



Doctoral Thesis

## **Mechanics Of Architected Microlattices Across Time And Length Scales**

**Author(s):**

Krödel, Sebastian

**Publication Date:**

2017

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000213856> →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 24538

**MECHANICS OF ARCHITECTED  
MICROLATTICES  
ACROSS TIME AND LENGTH SCALES**

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SEBASTIAN KRÖDEL

Master of Science, ETH Zurich

born on 15.10.1987

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Chiara Daraio

Prof. Dr. Andrei Constantinescu

2017

## ABSTRACT

The mechanical properties of a material are governed by its atomic- and microstructure: The arrangement of atoms in a perfect crystal defines the macroscopic stiffness and the grain size in a metal determines the fracture resistance. Rapid developments in microfabrication allow to fabricate artificial microstructures at unprecedented sub-micrometer resolution. A key technology to architect fully 3D microstructures is direct laser writing using two-photon polymerisation. This breakthrough in fabrication led to the emergence of microlattice materials, which are composed of periodically arranged microscale truss elements. By adjusting the geometry and topology of the unit cell, it is possible to realise microlattices with effective mechanical properties that exceed the performance of any available engineering material. These properties include extreme strength and stiffness, lightweight or negative Poisson's ratio.

Until now, most of the work on microlattices was focused on understanding the mechanical response of single material microlattices at quasi-static timescales. However, many of the suggested applications for microlattices, such as energy absorption or wave control, require knowledge

of their dynamic response. Moreover, the ability to create microlattices from nanocomposites is a promising approach: Mechanically reinforced polymers would allow to overcome current fabrication and application limitations that stem from failure of the weak base polymer. In addition, nanocomposites microlattices can be designed to express additional functionality such as electrical conductivity based on the filler properties.

This work extends the current knowledge on microlattices to the mechanical behavior of composite microlattices and dynamic timescales. The first part of this thesis describes how the mechanical properties of microlattices are impacted by reinforcing the base polymer with carbon nanotubes. In the studied composite microlattices, the confinement of carbon nanotubes along the truss axis, which is driven by physical mechanisms during fabrication, yields a tremendous increase in mechanical stability and static mechanical properties. We observe a size effect for decreasing truss thickness when the carbon nanotubes size scales become comparable to the truss size.

To answer fundamental questions about the time-dependent properties we study the mechanics of single material microlattices at low frequencies. We characterise the dynamic stress relaxation in polymeric microlattices with varying density and topology. Stress relaxation is the footprint of viscoelasticity and therefore crucial for potential applications that rely on viscous absorption and dissipation of mechanical vibration energy. In our study, we show that the damping loss factor of microlattices can be controlled over a wide range and independently from the

static properties. Furthermore, the microlattices are shown to outperform the dissipation of a bulk polymer.

Then we turn to high frequencies and describe the interaction of megahertz ultrasonic waves with fluid saturated polymeric microlattices. It is shown that in the long-wavelength limit, wave propagation in microlattices can be described by Biot's theory of porous media. However, at short wavelengths microlattices constitute a strongly scattering media with frequency dependent group velocity and high signal attenuation. Finally, we show that truss resonances can be exploited to filter ultrasonic waves in frequency ranges that are central to high resolution biomedical imaging applications. The frequency position of the obtained filtering properties can be deliberately controlled by tailoring the truss geometry. The designed microlattices show a high transmission of ultrasound over a large frequency range, while still effectively attenuating the signal when resonance occurs.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die mechanischen Eigenschaften eines Materials sind durch dessen Mikrostruktur bestimmt: Die Anordnung von Atomen in einem perfekten Kristallgitter definiert die makroskopische Steifigkeit und die Korngröße in Metallen bestimmt den Bruchwiderstand. Die rasanten Entwicklungen der Mikrofabrikation erlauben es, künstliche Mikrostrukturen in sehr hoher Auflösung herzustellen. Um diese vollumfänglich räumlichen Strukturen herzustellen, wurde die Methode des direkten Laserschreibens mittels 2-Photonen Polymerisation entwickelt. Diese Schlüsseltechnologie ermöglichte die Herstellung von Mikroglittern aus periodischen Strukturelementen. Analog zu der kristallinen Anordnung von Atomen kann ein Mikroglitter durch die Eigenschaften der primitiven Einheitszelle beschrieben werden. Durch geometrische und topologische Anpassungen der Einheitszelle, konnten Mikrostrukturen mit sehr effektiven mechanischen Eigenschaften konzipiert werden. Diese mechanischen Eigenschaften umfassen extreme Steifigkeit und Festigkeit, sowie negative Querkontraktion und verschwindend kleine Schermodule.

Die bisherige Forschung an Mikroglittern beschränkte sich auf die

quasi-statischen mechanischen Eigenschaften von homogenen Gittern. Jedoch verlangen wichtige Anwendungen, wie Energieabsorption und die Kontrolle von Wellenausbreitung, Kenntnisse über dynamische Interaktionen. Des Weiteren ist die Verwendung von Nano-Kompositen ein vielversprechender Ansatz: mechanisch verstärkte Polymere könnten Limitationen überkommen, welche aus dem mechanisch schwachen Basispolymer resultieren. Basierend auf den Nanopartikeleigenschaften könnten auch weitere Funktionen wie elektrische Leitfähigkeit integriert werden.

Diese Arbeit untersucht zuerst die Verwendung von Nano-kompositen für Mikrogitter. Darauffolgend werden die dynamischen Eigenschaften von homogenen Mikrogittern analysiert. Die Erarbeitung dieser beiden Themenbereiche stellt einen innovativen Beitrag zur Mikrostrukturforschung dar.

Im ersten Teil dieser Arbeit geht es um mechanische Eigenschaften in Mikrogittern aus Kohlenstoffnanoröhrchen-Kompositen. In den untersuchten Kompositen richten sich die Kohlenstoffnanoröhrchen gemäß den Stabelementen aus, was zu einer signifikanten Verbesserung der mechanischen Stabilität und der statischen mechanischen Eigenschaften führt. Für abnehmende Stabdicken stellen wir einen Grössen-Effekt fest, welche zu einem weiteren Anstieg der erreichten mechanischen Verstärkung führt.

Um grundlegende Fragen über die zeitabhängigen Eigenschaften zu klären, analysieren wir homogene Mikrogitter in tiefen Frequenzbereichen (0.1 Hz - 100 Hz). Wir charakterisieren Gitter mit unterschiedlichen

Dichten und Topologien, indem wir Relaxationsversuche durchführen. Relaxation lässt Rückschlüsse auf die viskoelastischen Eigenschaften zu, welche für Anwendungen wie Energieabsorption oder Vibrationsdämpfung von zentraler Bedeutung sind. In diesem Zusammenhang zeigen wir, dass der dynamische Verlustfaktor unabhängig von der statischen Steifigkeit eingestellt werden kann.

Darauffolgend wenden wir uns der hochfrequenten Interaktion (0.1 MHz - 30 MHz) von Ultraschallwellen mit fluidgesättigten Mikrogittern zu. In der Langwellenapproximation kann Wellenausbreitung in Mikrogittern mit der Biot Theorie beschrieben werden. Für kurze Wellenlängen, und damit hohe Frequenzen, stellen Mikrogitte ein stark Schall-streuendes Material dar, was zu frequenzabhängiger Gruppengeschwindigkeit und starker Signalabschwächung führt. Zuletzt wird gezeigt, dass Stabresonanzen ausgenutzt werden können um Ultraschallwellen gezielt zu filtern. Diese Filtereigenschaften können rein durch die Stabgeometrie eingestellt werden und erreichen Frequenzbereiche die in den bildgebenden Verfahren der Medizin Anwendung finden.