

Novel passive microfluidic mixer utilizing porous medium

Neuartiger passiver Mikrofluidik-Mischer unter Verwendung eines poröses Mediums

Emil Grigorov* Vassil Galabov*

*Technical University of Sofia, Faculty of German Engineering and Economics Education,
e-mail: egrigorov@FDIBA.tu-sofia.bg

Abstract — Mixing within microfluidic devices has always presented a significant challenge due to the small dimensions of the channels and the predominance of laminar fluid flow. Nevertheless, effective mixing is a crucial process in various biological, chemical, and pharmaceutical applications. This paper introduces a novel approach to passive mixing in microfluidic devices, involving the use of a porous medium. The authors present experimental and numerical analyses of this method, demonstrating that mixing efficiency decreases as the volume flow rates of the fluids increase. The largest tested sponge achieved a maximum mixing efficiency of 98%, suggesting that even greater efficiencies may be attainable with larger geometries. Furthermore, a decline in mixing efficiency along the length of the foam was observed as volume flow rates increased, possibly due to enhanced backflow. Despite the intricate structure of the PDMS sponge, numerical analysis indicates a linear relationship between pressure drop and Reynolds number.

Zusammenfassung — Das Mischen in Mikrofluidik-Geräten war schon immer eine bedeutende Herausforderung aufgrund der geringen Abmessungen der Kanäle und der vorherrschenden laminaren Strömung. Dennoch ist effizientes Mischen ein entscheidender Prozess in verschiedenen biologischen, chemischen und pharmazeutischen Anwendungen. Diese Arbeit stellt einen neuartigen Ansatz zum passiven Mischen in Mikrofluidik-Geräten vor, bei dem ein poröses Medium verwendet wird. Die Autoren präsentieren experimentelle und numerische Analysen dieser Methode und zeigen, dass die Mischeffizienz abnimmt, wenn die Volumenströme der Flüssigkeiten steigen. Der größte getestete Schwamm erreichte eine maximale Mischeffizienz von 98%, was darauf hinweist, dass sogar noch höhere Effizienzen mit größeren Geometrien erreichbar sein könnten. Zudem wurde beobachtet, dass die Mischeffizienz entlang der Länge des Schwamms abnimmt, wenn die Volumenströme steigen, möglicherweise aufgrund eines verstärkten Rückflusses. Trotz der komplexen Struktur des PDMS-Schwamms zeigt die numerische Analyse eine lineare Beziehung zwischen dem Druckabfall und der Reynolds-Zahl.

I. INTRODUCTION

Die Mikrofluidik hat sich als ein leistungsstarkes Werkzeug zur Untersuchung biologischer Systeme etabliert. Sie ermöglicht präzise Kontrolle über die Betriebsbedingungen des Systems und ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen wie Zellsortierung, Einzelzellanalyse und die Arzneimittelforschung. In vielen mikrofluidischen Anwendungen ist das Mischen erforderlich, um effiziente Reaktionen zwischen zwei oder mehr Komponenten zu ermöglichen. Zwei oder mehr Reaktanten können durch Einlasszweige zugeführt und dann in einem Mischkanal gemischt werden. Bei der Entdeckung und Entwicklung neuer Arzneimittel können mikrofluidische Geräte beispielsweise für das schnelle Screening einer großen Anzahl potenzieller Wirkstoffkandidaten eingesetzt werden. In diesem Fall ist eine effiziente Vermischung der Wirkstoffverbindungen und biologischen Proben unerlässlich, um genaue und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten. Aufgrund der niedrigen Reynolds-Zahlen (aufgrund der winzigen Abmessungen der Kanäle) und der stark laminaren Natur der Strömungen in mikrofluidischen Kanälen basiert der Prozess der Flüssigkeitsvermischung stark auf Diffusion und kann daher relativ langsam sein [1]. Bei einer typischen Kanalbreite von 200 μm kann je nach Diffusionskonstante der Flüssigmoleküle die Eindringtiefe eines Moleküls, das die gesamte Kanalbreite einnimmt, zwischen 10 und 960 μm liegen [2], was die Kon-

struktion von Kanälen mit inakzeptabel langen Längen erforderlich machen kann.

In den letzten Jahrzehnten wurden spezifische Methoden entwickelt, um das Mischen und somit die Reaktionseffizienz in mikrofluidischen Geräten zu verbessern. Zwei Arten des Mischens wurden bereits in der Literatur diskutiert: Bei aktiven Methoden werden externe Energiequellen (z. B. Schallwellen) verwendet, um die Qualität der Mischreaktionen zu verbessern, basierend auf Schwingungen im Strömungsfeld [3]. Zahlreiche bestehende Arbeiten zeigen das Potenzial der Implementierung von durch Pulsationen verursachten Strömungen [4], dynamischen Druckgeneratoren [5] oder sogar aktiven Rührstäben [6] in den Mikrokanälen. Aktive Mischmethoden können äußerst effektiv sein, um eine schnelle Vermischung zu erreichen. Die Herstellung von aktiven Mixern gestaltet sich jedoch oft schwierig aufgrund beweglicher Teile und der Notwendigkeit einer externen Stromquelle [7].

Passives Mischen hingegen wird durch die Änderung der Konfiguration der Mikrokanäle während des Herstellungsprozesses erreicht. Dieser Ansatz beinhaltet oft die Verwendung von geometrischen Merkmalen (z. B. Hindernissen oder Spiralen), um die Diffusion zwischen den beiden Flüssigkeiten durch Dehnung, Faltung oder Aufbrechen der Flüssigkeit zu beschleunigen. Mit anderen Worten, eine wesentliche Bedingung für gutes Mischen ist das "Überkreuzen" der Strömungslinien. Wie in ihrer Arbeit [8] beschrieben, kann dieser Pro-

zess, bei dem die Flüssigkeit eine Reihe chaotischer und unberechenbarer Bewegungen durchläuft, die das Mischen fördern, indem sie die Flüssigkeitsschichten stören und den molekularen Austausch zwischen verschiedenen Regionen fördern, grob mit "chaotischer Advektion" gleichgesetzt werden. In den letzten Jahren wurden verschiedene neuartige geometrische Designs und Konzepte von Mikromixern auf der Grundlage dieses Prinzips untersucht, von denen einige hier kurz vorgestellt werden.

In ihrer Arbeit präsentierten Chung et al. [9] eine Variation des traditionellen T-Mischers, bei der ein rautenförmiger Mikromixer mit flachen Winkeln verwendet wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Reynolds-Zahlen über 180 eine Mischungseffizienz von mehr als 93% erreicht werden konnte, aufgrund der Entwicklung eines Rezirkulationseffekts um die Strukturen. Ebenso schlugen Li et al. [10] einen Mischer mit verbesserter Geometrie vor, der mit Hilfe von Unterkanälen die Strömungslinien der Flüssigkeiten "aufteilt und wieder zusammenführt". Die experimentellen und numerischen Ergebnisse zeigten Mischleistungen zwischen 70% und 86% bei Reynolds-Zahlen im Bereich von 1-80. Yang et al. [11] verwendeten einen dreidimensionalen Spiral-Mikromixer, bestehend aus zwei sich überschneidenden Kanälen, um einen chaotischen Mischeffekt zu erzeugen. Es wurde experimentell gezeigt, dass durch Anpassung der Durchflussraten und der Kanalgeometrien eine Mischungseffizienz von 90% erreicht werden konnte. Ähnliche Mischungseffizienzen wurden im dreidimensionalen chaotischen Mikromixer von Li et al. [12] beobachtet, der aus periodischen dreieckigen Mischkammern bestand. Die Ergebnisse wurden durch mehrere numerische Simulationen bestätigt.

In diesem Artikel wird ein neuer Ansatz zur Erzielung passiven Mischens in einem mikrofluidischen Gerät durch die Integration eines porösen Mediums vorgestellt. Frühere Studien, einschließlich solcher von [13] und [14], haben die Mischmechanismen in porösen Medien ausführlich untersucht. Es wurde gezeigt, dass eine verbesserte Mischungseffizienz durch die Wechselwirkung zwischen lokalen Geschwindigkeitsfluktuationen und Diffusion erreicht wird. Das Mischen in porösen Medien erfolgt durch das Umrühren von Fluidelementen und die Bildung lamellarer Strukturen [13]. Dadurch werden anfangs getrennte Lösungsmittel in enge Nähe gebracht, wodurch sie sich durch Diffusion vermischen können. Darüber

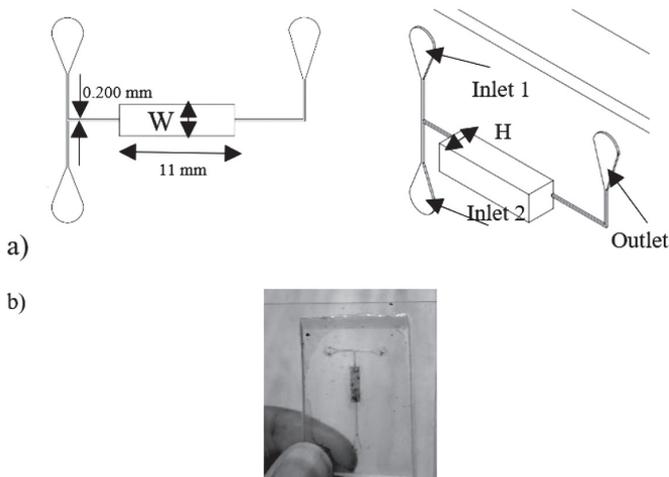


Fig. 1. Abbildung 1 Eine schematische Darstellung der Geometrie und der Abmessungen des verwendeten Modells in a) und des realen Chips mit dem integrierten PDMS-Schwamm in b).

hinaus beschleunigt die Verteilung der Lösungsverteilung durch advektives Umrühren ebenfalls den Mischprozess. Die Porosität in unserem mikrofluidischen Gerät wurde mithilfe der Matrix eines einfachen Würfelzuckers erzeugt. Die Mischungseffizienz wurde anhand aufgenommener mikroskopischer Bilder und einer Bildverarbeitungstechnik für verschiedene Einlassgeschwindigkeiten der beiden zu mischenden Flüssigkeiten bewertet. Darüber hinaus wurde die Geometrie eines der Geräte numerisch analysiert.

II. METHODS AND CHIP FABRICATION

Die Geometrie des mikrofluidischen Geräts wurde zunächst mithilfe von computergestützter Konstruktion (CAD) entwickelt. Die Form des Modells wurde anschließend mithilfe eines LCD-basierten stereolithografischen 3D-Druckers (Phrozen Sonic Mini 4K) hergestellt. Ein vorgemischter Polydimethylsiloxan (PDMS) Vorpolymer wurde dann in die gedruckte Masterform gegossen und in einem Ofen bei 60 C für 1 Stunde ausgehärtet. Nachdem der gehärtete Chip aus dem Harz entfernt wurde, wurde ein proportionaler PDMS-Schwamm in die Mischkammer eingesetzt. Der Chip und ein Mikroskop-Deckglas wurden einer Sauerstoffplasma-Behandlung ausgesetzt und anschließend miteinander verschmolzen.

TABLE I. Dimensionen der untersuchten Geometrien

Geometrie	W x H [mm]
I	2 x 2
II	3 x 3
III	4 x 4

Das Modell besteht aus zwei Einlasskanälen und einem Auslasskanal, von denen jeder die Abmessungen 200 x 200 μ m hat, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Mischkammer hat die Länge eines Standard-Würfelzuckers - 11mm. Allerdings wurden die Breite und die Höhe der Kammer gemäß Tabelle I variiert, um die Abhängigkeit der Mischeffizienz von den Abmessungen des gewählten Schwamms zu untersuchen.

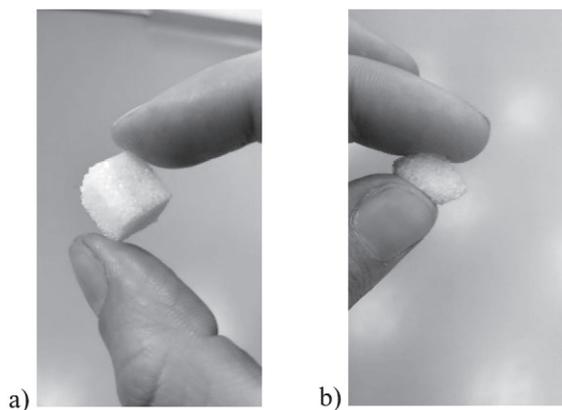


Fig. 2. Abbildung 2 In a) der verwendete Zuckerwürfel, in b) der resultierende zusammengedrückte PDMS-Schwamm.

Die Methodik zur Herstellung des PDMS-Schwamms wurde umfassend in [15] dokumentiert. Der Prozess beinhaltet das Platzieren eines Würfelzuckers in einer Petrischale, die eine Mischung des zuvor erwähnten PDMS-Vorpolymer enthält. Anschließend wird der mit der Polymermischung getränkte Zuckerwürfel 2 Stunden lang bei einer Temperatur von 60 °C in einem Ofen erhitzt, um eine vollständige Polymerisation des PDMS sicherzustellen. Sobald der Polymerisationsprozess abgeschlossen ist, wird das Verbundmaterial für eine Dauer

von 3 Minuten in einen Gefrierschrank gestellt, um das Ablösen des PDMS von dem Polymer zu erleichtern. Schließlich werden die Zuckerkristalle durch Spülen mit deionisiertem Wasser bei einer Temperatur von 60 C für eine Dauer von 1 Stunde entfernt. Abbildung 2 zeigt den Zuckerkwürfel und den resultierenden gepressten PDMS-Schwamm. Gemäß der Arbeit von [15], in der eine Mikro-Computertomographie (CT) am PDMS-Schaum durchgeführt wurde, verfügt der poröse PDMS-Schwamm über komplexe miteinander verbundene Porenkanäle mit einem breit polydispersen Volumen entlang der verschiedenen Bereiche. Die Analyse zeigte, dass die poröse Struktur eine glatte innere Oberfläche mit einer Makroporengröße im Bereich von $500 \pm 300 \mu\text{m}$ und einer Porosität von etwa 77 % aufwies.

Um die Experimente durchzuführen, wurden zwei Spritzenpumpen verwendet, um die Flüssigkeiten zuzuführen. Die Experimente wurden mithilfe eines hausinternen 3D-gedruckten umgekehrten Mikroskops mit einer Bildauflösung von 640×480 visualisiert. Destilliertes Wasser (DW) und DW mit Azorubin-Rotfarbstoff wurden als die beiden Flüssigkeiten für die Mischexperimente verwendet.

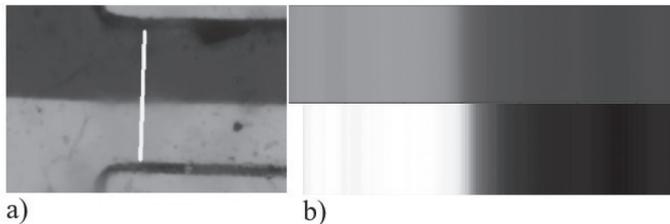


Fig. 3. Abbildung 3 In a) das Mikroskopbild mit der gezogenen Linie. In b) oben die Farben des Abschnitts, der von der Linie markiert ist, und die entsprechende Graustufenverteilung.

A. Mixing Efficiency

Um die Mischungseffizienzen im Versuchsaufbau zu quantifizieren, führten wir eine Bildverarbeitung an den mikroskopischen Bildern durch, die am Ausgang der Mischkammer aufgenommen wurden. Dies umfasste die Verwendung eines auf Python basierenden Softwarewerkzeugs, das es dem Benutzer ermöglichte, eine Linie über den Querschnitt des Bildes zu ziehen. Der ausgewählte Bereich wurde dann in ein Graustufenformat umgewandelt.

Die Auswertung der Mischungseffizienz erfolgte durch die Analyse der Dispersion der Pixelintensitäten entlang dieser Graustufenlinie. Abbildung 3 veranschaulicht die einzelnen Schritte dieses Prozesses anhand eines Bereichs, in dem keine Mischung beobachtet wurde, also vor dem Eintreten der beiden Flüssigkeiten in den porösen Schwamm. Abbildung 3a) zeigt die Farben der ausgewählten Linie, während Abbildung 3b) das entsprechende Graustufenbild darstellt. Die Abweichung der Grauintensität um den dunkelsten Graupixel, der der gemischten Region in der Mitte des Kanals entspricht, wurde für die Pixel der ausgewählten Linie mithilfe der Gleichung (1) berechnet:

$$(1) \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (G_{\min} - G_i)^2}$$

wobei σ die Standardabweichung der Pixelintensitäten entlang der Linie ist, G_{\min} die minimale Grauintensität darstellt und G_i die tatsächliche Grauintensität des i -ten Pixels entlang der Linie ist. Die Standardabweichung ist gleich 1, wenn keine Mischung vorliegt, während sie bei vollständiger Mischung 0 erreicht, da alle Pixel eine gleichmäßige Grauintensität auf-

weisen. Dieser Ansatz wurde bereits in der Arbeit von [16] demonstriert. Die tatsächliche Mischungseffizienz in Prozent wird dann gemäß der Gleichung (2) berechnet:

$$(2) \quad M_{\text{eff}} = (1 - \sigma) \cdot 100\%$$

B. Numerical Simulation

Die vorgeschlagene Methode zur Bewertung der Mischungseffizienz weist einen Nachteil auf, nämlich dass sie ausschließlich auf einer einzigen Ebene basiert, die durch das Mikroskopbild definiert ist, während der Mischprozess, wie in der Einleitung beschrieben, in der Regel von dreidimensionalen Effekten angetrieben wird. Um diese Einschränkung zu bewältigen, wurde eine numerische Simulation durchgeführt. Aufbauend auf der Arbeit von [15], die eine -CT-Analyse umfasste, die erfolgreich ein Video der Struktur des PDMS-Schaums erfasst hat, wurde ein dreidimensionales geometrisches Modell des Schwamms entwickelt. Ein auf Python basierendes Skript wurde verwendet, um das zuvor genannte Video in separate Frames zu zerlegen, und ein Open-Source-Software-Tool (Seg3D2), das normalerweise in der medizinischen Bildgebung zur Volumen-segmentierung und -verarbeitung verwendet wird, wurde für die Bildverarbeitung eingesetzt. Wie in Abbildung 4 gezeigt, wurde die Porosität erfolgreich rekonstruiert. Aufgrund der hochkomplexen Flächen

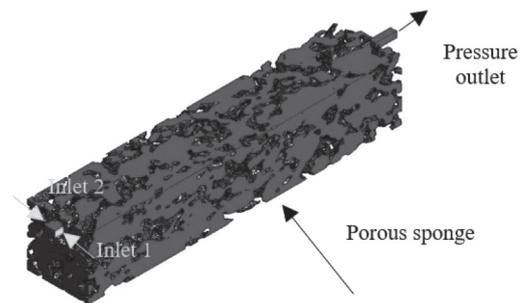


Fig. 4. Abbildung 4. Das erstellte 3D-Modell des PDMS-Schwamms am Beispiel von Geometrie 2 aus Tabelle 1.

und Geometrien, die damit einhergehen, war die Erstellung des Modells in Bezug auf den Speicher- und CPU-Verbrauch rechenintensiv, daher wurden nur die Geometrien 1 und 2 aus Tabelle 1 rekonstruiert. Für die Simulation und Diskretisierung des 3D-Modells wurde Ansys Fluent 21R2 mit dem implementierten Species-Transportmodell [17] verwendet, um das System der nachstehend beschriebenen partiellen Differentialgleichungen (3-5) zu lösen. Das verwendete Diskretisierungsgitter besteht aus etwa 26,2 Millionen tetraedrischen Elementen für Geometrie 2 und 7,3 Millionen für Geometrie 1. Die Randbedingungen umfassen ein konstantes Geschwindigkeitsprofil für die beiden Einlässe, einen Druckauslass mit $p = 0 \text{ Pa}$ am Auslasskanal nach der Mischkammer und No-Slip-Bedingungen für die Wände. Alle parallelen

Berechnungen hatten eine Wanduhrzeit von 30 Minuten, bevor die gewünschten Residualkriterien von 1×10^{-4} für die Kontinuität, Geschwindigkeitskomponenten, Drücke und Spezieskonzentration erreicht wurden. Für alle beschriebenen Simulationen wurden 160 Kerne auf dem "bwUniCluster 2.0" am Karlsruher Institut für Technologie verwendet.

Die Gleichungen, die für die Diskretisierung des Problems verwendet wurden, sind unten dargestellt. Gleichung (3) repräsentiert die Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) für inkompressible Fluide, während Gleichung (4) die Impulsbilanz ist:

$$(3) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho U = 0$$

$$(5) \quad \frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu[\nabla U + \nabla U^T])$$

Die Dichte ρ und die Viskosität μ für beide Flüssigkeiten wurden auf 1000 kg m^{-3} bzw. $0,001 \text{ Pas}$ festgelegt. Ist der Geschwindigkeitsvektor (m/s) und p der Druck (Pa). Bei der Modellierung von Mischproblemen sollte immer die Diffusion der Spezies in den Flüssigkeiten berücksichtigt werden. Dieser Transfer wird in Form einer

Konvektion-Diffusionsgleichung (5) berücksichtigt, wie unten dargestellt:

$$(5) \quad U \cdot \nabla c = \nabla \cdot (D \nabla c)$$

wobei c die Konzentration der Spezies mol m^{-3} und D den Diffusionskoeffizienten $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ darstellt. Da die Konzentration des verwendeten roten Farbstoffs zwischen den Arbeitsflüssigkeiten im Vergleich zu den Flüssigkeitsvolumina vernachlässigbar klein ist, wurde die Selbstdiffusion von reinem Wasser für die Simulationen verwendet. Der Diffusionskoeffizient für Wassermoleküle in Wasser wurde aus [18] mit $D = 2,29 \text{ m}^2 \text{ ms}^{-1}$ entnommen.

Tabelle 2 fasst die verwendeten Randbedingungen für die simulierte Geometrie zusammen. Die aufgeführten Werte in Spalte 2 entsprechen den im experimentellen Teil verwendeten Volumenstromraten. Die entsprechende Reynolds-Zahl ($Re = \rho L u / \mu$, wobei L gleich der Kanalbreite von 200 m ist) ist ebenfalls in Tabelle 2 aufgeführt.

Ähnlich wie bei (1) wurde die Mischungseffizienz für die

TABLE II. Einlassgeschwindigkeiten und Re-Zahlen

Case	Inlet Velocity [m/s]	Re
1	0,00139	0,02778
2	0,00417	0,08333
3	0,00625	0,12510
4	0,00833	0,16667
5	0,01319	0,26389

oben dargestellten numerischen Simulationen gemäß (5) bewertet, was auch in [19] verwendet wurde:

$$(6) \quad M_{eff} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{c} - c_i)^2}}{\bar{c}}$$

wobei c_i die Massenfraktion der Flüssigkeit im i -ten Gitterkontrollelement und \bar{c} den durchschnittlichen Massenfraktionswert der Flüssigkeit auf der gesamten ausgewählten Fläche darstellt.

III. RESULTS

Im ersten Teil des Ergebnisteils werden die experimentellen Ergebnisse für die drei Geometrien aus Tabelle 1 diskutiert. Abbildung 5 zeigt die unmittelbar nach dem PDMS-Schwamm ermittelten Mischeffizienzen als Funktion der Reynolds-Zahl (Re). Jeder Punkt repräsentiert den Durchschnitt über zwei separate Experimente in verschiedenen Mikrofluidik-Chips.

Aus den Daten können wir erkennen, dass für alle drei Geometrien eine Abnahme des Mischeffizienzindex beobachtet wird, wenn die Reynolds-Zahl (Einlassgeschwindigkeiten) steigt. Dies kann damit erklärt werden, dass mit steigender

Durchflussrate die Verweilzeit der Flüssigkeiten in den Poren des Schwamms abnimmt. Diese verringerte Verweilzeit bedeutet, dass weniger Zeit für den diffusionsdominierten Mischprozess bleibt, was zu einem niedrigeren Mischeffizienzindex führt.

Diese Beobachtung ist konsistent mit früheren Forschungen [14], die gezeigt haben, dass ein zentrales Problem beim Mischen in porösen Medien darin besteht, dass charakteristische Diffusionszeiten um mehrere Größenordnungen größer sein können als charakteristische Advektionszeiten. Mit anderen Worten, während die Strömung die Flüssigkeiten im Schwamm verteilen oder umrühren kann, reicht dies möglicherweise nicht aus, um sie effektiv zu vermischen. Dies könnte auch die in Abbildung 5 beobachteten Abfälle erklären, bei denen wir eine Abnahme des Mischeffizienzindex mit steigender Reynolds-Zahl beobachten. Abbildung 5 zeigt eine klare Verbesserung

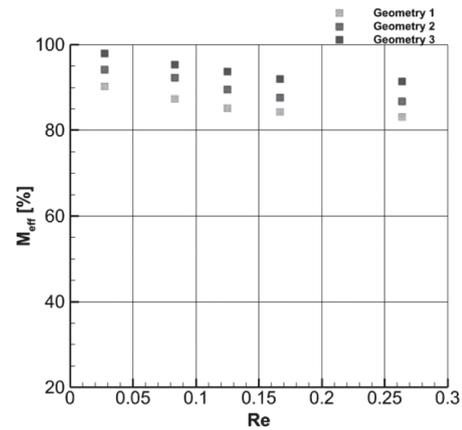


Fig. 5. Abbildung 5 Mischeffizienz der durchgeführten Experimente als Funktion der Re-Zahl für die drei in Tabelle 1 beschriebenen Geometrien.

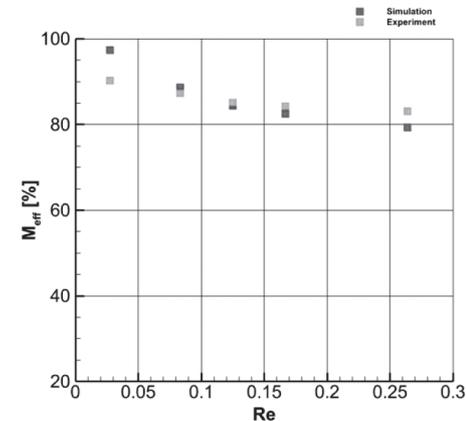


Fig. 6. Abbildung 6 Vergleich der Mischeffizienzen zwischen Simulation und Experiment für Geometrie 1 in Tabelle 1.

der Mischeffizienz mit zunehmenden Schwammabmessungen. Im Durchschnitt kann eine Steigerung der Mischeffizienz um 6-7% für eine feste Reynolds-Zahl beobachtet werden, wenn die Schwammgröße erhöht wird. Diese Verbesserung kann weitgehend darauf zurückgeführt werden, dass größere Schwämme eine homogenere Verteilung der Flüssigkeit über den Querschnitt der Geometrie sowie längere Verweilzeiten und Kontakt zwischen den beiden Flüssigkeiten in den Kanälen des Schwamms bieten. Diese Faktoren führen zu einem gleichmäßigeren Mischprozess mit weniger Taschen unvermischter Flüssigkeiten. Die maximal erzielte Mischeffizienz betrug 97,8% für die niedrigste Reynolds-Zahl und die größte

Schwammgröße von 4 mm x 4 mm, während der niedrigste Effizienzindex bei 82,1% lag. Beim Vergleich der aus den numerischen Simulationen gewonnenen Ergebnisse mit der experimentell ermittelten Mischeffizienz, wie in Abbildung 6 für Geometrie 1 in Tabelle 1 dargestellt, gibt es Unterschiede in den Entwicklungssteigungen. Die Ergebnisse wurden am Querschnitt des Auslasskanals berechnet (dem Kanal direkt nach dem Austritt des Schwamms - siehe Abbildung 4). Bei niedrigen Reynolds-Zahlen übertreffen die Simulationsergebnisse die experimentell ermittelten Mischwerte um 8%. Bei hohen Reynolds-Zahlen sind die numerischen Werte geringer als die experimentell ermittelten Mischwerte um weniger als 5%. Obwohl diese Unterschiede relativ gering sind und die

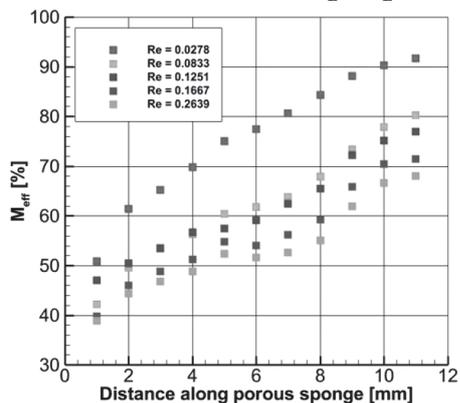


Fig. 7. Abbildung 7 Numerische Mischeffizienz entlang der Länge des PDMS-Schwamms für die simulierten Re-Zahlen.

Daten zwischen Experiment und Simulation gut übereinstimmen, gibt es mehrere Faktoren, die sie erklären können. Erstens entspricht die simulierte Geometrie nicht perfekt den in der experimentellen Studie verwendeten porösen Schwämmen. Um eine nähere numerische Beschreibung der Mischung im porösen Medium des PDMS-Schwamms zu erhalten, müssen zahlreiche andere Modelle auf der Grundlage unterschiedlicher Zuckerkwürfel entwickelt werden. Darüber hinaus ist trotz der Verwendung eines hochwertigen Gitters für die CFD Simulation immer noch numerische Diffusion vorhanden, die zu einem nicht-physikalischen Anstieg der Effizienz der numerischen Ergebnisse führen kann. Weitere Analyse der Mechanismen, die die Mischung im vorgestellten PDMS-Schwamm antreiben, kann Aufschluss über die lokale Entwicklung des Mischungseffizienzindex geben. Abbildung 7 zeigt den effektiven Mischungseffizienzindex (M_{eff}) als Funktion der Länge des PDMS-Schwamms für die untersuchten Reynolds-Zahlen (Re). Die Ergebnisse zeigen, dass die Mischeffizienz zwischen den beiden Flüssigkeiten nicht nur am Ausgang der Geometrie, sondern auch entlang der Länge des Schwamms erhöht wird, insbesondere bei den höheren Re-Zahlen. Ein interessantes Phänomen, das sich zeigt, ist die Beobachtung, dass für die höchsten Volumenströme eine leichte Abnahme des Mischungsanteils zwischen dem 5. und 7. mm des Schaums festzustellen ist. Diese Abnahme kann auf die negativen Geschwindigkeiten in axialer Richtung im PDMS-Schwamm zurückgeführt werden, die aufgrund der Struktur der Geometrie entstehen und zu Rückströmungen führen. Eine weitere interessante Beobachtung ist der Unterschied von etwa 10% in der Mischeffizienz im ersten Millimeter für die verschiedenen Volumenströme. Dieser Unterschied kann auf die längere Verweilzeit der Flüssigkeiten bei niedrigeren Re-Zahlen zurückgeführt werden und ist am deutlichsten am Eingang des PDMS-Schwamms, wo die Flüssigkeit den Kanal mit kleineren Abmessungen verlässt.

IV. CONCLUSION

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine neuartige passive Mischungsmethode, die auf der Integration eines porösen Mediums in einem Mikrofluidikgerät basiert. Nach bestem Wissen der Autoren handelt es sich bei dieser Arbeit um den ersten Einsatz eines porösen Mediums zur Mischung

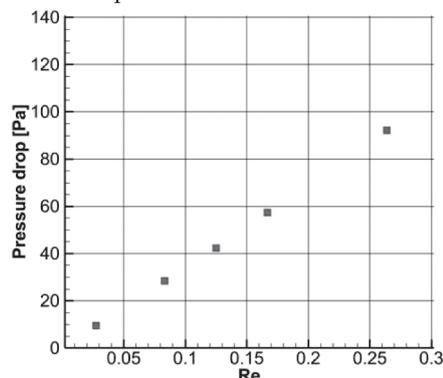


Fig. 8. Abbildung 8. Druckabfälle der Geometrie 1 aus Tabelle 1 als Funktion der Re-Zahl.

in einem Mikrofluidikgerät. Sowohl experimentelle als auch numerische Analysen ergaben, dass die Effizienz der Mischung abnimmt, wenn die Volumenströme der beiden Flüssigkeiten zunehmen. Der größte getestete Schwamm (4 mm x 4 mm) erreichte eine maximale Mischeffizienz von 98%, was darauf hindeutet, dass noch größere Effizienzen mit größeren Geometrien möglich sein könnten. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass die Effizienz der Mischung entlang der Länge des Schaums mit zunehmenden Volumenströmen abnahm. Dies könnte auf den steigenden Rückfluss innerhalb der Geometrie zurückzuführen sein, obwohl weitere Untersuchungen erforderlich sind, um dies zu bestätigen. Trotz der komplexen Struktur des Polydimethylsiloxans (PDMS)-Schwamms, wie in früheren Studien berichtet [15], zeigte die numerische Analyse eine lineare Beziehung zwischen dem Druckabfall über die Geometrie und der Reynolds-Zahl, was mit der vorhandenen Literatur übereinstimmt.

Eines der beabsichtigten Anwendungsgebiete unseres Geräts ist die Reinigung und Trennung von biologischen Proben mit komplexen Flüssigkeitsgemischen (z.B. Magensaft usw.). Tatsächlich planen wir den Einsatz des Mischers als DNA-Extraktor aus dem Pansen von lebenden Schafen in einem Projekt zur Optimierung des Mikrobioms von Wiederkäuern zur Reduzierung von Methanemissionen.

V. REFERENCES

- [1] N. Nguyen and S. Wereley, Fundamentals and Applications of Microfluidics; Artech House Publishing: Norwood, MA, USA, (2007), 3rd ed. Harlow, England: Addison-Wesley,
- [2] E. Grigorov, B. Kirov, M. Marinov and V. Galabov Review of Microfluidic Methods for Cellular Lysis, vol. 12, Micromachines
- [3] 2021, 498
- [4] Y. Xu, Z. Zhang, Z. Zhou, X. Han and X. Liu, Continuous Microfluidic Purification of DNA Using Magnetophoresis, vol. 11, Micromachines 2020, 187
- [5] B.K. Madhusudan, G. Sanket, Advances in continuous-flow based microfluidic PCR devices—a review, vol. 2, Eng. Res. Express 2020, 042001
- [6] N. Shembekar, C. Chaipan, R. Utharala and C. A. Merten

- [7] Droplet-based microfluidics in drug discovery, transcriptomics and high-throughput molecular genetics, vol. 16, *Lab Chip* 2016, 1314-1331
- [8] T. Thorsen, R. W. Roberts, F. H. Arnold and S. R. Quake Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device, vol. 86, *Phys. Rev. Lett.* 2001, 4163—4166
- [9] W. Zeng and H. Fu Precise droplet formation in a T-junction micro-droplet generator, vol. 86, *IEEE 8th International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)* 2019, 1190-1196
- [10] S. L. Anna, N. Bontoux and H. A. Stone Formation of dispersions using “flow focusing” in microchannels, vol. 82, *Appl. Phys. Lett.* 2003, 364—366
- [11] L. Yobas ,S. Martens, W. L. Ong and N. Ranganathan High-performance flow-focusing geometry for spontaneous generation of monodispersed droplets, vol. 6, *Lab Chip* 2006, 1073 —1079
- [12] C. Cramer, P. Fischer and E. J. Windhab Drop formation in a co-flowing ambient fluid, vol. 59, *Chem. Eng. Sci.* 2004, 3045—3058
- [13] W. Lan, S. Li, Y. Wang and G. Luo CFD Simulation of Droplet Formation in Microchannels by a Modified Level Set Method, vol. 53, *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 4913
- [14] Y. Li, M. Jain, Y. Ma and Nandakumar Control of the breakup process of viscous droplets by an external electric field inside a microfluidic device., vol. 11, *Soft Matter* 2015, 3884
- [15] A. Gupta, H. S. Matharoo, D. Makkar and R. Kumar Geometry Effects of Axisymmetric Flow-Focusing Microchannels for Single Cell Encapsulation, vol. 100, *Comput. Fluids* 2018, 218
- [16] C. Yao, Y. Liu, C. Xu, S. Zhao and G. Chen, Formation of Liquid-Liquid Slug Flow in a Microfluidic T-junction: Effects of
- [17] Fluid Properties and Leakage Flow, vol. 64, *AIChE J.* 2018, 346
- [18] K. Ghaib The Volume of Fluid Method, a Method for the Simulation of Two-Phase Flow , *Chemie Ingenieur Technik* 2018, 316323
- [19] L. Wu, M. Tsutahara, L. S. Kim and M. Ha, Three-dimensional lattice Boltzmann simulations of droplet formation in a crossjunction microchannel, vol. 34, *Int. J. Multiphase Flow* 2008, 852
- [20] P.A. Romero and A.R. Abate Flow focusing geometry generates droplets through a plug and squeeze mechanism, vol. 12, *Lab Chip* 2012, 5130-5132
- [21] X. Chen, T. Glawdel and N. Cui Advances in Droplet-Based Microfluidic Technology and Its Applications, vol. 18, *Microfluid*
- [22] *Nanofluid* 2015, 1341–1353