

Mikromorphe Erweiterung verschiedener Kontinuumsatheorien - Grundlagen, Vergleich und Anwendung auf schaumartige Strukturen mit Hilfe finiter Elemente



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität · gegründet 1825

Lutz Herdtweck



Motivation

Luftgefüllte Schäume sind als heterogene Materialien einzustufen, deren Komponenten sich durch stark unterschiedliche Eigenschaften auszeichnen. Sie besitzen eine innere Struktur, welche aus keramischem, polymerischem oder metallischem Material bestehen kann. Die Mikrostruktur ist komplex und damit schwer exakt rechnerisch idealisierbar. Deshalb werden in der Arbeit Kontinuumsmodelle auf ihre Eignung untersucht, um das mechanische Verhalten von Schäumen gemittelt zu beschreiben. Hierbei erscheint eine Erweiterung der Cosserat-Theorie vielversprechend, da nicht nur phänomenologische Materialgesetze, sondern höhere kinematische Ansätze zur Beschreibung der Vorgänge auf Mikroebene verwendet werden.

Zusätzlich zum Verschiebungs- und Rotationsfeld wird ein Mikrodilatationsfeld $\bar{\alpha}_p$ eingeführt. Dieses Mikrodilatationsfeld kann volumetrische Änderungen auf Mikroebene abbilden. Ziel ist die kinematisch-phänomenologische Beschreibung metallischer Schäume.

Konstitution

Die drei Anteile der inneren Formänderungsenergiedichte werden durch die makroskopische Verzerrungsenergie

$$W_{mp}(\bar{\mathbf{U}}) = \mu \|\text{sym} \bar{\mathbf{U}} - \mathbb{1}\|^2 + \mu_c \|\text{skew} \bar{\mathbf{U}} - \mathbb{1}\|^2 + \frac{\lambda}{4} ([\det \bar{\mathbf{U}} - 1]^2 + [\frac{1}{\det \bar{\mathbf{U}}} - 1]^2),$$

die mikroskopische Verzerrungsenergie des Schaumes

$$W_{foam}(E) = \frac{\lambda^m}{4} ([e^{-\frac{\bar{\alpha}_p}{3}} - 1]^2 + [\frac{1}{e^{-\frac{\bar{\alpha}_p}{3}}} - 1]^2)$$

und die mikroskopische Krümmungsenergie

$$W_{curv}(\mathfrak{C}, \mathbf{d}) = \frac{\mu}{q} (C_1 + L_c^2 \|\mathfrak{C}\|^2)^{\frac{q}{2}} + \frac{C_2}{2} \|\mathbf{d}\|^2$$

angesetzt.

Im Verzerrungsmaß $\bar{\mathbf{U}} := e^{-\frac{\bar{\alpha}_p}{3}} \bar{\mathbf{R}}^T \mathbf{F}$ ist die Kopplung zwischen Makroverzerrung, Mikrorotationsfeld $\bar{\mathbf{R}}$ und Mikrodilatationsfeld $\bar{\alpha}_p$ zu erkennen. Diese drei Felder beeinflussen sich gegenseitig.

Numerische Tests

Das Modell wird innerhalb der Finiten Element Methode eingebunden, zu dessen Lösung ein Newton-Raphson Algorithmus Verwendung findet. Bei verschiedenen numerischen Tests zeigt sich, dass die Einführung der weiteren Freiheitsgrade Einfluss auf die Querkontraktion hat. Die Mikrodilatation ist wie erwartet Richtungsunabhängig. In Abbildung 1 ist der Einfluss des Materialparameters λ^m zu sehen. Dieser korrespondiert qualitativ mit dem Wert eines Porenvolumens und ist damit in direktem Bezug zur Steifigkeit des Materials.

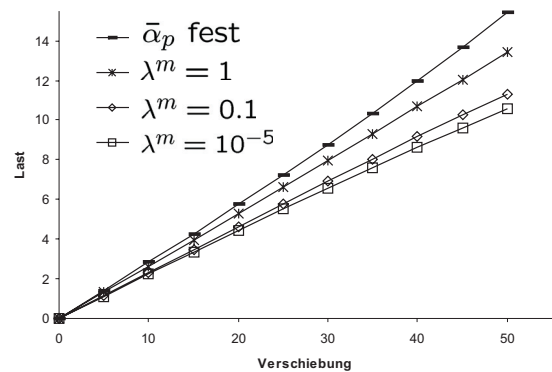


Abb. 1: Last-Verformungsdiagramm eines Schertests. Die gewählten Materialparameter sind $E=100$, $\nu = 0.3$, $\mu_c = \mu$, $l_c = 0$, $C_2 = 0$.

Je größer das Porenvolumen des Schaumes ist, desto weicher verhält sich das Material.

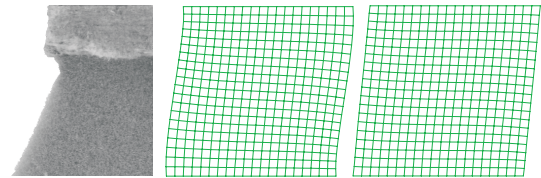


Abb. 2: Detail eines experimentellen Schertests im Vergleich zu numerischen Ergebnissen

Abbildung 2 (links) zeigt das Detail eines experimentellen Schertests. Man stellt fest, dass sich der Schaum im Randbereich lokal stark deformiert. In der numerischen Simulation zeigt das erweiterte COSSEAT-Modell ein ähnliches Verhalten (Abb. 2 Mitte). Klassisches NEO-HOOKE-Material, zeigt dies im Vergleich nicht (Abb. 2 rechts).

Weitere numerische Tests ergeben, dass das COSSEAT-Modell energetisch günstigere Lösungen anbietet. Es treten nicht-klassische Deformationsmoden dann auf, wenn eine kleine interne Länge L_c gewählt wird.