

Kapitel 5

Ergebnisse

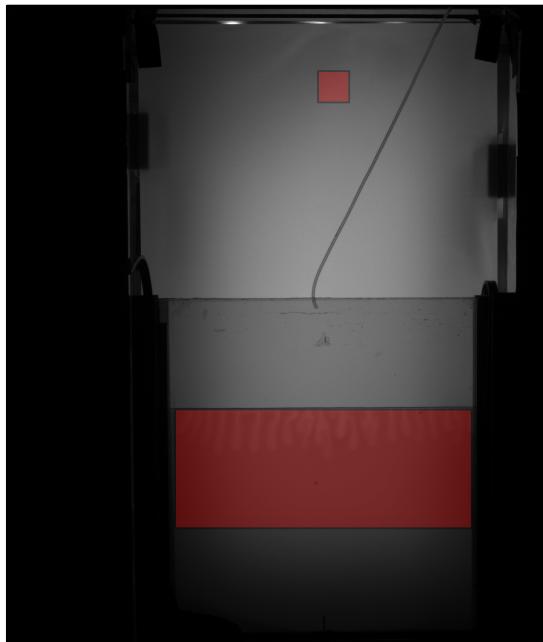


Abbildung 5.1: Foto des Aufbaus. Mit roten Rechtecken sind die Bereiche zur Stabilisierung der Helligkeit (oben rechts) und zur tatsächlichen Auswertung (unten) markiert. Von oben kommt der Schlauch, durch welchen das CO₂ zugeführt wird ins Bild.

5.1 CO₂-Experiment

Wie in Teil 3 beschrieben wurde das CO₂-Experiment mit der kleinen Hele-Shaw Zelle durchgeführt. Ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 5.1

zu sehen. Dort sind auch der Bereich zur Stabilisierung der Helligkeit und der für die Messungen analysierte Bereich eingezeichnet.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt die gemachten Beobachtungen geschildert, anschließend werden sie interpretiert und diskutiert.

5.1.1 Beobachtungen

In den Abbildungen 5.2 bis 5.5 und 5.8 5.13 sind die Ergebnisse des CO₂-Experiments festgehalten. Die Gesamtdauer des Experiments beläuft sich auf 5 h 6 min, der für diese Arbeit interessante Übergang zur Fingerbildung findet nach 9 min statt. Nach ca. 1,5 h wird das Verhalten zunehmend von Vortizitäten, die die ganze Zelle erfassen dominiert, weshalb spätestens hier alle in Teil 4 beschriebenen Methoden versagen. Die Vortizitäten auf Zellskala sorgen für Durchmischung, da durch sie die Finger nicht mehr gerade nach unten sinken können, sondern zur Seite driften.

Wie erwartet kann die Fingerbildung beobachtet werden. Abbildungen 5.8, 5.9 und 5.11 zeigen ihren zeitlichen Verlauf.

Zur Fingerdetektion wurde, wie in Teil 4.2.1 beschrieben, eine Fourieranalyse der mittleren Fingerintensitäten durchgeführt. Die resultierenden Spektren der Wellenzahlen $k(t)$ sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Hier kann man erkennen, dass über den ersten Zeitbereich des Experiments zwischen 9 und 60 min, ein Abstand von 1,52 cm (entspricht $k = 0,66 \text{ cm}^{-1}$) zwischen den Fingern dominiert und im zeitlichen Verlauf stabil bleibt.

Die mit Hilfe dieser Fourieranalyse bereinigten mittleren Fingerintensitäten ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Ihr zeitlicher Verlauf ist farblich kodiert. Es wurden alle Signale mit einer Wellenzahl

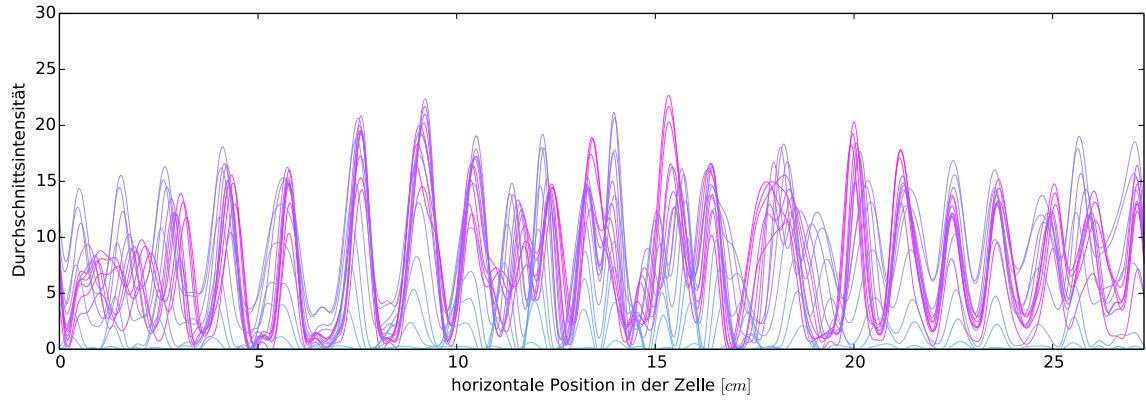


Abbildung 5.2: Die mit Hilfe der diskreten Fourieranalyse vom Rauschen bereinigten mittleren Intensitäten der Finger. Der zeitliche Verlauf ist farblich codiert und geht von 0 min (hellblau) bis 1 h 24 min (pink).

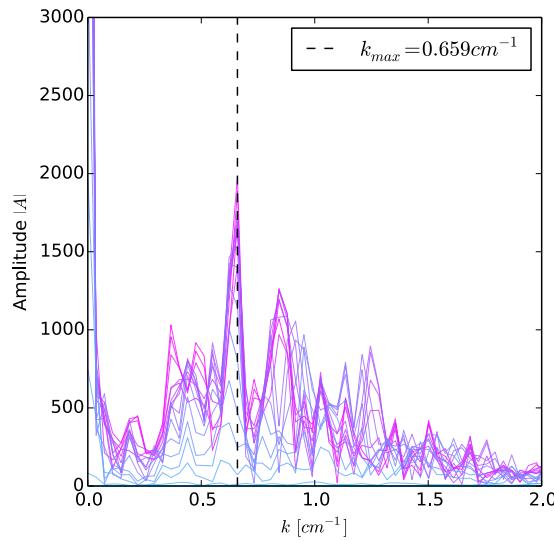


Abbildung 5.3: Mit Hilfe der diskreten Fourieranalyse bestimmtes Spektrum der Wellenzahlen. Man kann gut erkennen, dass $k \approx 0,66 \text{ cm}^{-1}$ die dominierende Wellenzahl ist. Der zeitliche Verlauf ist farblich codiert und geht von 0 min (hellblau) bis 1 h 24 min (pink).

$k > 2 \text{ cm}^{-1}$ als Rauschen eingestuft und ausgespiert. Hier kann man gut das Wachstum der Finger

in Form der steigenden Amplitude, sowie die Bewegung der Finger, erkennen.

Graph 5.4 zeigt die mittlere Länge der Finger im Verlauf der Messung. Für diese Betrachtung wurde der untersuchte Bereich der Hele-Shaw Zelle in 9 gleich große Teile aufgeteilt und über die Längen der Finger in diesen Bereichen gemittelt, um zu sehen, ob das Wachstum in verschiedenen Bereichen der Zelle unterschiedlich ist. Hier zeigt sich, was auch in Abbildung 5.8 zu erkennen ist: die Länge der Finger nimmt linear im Lauf der Zeit zu, mit gleicher Rate in allen Bereichen.

Für genauere Betrachtung des Übergangs vom diffusiven zum konvektiven Vermischungsprozess von Wasser und CO₂ sind in Abbildung 5.11 und 5.12 die ersten 16 min, beziehungsweise 52 min des Experiments gezeigt. Hierfür wurden die originalen Aufnahmen verwendet, da man hier deutlicher den Effekt beobachten kann.

Man kann erkennen, dass im Verlauf des Experiments, von 5 min zu 9 min der Übergang stattfindet. Anschließend bilden sich Finger aus. Direkt zu Beginn der Fingerbildung kann man sehen, wie die diffusive Schicht abgesaugt wird, ebenso wie kürzere Finger. Dies wird in Abbildung 5.12 (9 bis 26 min) besonders deutlich. In diesem Zeitraum kann man beobachten, wie rechts und links von dem am größten hervorragenden Finger die diffusive Schicht kleiner wird, bis fast wieder reines Wasser an der Wasseroberfläche ist. Nach 24 min ist die

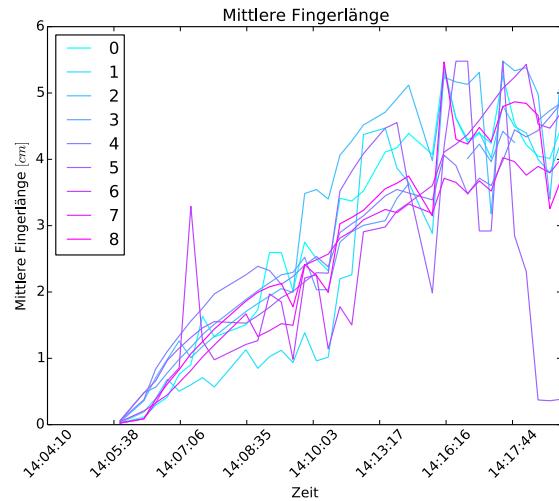


Abbildung 5.4: Länge der detektierten Finger im Verlauf des Experiments. Das Rauschen tritt auf, da die Methode nicht einwandfrei funktioniert. Siehe dazu auch Abbildung 5.10. Im Zeitraum zwischen 9 bis 40 min liefert sie zuverlässige Ergebnisse.

obere CO_2 Schicht wieder so dick wie nach 9 min. Nach 39 min sorgen Vortizitäten dafür, dass die Schicht wieder dünner und vom Finger abgeführt wird.

Letztendlich verschmelzen nach einer Stunde immer mehr Finger miteinander (siehe z.B. Abbildung 5.13). Diese wandern entlang der Wasseroberfläche. Nach 5 h ist die Zelle gut, wenn auch noch nicht komplett, durchmischt.

5.1.2 Diskussion

Ein Vergleich der oben gezeigten Ergebnisse mit denen aus anderen Arbeiten zeigen gute Übereinstimmungen. Kneafsy and Pruess [2010] beschreiben in Ihrer Arbeit sehr ähnliche Phänomene beim Lösen von CO_2 in Wasser in einer Hele-Shaw Zelle, so wie sie auch hier zu beobachten sind. Auch dort wird der Effekt beobachtet, dass die diffusive Schicht, welche sich zunächst ausbildet, mit Entstehen der Finger dünner wird.

Grund für dieses Verhalten ist die Konvektion des CO_2 -haltigen Wassers (siehe Abbildung 5.5).

Was beobachtet werden kann sind zwei Prozesse, die einander beeinflussen:

- Mittels Diffusion wird das gelöste CO_2 langsam in tiefere Wasserschichten gebracht.
- Sobald die dadurch ausgebildete Schicht instabil wird, brechen Finger hervor. Es beginnt ein konvektiver Prozess, der das gelöste CO_2 schneller in noch tieferes Wasser bringt.
- Dadurch wiederum gelangt reines Wasser an die Oberfläche, was wiederum die Lösung von CO_2 im Wasser begünstigt.
- Neues CO_2 wird im Wasser gelöst und über die Konvektionskanäle, also die Finger, abtransportiert.

Abbildung 5.5 veranschaulicht das Beschriebene.

Die stabilen Abstände zwischen den Fingern, in den ersten 60 min, lassen sich auch durch die konvektiven Prozesse zu Beginn erklären. Diese wirken stabilisierend auf die Finger, solange keine Vortizitäten auf Zellskala auftreten. Intuitiv macht es Sinn, dass die Abstände der Finger in Größenordnung ihrer Breite sein sollte, da das durch die Finger verdrängte Volumen dem nach oben gedrängten entsprechen muss. Dieses Verhalten wird beobachtet. Ähnliche Beobachtungen zur Stabilisierung der Fingersabstände werden von Fernandez et al. [2002] gemacht. Auch dort dominiert ein Abstand zu Beginn der Fingerbildung.

Das Verhalten der Finger, das nach spätestens 60 min zu beobachten ist, lässt sich ähnlich erklären. Da die Zelle endlich tief ist, entstehen durch die Abwärtsbewegung des gelösten CO_2 Vortizitäten in Größenordnung der Zellentiefe. Diese führt dazu, dass die Finger nach außen driften und die Zelle nach und nach durchmischt wird.

Damit lässt sich das Experiment insgesamt in drei Phasen gliedern:

- Diffusion (0 min bis 9 min)
- stabile Fingerbildung (9 min bis 60 min)
- Vortizitäten auf Zellebene (60 min bis zum Ende)

Bei der Auswertung dieser Messung gibt es mehrere bekannte Fehlerquellen, die an dieser Stelle Erwähnung finden sollen. Zum einen sind die

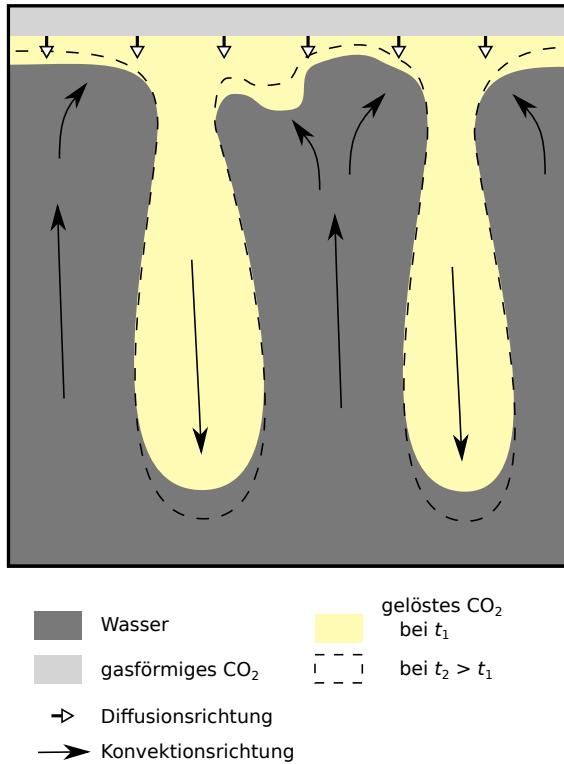


Abbildung 5.5: Interpretation der auftretenden Phänomene, verursacht durch Konvektion und Diffusion. Durch das Absinken der Finger wird Wasser mit gelöstem CO₂ aus der diffusiven Schicht, direkt unter Wasseroberfläche, abtransportiert und klares Wasser nach oben gedrückt. Dadurch kann sich wiederum mehr CO₂ im Wasser lösen.

Aufnahmen, aufgrund der niedrigen Belichtungszeit verrauscht, was die Fingerdetektion und -längenmessung, trotz Stabilisierung der Bildhelligkeit, fehleranfällig macht.

Ein weitaus größeres Problem ist allerdings das Schwanken der Belichtung der Kamera. Leider konnte nicht herausgefunden werden, woher dieser Effekt kommt. Was man feststellen kann ist, dass die Kamera im Laufe der Zeit immer dunklere Bilder macht. Dieser Effekt sollte, durch die in Teil 4.1 beschriebene Methode zur Korrektur der Helligkeitsschwankungen ausgeglichen werden. Leider konnte die angewandte Methode allerdings, nicht die gewünschten Ergebnisse liefern. Die Helligkeit der Bilder schwankt trotz allem im analysierten Bereich, wenn auch weniger stark. Dennoch führt dies dazu, dass, wie man in Abbildung 5.8 sehen kann, die Intensitäten der Finger schwanken und schwächer werden. Auch das führt zu fehlerhaften Längenbestimmungen der Finger, da der Grenzwert (siehe Teil 4.2.2) zu spät erreicht wird.

Diese Fehlerquellen wirken sich aber nicht negativ auf die Bestimmung der Fingerabstände über die Fourieranalyse aus, da die mittleren Intensitäten, trotzdem das charakteristische Wellenmuster (siehe Abbildung 5.2) aufweisen. Die Werte, welche aus diesen Messungen gewonnen wurden sind somit aussagekräftig.

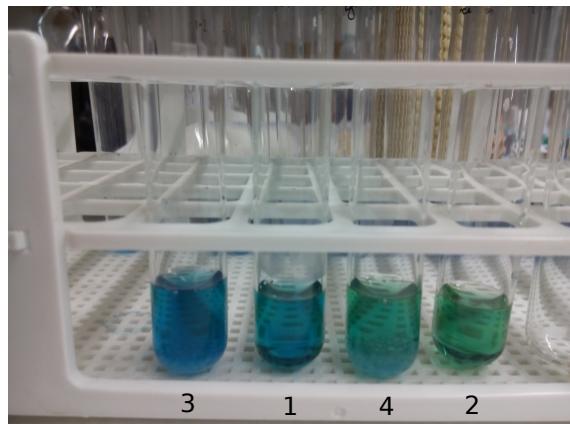


Abbildung 5.7: Farbumschläge des Bromkresol Grün. Bromkresol Grün (1) in neutraler Form, d.h. im Gleichgewicht mit der umgebenden Luft, (2) in Kombination mit gelöstem CO₂, (3) mit den Glaskügelchen aus Borosilikat-Glas, (4) mit Glaskügelchen und gelöstem CO₂.



Abbildung 5.6: 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, (3) mit den Glaskügelchen verschiedener Größen, (4) mit Glaskügelchen und gelöstem CO₂.

5.2 CO₂-Experiment mit porösem Medium

Der Versuch das CO₂-Experiment in einer mit einem porösen Medium gefüllten Hele-Shaw Zelle durchzuführen ist aufgrund der verwendeten Glas-Kugeln gescheitert. Glas macht Wasser durch Ionenaustausch basisch. Die leicht löslichen Elemente an der Oberfläche des Glases werden vom Wasser herausgelöst und durch die im Wasser vorhandenen H⁺-Ionen ersetzt. Dadurch wird das Wasser basisch, da die OH⁻-Konzentration steigt [Vogel, 1992].

Dieser Effekt ist durch die große Oberfläche, die die Kugelchen insgesamt haben, nicht zu verhindern und sorgt dafür, dass der benutzte Indikator nur den basischen Farbton annimmt. Das Lösen von CO₂ im Wasser kann diesen Effekt offensichtlich nicht überwiegen.

Zur Verdeutlichung der beschriebenen Phänomene siehe Abbildung 5.6. Man kann erkennen, dass der Indikator einwandfrei das gelöste CO₂ anzeigt, solange sich nicht zusätzlich Kugelchen dabei befinden. In diesem Fall bleibt der Indikator blau, auch wenn CO₂ im Wasser gelöst ist.

Ein angedachter Lösungsansatz mit Glaskugeln, welche dem Wasser gegenüber beständiger sind, konnte aus Zeitgründen nicht umgesetzt werden. Wie man in Abbildung 5.7 sehen kann ergab ein Test der Kugeln aus Borosilikatglas aber vielversprechende Ergebnisse, da der durch das CO₂ hervorgerufene Farbumschlag auch mit Kugeln in der Indikatorlösung beobachtet werden konnte.

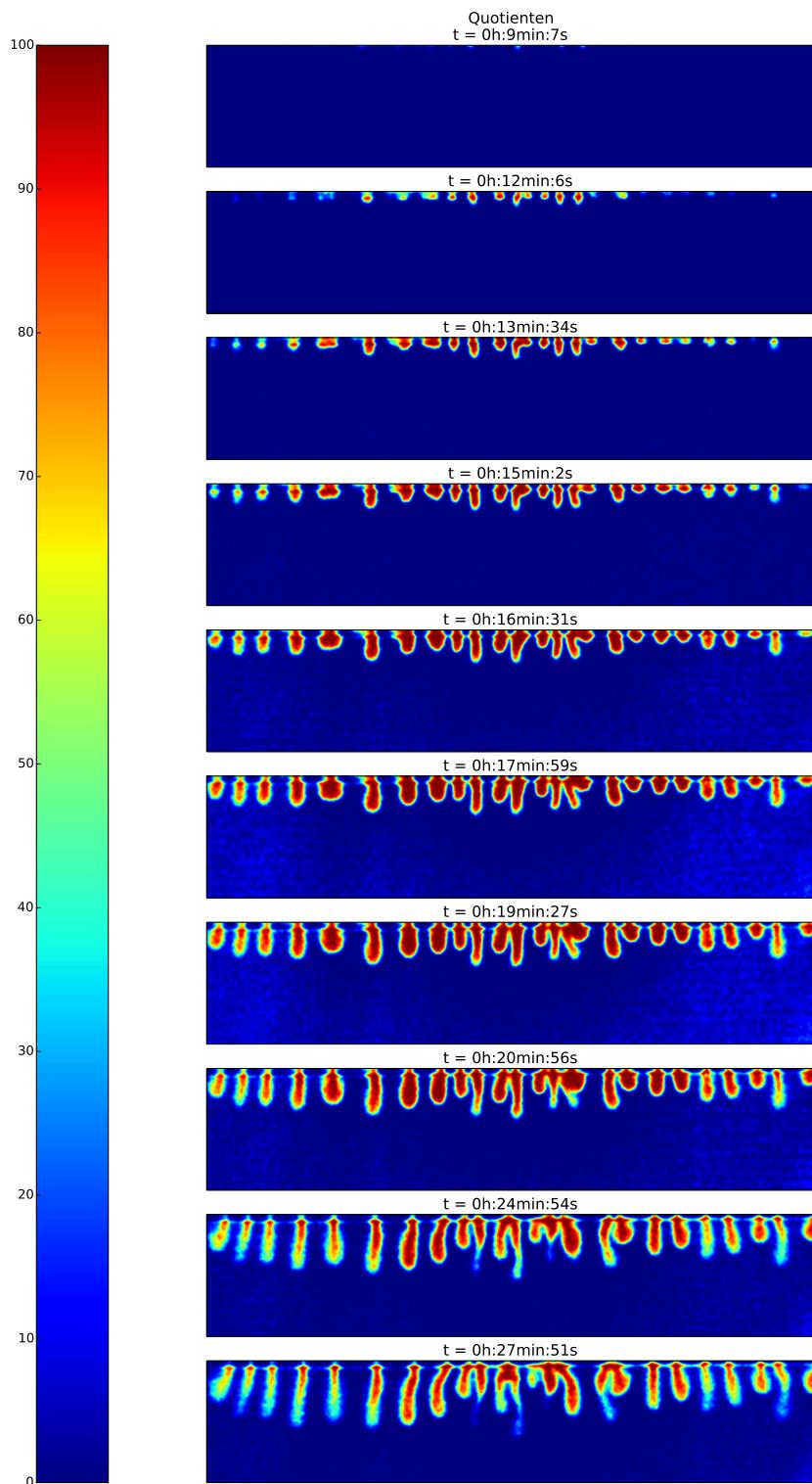


Abbildung 5.8: (1/2) Fingerbildung im CO_2 -Experiment. Die Farbskala beschreibt die relative Absorption im Bezug auf den Hintergrund. Maximale Absorption bekommt den Wert 100 zugewiesen, minimale 0.

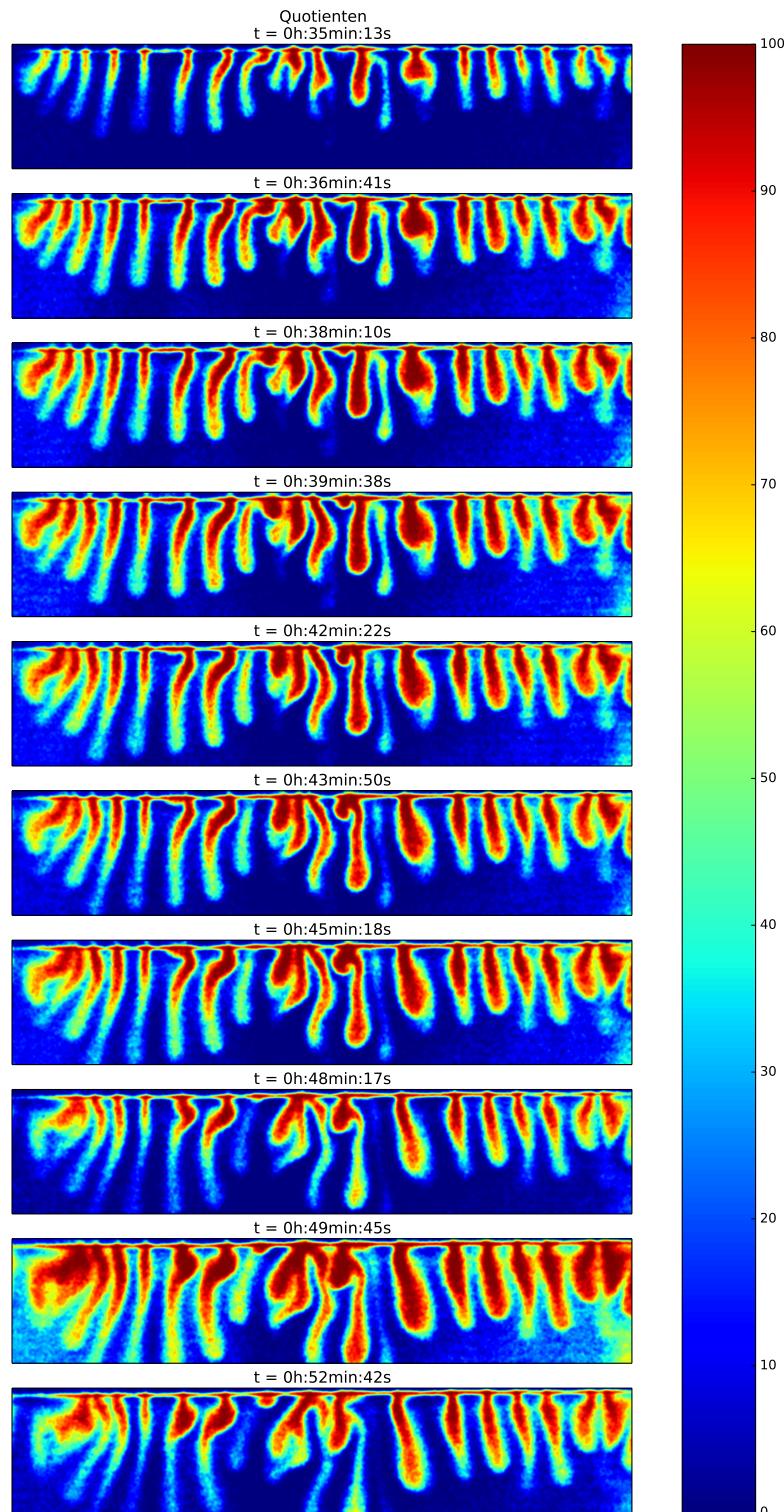


Abbildung 5.9: (2/2) Fingerbildung im CO_2 -Experiment. Die Farbskala beschreibt die relative Absorption im Bezug auf den Hintergrund. Maximale Absorption bekommt den Wert 100 zugewiesen, minimale 0.

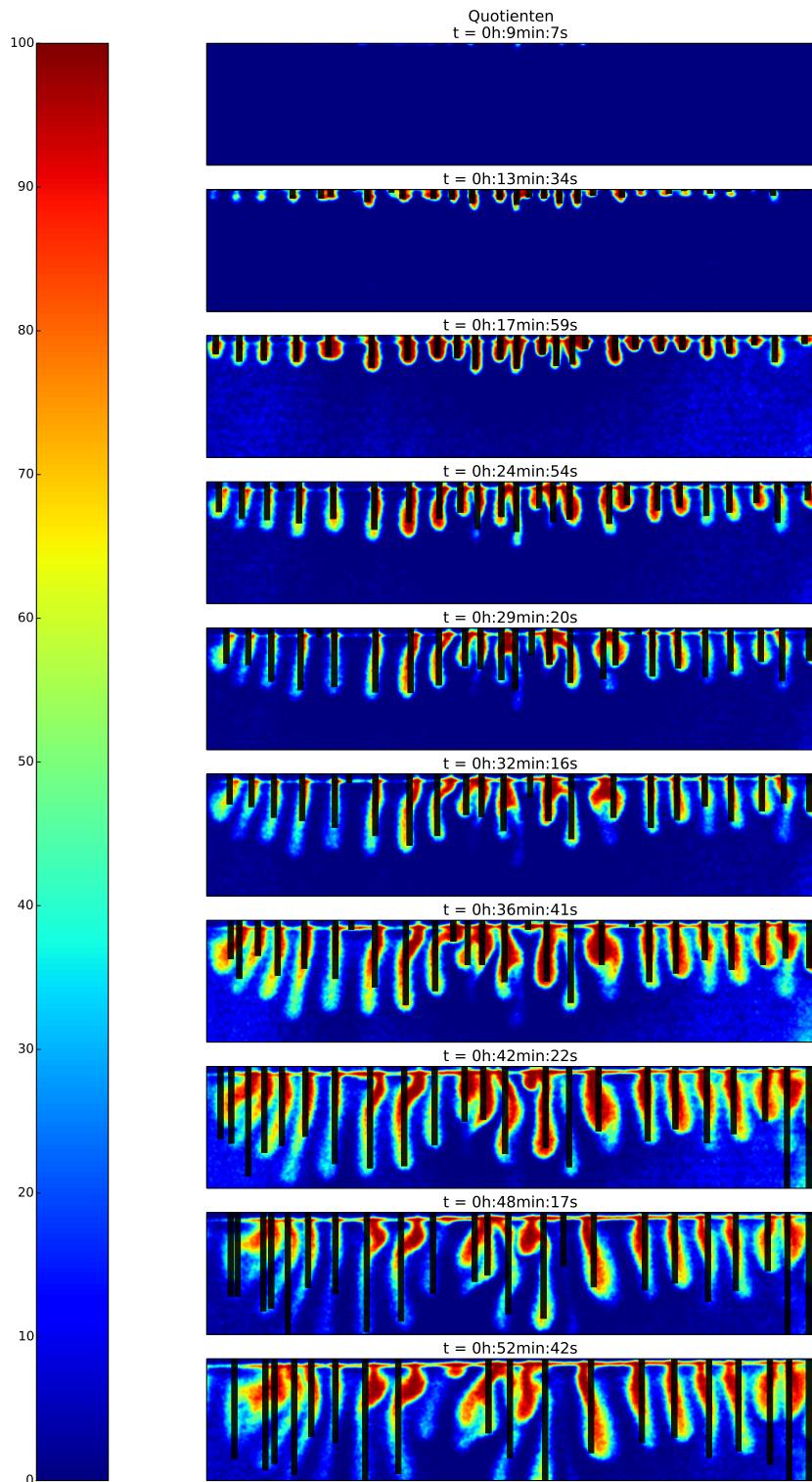


Abbildung 5.10: Abgebildet sind die Fingerbildung zusammen mit den detektierten Fingerpositionen und -längen zur Demonstration, wie die in Teil 4.2.2 beschriebene Methode funktioniert. Die Farbskala beschreibt die relative Absorption im Bezug auf den Hintergrund. Maximale Absorption bekommt den Wert 100 zugewiesen, minimale 0.

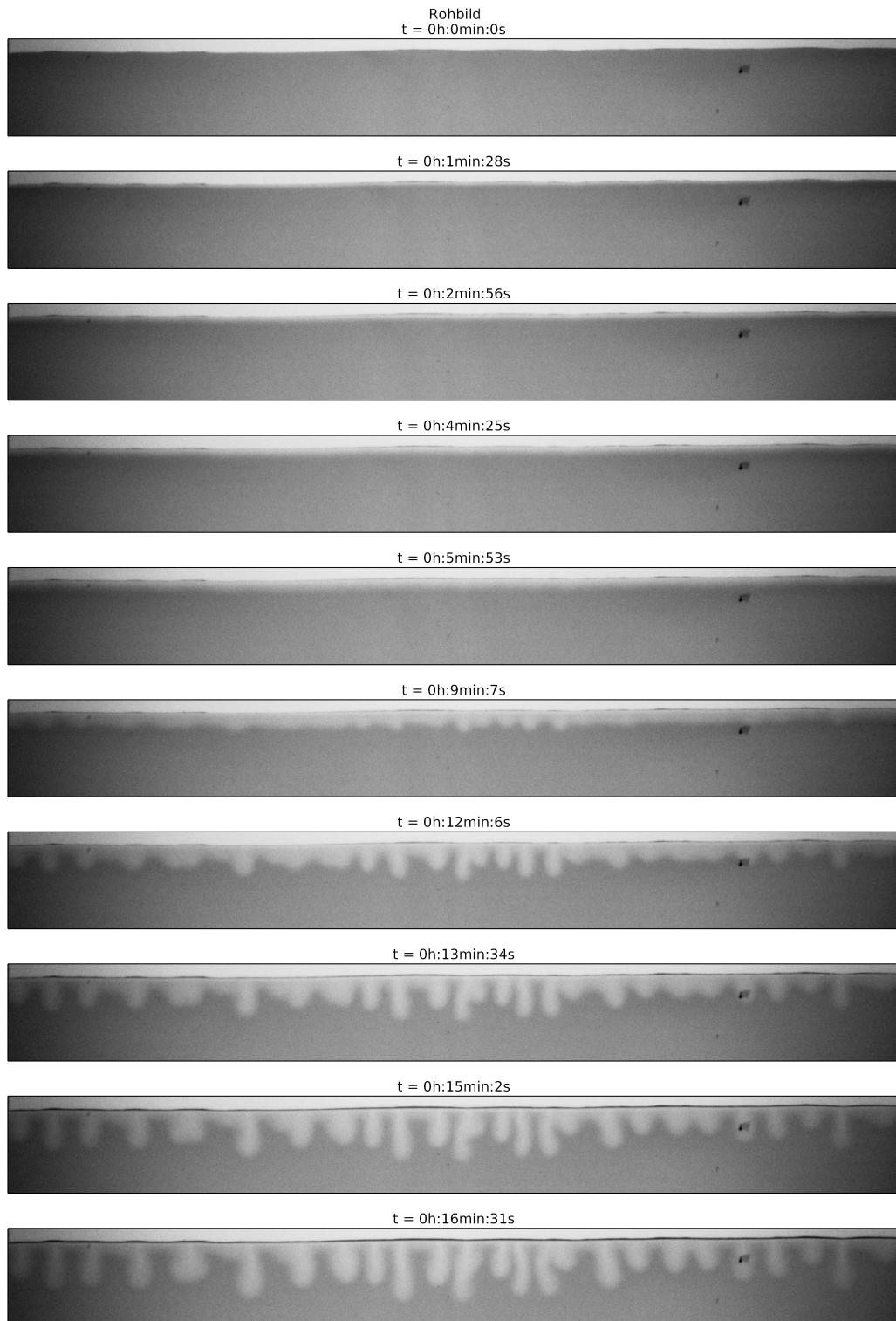


Abbildung 5.11: Fingerbildung im CO₂-Experiment. Rohaufnahmen mit erhöhtem Kontrast. Zu erkennen ist der Übergang vom diffusiven zum konvektiven Prozess bei ca. 9 min. Auch kann man beobachten, wie die diffusive Schicht zwischen den Fingern "abgesaugt" wird.

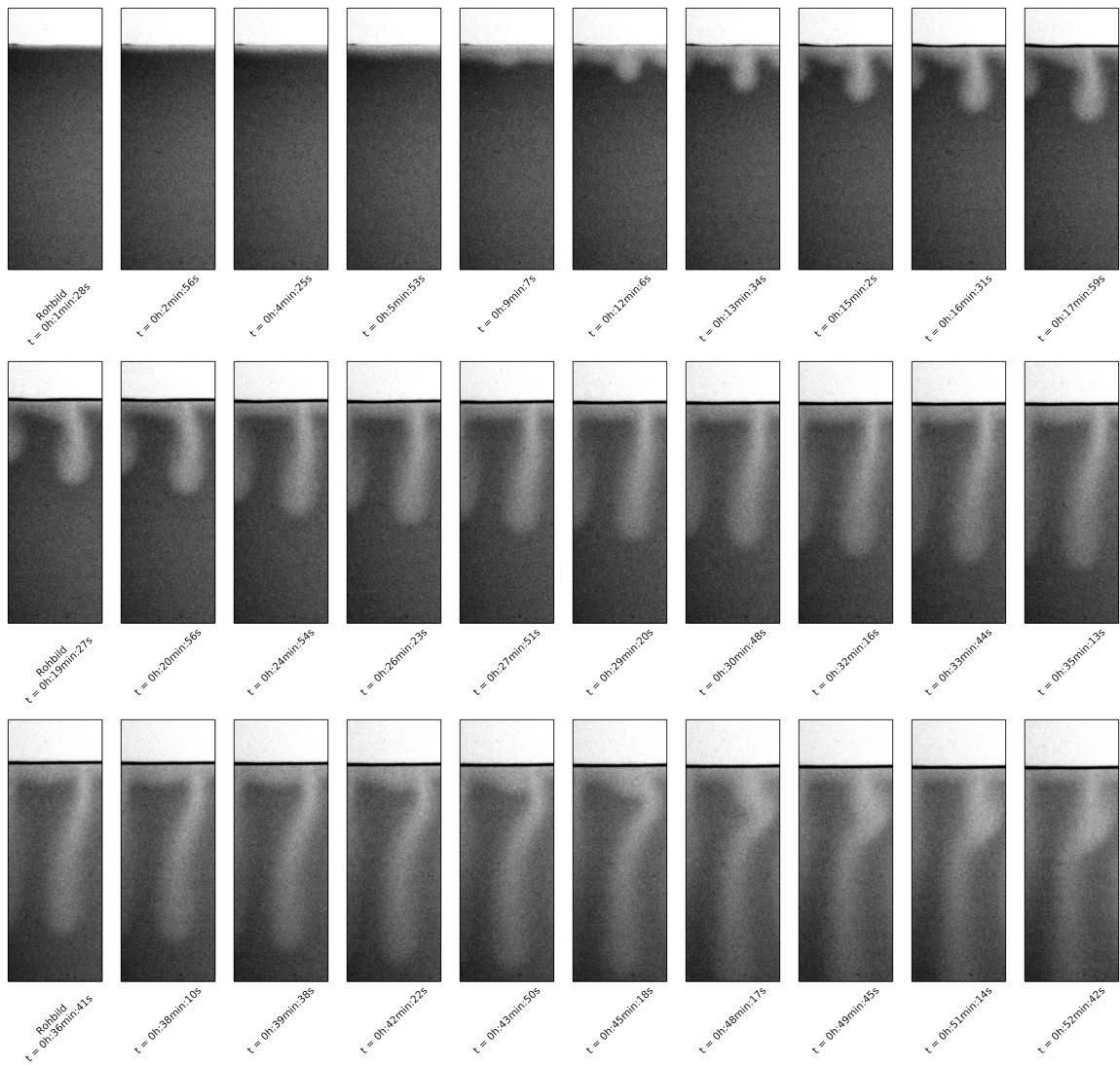


Abbildung 5.12: Entwicklung eines einzelnen Fingers mit der Zeit. Rohaufnahmen mit erhöhtem Kontrast. Zu erkennen ist der Übergang vom diffusiven zum konvektiven Prozess bei ca. 9 min, sowie das Dünner werden der diffusiven Schicht rechts und links vom Finger im Zeitraum zwischen 9 min und 24 min

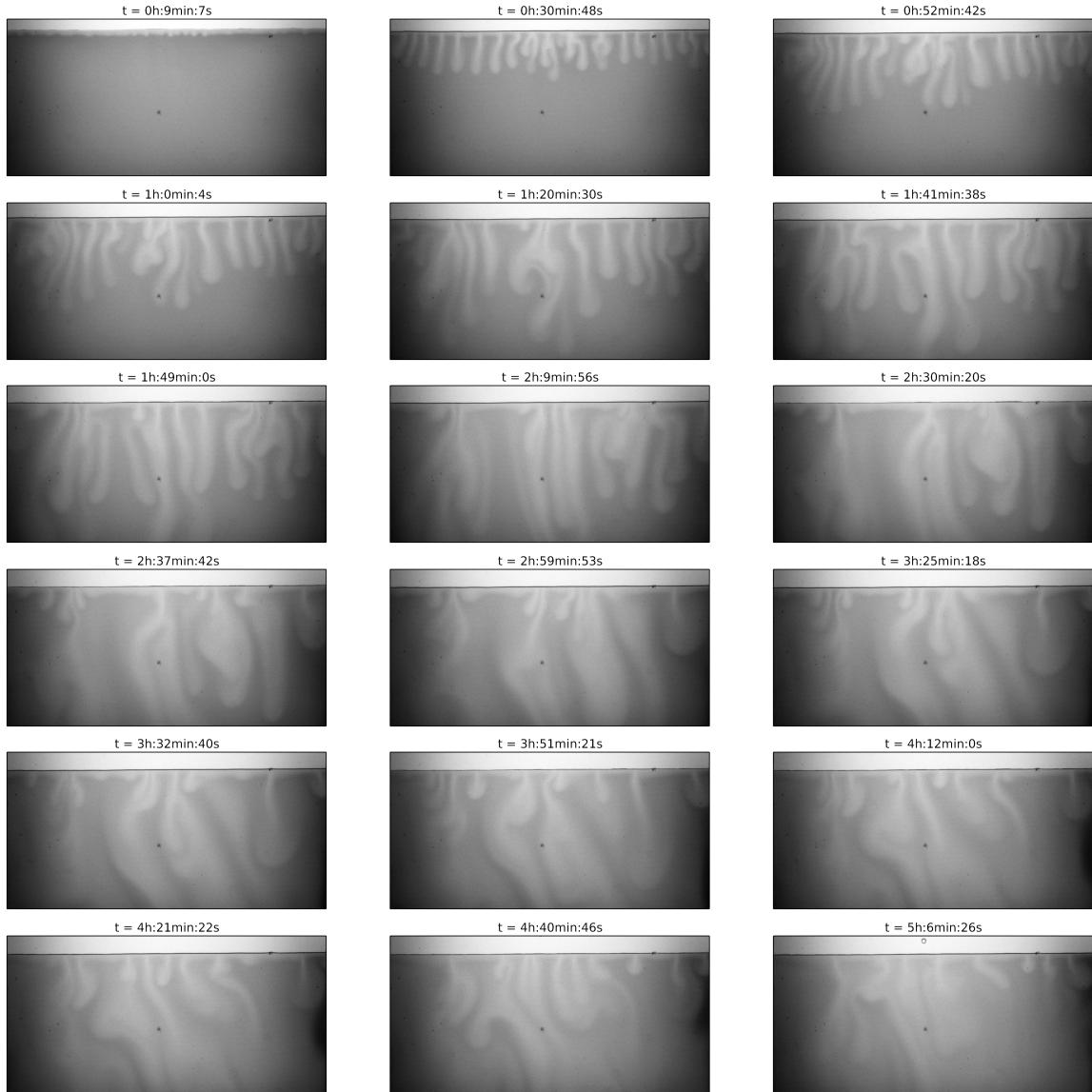


Abbildung 5.13: Überblick über den gesamten Verlauf des Experiments. Zu erkennen sind die beiden letzten Phasen in die sich der Verlauf des Experiments gliedert: stabile Fingerbildung und die ausbildung von Vortizitäten, die für Durhcmischung der Zelle sorgen. Die Phase, in der sich die diffusiven Schicht ausbildet ist zu kurz, als dass sie bei dieser Zeitauflösung zu erkennen wäre. Sie kann in Abbildung 5.11 betrachtet werden.