

Dipl.-Ing. Knut Büttner, München

**Ein Beitrag zur Simulation  
des dynamischen Verhaltens  
mikromechanischer  
kinetischer Elemente  
mit parallelen Platten  
unter besonderer Berück-  
sichtigung der Dämpfung**

Reihe **20**: Rechnerunterstützte  
Verfahren

Nr. **218**

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen.....	IX
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Mikromechanik und Mikrosystemtechnik .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Mikromechanische kinetische Elemente.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Aufgabenstellung und Gliederung.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Analytische Lösungsmöglichkeiten linearer Schwingungsdifferentialgleichungen.....</b>	<b>9</b>
<b>2.1. Lineare Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.1. Duhamel-Integral .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2. FOURIER-, HARTLEY- und LAPLACE-Transformation .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2. Analytische Näherungsverfahren für nichtlineare Schwingungsdifferentialgleichungen .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1. Störungsrechnung.....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.2. Methode von BOGOLJUBOW und MITROPOLSKIJ.....</b>	<b>17</b>
<b>3. Numerische Verfahren zur Lösung von Anfangswertaufgaben .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Anwendungsgebiete der numerischen Verfahren .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. Allgemeines zu numerischen Verfahren .....</b>	<b>19</b>
<b>3.3. Rundungsfehler .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Steife Differentialgleichungssysteme.....</b>	<b>24</b>
<b>3.5. Einschrittverfahren.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5.1. Explizites RUNGE-KUTTA-Verfahren für Differentialgleichungssysteme erster Ordnung .....</b>	<b>26</b>
<b>3.5.2. Einbettungs-Verfahren für Differentialgleichungssysteme erster Ordnung.....</b>	<b>28</b>

<b>3.5.3.</b> RUNGE-KUTTA-Tripel für Differentialgleichungssysteme erster Ordnung.....	29
<b>3.5.4.</b> Implizites RUNGE-KUTTA-Verfahren für Differentialgleichungssysteme erster Ordnung.....	31
<b>3.5.5.</b> Fehlerabschätzung und Schrittweitenbestimmung .....	32
<b>3.6.</b> Lineare Mehrschrittverfahren .....	33
<b>3.6.1.</b> Ein implizites, steif-stabiles BDF-Verfahren .....	35
<b>3.6.2.</b> NEWTON-Iteration für die Lösung impliziter Mehrschrittverfahren .....	40
<b>3.6.3.</b> Erweiterte lineare Mehrschrittverfahren mit zweiter Ableitung .....	41
<b>3.7.</b> Stabilität numerischer Verfahren.....	42
<b>3.8.</b> Vergleich der numerischen Verfahren zur Lösung von Anfangswertproblemen bei Differentialgleichungssystemen .....	47
<b>4.</b> Überblick über Dämpfungsarten mechanischer Schwingsysteme .....	52
<b>4.1.</b> Strukturdämpfung.....	52
<b>4.1.1.</b> Dämpfung durch Reibung.....	52
<b>4.1.2.</b> Dämpfung durch Fluidkompression in schmalen Spalten .....	54
<b>4.1.3.</b> Schalldämpfung .....	55
<b>4.2.</b> Werkstoffdämpfung .....	55
<b>5.</b> Beschreibung des Einflusses der Fluidströmung auf die Plattenbewegung bei kinetischen mikromechanischen Elementen .....	60
<b>5.1.</b> Überblick über die Berechnung der Dämpfung bei kinetischen mikromechanischen Elementen.....	60
<b>5.2.</b> Die zwei Grundgleichungen der Hydrodynamik für die Strömung eines zähen, reibungsbehafteten Fluids .....	63
<b>5.2.1.</b> Festlegung des Koordinatensystems.....	67
<b>5.2.2.</b> Gleichmäßige Bewegung der oberen Platte .....	68
<b>5.2.3.</b> Harmonische Bewegung der Platte.....	71

<b>5.2.4.</b> Beliebige Bewegungsform der Platte .....	72
<b>5.3.</b> Betrachtungen zur Viskosität bei quadratischer Geschwindigkeitsverteilung (POISEUILLE-Strömung) .....	75
<b>6.</b> Formulierung des Berechnungsmodells .....	82
<b>6.1.</b> Das mikromechanische kinetische Element als Einfreiheitsgradsystem .....	82
<b>6.2.</b> Das elektrostatische Feld zwischen den Platten .....	83
<b>6.3.</b> Die Kopplung des mechanischen, elektrostatischen und hydrodynamischen Feldes.....	86
<b>6.3.1.</b> Statisches Kräftegleichgewicht .....	87
<b>6.3.2.</b> Lineares Simulationsmodell.....	89
<b>6.3.3.</b> Erweitertes, nichtlineares Simulationsmodell.....	89
<b>6.4.</b> Berechnungsmodell für die Ausführung des mikromechanischen Elements als Differentialkondensator.....	91
<b>6.4.1.</b> Lineares Simulationsmodell.....	92
<b>6.4.2.</b> Nichtlineares Simulationsmodell.....	92
<b>7.</b> Messungen an mikromechanischen kinetischen Elementen .....	95
<b>7.1.</b> Bestimmung wichtiger Eigenschaften der mikromechanischen Elemente .....	95
<b>7.2.</b> Simulationsprogramm .....	100
<b>7.3.</b> Vergleich zwischen Meß- und Simulationsergebnissen.....	101
<b>7.4.</b> Vergleich zwischen linearem und nichtlinearem Simulationsmodell..	108
<b>7.5.</b> Schlußfolgerungen für die Simulation und den Entwurf kapazitiver mikromechanischer kinetischer Elemente.....	112
<b>8.</b> Einfluß der elektrischen Beschaltung auf das dynamische Verhalten der Elemente .....	115
<b>8.1.</b> Berechnung der elektrostatischen Dämpfung.....	115
<b>8.2.</b> Messung der elektrostatischen Dämpfung und Meßwertverarbeitung.....	119

<b>9. Zusammenfassung .....</b>	<b>123</b>
<b>10. Anlagen.....</b>	<b>126</b>
<b>11. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>149</b>