

Entwicklung eines magnetohydrodynamischen Pumpsystems für die Mikrofluidik

Development of a magnetohydrodynamic pumping system for microfluidics

Henning Otto¹, Raschid Azizy², David Schreier¹, Jörg König¹, Christoph Weigel², Steffen Strehle² und Christian Cierpka¹

¹Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Fachgebiet Technische Thermodynamik, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau

²Institut für Mikro- und Nanotechnologien, Fachgebiet Mikrosystemtechnik, Technische Universität Ilmenau, 98693 Ilmenau

Schlagworte: Mikrofluidik, Magnetohydrodynamik, Lorentz-Kraft

Keywords: microfluidics, magnetohydrodynamic, Lorentz force

Zusammenfassung

Für mikrofluidische Lab-on-a-Chip-Systeme werden häufig externe Pumpen verwendet, um ein Trägerfluid zwischen den Funktionselementen des Chips zu transportieren. Um die damit verbundene Komplexität und Baugröße zu reduzieren, wird in diesem Beitrag ein magnetohydrodynamisches, vollintegriertes Pumpsystem vorgestellt. Dieses basiert auf der Nutzung der Lorentz-Kraft, welche in einem leitfähigen Fluid durch auf dem Mikrochip verbaute Elektroden und Spulenordnungen erzeugt wird. Das System wird in COMSOL Multiphysics simuliert und sowohl das erzeugte Magnetfeld, der Ionenstrom im Fluid als auch das resultierende Geschwindigkeits- und Druckfeld werden analysiert. Abschließend werden Verbesserungspotenziale für die zukünftige Prototypenfertigung aufgezeigt.

Einleitung

Im Rahmen biologischer und medizinischer Untersuchungen bieten Lab-on-a-Chip-Systeme (LOC) vielversprechende Voraussetzungen, um kleinste Mengen einer Probe auf verschiedenste Arten zu analysieren. LOCs sind dabei mikrofluidische Systeme, welche mit den Fertigungsmethoden der Mikrosystemtechnik hergestellt werden. Mit Hilfe von Mikrokanälen und einem Trägerfluid können so Kleinstmengen einer Probe durch das System und zu verschiedenartigen Funktionselementen transportiert werden. Ein typisches Funktionselement könnte beispielsweise ein Partikelseparator sein, welcher durch die Nutzung akustischer Oberflächenwellen verschieden große Partikel einer Probe örtlich voneinander trennt [1, 2].

Neben den Funktionselementen zur Analyse oder Bearbeitung einer Probe werden zudem auch Bauteile wie Pumpen für den kontrollierten Fluidtransport benötigt. Um die Komplexität, die Baugröße und die Anfälligkeit gegenüber Ausfällen zu minimieren, sollten die verbauten Pumpen möglichst ohne bewegliche Bauteile hergestellt werden. Mögliche Pumpenmechanismen, die sich aus diesen Anforderungen ergeben und an denen bereits geforscht wird sind unter anderem Elektrobenetzungspumpen, Elektroosmosepumpen, elektrohydrodynamische Pumpen oder magnetohydrodynamische (MHD) Pumpen [3].

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein neuartiges Pumpendesign einer magnetohydrodynamischen Pumpe vorgestellt. Das Prinzip dieser Pumpe basiert auf der Lorentz-Kraft, welche gemäß $\vec{f}_L = \vec{j} \times \vec{B}$ aus der Überlagerung einer elektrischen Stromdichte \vec{j} im Fluid und einer magnetischen Flussdichte \vec{B} die Volumenkraft \vec{f}_L auf ein Fluidelement ausübt. Während in früheren Mikro-MHD (μ MHD)-Pumpen zwar die notwendigen Elektroden für die Erzeugung der Stromdichte im Fluid bereits auf der Mikroplattform verbaut wurden, wurde das Magnetfeld stets von makroskopischen, externen Permanentmagneten bereitgestellt [4, 5]. Im Gegensatz dazu ist das Ziel des hier vorgestellten Projektes, eine vollständige Integration der Komponenten zur Erzeugung eines magnetischen Feldes. Dazu sollen Spulenwicklungen direkt mikrotechnologisch in die Abdeckung eines Mikrokanals integriert werden. Somit lassen sich potenziell einzelne Spulen oder auch Spulen-Arrays erzeugen, welche bei Beaufschlagung eines elektrischen Stromes das notwendige magnetische Feld erzeugen können.

Während das Gesamtprojekt auch die Weiterentwicklung des Verbundsubstrates zur Spulenerstellung und die Prozessentwicklung zur Herstellung mikrofluidischer Kavitäten mit definierter Geometrie umfassen, wird im Rahmen dieses Beitrags insbesondere auf den Teil der strömungsmechanischen Charakterisierung des angestrebten Systems eingegangen. Dies umfasst die Simulation des mikrofluidischen Designs bestehend aus der Simulation des Magnetfeldes einer Spulenordnung, der Simulation der elektrischen Stromdichte und der Strömungssimulation des Fluids aufgrund der erzeugten Lorentz-Kraft. Um die verschiedenen physikalischen Teilbereiche in einer Gesamtsimulation verknüpfen zu können wird die kommerzielle Software *COMSOL Multiphysics 6.0* eingesetzt.

Modellvorstellung und Simulationsparameter

Simulationsmodell

In diesem Abschnitt wird zunächst das Simulationsmodell vorgestellt, welches dazu dienen soll, abzuschätzen, welche Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Druckdifferenzen durch das Pumpendesign erzeugt werden können. Diese Daten dienen dann als Basis für die Prototypenherstellung. Gleichzeitig kann das Modell iterativ verbessert und angepasst werden, um abschließend ein funktionsfähiges Gesamtkonzept zu erlangen.

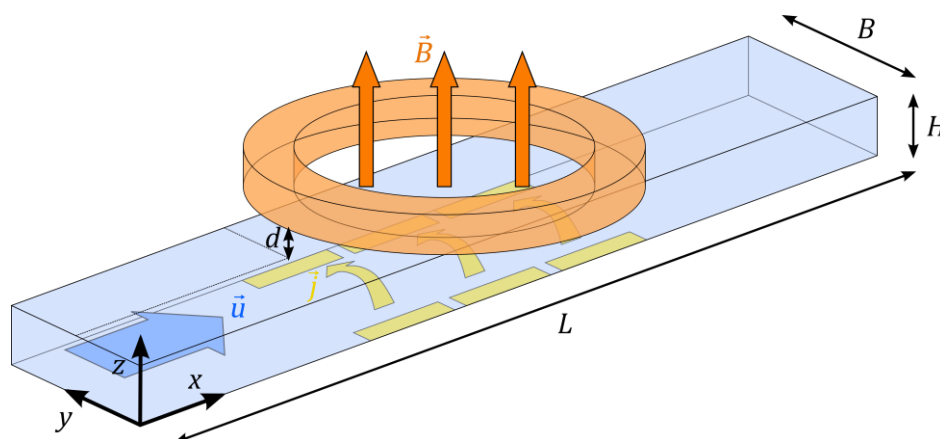


Abb. 1 Schematische Darstellung des magnetohydrodynamischen Pumpsystems, das in *COMSOL* simuliert wurde. Der blaue Bereich stellte eine Kanalgeometrie der Länge L , der Höhe H und der Breite B dar. Der orange Bereich zeigt eine Spule zur Erzeugung des Magnetfeldes \vec{B} , welche im Abstand d oberhalb des Kanals angeordnet ist. Auf der Unterseite des Kanals stellen gelbe Felder drei Elektrodenpaare dar, welche die elektrische Stromdichte \vec{j} im Fluid erzeugen, sodass eine Lorentz-Kraft wirken kann und eine Strömung mit der Geschwindigkeit \vec{u} entsteht.

Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Simulationsmodells, welches in *COMSOL Multiphysics* erzeugt wurde. Es besteht aus einer geraden, rechteckigen Kanalgeometrie der Länge $L = 6000 \mu\text{m}$, Höhe $H = 200 \mu\text{m}$ und der Breite $B = 600 \mu\text{m}$. Diese Werte orientieren sich zunächst an Erfahrungswerten bei der Fertigung der Mikrokanäle und können in zukünftigen Iterationen der Entwicklung noch angepasst werden. Am Boden des Kanals sind drei Elektrodenpaare angebracht, welche einen Ionenstrom in Kanalquerrichtung (hauptsächlich in y -Richtung) induzieren. Durch Vorgabe einer Stromstärke I_{El} an den Elektroden kann in der Simulation die Stromdichte \vec{j} im Fluid variiert werden. Gemeinsam mit dem Magnetfeld, das durch die über dem Kanal angeordnete Spule erzeugt wird, wirkt die volumenspezifische Lorentz-Kraft \vec{f}_L auf das Fluid im Kanal und erzeugt dadurch eine Strömung \vec{u} .

Geometrisch wird die Spule in der Simulation zwar lediglich als Ring mit quadratischem Querschnitt aufgebaut (vgl. Abb. 1), allerdings kann durch Vorgabe einer beliebigen Anzahl an Spulenwindungen N_{Sp} und durch Vorgabe des Spulenstroms I_{Sp} eine Vielzahl unterschiedlicher Spulen getestet werden. Die Ausrichtung des resultierenden Magnetfeldes wird dabei durch das Vorzeichen des Spulenstroms bestimmt und würde – wie auch in der realen Anwendung – eine Strömung des Fluids in beide Kanalrichtungen ermöglichen. Beim Durchmesser D_{Sp} der Spule ist zu beachten, dass dieser stets so groß zu wählen ist, dass die komplette Fläche der Elektroden in der Draufsicht umschlossen ist, da außerhalb dieses Bereichs die z -Komponente des Magnetfeldes ein anderes Vorzeichen hat und so ebenfalls entgegengesetzte Lorentz-Kräfte erzeugt.

Da in der Anwendung nur Fluide mit einer sehr niedrigen elektrischen Leitfähigkeit σ wie bspw. Hexacyanoferrat (mit dem Anion Ferrocyanid) genutzt werden [6], ist die magnetische Reynoldszahl $\text{Re}_{\text{mag}} = \mu_0 \cdot \sigma \cdot u \cdot D_h \approx 6 \times 10^{-11}$ so niedrig, dass die Rückkopplung der Strömung auf das Magnetfeld zu vernachlässigen ist. Dabei wurde der hydraulische Durchmesser $D_h = (4B \cdot H)/(2B + 2H)$, eine Strömungsgeschwindigkeit von $u = 10 \text{ mm/s}$, die elektrische Leitfähigkeit von Ferrocyanid σ und die magnetische Feldkonstante μ_0 zur Berechnung herangezogen. Tab. 1 fasst die wichtigsten zuvor genannten Größen inklusive der in der Simulation verwendeten Werte noch einmal zusammen.

Tab. 1 Geometrische und physikalische Parameter des Simulationsmodells

Bezeichnung	Variable	Wert
Elektrodenstrom	I_{El}	0,4 mA
Spulenstrom	I_{Sp}	200 mA
Anzahl Spulenwindungen	N_{Sp}	20
Spulendurchmesser	D_{Sp}	2 mm

Simulationseinstellungen

Wie schon zuvor erwähnt, wurden die Simulationen mit der Software *COMSOL Multiphysics 6.0* durchgeführt. Diese erlaubt die Einbindung und Verknüpfung unterschiedlicher physikalischer Modelle, wobei in dieser Arbeit die Pakete *Magnetic Fields*, *Electric Currents* und *Creeeping Flow* zur Simulation des dreidimensionalen, stationären Strömungsfeldes genutzt wurden. Der Ablauf einer Simulation bestand dabei aus drei aufeinanderfolgenden Schritten.

Im ersten Schritt wurde mit dem *Magnetic Fields*-Paket das Magnetische Feld der Spulenkonfiguration im Modellraum berechnet. Dazu wurde zusätzlich zu dem in Abb. 1 dargestellten Modell noch eine Umgebungsgeometrie genutzt, welche in der Simulation mit Luft gefüllt ist und dazu benötigt wird, dass das Magnetfeld korrekt berechnet werden kann.

Im zweiten Schritt wurde die Stromdichteverteilung im Kanal berechnet, welche sich im Fluid durch den eingestellten Elektrodenstrom einstellt. Dieser Schritt ist komplett unabhängig vom ersten Schritt und hätten ebenso als erstes durchgeführt werden können.

Im letzten Schritt wird aus dem Kreuzprodukt der berechneten magnetischen Feldstärke $\vec{B}(x, y, z)$ (aus Schritt 1) und der Stromdichteverteilung $\vec{j}(x, y, z)$ (aus Schritt 2) zunächst die

volumenbezogene Lorentz-Kraft $\vec{f}_L(x, y, z)$ berechnet. Diese geht anschließend als zusätzlicher Kraftterm in die vereinfachten Navier-Stokes-Gleichungen ein. Im Strömungslöser werden anschließend sowohl die Kontinuitätsgleichung als auch die Impulsgleichungen für stationäre, inkompressible Strömungen bei sehr niedriger Reynoldszahl (Trägheitsterm kann vernachlässigt werden) gelöst:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

$$0 = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}_L \quad (2)$$

Das Ergebnis dieses letzten Schrittes ist die Geschwindigkeitsverteilung $\vec{u}(x, y, z)$ und das Druckfeld $p(x, y, z)$ innerhalb der Kanalgeometrie. Da die magnetische Reynoldszahl sehr gering ist, ändert sich das Magnetfeld aufgrund der Strömung nicht. Als Randbedingungen wurde an allen Kanalseitenwänden die Hafttrandbedingung und an die Stirnflächen ($x = 0$ und $x = L$) ein konstanter statischer Druck von jeweils 0 Pa vorgegeben.

Simulationsergebnisse

Bevor in diesem Abschnitt näher auf die Strömungsstrukturen eingegangen wird, welche durch die simulierte Pumpenkonfiguration in dem Kanalabschnitt erzeugt wird, werden zunächst das Magnetfeld der Spule und die Stromdichteverteilung der Elektroden im Bereich der Kanalgeometrie diskutiert.

Da nur die x -Komponente der Lorentz-Kraft eine Strömung in Hauptrichtung des Kanals erzeugen kann, sollte die Pumpe möglichst so ausgelegt sein, dass diese Komponente maximiert wird. Wie schon erwähnt, setzt sich die Lorentz-Kraft aus dem Kreuzprodukt der Stromdichteverteilung und der magnetischen Flussdichte zusammen, sodass für die x -Komponente der Kraft $f_{L,x} = j_y B_z - j_z B_y$ gilt. Durch die Anordnung der Spule direkt über dem Kanal soll daher erreicht werden, dass das Magnetfeld größtenteils in vertikale Richtung wirkt und die anderen Komponenten (B_x, B_y) des Magnetfeldes möglichst klein sind.

Abb. 2a) zeigt die vertikale Komponente der resultierenden magnetischen Flussdichte B_z im Bereich der Kanalgeometrie. In dem roten Bereich nimmt B_z positive Werte an. Dies ist der Bereich innerhalb der Spulenwindungen. Der Bereich außerhalb der Spulenwindungen ist durch negative Werte – also ein nach unten gerichtetes Magnetfeld – gekennzeichnet. Es zeigt sich, dass der Maximalwert der magnetischen Flussdichte im Bereich von 5 mT liegt und somit relativ gering ausfällt.

Abb. 2b) stellt die Stromdichteverteilung, welche durch die im Kanal platzierten Elektroden hervorgerufen wird, anhand der Feldlinien dar. Die gelben Rechtecke am Boden des Kanals zeigen die Positionen der Elektrodenpaare. Es ist gut zu erkennen, dass der Ladungstransport in der Mitte des Kanals im Wesentlichen in y -Richtung erfolgt, sodass der Elektrodenstrom hauptsächlich zu der x -Komponente der Lorentz-Kraft beiträgt. In den Bereichen der vorderen und hinteren Elektroden hat das Stromdichtefeld zusätzlich einen größeren Anteil in x -Richtung, was dort zu Querkräften und somit auch Sekundärströmungen führen kann.

Resultierend aus der hervorgerufenen Lorentz-Kraft zeigt Abb. 3 die Hauptströmungskomponente u_x , welche sich im Kanal einstellt. Es ist gut zu erkennen, dass sich außerhalb der eigentlichen Pumpe (also im Bereich $x = 0 - 2000 \mu\text{m}$ und $x = 4000 - 6000 \mu\text{m}$) eine typische Kanalströmung mit der maximalen Geschwindigkeit in der Mitte und niedrigen Geschwindigkeiten in der Nähe der Seitenwände ausbildet. Im Bereich der Pumpenkomponenten (bei $x = 2000 - 4000 \mu\text{m}$) ist anhand der dunkelroten Bereiche zu erkennen, dass hier noch höhere Geschwindigkeiten auftreten. Gleichzeitig zeigen die blauen Bereiche in Nähe der Seitenwände jedoch auch, dass es hier zu Rückströmungen kommt, da die Werte von u_x hier negativ

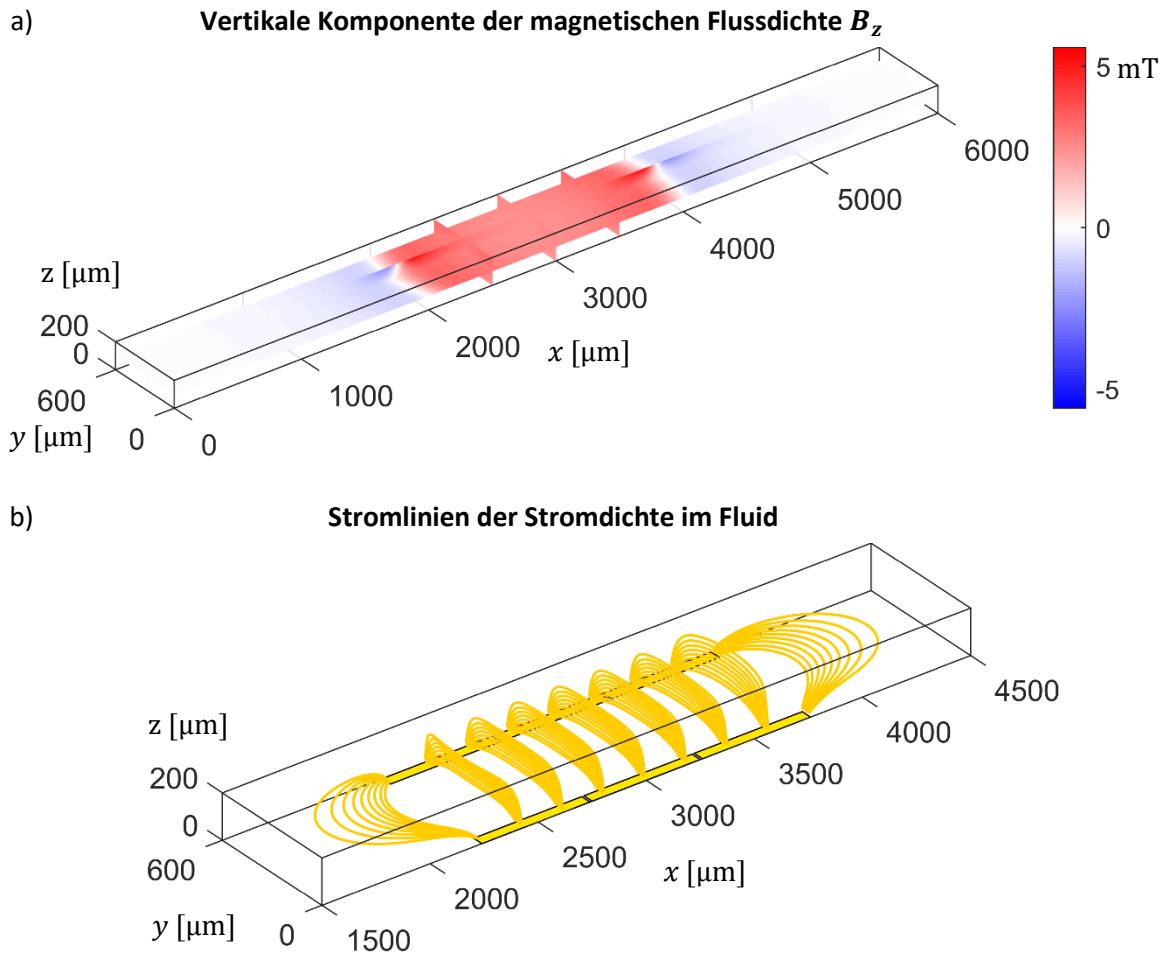


Abb. 2 a) Darstellung der Verteilung der vertikalen Komponente der magnetischen Flussdichte mit positiven (rot dargestellten) Werten innerhalb der Spulenwicklungen und negativen (blauen) Werte außerhalb. b) Stromlinien des Stromdichtefeldes innerhalb im Bereich der drei Elektrodenpaare am Boden des Kanals (als Rechtecke dargestellt).

sind. Zudem zeigt sich, dass nur relativ niedrige Geschwindigkeiten ($< 10 \mu\text{m/s}$) erreicht werden.

Um das Phänomen der Rückströmung noch etwas genauer zu untersuchen, werden in Abb. 4 Profile von u_x an drei verschiedenen x -Positionen ($x = 100 \mu\text{m}, 3000 \mu\text{m}, 5900 \mu\text{m}$) gezeigt. Auf der linken Seite der Abbildung sind Profile entlang der Kanalbreite auf halber Kanalhöhe dargestellt. Die beiden Profile vom Einlass- bzw. Auslassbereich sind nahezu identisch und zeigen eine Symmetrie der Strömung für einen gleichen Abstand zur Pumpenanordnung. Die Profile zeigen relativ konstante Geschwindigkeit in der Kanalmitte mit starkem Abfall an den Seitenwänden. Dies entspricht dem typischen Geschwindigkeitsprofil einer eingelaufenen, laminaren Kanalströmung. Das Profil bei $x = 3000 \mu\text{m}$ unterscheidet sich deutlich von den beiden anderen Profilen. In den Bereichen der Seitenwände ($y = 0 \mu\text{m}, 600 \mu\text{m}$) ist die Geschwindigkeit negativ und zeigt die zuvor erwähnte Rückströmung. In Richtung der Kanalmitte ($y = 300 \mu\text{m}$) steigt die Geschwindigkeit stark an und erreicht höhere Maximalgeschwindigkeiten im Vergleich zu den anderen beiden x -Positionen.

Im Rahmen hier nicht gezeigter Voruntersuchungen wurde der Einfluss einer inhomogenen Verteilung einer Volumenkraft über einem Kanalquerschnitt untersucht. Diese haben gezeigt, dass die inhomogene Kraftverteilung die Ursache für Rückströmungen sein kann, da insbesondere in mikrofluidischen Anordnungen der Druckverlust in den engen Kanälen so hoch ist,

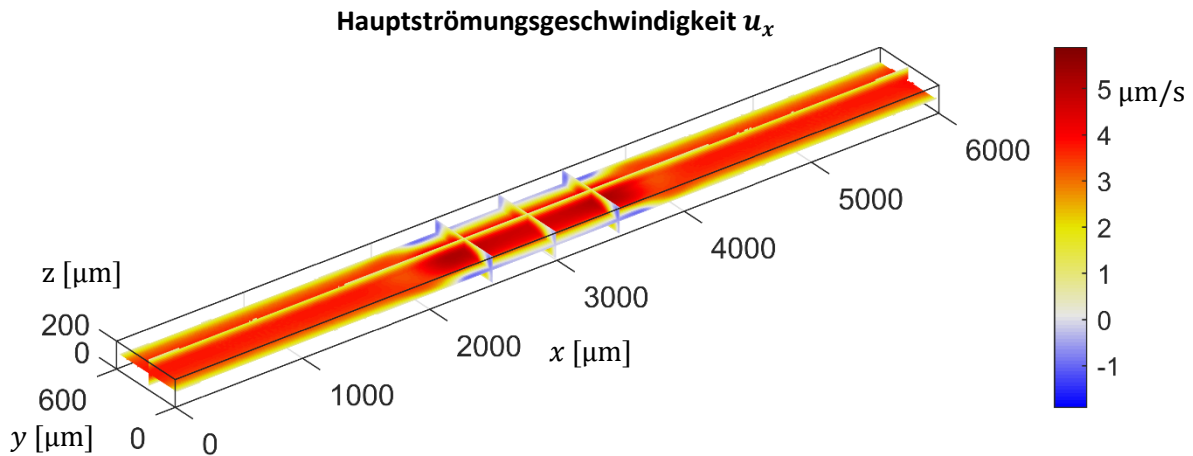


Abb. 3 Verteilung der Hauptströmungsgeschwindigkeit u_x über die komplette Kanallänge. Gelblich bis rötliche Bereiche zeigen positive, bläuliche Bereiche zeigen negative Werte, welche Rückströmungsgebieten im Pumpsystem entsprechen.

dass die Strömung in Gebieten niedriger aufgeprägter Volumenkraft zurückströmt, anstatt für einen noch höheren Gesamtvolumenstrom zu sorgen. Dies ist auch für die zuvor gezeigte Strömung der Fall, da die Rückströmung in den Regionen stattfindet, wo die Lorentz-Kraft im Kanalquerschnitt am niedrigsten ist.

Die Profile auf der rechten Seite von Abb. 4 zeigen den Geschwindigkeitsverlauf entlang der Kanalhöhe bei halber Kanalbreite. Auch hier sind die Profile vom Ein- und Auslass nahezu identisch und das Profil bei $x = 3000 \mu\text{m}$ zeigt eine höhere Maximalgeschwindigkeit. Die Form der Geschwindigkeitsprofile ist entlang dieser Raumrichtung parabelförmig, wie es für die kleinere Abmessung eines rechteckigen Kanalquerschnitts zu erwarten ist. Bei sehr genauer Betrachtung ist zu erkennen, dass die Maximalgeschwindigkeit im Pumpenbereich leicht zur Kanalunterseite (Richtung $z = 0 \mu\text{m}$) verschoben ist. Dies liegt an Sekundärströmungen bei Eintritt in den Bereich der Pumpenanordnung, die auf die dort vorliegenden Randerscheinungen des Stromdichte- und Magnetfeldes zurückzuführen sind.

Insgesamt zeigt Abb. 4, dass die aufgeprägte Lorentz-Kraft der Pumpe potenziell höhere Strömungsgeschwindigkeiten erzeugen kann, als dies außerhalb der Pumpe beobachtet wird. Da die Reibung in dem Mikrokanal jedoch eine zu starke Gegenkraft erzeugt, bilden sich Rückströmungsgebiete im Pumpenbereich aus, welche in Nähe der vertikalen Seitenwände vorzufinden sind und dafür sorgen, dass der Gesamtvolumenstrom über die komplette Kanallänge immer konstant bleibt.

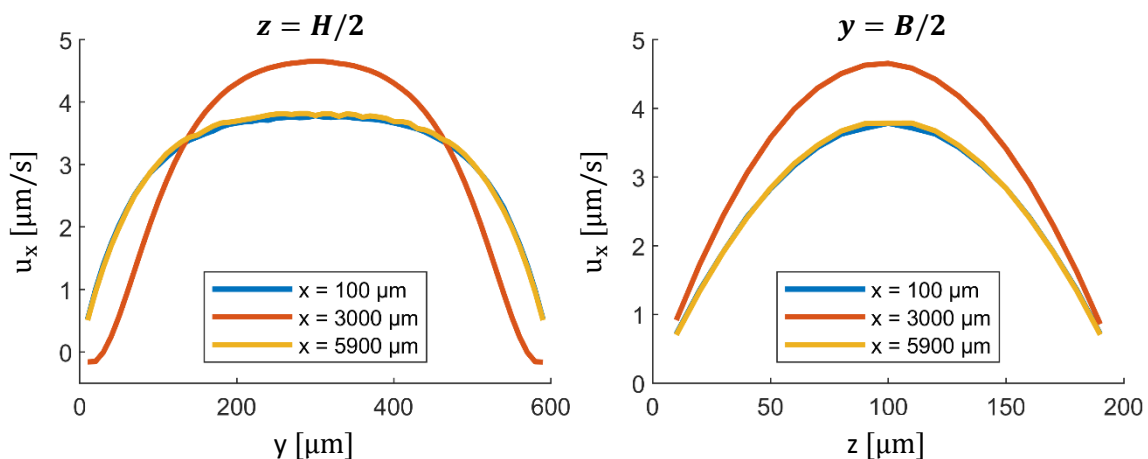


Abb. 4 Horizontale (links) und vertikale (rechts) Profile der Hauptströmungskomponente u_x an drei Positionen in Kanallängsrichtung.

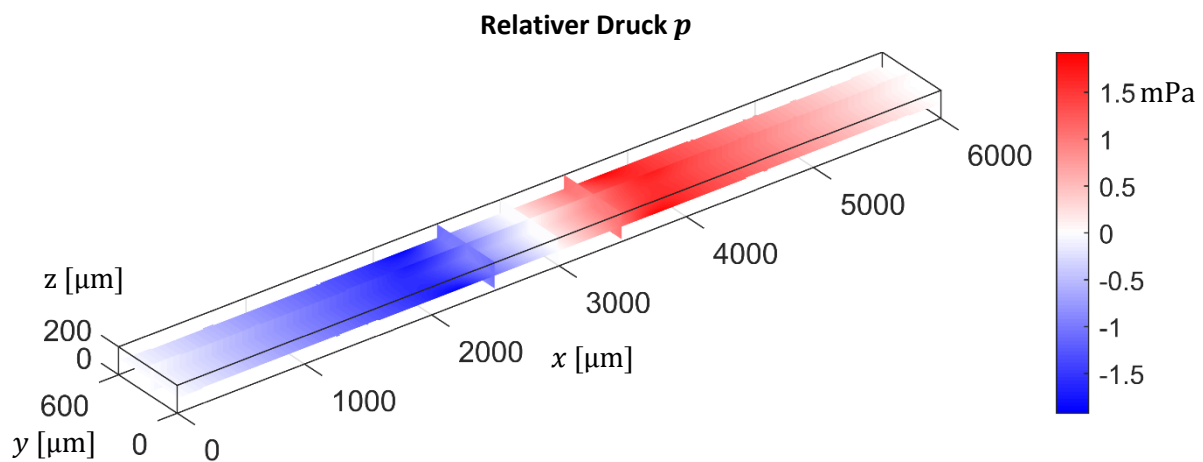


Abb. 5 Druckverteilung im Kanal relativ zum Umgebungsdruck aus den Randbedingungen.

Abschließend wird in Abb. 5 das von der Pumpe erzeugte Druckfeld gezeigt. Dieses ist relativ zum Umgebungsdruck, welcher mit 0 Pa am Ein- und Auslass des Kanals konstant vorgegeben wurde. Dadurch können hier auch negative Werte zustande kommen. Zu sehen ist, dass aufgrund der wirkenden Lorentz-Kraft ein Bereich negativen Drucks vor der Pumpenanordnung erzeugt wird. Dieser erreicht sein Minimum bei $x \approx 2000 \mu\text{m}$, wo die Pumpenanordnung beginnt. Innerhalb der Anordnung steigt der Druck an bis er seinen Maximalwert bei $x \approx 4000 \mu\text{m}$ erreicht und anschließend bis zum Auslass wieder auf die vorgegebene Randbedingung absinkt. Anhand der Farbskala ist somit die Gesamtdruckdifferenz, welche die Pumpe erzeugen kann, direkt abzulesen und liegt im Bereich von 3 – 4 mPa.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Simulationen zu einem neuartigen Pumpensystem für die Anwendung in mikrofluidischen Plattformen vorgestellt. Das System nutzt dazu Lorentz-Kräfte, welche durch vollintegrierte Elektrodenpaare und Elektromagneten in niedrig-leitfähigen Fluiden induziert werden können. Es wurde gezeigt, dass eine runde Spulenanordnung oberhalb des Kanals ein größtenteils homogenes Magnetfeld im Kanal erzeugen kann. Am Boden angebrachte Elektrodenpaare können darüber hinaus einen Ionenstrom in Kanalquerrichtung erzeugen, sodass insgesamt eine Lorentz-Kraft erzeugt wird, welche hauptsächlich in Längsrichtung des Kanals wirkt.

Das resultierende Geschwindigkeitsfeld hat gezeigt, dass die Gesamtanordnung funktioniert und außerhalb des Bereichs der Pumpe eine typische laminare Kanalströmung erzeugt wird. Aufgrund der nicht komplett homogenen Verteilung der Lorentz-Kraft im Kanalquerschnitt und der hohen Reibungskräfte in Mikrokanälen, kommt es zu Rückströmungen, die vermieden werden sollten. Zudem ist an den relativ niedrigen Geschwindigkeiten und Druckdifferenz zu erkennen, dass es noch Verbesserungspotential gibt. Daher sind aufbauend auf den Simulationsergebnissen folgende Weiterentwicklungen geplant:

- Durch eine vertikale Anordnung der Elektroden wird der Ionenstrom im Fluid noch stärker auf die Kanalquerrichtung (y-Richtung) konzentriert, sodass die resultierende Kraftverteilung im Kanal homogener ist und Rückströmungen vermieden werden.

- Durch zusätzliche Magneten in Kombination mit einem Eisenjoch wird das lokale Magnetfeld verstärkt und gleichzeitig der Gesamtbereich der Pumpe vergrößert, sodass die Pumpe insgesamt leistungsfähiger wird.

Die genannten Verbesserungsmöglichkeiten werden derzeit als Prototypen neu gefertigt, um einen experimentellen Nachweis der Simulationsergebnisse zu liefern und damit ein erstes funktionstüchtiges und vollintegriertes Pumpsystem zu erzeugen.

Literatur

- [1] **Sachs, S., Baloochi, M., Cierpka, C., König, J., 2022:** “On the acoustically induced fluid flow in particle separation systems employing standing surface acoustic waves – Part I,” *Lab Chip*, Vol. 22, pp. 2011–2027
- [2] **Sachs, S., Cierpka, C., König, J., 2022:** “On the acoustically induced fluid flow in particle separation systems employing standing surface acoustic waves – Part II,” *Lab Chip*, Vol. 22, p. 2028–2040
- [3] **Azizy, R., 2022:** “Mikrotechnologischer Aufbau und Evaluation eines magneto-mikrofluidischen Demonstrator-Systems”, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Masterarbeit
- [4] **Haehnel, V., Khan, F.Z., Mutschke, G., Cierpka, C., Uhlemann, M., Fritsch, I., 2019:** “Combining magnetic forces for contactless manipulation of fluids in microelectrode-microfluidic systems,” *Scientific Reports*, Vol. 9, 5103
- [5] **König, J., Khan, F.Z., Fritsch, I., Cierpka, C., 2018:** “Experimental characterization of the fluid flow induced in micro chambers by redox-magnetohydrodynamic pumping,” in *Experimentelle Strömungsmechanik - 26. Fachtagung 2018 Rostock*, Rostock
- [6] **Rösing, W., 2021:** “Entwicklung und Charakterisierung einer membranlosen mikrofluidischen Brennstoffzelle,” Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Dissertation