

Mechanische Metamaterialien

Metamaterialien sind Werkstoffkompositionen mit außergewöhnlichen Eigenschaften, wie sie in der Natur üblicherweise nicht vorkommen. Bereits seit längerem im Gespräch sind elektromagnetische Metamaterialien, mit denen z. B. „Tarnkapfen“ demonstriert werden konnten, die einen negativen Brechungsindex haben und Licht bestimmter Wellenlängen um ein zu versteckendes Objekt herum leiten können. In den letzten Jahren wurden jedoch auch vermehrt Anstrengungen unternommen, das Konzept der Metamaterialien auf andere Bereiche auszudehnen. Von besonderem Interesse sind hier die sog. mechanischen Metamaterialien. Diese zeigen unter mechanischer Belastung ein ungewöhnliches, den Erwartungen nicht entsprechendes Verhalten. Beispielsweise erfolgt aufgrund von Druck keine Verkürzung des Bauteils, sondern es dehnt sich aus oder führt eine Drehbewegung aus. Dadurch haben auch mechanische Metamaterialien ein großes Zukunftspotenzial für eine Vielzahl interessanter Anwendungsgebiete.

Die grundlegende Gemeinsamkeit aller Metamaterialien besteht darin, dass ihre Eigenschaften nicht nur durch die enthaltenen Atome und deren natürliche, meist periodische Anordnung innerhalb des Materials bestimmt werden, sondern durch die Anordnung größerer, künstlicher Einzelbausteine. Diese sogenannten funktionalen Elementarzellen lassen sich grundsätzlich aus allen Basismaterialien fertigen (Polymere, Metalle und Keramiken sowie Composite aus diesen), was ihre Eigenschaften zusätzlich beeinflusst. Durch eine komplexe Anordnung der Bausteine kann gezielt die Ausbreitung von Wellen im Material gesteuert werden. Im Fall von mechanischen Metamaterialien geht es dabei um die Ausbreitung elastischer Wellen. Darunter versteht man sich im Werkstoff ausbreitende Deformationen, die etwa durch mechanische Belastungen oder den Aufprall eines Objekts auf ein Bauteil entstehen können. Durch die Manipulation dieser elastischen Wellen können neuartige Mechanismen der Energieausbreitung im Material erzeugt werden. Beispielsweise lassen sich die

Deformationen so in bestimmte Bereiche der Struktur ablenken, um die insgesamt resultierende Schädigung des Bauteils zu minimieren oder um Bereiche hinter dem Bauteil zu schützen. Mögliche Anwendungen sind hier nicht nur Vibrations- und Schalldämpfung, sondern auch neuartige Werkstoffe für den ballistischen Körperschutz und Panzerungen.

Die Entwicklung mechanischer Metamaterialien zielt darüber hinaus darauf ab, Gitterstrukturen mit extrem geringer Dichte aus metallischen oder polymerbasierten Basismaterialien zu erhalten, die ebenfalls als Struktur- oder Panzerungswerkstoffe zur Anwendung kommen könnten. Durch ihre spezielle Struktur lassen sich die mechanischen Eigenschaften sehr präzise an jedem Punkt im Material einstellen, wodurch sich das Verhalten eines Bauteils besser an realistische Anforderungen anpassen lässt. Auch ist es dadurch möglich, Gradienten in den Eigenschaften über ein Bauteil hinweg oder stark richtungsabhängiges Verhalten im Bauteil zu erhalten. Vorbild sind hier natürliche, extrem schadenstolerante Materialien, die ebenfalls starke Gradienten oder eine Richtungsabhängigkeit physikalischer Eigenschaften aufweisen. Andere Entwicklungen in diesem Bereich zielen darauf ab, Materialien wie technische Keramiken zu verbessern. Solche Materialien sind zwar sehr hart, aber auch unnachgiebig, wodurch sie leicht brechen. Um das zu vermeiden, wurden z. B. mechanische Metamaterialien aus keramischem Basismaterial erzeugt, die sich auch nach über 50 % Dehnung wieder in ihre ursprüngliche Gestalt zurückbegeben können, ohne zu zerbrechen.

Eine weitere interessante Forschungsrichtung im Bereich mechanischer Metamaterialien stellen sogenannte Buckling Materials dar. Dabei macht man sich die Beweglichkeit bzw. Instabilität bestimmter Bausteine oder Verbindungen in der Struktur zunutze, um deren Gesamtverhalten zu verbessern. Ein theoretisch denkbare Beispiel dafür wäre eine Stoßstange, die sich bei einem heftigeren Aufprall auf ein Objekt so verformt, dass Objekt und Fahrzeug möglichst wenig Schaden nehmen.

Anschließend würde die Stoßstange wieder in ihre Ausgangsform zurückkehren. Solche Metamaterialien sind nicht nur für Strukturwerkstoffe interessant, sondern auch als neuartige Aktuatoren, z. B. für robotische Systeme.

Mechanische Metamaterialien stellen auch eine Basis für adaptive Materialien dar, die sich in ihren Eigenschaften an wechselnde Belastungen anpassen können. Beispielsweise werden Strukturen entwickelt, die in stützenden Bandagen zum Einsatz kommen sollen. Dort sollen sie in der Lage sein, sich kurzzeitig zu verfestigen und anschließend wieder in ihren weicheren Ausgangszustand zurückzukehren. So könnten ältere oder verletzte Menschen etwa beim Aufstehen oder bei bestimmten Bewegungen unterstützt werden. Grundsätzlich denkbar ist aber auch eine Unterstützung gesunder Menschen bei komplexen oder schwierigen Bewegungsabläufen. Im Gegensatz zu schweren und steifen Exoskeletten würden sie ihren Träger dabei nicht dauerhaft in seiner Bewegung einschränken.

Ob und welche dieser vielfältigen Anwendungsgebiete sich zukünftig werden realisieren lassen, ist derzeit noch nicht abzusehen. Die Technologiereife ist allgemein noch gering, auch wenn einzelne Systeme in ihrer Entwicklung bereits weiter fortgeschritten sind. Grundlegende Probleme bestehen vor allem noch in der großskaligen Fertigung der Materialien. Während theoretisch vielfältigste Möglichkeiten exploriert werden, lassen sich nicht alle tatsächlich in reale Strukturen übersetzen. Zudem müssen noch Aspekte wie die Langzeitstabilität untersucht werden. Dennoch bieten mechanische Metamaterialien das Potenzial, neue Werkstoffe für eine Vielzahl von Anwendungen zu erhalten, die bisher ungeahnte Möglichkeiten zur Verfügung stellen können. Es ist davon auszugehen, dass die bisher vorgestellten, teils noch recht simplen Strukturen erst den Anfang darstellen und einen ersten Hinweis darauf geben, was mit diesen Materialien alles erreicht werden könnte.

Dr. Ramona Langner