

Versuch Verweilzeit

Zielstellung:

Untersuchung der Verweilzeitcharakteristik mikrofluidischer Bauteile.

Grundlagen:

In mikrofluidischen Bauteilen mit geringem Kanaldurchmesser ist die laminare Strömung das vorherrschende Flussregime. Turbulente Strömungen können nur unter extremen Bedingungen erzeugt werden. Das vorherrschende parabolide Strömungsprofil führt dabei zu einer ausgeprägten Dispersion (Abb 1).

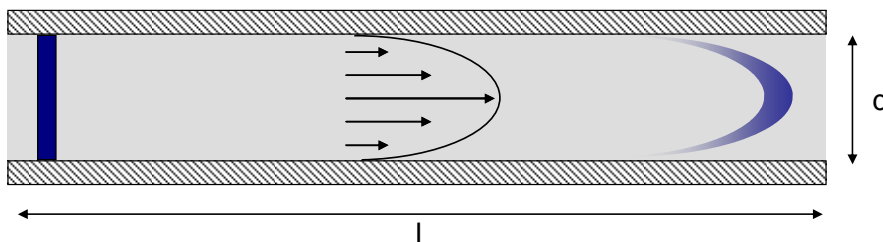


Abb.1: Geschwindigkeitsprofil und Dispersion in einem Mikrokanal

Z.B. ist im Falle von parallelen Mikrokanälen die auftretende Dispersion geringer als in einem Kanal mit gleichem Querschnitt (Abb. 2).

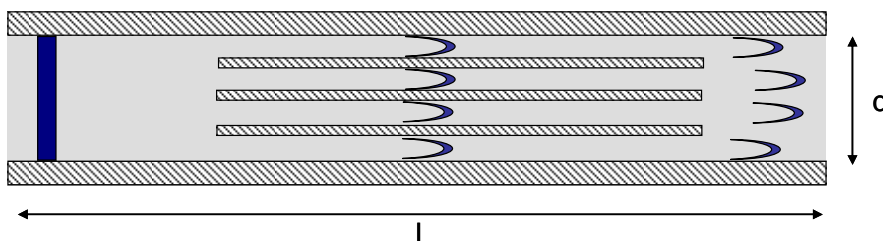


Abb. 2: Geschwindigkeitsprofil und Dispersion in parallelen Kanälen

Komplexe Strömungsvorgänge innerhalb eines Mikromischers haben einen starken Einfluss auf die Dispersion und hängen sowohl von der Geometrie des Mixers als auch von Flussrate und Viskosität der Lösungen ab. Die unterschiedlichen Geometrien von Mikromischern führen zu unterschiedlich wirkenden Mechanismen zur Restrukturierung von Fluidlamellen innerhalb des Bauteils und haben somit starken Einfluss auf die Dispersion. Dies führt zu unterschiedlichen Aufenthaltsdauern einzelner Volumenelemente innerhalb des

Mikromischers. Je nach Geometrie kann es hierbei auch zu Zonen stagnierender Fluide kommen. Durch Untersuchung der Verweilzeitverteilung kann die Häufigkeit der Aufenthaltsdauer einzelner Volumenelementen bestimmt werden.

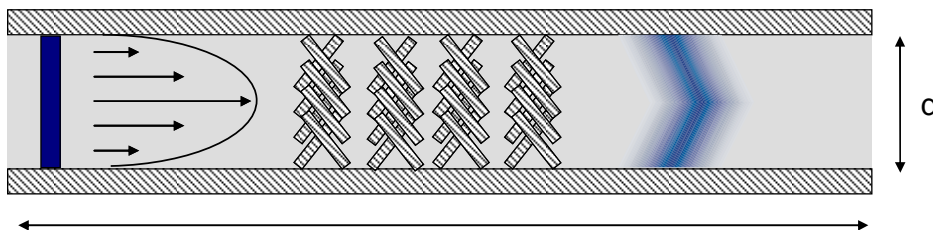


Abb. 3: Dispersion in einem Mikromischer

Zur Untersuchung der Verweilzeiteigenschaften von Mikroreaktoren und Kapillaren wird die Methode der Pulsmarkierung eingesetzt. Hierbei wird ein Markierpuls (Farbstoff) im Zuführungskanal erzeugt und dessen Form vor und hinter dem mikrofluidischen Bauteil detektiert (Abb. 4). Die Änderung der Pulsform wird durch die spezifische Dispersion innerhalb des untersuchten Bauteils bewirkt. Die resultierende Verweilzeitverteilung (RTD) gibt an wie lange sich eine Volumenfraktion innerhalb des Bauteils aufgehalten hat.

Die Änderung der Verweilzeitverteilungen ist auf den mit der Flussrate variierenden Einfluss folgender Effekte zurückzuführen:

- Dispersion durch das radiale Geschwindigkeitsprofil
- Restrukturierung des Fluids durch Mischoperationen innerhalb eines Mischers
- Molekulare Diffusion
- Auftreten von Sekundär Flow Effekten wie z.B. statische Wirbel
- Turbulente Vermischung bei hohen Re-Zahlen bzw. hohem Druckverlust.

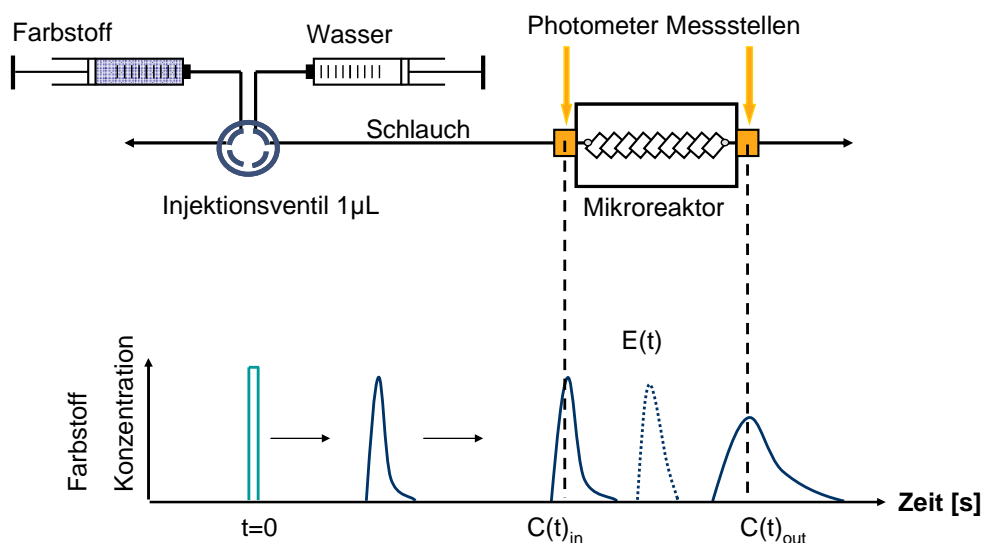


Abb. 5: Pulsverlauf in einem mikrofluidischen System

$$C_{out}(t) = C_{in}(t) * E(t) = \int_0^t C_{in}(t') \cdot E(t-t') \cdot dt' \quad \text{Gl. 1}$$

$$\varepsilon = \sum [C_{out}(t) - C_{in}(t) * E(t)]^2 \cdot \Delta t^2 \Rightarrow \min \quad \text{Gl. 2}$$

$$C_{out}^{calc}(t) = C_{in}(t) * E(t)$$

Zur Ermittlung der Verweilzeitverteilung wird eine Pulsmarkierungsmessung durchgeführt und ein Verweilzeit Modell an die Messdaten angepasst. Hierzu werden die Modellparameter so lange optimiert, bis eine bestmögliche Übereinstimmung des gemessenen Response-Signals mit dem berechneten Response Signal erzielt wird (Gl. 2). Die aus dem Modell resultierende Verweilzeitverteilung $E(T)$ werden für unterschiedliche Flussraten bestimmt.

Die mittlere Verweilzeit wird mit Hilfe von Gl. 2 bestimmt. Um die Verweilzeitverteilungen $E(t)$ für unterschiedlicher Flussraten vergleichen zu können wird mit Hilfe von Gl. 4 und Gl. 5 die dimensionslose Verweilzeit θ berechnet.

$$\tau = \int E(t) \cdot t \cdot dt \quad \text{Gl. 3}$$

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad \text{Gl. 4}$$

$$E(\theta) = E(t) \cdot \tau \quad \text{Gl. 5}$$

Ein Modell zur Beschreibung der Verweilzeitverteilung ist das Dispersionsmodell nach Gl. 6. Die axiale Peclet-Zahl Pe_{ax} beschreibt hierbei die Dispersion in axialer Richtung nach Gl. 7. Der axiale Dispersionskoeffizient D_{ax} ist dabei vom molekularen Diffusionskoeffizient D_M , einem Geometriefaktor χ , der mittleren Strömungsgeschwindigkeit \bar{w} und dem Rohrradius d_R abhängig.

$$E(t) = \sqrt{\frac{Pe_{ax} \cdot \tau}{4 \cdot \pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\frac{Pe \cdot \tau}{4t} \cdot \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2} \quad [s^{-1}] \quad \text{Gl. 6}$$

$$Pe_{ax} = \frac{\bar{w} \cdot d_R}{D_{Ax}} \quad [-] \quad \text{Gl. 7}$$

$$D_{ax} = D_M \chi \frac{\bar{w}^2 \cdot d_t^2}{D_m} \quad \left[\frac{m^2}{s} \right] \quad \text{Gl. 8}$$

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu} \quad [-] \quad \text{Gl. 9}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_M} \quad [-] \quad \text{Gl. 10}$$

Zur Beschreibung der Verweilzeitverteilung $E(t)$ können ebenfalls empirische Modelle wie z.B. Gl. 9 eingesetzt werden. Die resultierenden Verweilzeitverteilungsfunktionen von Mikroreaktoren können hiermit häufig exakter beschreiben werden.

$$E(t) = A \cdot e^{-e^{-W_1(t-T)} - W_2(t-T)} \quad \text{Gl. 11}$$

Als Maß für die Streuung der Verweilzeitverteilung um die mittlere Verweilzeit τ wird die Varianz $\sigma(t)^2$ Gl. 12 sowie $\sigma(\theta)^2$ Gl. 13 verwendet.

$$\sigma(t)^2 = \int (t - \tau)^2 \cdot E(t) \cdot dt \quad [-] \quad \text{Gl. 12}$$

$$\sigma(\theta)^2 = \frac{\sigma(t)^2}{\tau^2} = \int (\theta - 1)^2 \cdot E(\theta) \cdot d\theta \quad \text{Gl. 13}$$

Versuchsaufbau:

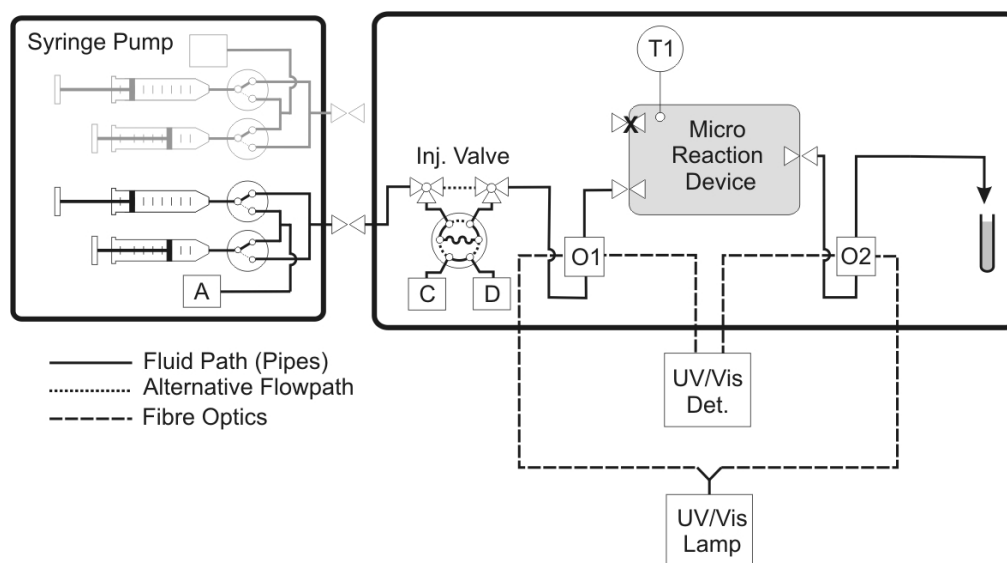


Abb. 1.: Schema Versuchsaufbau

Aufgabenstellung:

- 1) Messen Sie die Verweilzeitverteilung für die Mischer M1 – M6 für die Flussraten: 50, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000 $\mu\text{L}/\text{min}$.
- 2) Entscheiden Sie welches Modell zur Beschreibung der Verweilzeitverteilung am besten geeignet erscheint und berechnen Sie damit $E(\theta)$
- 3) Stellen Sie die Verweilzeitverteilungen $E(\theta)$ als Diagramme dar
- 4) Diskutieren Sie die Ergebnisse

Versuchsdurchführung

Nach Einweisung durch den Versuchsbetreuer ist zur Durchführung des Versuches die Steuerungssoftware konfiguriert werden. Zur Auswertung wird eine am Versuchsort vorhandene Software eingesetzt.

Literatur:

Baerns, A. Behr, A. Brehm, J. Gmehlin, H. Hofmann, U. Onken, A. Renken, „Technische Chemie“, Wiley-VCH, 2006, Seite 167ff.