, kann man genau sehen, wo sich die Intensitäts-Maxima befinden. Auf diese Weise erhält man eine zeitaufgelöste Vorstellung davon, wo sich die Finger im Verlauf des Experiments befinden.

4.2.2 Länge

Mit dem Wissen, wo sich die Finger befinden, lässt sich relativ leicht auch deren Länge errechnen. Dazu wird an jeder Stelle s im Array \mathbf{C} aus Teil 4.2.1, wo sich ein Finger befindet, die Pixelsäule ' \mathbf{c}_{sm} ' von unten nach oben abgewandert ($m \in M, \dots, 1$), bis ein Schwellenwert c_{crit} überschritten ist, der angibt, ab welchem Grauwert von einem Finger die Rede ist. Um dieses Wert nicht wegen Rauschen zu früh

zu detektieren wird immer über eine Reihe von 5 Pixeln links und rechts von \mathbf{c}_{sm} gemittelt. Der so erhaltene Wert für m gibt die Länge l des Fingers in Pixeln an.

$$l(m) = \left(\frac{1}{10} \sum_{i=s-5}^{s+5} \mathbf{c}_{im} \leq c_{crit} \right) ? l(m-1) : m \quad (4.8)$$

$$l(0) = 0 \quad (4.9)$$

In Abbildung 5.1 und 5.2 sind Beispiele für die Detektion und bestimmte Länge der Finger zu finden.

4.2.3 Wachstum

Da die Finger mit der Zeit länger werden macht es Sinn auch deren Wachstum zu untersuchen. Mit der Annahme, dass alle Finger gleich schnell wachsen reicht es aus zu jedem Zeitschritt den Mittelwert der Länge aller Finger zu nehmen und anschließend durch den Zeitschritt zu teilen. Da man aber beobachten kann, dass die Finger in unterschiedlichen Bereichen unterschiedlich schnell wachsen, wird eine Methode implementiert, die es erlaubt Teile des untersuchten Arrays \mathbf{C} zu betrachten. Das bedeutet, es werden nur die Längen der Finger in diesem Bereich in Betracht gezogen. **Wählt man den Bereich klein genug ist es möglich auch einzelne Finger zu betrachten. ACHTUNG! wurde noch nicht gemacht**

Kapitel 5

Results

5.1 Verdunstungsexperiment

5.2 CO₂ -Experiment



Abbildung 5.2: Um zu demonstrieren, dass die Methode zur Längenbestimmung funktioniert wurden in diesem Bild die Längen der Finger als Balken über ihre Position geplottet. Da die Finger aber nur in der Anfangsphase des Experiments gerade nach unten sinken kann man in Abbildung 5.3 ein Beispiel sehen, wo die Länge der Finger offensichtlich unterschätzt wird.



Abbildung 5.1: Mit Hilfe der diskreten Fourieranalyse wird bestimmt wo sich die Finger befinden. Zusätzlich erhält man die dominierenden Abstände der Finger. Man kann gut erkennen, dass dieser bei $k = ??$ liegt. Das bereinigte Spektrum wird zur Fingerdetektion benutzt.



Abbildung 5.3: Nach $t = 5 \text{ min}$ kann die Fingerglänge nicht mehr sinnvoll bestimmt werden.

5.3 CO₂ Experiment im porösen Medium

Leider musste schnell festgestellt werden, dass die Kügelchen den pH-Wert des Wassers so sehr basisch beeinflussen, dass das CO₂ keinen Ausschlag in die saure Richtung verursachen kann. Fotografien von Tests dazu finden sich in Abbildung 5.4.



Abbildung 5.4: Farbumschläge des Bromkresol Grün in Verbindung mit verschiedenen Substanzen. Bromkresol Grün (1) in neutraler Form, d. h. im Gleichgewicht mit der umgebenden Luft, (2) in Kombination mit CO₂. Man kann sehr gut den Ausschlag ins Gelbe erkennen. (3) mit den Glaskügelchen verschiedener Größen, (4) mit Glaskügelchen und CO₂.

Auch die Verwendung von Kügelchen aus anderem Material wurde angedacht. Erste Tests zeigen

Kapitel 6

Zusammenfassung

6.1 Verdunstungsexperiment

6.2 CO₂ -Experiment

Literaturverzeichnis

Allied-Vision. Pike f-505, 2015. URL <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/firewire/pike/f-505bc.html>.

Jens Stefan Buchner. Solute transport in porous media: Theory and experiment. 2009.

Lisa Feustel. Solute transport in heterogeneous porous media. 2014.

Steffen Heberle. High resolution lab experiments on solute transport in porous media. 2010.

Python. Python language reference, version 2.7. URL <http://www.python.org>.

Kurt Roth. Soil physics. lecture notes. institute of environmental physics, heidelberg university. 2012.

Wikipedia. Bromocresol green — Wikipedia, the free encyclopedia, 2015. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Bromocresol_green#/media/File:Bromocresol_green_spectrum.png. [Online; accessed 18-March-2015].

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 1.April 2015,