

# Fortschritt-Berichte VDI

**Reihe 1**

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Jörg Ulrich, Estella (Navarra)

**Nr. 317**

**Ein Modell zur Simulation  
von Mikropumpen  
auf Basis der Finite-  
Elemente-Methode**

*HLuHB Darmstadt*



**14648232**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Mikrofluidsysteme - Produkte für die Zukunft? . . . . .	1
1.2	Fertigungstechnologie von Mikropumpen . . . . .	3
1.3	Simulation - Reduktion des Entwicklungsaufwandes . . . . .	4
<b>2.</b>	<b>Aufbau und Funktion von Mikropumpen</b>	<b>6</b>
2.1	Grundprinzip von Mikropumpen . . . . .	6
2.2	Antriebstypen für Mikromembranpumpen . . . . .	7
	2.2.1 Piezoelektrischer Antrieb . . . . .	8
	2.2.2 Thermopneumatischer Antrieb. . . . .	9
	2.2.3 Thermopneumatischer Antrieb mit Phasenwandlung. . . . .	9
	2.2.4 Elektrostatischer Antrieb . . . . .	10
2.3	Ventile und Strömungsregulierer . . . . .	11
	2.3.1 Passive Rückschlagventile . . . . .	11
	2.3.2 Aktive Mikroventile . . . . .	12
	2.3.3 Strömungsregulierer ohne bewegliche Komponenten . . . . .	13
2.4	Grundlage der Simulation von Mikropumpen . . . . .	14
	2.4.1 Stand der Technik . . . . .	14
	2.4.2 Ein Prinzip für ein vollständiges Simulationsmodell . . . . .	16
	2.4.3 Auswahl der Simulationswerkzeuge . . . . .	18
<b>3.</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>20</b>
3.1	Grundlagen der Strömungsmechanik . . . . .	20
	3.1.1 Allgemeine Strömungsbeschreibung . . . . .	20
	3.1.2 Durchströmung von Leitungen - Die Bernoulli-Gleichung . . . . .	22
	3.1.3 Gültigkeitsbereich der makroskopischen Strömungstheorie . . . . .	23
3.2	Grundlagen der Elastomechanik . . . . .	25
	3.2.1 Membrantheorie . . . . .	25

3.2.2	Balkentheorie	26
3.3	Grundlagen der Finite-Elemente-Methode	27
3.3.1	Grundprinzip der Finite-Elemente-Methode	28
3.3.2	FEM in der Strukturmechanik und Strömungsmechanik	29
<b>4.</b>	<b>Simulation einer Fluid-Struktur-Kopplung</b>	<b>31</b>
4.1	Einordnung gekoppelter physikalischer Probleme	31
4.2	Fluid-Struktur-Kopplung - Stand der Technik	33
4.3	Implementierung einer Fluid-Struktur-Kopplung in das FEM-Programm ANSYS	34
4.3.1	Simulationsprinzip einer Fluid-Struktur-Kopplung	34
4.3.2	Die Netzgenerierung	37
4.3.3	Das Iterationsverfahren	39
4.4	Simulation einer Balkenschwingung im Fluid	40
4.5	Verifizierung des Simulationsmodells	43
4.5.1	Simulation eines Einmassenschwingers im Fluid	43
4.5.2	Simulation eines Makromodells einer Ventilklappe	46
4.5.3	Simulation einer Mikroklappe	47
<b>5.</b>	<b>Simulation von Mikroventilen</b>	<b>50</b>
5.1	Aufbau von Klappenventilen	50
5.2	Statisches Ventilverhalten	52
5.2.1	Simulation eines 2D-Ventils	52
5.2.2	Simulation eines 3D-Ventils	55
5.2.3	Analytische Beschreibung des statischen Ventilverhaltens	55
5.3	Dynamisches Ventilverhalten	61
5.3.1	Simulation des dynamischen Ventilverhaltens	61
5.3.2	Analytisches Modell für das dynamische Ventilverhalten	66
<b>6.</b>	<b>Simulation einer elektrostatischen Mikropumpe</b>	<b>70</b>
6.1	Aufbau und Funktionsprinzip der elektrostatischen Mikropumpe	70
6.2	Der elektrostatische Antrieb	72
6.2.1	Analytischer Lösungsansatz für den elektrostatischen Antrieb	72
6.2.2	FEM-Simulation des Antriebs	74
6.2.3	Statische Antriebskennlinien	79
6.3	FEM-Simulation eines 2D-Modells der kompletten Mikropumpe	81
6.4	Analytische Simulation einer elektrostatischen Mikropumpe	83

---

6.4.1	Das analytische Simulationsmodell	83
6.4.2	Simulation des frequenzabhängigen Verhaltens der Pumpe	85
<b>7.</b>	<b>Simulation einer ventillosen Mikropumpe</b>	<b>87</b>
7.1	Aufbau und Funktionsweise	87
7.1.1	Aufbau der ventillosen Mikropumpe	88
7.1.2	Funktionsprinzip	89
7.2	FEM-Simulation	90
7.2.1	FEM-Modell der ventillosen Mikropumpe	91
7.2.2	Simulation des dynamischen Pumpenverhaltens	93
7.2.3	Simulation der Antriebskennlinien	95
7.2.4	Simulation der Ventilkennlinien	97
7.3	Analytische Simulation einer ventillosen Mikropumpe	98
7.3.1	Das analytische Simulationsmodell	99
7.3.2	Simulation des frequenzabhängigen Verhaltens der Pumpe	101
<b>Anhang A:</b>	<b>Analytische Beschreibung der Druckverteilung im Klappenventil</b>	<b>103</b>
<b>Anhang B:</b>	<b>Analytische Lösungsansätze für die elektrostatische Membranauslenkung</b>	<b>106</b>
<b>Anhang C:</b>	<b>Analytisches Gesamtmodell der elektrostatischen Mikropumpe</b>	<b>108</b>
<b>Anhang D:</b>	<b>Numerische Lösung linearer Differentialgleichungssysteme</b>	<b>112</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>114</b>