

High-Performance-Computing für Mehrphasenströmungen

von Dr. Dmitri Kuzmin und Prof. Dr. Stefan Turek
Institut für Angewandte Mathematik und Numerik

Viele praxisrelevante Prozesse sind durch die Koexistenz und vielfältige Wechselwirkungen von mehreren Phasen gekennzeichnet. Oft handelt es sich um eine kontinuierliche Phase (Flüssigkeit oder Gas) und eine disperse Phase (Gasblasen, Flüssigkeitstropfen oder Feststoffpartikel). Bei der Auslegung von industriellen Betriebsanlagen braucht man möglichst genaue Informationen über das Strömungsverhalten des vorliegenden Mehrphasensystems. Experimentelle Methoden erweisen sich oft als äußerst aufwendig und – bei industrietypischen Geometrien, Abmessungen und Betriebsbedingungen – kaum anwendbar. Computational Fluid Dynamics (CFD) ermöglicht es, das Geschehen im Inneren der Apparatur mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen zu ergründen. Um den Rechenaufwand trotz einer Unzahl von Unbekannten in Grenzen zu halten, sind moderne High-Performance-Computing Techniken notwendig.

Einleitung

Die Mehrzahl von Problemstellungen der numerischen Strömungsmechanik zeichnet sich durch die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie aus. Das Strömungsverhalten läßt sich mit Hilfe von partiellen Differentialgleichungen beschreiben, die im Falle von Einphasenströmungen seit langem bekannt sind. Beispielsweise gilt das System von Navier-Stokes Gleichungen

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

für die Geschwindigkeit \mathbf{u} und den Druck p eines isothermen inkompressiblen Fluids. Hierbei bezeichnet ν die kinematische Viskosität, und \mathbf{f} steht für etwaige Zusatzkräfte, die zu Impulsänderungen in Ort und Zeit führen. Analytisch können diese Gleichungen nur in wenigen Spezialfällen (z.B. für eine Poiseuille-Rohrströmung) gelöst werden. Selbst für einen Beweis der Existenz und Glattheit der exakten Lösung wurde vom Clay Mathematics Institute im Jahre 2000 ein Millennium Preis in Höhe von \$1,000,000 ausgeschrieben (siehe <http://www.claymath.org/prizeproblems/>).

Ein Durchbruch auf dem analytischen Weg ist leider noch nicht in Sicht. Die moderne Numerik ermöglicht jedoch die Berechnung von mehr oder weniger aussagekräftigen Näherungslösungen. Partielle Differentialgleichungen werden anhand eines Diskretisierungsverfahrens in ein großes (nicht-)lineares Gleichungssystem überführt, das direkt oder iterativ gelöst werden kann. Die neuen Unbekannten sind Funktionswerte in den Knoten eines Rechengitters. Ist das numerische Verfahren richtig aufgebaut, so wird die Approximation auf feiner werdenden Gittern immer besser, und die numerische Lösung konvergiert gegen die exakte. Der Rechenaufwand nimmt jedoch mit der Anzahl der Gitterpunkte drastisch zu. Zum einen wird das zu lösende Gleichungssystem immer größer, zum anderen verschlechtert sich die Konvergenz von iterativen Lösungsmethoden, während direkte Verfahren aus rechentechnischen Gründen überhaupt nicht in Frage kommen.

High-Performance-Computing Techniken sind spezielle numerische Algorithmen, die zur Behandlung von sehr rechenzeitintensiven Problemstellungen eingesetzt werden. Im UniReport 2000 [5] wurden diese hocheffizienten Simulations-Tools (adaptive Steuerungsmechanismen, optimierte Mehrgitterverfahren, hardware-spezifische Implementierung und Parallelisierung) für einphasige Konfigurationen vorgestellt. Es wurde gezeigt, daß die scheinbar unbegrenzte Rechnerleistung

selbst im Falle einer laminaren inkompressiblen Strömung an ihre Grenzen stößt, wenn die numerischen Ansätze nicht auf dem neuesten Stand sind. Oft ist die um einen teuren Preis erkaufte Lösung noch viel zu ungenau. Daher wäre es falsch anzunehmen, daß CFD-Simulationen zu einer quantitativen Vorhersage ohne weiteres geeignet sind. Der Einsatz von neuen mathematischen Konzepten und effizienten Algorithmen erhöht die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse und eröffnet neue Anwendungsbereiche, da die verfügbare Rechenkapazität besser ausgenutzt werden kann. Im folgenden gehen wir auf Mehrphasenströmungen ein, die heute noch als wissenschaftliches Neuland gelten.

Mehrphasenströmungen

Befinden sich mehrere Phasen im gleichen Raum, so bewegen sie sich relativ zueinander und beeinflussen sich gegenseitig. Auf dem Mikromaßstab sind die Phasen jedoch nicht vermischt (bei einem Gemisch von Flüssigkeiten oder Gasen handelt es sich um eine einphasige Mehrkomponentenströmung) und weisen unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf. An der beweglichen Phasengrenzfläche läuft der Stoff-, Impuls- und Wärmeaustausch ab. Auf beiden Seiten davon liegt jeweils eine Einphasenströmung vor, die sich mit Hilfe von individuellen Navier-Stokes Gleichungen oder ähnlichen Erhaltungssätzen modellieren läßt. Um den Geltungsbereich der mikroskopischen Bilanzgleichungen zu bestimmen und sie durch innere Randbedingungen miteinander zu koppeln, muß allerdings der Verlauf der Grenzfläche – *der freie Rand* – bekannt sein.

Freie Randwertprobleme zählen zu den größten Herausforderungen in der Numerik. Das mathematische Modell steht fest und liefert eine ‘exakte’ Beschreibung der Mehrphasenströmung. Zur Verfolgung der freien Ränder haben sich Methoden wie *Front Tracking*, *Volume of Fluid* und *Level Set* etabliert. Der programmiertechnische Aufwand und die erforderlichen Rechenzeiten für eine Direkte Numerische Simulation (DNS) sind jedoch extrem hoch. Auf den heutigen Rechnern kann DNS höchstens zur Untersuchung der Teilphänomene herangezogen werden. Für realistische Mehrphasensysteme scheidet diese Vorgehensweise aus.

Eigentlich ist es gar nicht nötig, die Strömungsvorgänge bis auf den Mikromaßstab aufzulösen. Normalerweise interessiert man sich lediglich für bestimmte Mittelwerte, die das makroskopische Verhalten der Mehrphasenströmung beschreiben. Wäre eine DNS machbar, so könnten die Ergebnisse statistisch bearbeitet werden, um die Mittelwerte zu gewinnen. Stattdessen bietet sich eine ‘Abkürzung’ an: die makroskopischen Größen aus *gemittelten* Modellgleichungen zu bestimmen.

Im gemittelten Modell werden sämtliche Phasen als Quasikontinua betrachtet, die an jedem Ort *gleichzeitig* vorliegen. Jede Phase besitzt ihre eigene effektive Dichte, Impuls und andere physikalische Eigenschaften. Ihr Einfluß auf die Strömung hängt im wesentlichen von ihrem lokalen Volumenanteil $\alpha_k(\mathbf{x}, t)$ ab. Damit wird die Phasenverteilung in einer kleinen Umgebung von \mathbf{x} beschrieben. Mathematisch gesehen stellt α_k die Wahrscheinlichkeit dar, daß der Ort \mathbf{x} zur Zeit t von Phase k besetzt ist. Die Summe aller Volumenanteile ist stets eins: $\sum_k \alpha_k = 1$. Die makroskopischen Masse- und Impulsbilanzen sehen folgendermaßen aus [1]:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_k \mathbf{u}_k) = \Gamma_k \quad \text{mit} \quad \tilde{\rho}_k := \alpha_k \rho_k, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_k \mathbf{u}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\tilde{\rho}_k \mathbf{u}_k \otimes \mathbf{u}_k) = \nabla \cdot (\alpha_k \mathcal{S}_k + \alpha_k \mathcal{T}_k) + \mathbf{M}_k + \Gamma_k \mathbf{u}_{ki}. \quad (3)$$

Diese Gleichungen unterscheiden sich von denen für Einphasenströmungen durch die Austauschter-

me Γ_k und \mathbf{M}_k , die für grenzflächige Wechselwirkungen zuständig sind. Außerdem ist die effektive Dichte $\tilde{\rho}_k$ selbst für eine inkompressible Phase ($\rho_k \equiv \text{const}$) variabel. Der laminare Streßtensor \mathcal{S}_k wird um einen turbulenten Anteil \mathcal{T}_k ergänzt, um den Effekt von ‘wegemittelten’ Geschwindigkeitsschwankungen zu berücksichtigen. Der entscheidende Vorteil im Vergleich zu DNS besteht darin, daß die gemittelten Gleichungen in einem festen Rechengebiet definiert sind. Demgegenüber ist die Modellierung von Termen Γ_k , \mathbf{M}_k und \mathcal{T}_k mit großen Unsicherheiten verbunden und erfolgt mit Hilfe von empirischen Korrelationen, die stark problemabhängig sind.

Gas-Flüssigkeits-Reaktoren

Als konkretes Beispiel betrachten wir Blasenströmungen in Gas-Flüssigkeits-Reaktoren. Der einfachste Vertreter dieser Reaktorklasse erinnert an eine Sprudelsäule (Abb. 1), wird aber in einem wesentlich größeren Maßstab gebaut und für völlig andere Zwecke eingesetzt. Damit eine Reaktion zwischen gasförmigen und flüssigen Spezies möglich wird, müssen diese erst einmal in gegenseitigen Kontakt kommen. In einer Blasensäule wird das Gas in Form von Blasen einem mit einer Flüssigkeit gefüllten Apparat zugeführt. Die Begasung kann lokal (Abb. 2, links) oder gleichmäßig (Abb. 2, rechts) geschehen. Die aufsteigenden Blasen versetzen die sie umgebende Flüssigkeit in Bewegung, wobei zwischen den beiden Phasen Stoffaustausch stattfindet. Das Gas geht in die flüssige Phase über und kann dort mit anderen Spezies reagieren. Wird die Reaktion mit dem Ziel der Produktgewinnung durchgeführt, handelt es sich um *chemische Synthese*. Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Entfernung von unerwünschten Komponenten aus einem Gasstrom (*chemische Gaswäsche*).

Die wichtigsten Vorteile von Blasensäulenreaktoren sind ihre einfache Bauart und ihre niedrigen Betriebs- und Wartungskosten. Im Gegensatz zu der Bauweise ist das Strömungsverhalten äußerst komplex, was die Auslegung und den Scale-Up wesentlich erschwert. Airlift-Schlaufenreaktoren unterscheiden sich von leeren Blasensäulen durch Einbauteile, die zu einer stabilen Umlaufströmung führen (Abb. 3). Im begasten Aufströmerbereich fließen die beiden Phasen nach oben, im Abströmer sind dagegen keine Blasen mehr vorhanden, und die Flüssigkeit fließt nach unten. Je nachdem, wo sich die Auf- und Abströmer befinden, bezeichnet man die Schlaufe als extern (Abb. 3, links) oder intern (Abb. 3, rechts). Die Strömungsstruktur wird von den Einbauten bestimmt und läßt sich durch ihre Form beeinflussen. In Zusammenarbeit mit der BASF AG entwickeln wir Simulationssoftware, die als Werkzeug zur Optimierung von Airlift-Schlaufenreaktoren dienen soll.

Der Rechenaufwand ist umso größer, je mehr Kräfte und Wechselwirkungen im Modell berücksichtigt werden. Daher sollten nebensächliche Effekte weitestgehend eliminiert werden. Da die Gasdichte sehr klein im Vergleich zur Dichte der Flüssigkeit ist, reduziert sich das Two-Fluid-Modell (2)-(3) zu einem einfacheren Drift-Flux-Modell. Dabei wird das Gas-Liquid-Gemisch als eine schwachkompressible Flüssigkeit betrachtet. Die effektive Dichte dieser Flüssigkeit hängt vom lokalen Gasgehalt ϵ ab, wobei die Strömung durch Dichteunterschiede induziert wird. Einphasige Auftriebsströmungen infolge von Temperaturgradienten werden als freie Konvektion bezeichnet und üblicherweise mit Hilfe der sog. Boussinesq-Approximation modelliert. Es liegt nahe, diese Vorgehensweise auf gasinduzierte Blasenströmungen auszudehnen [4].

Im Rahmen der Boussinesq-Approximation wird die Abhängigkeit der effektiven Dichte vom Gasgehalt nur im Schwerkraftterm der Impulsbilanz (3) berücksichtigt. Die resultierenden Bilanzgleichungen für das Gemisch stimmen mit den inkompressiblen Navier-Stokes Gleichungen (1)

überein. In diesem Fall steht $\mathbf{f} = -\epsilon\mathbf{g}$ für die Auftriebskraft, die von den aufsteigenden Blasen auf die sie umgebende Flüssigkeit ausgeübt wird. Der konstante Anteil der Schwerkraft wird wie üblich im Druckgradienten untergebracht. Es wird davon ausgegangen, daß der Druck p für beide Phasen gleich ist und die Zustandsgleichung für ideale Gase $p = \rho_G RT$ erfüllt.

Die Geschwindigkeiten unterscheiden sich um eine Schlupfgeschwindigkeit \mathbf{u}_{slip} , die aus empirischen Korrelationen oder Messungen für die Aufstiegsgeschwindigkeit von Blasen gewonnen wird. Es gilt: $\mathbf{u}_L = \mathbf{u}$ für die Flüssigkeit und $\mathbf{u}_G = \mathbf{u} + \mathbf{u}_{\text{slip}}$ für die Gasphase. Die Kontinuitätsgleichung (2) liefert die effektive Dichte $\tilde{\rho}_G$, die in den Gasgehalt $\epsilon = \tilde{\rho}_G RT/p$ umgerechnet wird. Zur Bestimmung der Konzentrationsfelder für alle beteiligten Spezies müssen zusätzliche Massebilanzen vom Typ (2) gelöst werden. Mit diesem Modell mittlerer Komplexität lassen sich die im Reaktor herrschenden Strömungsverhältnisse ziemlich gut wiedergeben [2].

Numerik und Software

Die vereinfachten Modellgleichungen erlauben eine effiziente numerische Behandlung, die auf bereits vorhandenen Algorithmen für Einphasenströmungen aufbaut. Nichtdestoweniger handelt es sich um ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen, die stark gekoppelt und zudem sehr empfindlich sind. Bei der Diskretisierung dieser Gleichungen wird man mit allen denkbaren numerischen Problemen konfrontiert, die zum Teil schon seit langem bekannt sind und trotz intensiver Forschung noch nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten.

Eine der größten Schwierigkeiten in der Numerik ist die Behandlung von Transportgleichungen mit dominierender Konvektion. Bekannterweise sind solche Gleichungen instabil und lassen sich mit Standardmethoden wie zentralen Differenzen oder Galerkin FEM nicht lösen. Selbst stabilisierte Diskretisierungsverfahren hoher Ordnung neigen zu unphysikalischen Oszillationen, falls die Lösung steile Gradienten aufweist. Das bedeutet, daß der Gasgehalt und die Konzentrationen u.U. negative Werte annehmen können. Für den Simulationsverlauf hätte dies katastrophale Folgen.

Um die Positivität der numerischen Lösung zu garantieren, werden oft monotonieerhaltende Verfahren wie *Upwind* eingesetzt. Leider können solche Methoden – im linearen Fall – höchstens von erster Ordnung genau sein. Dies schlägt sich in einer unzulässig hohen numerischen Diffusion nieder, die selbst auf feinen Gittern zu unbrauchbaren Simulationsergebnissen führt. Die Genauigkeit läßt sich nur erhöhen – ohne Oszillationen zu verursachen – wenn der Betrag der künstlichen Diffusion an den lokalen Lösungsverlauf angepaßt wird.

Moderne hochauflösende Methoden werden als eine nichtlineare Kombination von Diskretisierungen hoher und niedriger Ordnung realisiert. Ist die Lösung glatt, wird nach der Methode hoher Ordnung diskretisiert. Sind die Lösungsprofile steil, muß auf die Methode niedriger Ordnung umgeschaltet werden, um die Oszillationen zu dämpfen. Diese Vorgehensweise geht auf das Konzept von *Flux-Corrected-Transport* (FCT) zurück. An unserem Institut haben wir eine neue Klasse von FCT-Verfahren entwickelt, die auf implizite FEM-Diskretisierungen und unstrukturierte Gitter anwendbar sind [3]. Darüberhinaus ist uns vor kurzem eine erfolgsversprechende Erweiterung von hochauflösenden TVD-Schemata auf Finite Elemente gelungen.

Für die Leistungsfähigkeit des CFD-Tools ist nicht nur die Ortsdiskretisierung, sondern auch das Zeitschrittverfahren und der Gleichungssystemlöser mitentscheidend. Implizite Zeitdiskretisierungen sind in der Regel wesentlich effizienter als explizite, die einer restriktiven Stabilitätsbedingung

unterliegen. Um die zeitliche Entwicklung der Zweiphasenströmung mit einem minimalen Rechenaufwand zu erfassen, sollte der Zeitschritt adaptiv gesteuert werden. Es liegt nahe, die relativen Änderungen der Gasgehaltsverteilung zu kontrollieren, da diese im Falle von Auftriebsströmungen eine ausschlaggebende Rolle spielt. Je schneller sich der Gasgehalt ändert, umso kleiner muß die Zeitschrittweite sein. In unserem Simulationsprogramm wird sie kontinuierlich angepaßt, um eine vom Benutzer vorgegebene Umverteilungsrate möglichst genau einzuhalten.

Dem Gleichungssystemlöser kommt eine ganz entscheidende Bedeutung zu. Bei dynamischen 3D-Simulationen handelt es sich um mehrere Millionen Unbekannten, die in jedem Zeitschritt upgedated werden müssen. Zur Zeit sind nur iterative und insbesondere Mehrgitterverfahren in der Lage, solche 'Riesensysteme' hinreichend effizient zu behandeln. Das sind allerdings keine 'Black-Box'-Löser, denn ihre Robustheit und Effizienz hängt stark von den zugrundeliegenden Vorkonditionierern, Glättern, Gittertransferoperatoren und Abbruchkriterien ab. Die Kunst besteht darin, eine Parameterkonstellation zu finden, die für die vorliegende Problemstellung 'optimal' ist. Gelingt es einem, so wird man mit hervorragenden Konvergenzraten belohnt. Wird der Löser falsch 'konfiguriert', so kann es dagegen zu einer schlechten Konvergenz oder gar zum Absturz führen.

Eine ausführliche Beschreibung unserer numerischen Ansätze würde den Rahmen dieses Artikels sprengen. An dieser Stelle sei auf das Buch von Stefan Turek [6] verwiesen, in dem weitere Diskretisierungs- und Löseransätze vorgestellt werden. Ein besonderes Highlight sind die Multilevel Pressure Schur Complement Techniken zur Behandlung der Navier-Stokes Gleichungen. Der darauf aufgebaute Hochschulcode FEATFLOW (<http://www.featflow.de>) ist ein grundlegender Baustein unserer Software zur Simulation von Blasenströmungen mit Stoffaustausch und Reaktion.

Simulationsergebnisse

Im ersten numerischen Beispiel handelt es sich um das Anfahren einer lokal begasten zylindrischen Blasensäule. Das Gas wird über einen kreisförmigen Gasverteiler in der Mitte zugeführt. Die durch den Blasenanstieg induzierte Auftriebskraft wirkt auf die Flüssigkeit, und es entsteht eine Zirkulationsbewegung in der Säulenmitte. Die Entwicklung der Gasgehaltsverteilung in den ersten Sekunden nach dem Einschalten des Begasers ähnelt einem Pilzwachstum (Abb. 4). Simulationsergebnisse für einen prototypischen Airlift-Schlaufenreaktor sieht man in Abb. 5. Begast wird am Boden des Aufströmers, in dem beide Phasen im Gleichstrom nach oben fließen. An der freien Oberfläche verlassen die Blasen den Reaktor, während die Flüssigkeit vom Einbauteil umgelenkt wird und durch den gasfreien Abströmer nach unten fließt. In wenigen Sekunden stellt sich ein stationärer Strömungszustand ein (Abb. 5, rechts).

Zum Schluß sei das Wechselspiel der Hydrodynamik mit Stoffaustausch und chemischer Reaktion gezeigt. Im ersten 2D-Beispiel wird eine flache Blasensäule mit CO₂ begast. Schnappschüsse der Gasgehaltsverteilung, Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder sind in Abb. 6 dargestellt. Da CO₂ in Wasser sehr gut löslich ist, kommt es zu einem Schrumpfen der Blasen, obwohl der Druck mit der Höhe abnimmt. Wird das gelöste Gas durch chemische Reaktionen verbraucht, so kann der Stoffaustausch wesentlich beschleunigt werden. Eine schnelle Reaktion wie $\text{CO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ kann zur Folge haben, daß sich die Blasen vollständig auflösen (Abb.7, oben). Da die Strömung ausschließlich durch die Blasenbewegung zustandekommt, gehen die Transport- und Reaktionsvorgänge nur am Boden der Blasensäule vor sich (Abb.7, Mitte). Der große Wirbel führt zu einer spiralförmigen Konzentrationsverteilung für das Produkt (Abb.7, unten). Die Ergebnisse einer 3D-Simulation sehen weitgehend ähnlich aus (s. Abb.8).

Zusammenfassung und Ausblick

Das Wechselspiel von unterschiedlichen physikalischen und chemischen Einflußfaktoren macht Mehrphasenströmungen zu einer schwierigen Problemstellung. Detaillierte mathematische Modelle setzen hohe Anforderungen an das Diskretisierungsverfahren und den Gleichungssystemlöser. Die Effizienz von CFD-Software bestimmt das Ausmaß der Effekte, die berücksichtigt werden können. Die Zunahme der Rechnerleistung und die Entwicklung von neuen mathematischen Verfahren ermöglicht schon heute dreidimensionale dynamische Strömungssimulationen für komplexe Mehrphasensysteme wie Gas-Flüssigkeits-Reaktoren. Die Ergebnisse weisen eine gute qualitative Übereinstimmung mit Experimenten auf. Eine quantitative Vorhersage ist z.Zt. noch kaum möglich. Durch den Einsatz von hochauflösenden Diskretisierungsverfahren und adaptiver Gitterverfeinerung bzw. Zeitschrittweitenkontrolle kann der numerische Fehler wesentlich reduziert werden. Modellfehler sind dagegen schwer zu beseitigen, weil das Verständnis für die physikalischen Abläufe (z.B. Turbulenz) oft nicht ausreicht. Für die Zukunft ist ein Trend in Richtung Direkte Numerische Simulation abzusehen, die Modellfehler weitgehend eliminieren würde.

Literatur

- [1] D. A. Drew und S. L. Passman, *Theory of Multicomponent Fluids*. Springer, 1999.
- [2] D. Kuzmin und S. Turek, Efficient numerical techniques for flow simulation in bubble column reactors. In: *Preprints of the 5th German-Japanese Symposium on Bubble Columns*, VDI/GVC, 2000, 99-104.
- [3] D. Kuzmin und S. Turek, Flux correction tools for finite elements. *J. Comput. Phys.* **175** (2002) 525-558.
- [4] A. Sokolichin und G. Eigenberger, Modellierung und effiziente numerische Simulation von Gas-Flüssigkeits-Reaktoren mit Blasenströmungen nach dem Euler-Euler-Konzept. DFG-Bericht, Universität Stuttgart, 1997. <http://pcvt12.verfahrenstechnik.uni-stuttgart.de/alex/icvt2.html>.
- [5] S. Turek, Strömungssimulation am Computer - Numerische Effizienz versus Gigaflops. Uni-Report **30**, Universität Dortmund, 2000.
- [6] S. Turek, *Efficient solvers for incompressible flow problems: An algorithmic and computational approach*, LNCSE 6, Springer-Verlag, 1999.

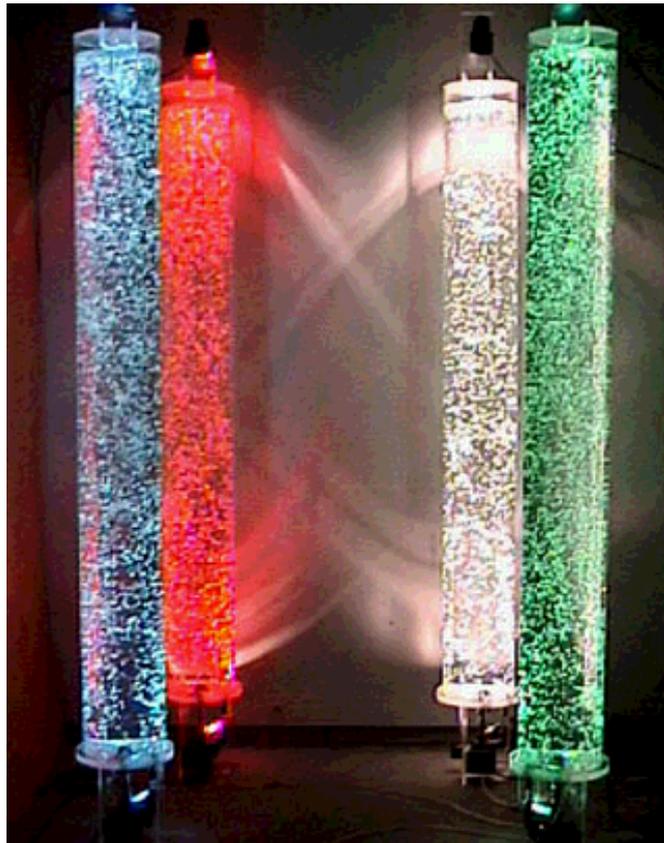


Abbildung 1: Blasenströmung in Sprudelsäulen.

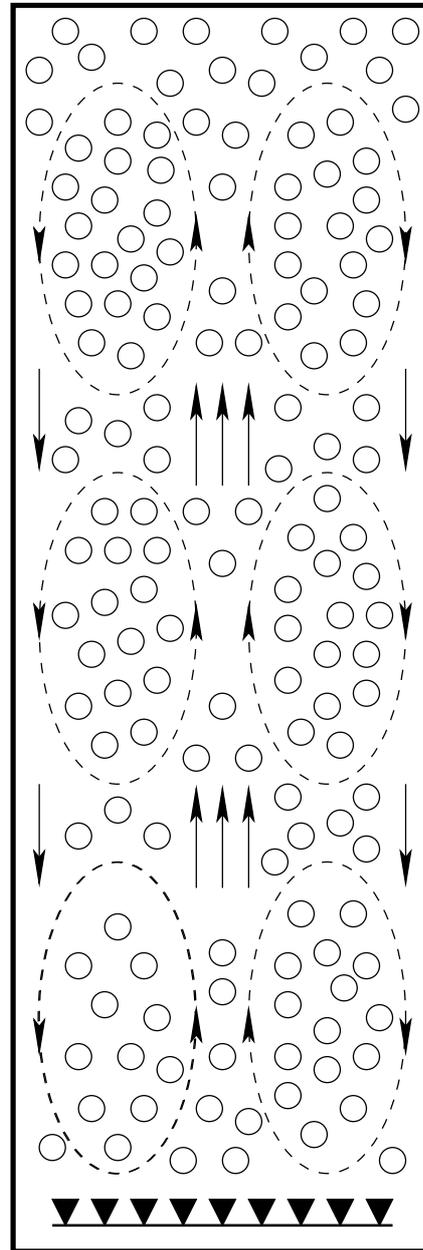
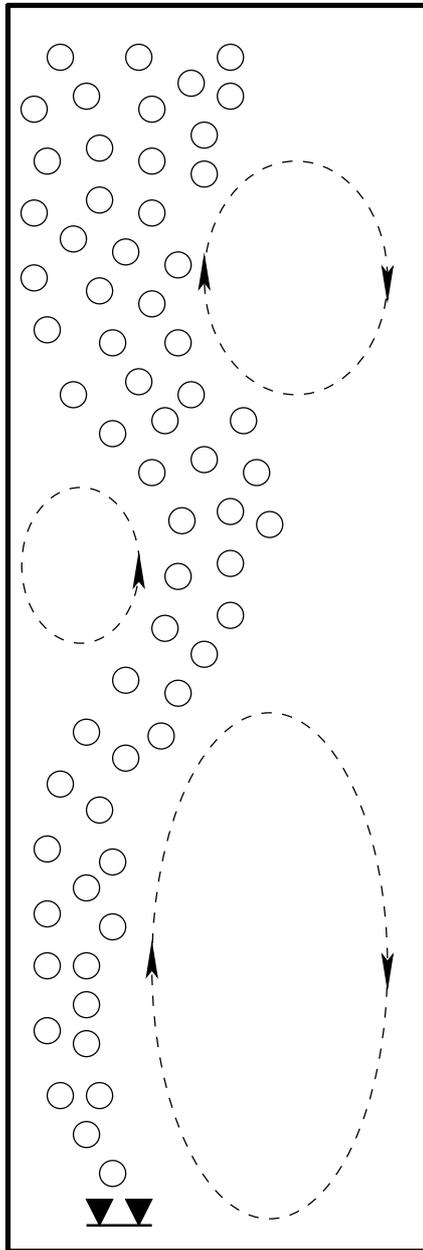


Abbildung 2: Lokal (links) und gleichmäßig (rechts) begaste Blasensäulen.

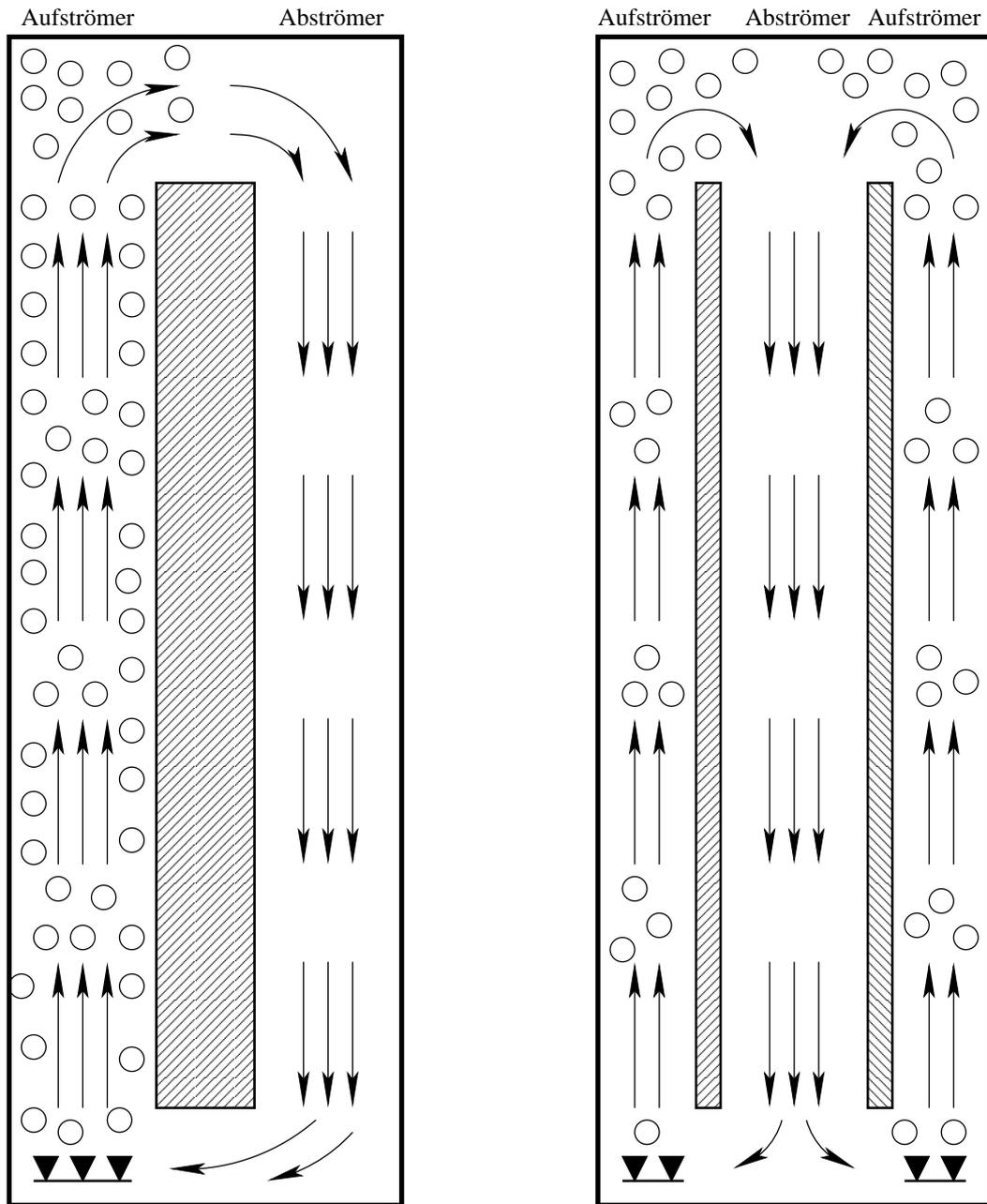


Abbildung 3: Airlift-Reaktoren mit externer (links) und interner (rechts) Schlaufe.

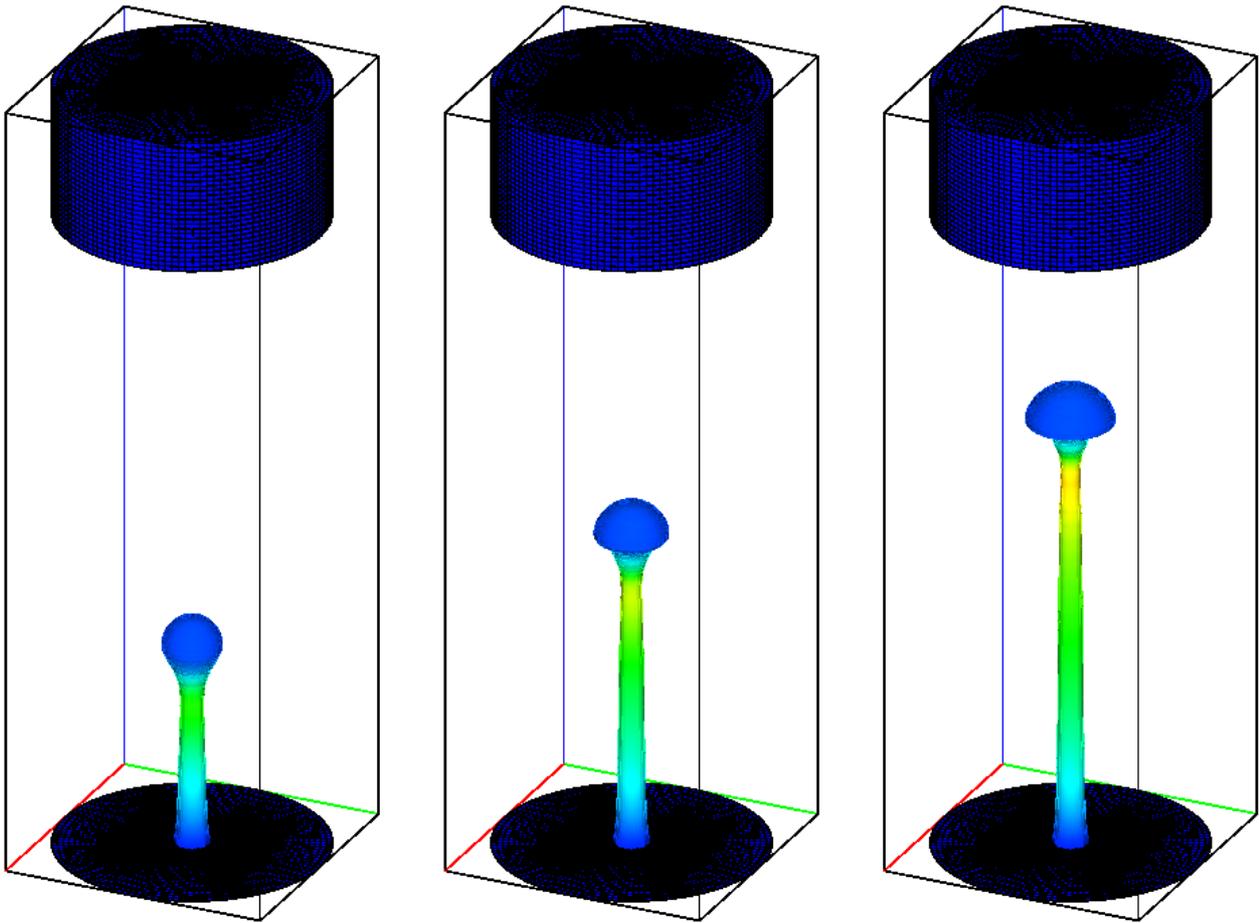


Abbildung 4: Anfahren einer lokal begasten Blasensäule.

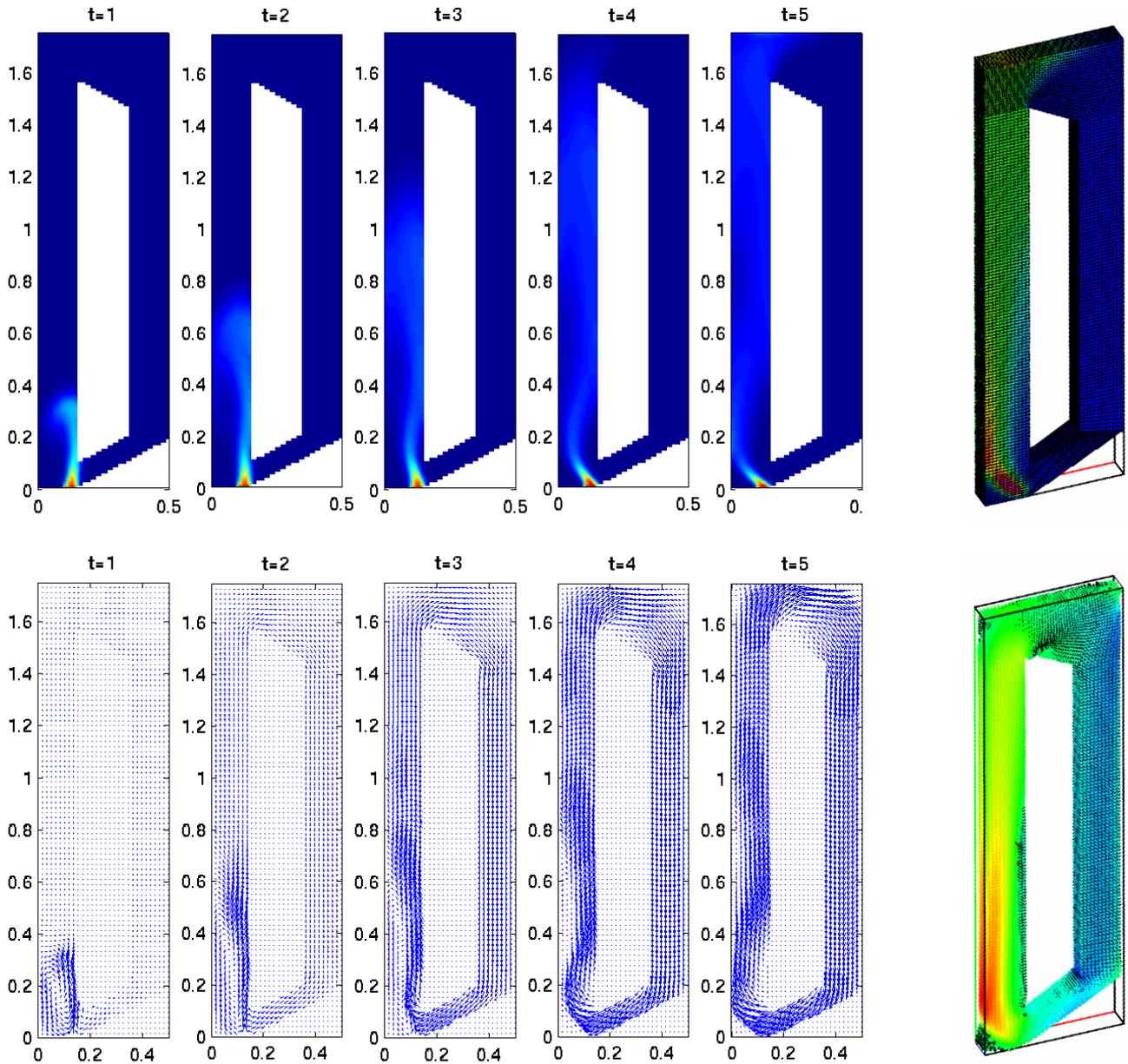


Abbildung 5: Airlift Schlaufenreaktor: dynamische (links) und stationäre (rechts) Lösung.

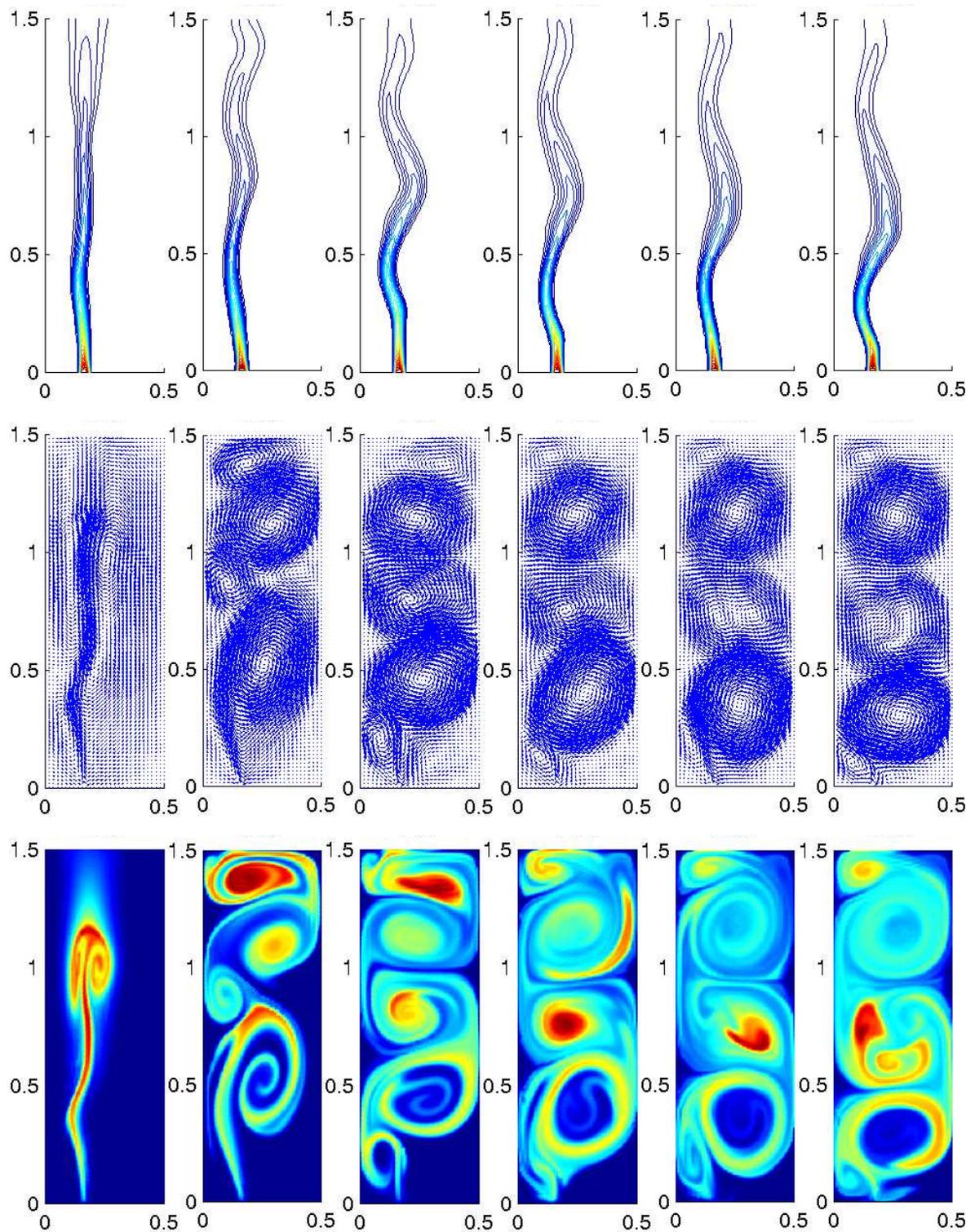


Abbildung 6: Physikalische Absorption of CO₂ in einer Blasensäule (2D-Simulation).

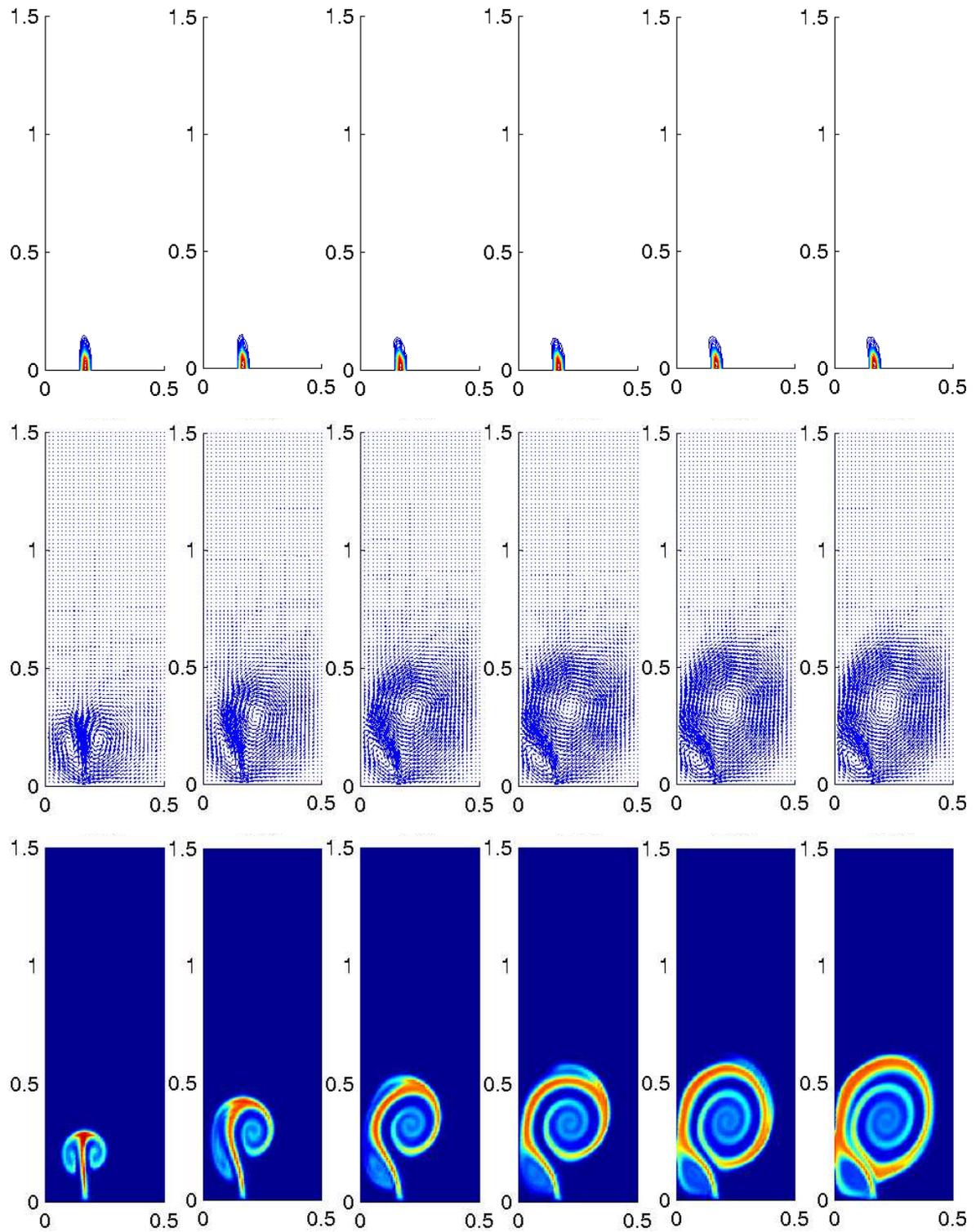


Abbildung 7: Chemisorption von CO_2 in einer Blasensäule (2D-Simulation).

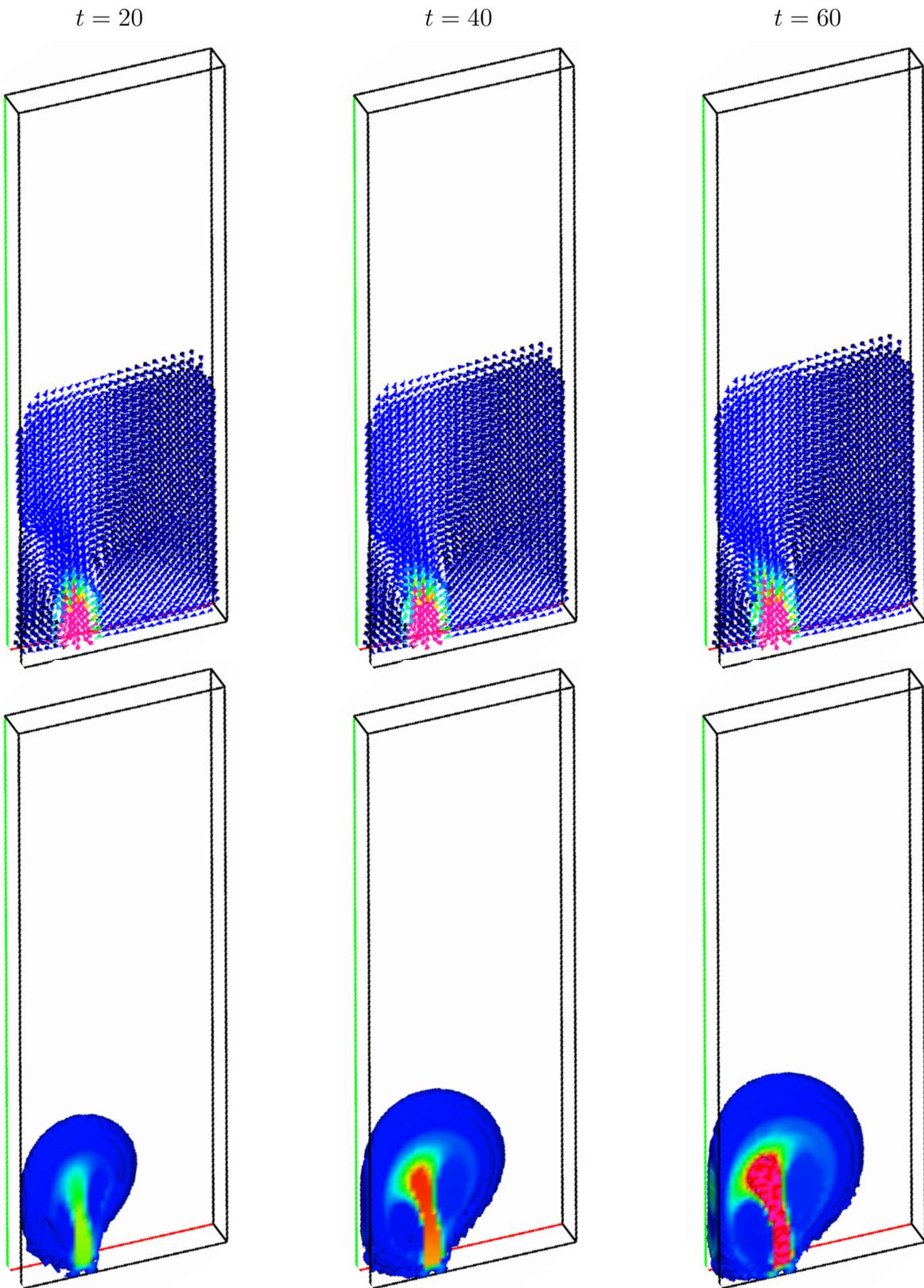


Abbildung 8: Chemisorption von CO₂ in einer Blasensäule (3D-Simulation).