

Untersuchung von Eigenschwingung und Leichtbaupotenzial unterschiedlicher Gitterstrukturen am Beispiel von Magnetuntergestellen von Teilchenbeschleunigern

Simone Andresen

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven,
Deutschland

Summary:

Investigating the influence of structural components on the natural vibrations of structures is of great interest in many fields of application including mechanical engineering, aerospace, construction and optics. Shells of marine protozoa show an enormous diversity of regular and irregular honeycomb and lattice structures which often fulfill different functions. The silicate shells of diatoms, for example, are characterized by a high stiffness at low mass and serve already as inspiration for lightweight designs. Furthermore, the irregular diatom structures are expected to have a positive influence on vibration characteristics.

In this study, a magnet underframe structure (girder) of a particle accelerator was replaced by bio-inspired lattice structures in order to achieve a high first natural frequency and stiffness. The parametrically constructed structures were based on algorithms, which generated the bio-inspired structures. Multi-objective optimizations using evolution strategy allowed the discovery of best possible parameter combination to achieve the desired properties. The results indicated a high potential of lattice and honeycomb structures to influence the vibration characteristics. The irregular structures led to significantly higher natural frequencies and stiffness than regular structures. Moreover, structures of equal stiffness and different first natural frequencies were generated, whereby the masses always remained within permitted values. Regarding the girder structure, the bio-inspired structures showed a simultaneous increase of the first natural frequency by a factor of 1.4 and the stiffness of 1.9 compared to the reference structure.

Keywords:

Biomimetic, eigenfrequency, evolution strategy, girder, honeycomb, lattice, multi-objective optimization

1 Einleitung

Die Untersuchung des Einflusses struktureller Komponenten auf die Eigenschwingungen von Strukturen ist für viele Anwendungsbereiche, oft im Zusammenhang mit Leichtbau, von großem Interesse. Mögliche Anwendungsfelder sind u. a. Maschinenbau, Luft- und Raumfahrt, Bauwesen und Optik. In der Natur finden sich verschiedenste reguläre und irreguläre Gitter- und Wabenstrukturen, die häufig unterschiedliche Funktionen erfüllen. Insbesondere die Schalen mariner Einzeller zeigen eine große Vielfalt solcher Geometrien (Round et al. [1]). So sind die Silikatschalen von Kieselalgen (Diatomeen) sehr leicht und permeabel und weisen gleichzeitig eine hohe Festigkeit auf. Ihre Druckresistenz liegt nach Hamm et al. [2] bei bis zu 700 t m^{-2} . Darüber hinaus ist zu erwarten, dass die Strukturen aufgrund ihrer Unregelmäßigkeiten spezielle Schwingungseigenschaften besitzen, u.a. um die Alge vor vibrierenden Mundwerkzeugen ihrer Fressfeinde zu schützen. Die komplexe, unregelmäßige Bauweise der Kieselalgenschalen wird bereits sehr erfolgreich als Basis für die bionische Leichtbauoptimierung technischer Bauteile eingesetzt (Maier et al. [3], Heinrichs et al. [4]). In dieser Studie wurde untersucht, inwiefern eine gezielte Nutzung der biologischen Strukturunregelmäßigkeiten auch die Schwingungseigenschaften positiv beeinflussen kann. Viele bereits durchgeführte Analysen zeigten für Schaum- und Gitterstrukturen eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (vor allem eine Zunahme des Elastizitätsmoduls) mit steigendem Grad an Strukturunregelmäßigkeiten auf (z.B. Zhu et al. [5], Li et al. [6] und Tekoğlu et al. [7]). Jedoch sind die Schwingungseigenschaften von biologisch inspirierten unregelmäßigen Gittern bisher nicht untersucht worden. Betrachtet wurde eine Anwendung der Gitterstrukturen zur Optimierung eines Magnetuntergestells (Trägers) des Teilchenbeschleunigers PETRA III des DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron). In Teilchenbeschleunigern führt eine Anregung der Träger durch äußere Schwingungen zu einer Aufweitung des Teilchenstrahls. Da niedrige Anregungsfrequenzen zu hohen Schwingungsamplituden führen können, ist eine Erhöhung der Struktureigenfrequenzen des Trägers von großem Interesse. Des Weiteren sind eine hohe Steifigkeit und geringe Masse notwendig. Das Ziel dieser Untersuchung bestand darin, den Einfluss von biologisch inspirierten Strukturen auf das Schwingungsverhalten zu analysieren. Durch den Einsatz der Strukturen als Träger von Teilchenbeschleunigern sollten höhere erste Eigenfrequenzen und Steifigkeiten erreicht werden.

2 Methoden

2.1 Referenzstruktur

Die Grundlage für die Berechnung der Referenzstruktur war ein CAD-Modell eines stark belasteten Trägers des Teilchenbeschleunigers PETRA III, das von DESY-MEA zur Verfügung gestellt wurde. Nach Vereinfachung der Struktur und Definition der Randbedingungen ergab sich das in Fig. 1 dargestellte Referenzmodell. Hierbei wurden die drei Auflagerpunkte des länglichen Trägers auf zwei darunterliegenden Füßen als Federn dargestellt. Drei Lenker, welche ein nachträgliches Verschieben der platzierten Struktur ermöglichen, ließen sich als Federn abstrahieren. Auf dem Träger waren drei Magnete befestigt, die als jeweils als Punktmassen aufgeteilt auf vier Zylinder herangezogen wurden. Tab. 1 beinhaltet die Magnetmassen, Federsteifigkeiten und Materialeigenschaften. Die Durchführung einer Gitterstudie zeigte eine hinreichende Vernetzung aus 446.798 Knoten und 255.655 Elementen

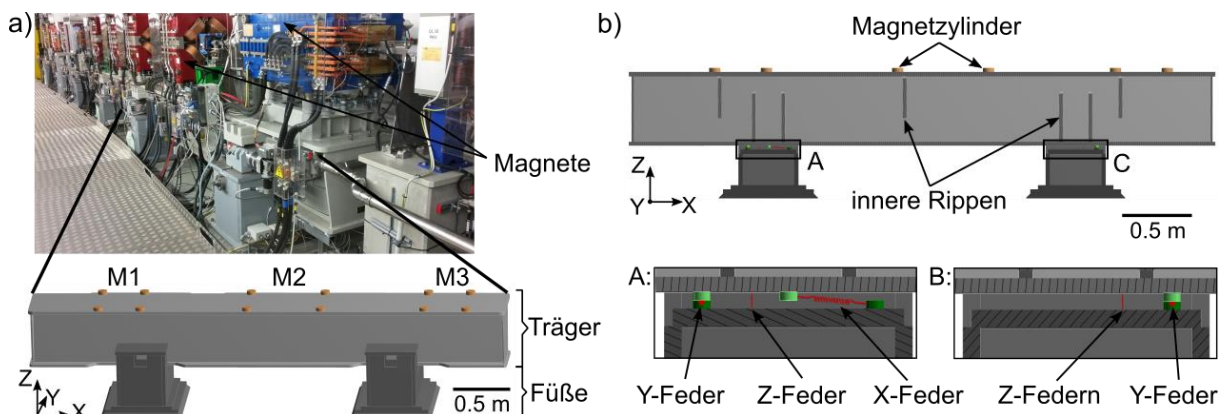


Figure 1: a) Blick in den PETRA III Tunnel mit den Magnetträgerstrukturen, von denen die hier betrachtete Referenzstruktur vereinfacht abgebildet ist. In b) ist der innere Aufbau des Trägers erkennbar sowie vergrößert die Verbindung zu den Füßen über insgesamt sechs Federn.

für die 3D-Struktur auf. Mit Hilfe der Software ANSYS Workbench (Version 18.0, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA) wurde in einer linear-statischen Berechnung die Verformung unter Eigenlast berechnet. Die anschließende Modalanalyse zeigte die Eigenfrequenzen und Eigenformen auf.

Table 1: Definierte Magnetmassen, Federsteifigkeiten und Materialeigenschaften

Magnetmassen	Federsteifigkeiten	Materialeigenschaften
M1: 1150 kg	X-Feder: $7,1 \cdot 10^8 \text{ N m}^{-1}$	Elastizitätsmodul: $2,1 \cdot 10^{11} \text{ N m}^{-2}$
M2: 1800 kg	Y-Feder: $7,1 \cdot 10^8 \text{ N m}^{-1}$	Dichte: 7850 kg m^{-3}
M3: 1150 kg	Z-Feder: $4,8 \cdot 10^9 \text{ N m}^{-1}$	Querkontraktion: 0,3

2.2 Gitterstrukturen

Vier verschiedene Gitterstrukturen (Fig. 2) wurden unter Verwendung des Plug-Ins Grasshopper der Software Rhinoceros (Grasshopper-Version 0.9.0076 und Rhinoceros-Version 5.0, Robert McNeel & Associates, Seattle, WA, USA) parametrisch konstruiert:

1. Unregelmäßiges Gitter aus 3D-Voronoiwaben
2. Unregelmäßiges Gitter basierend auf der Verbindung benachbarter Punkte
3. Regelmäßiges Gitter aus Rechteckzellen
4. Regelmäßiges Gitter aus hexagonalen Zellen

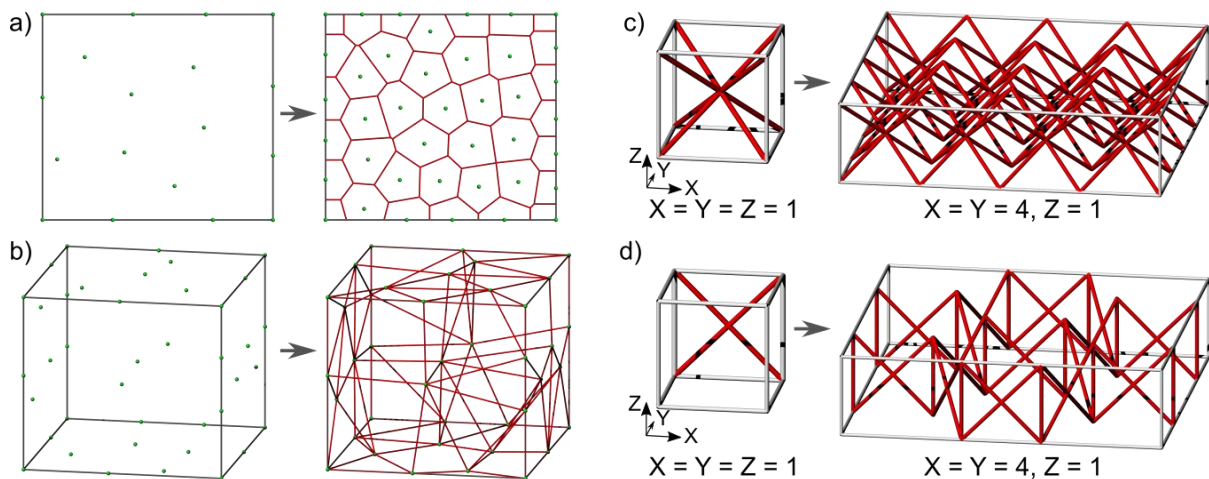


Figure 2: Darstellung der Gitterstrukturen: Das Voronoi-gitter (a) und die Verbindung benachbarter Punkte (b) sind unregelmäßige Gitterstrukturen, während die rechteckigen (c) und hexagonalen (d) Zellen regelmäßige Gitter bilden.

Die unregelmäßigen Gitterstrukturen beruhen auf Konstruktionsalgorithmen, die Strukturen in Anlehnung an die biologischen Strukturen generierten. Basierend auf einer Punkteverteilung entstanden durch Parameterveränderung verschiedenste Varianten der Gitterstrukturen. Hierbei wurden die Auflagerpunkte und Magnetanbindungsstellen als Attraktoren herangezogen, in dessen unmittelbarer Umgebung die Punkteverteilung lokal variiert werden konnte. Während im ersten unregelmäßigen Gitter jeder Punkt der Punkteverteilung Mittelpunkt einer Voronoiwabe (konvexe Polyeder, die in vielen Diatomeenstrukturen zu finden sind) war, wurde das zweite durch die Verbindung der Punkte mit einer variierenden Anzahl an Nachbarpunkten gebildet.

Die Gitterkonstruktionen erfolgten in Anlehnung an den Referenzträger in einen Designraum der Maße $4200 \times 650 \times 525 \text{ mm}$, wobei die Randbedingungen und Materialkennwerte dem Referenzmodell entsprachen. Die Darstellung der Gitterstreben erfolgte als Timoshenko-Balken. Die Füße wurden zur Erhöhung der Steifigkeit mit jeweils zwei Diagonalrippen versehen und mit Schalenelementen einer Kantenlänge von $0,05 \text{ m}$ vernetzt, die sich aus einer Gitterstudie ergab.

Zum Auffinden bestmöglicher Parameterkombinationen wurden multikriterielle Optimierungsrechnungen unter Verwendung der Evolutionsstrategie (Rechenberg [8]) eingesetzt. Die hierfür definierte Zielfunktion (Fitness) setzte sich zu gleichen Teilen aus einer hohen ersten Eigenfrequenz, einer hohen Steifigkeit und einer geringen Masse zusammen. Nach der zufälligen Bildung einer Startpopulation (Menge an Gitterstrukturen unterschiedlicher Parameterkombinationen) und die Berechnung der Fitness für jede Struktur, wurden nur die besten Strukturen mit der höchsten Fitness in die nächste Generation weitergegeben. Gleichzeitig sorgten zufällige Ereignisse wie der

Austausch von Parameterwerten zwischen Strukturen (Rekombination) und die Veränderung von Parameterwerten (Mutation) für eine hohe Variabilität in den Gitterstrukturen. In Tab. 2 sind die Konstruktionsparameter sowie die Einstellungen der Evolutionsstrategie aufgelistet. Mit Ablauf der Generationen entwickelten sich Strukturen hoher Fitness. Die Strukturen der letzten Generation, die folglich die höchste Fitness besaßen, wurden für die anschließende Auswertung herangezogen. Alle Gitterstrukturen inklusive der Magnete, die mehr als 7,5 t wogen, wurden vernachlässigt. Von den restlichen Strukturen galt die Struktur mit der höchsten ersten Eigenfrequenz als bestes Gitter.

Table 2: Auflistung der Parameter und der gewählten Einstellungen für die Evolutionsstrategie

Parameter	Konfiguration der Evolutionsstrategie	
- Dichte der Punkteverteilung	Genpool:	100 Strukturen
- Gitterstrebendurchmesser	Population:	50 Strukturen
- Wanddicke der Füße	Anzahl an Generationen:	50 Generationen
- Anzahl an Zellen	Elitismus:	50 %
- Anzahl benachbarter Punkte	Rekombinationswahrscheinlichkeit:	10 % (Rate: 80 %)
	Mutationswahrscheinlichkeit:	10 % (Rate: 50 %)

3 Ergebnisse

Fig. 3 zeigt für die Gitterstrukturen der jeweils letzten Generation und die Referenzstruktur den Kehrwert der maximalen Verschiebung in Abhängigkeit von dem Quadrat der ersten Eigenfrequenz. Beide Werte wurden mit der jeweiligen Strukturmasse normiert. Insgesamt war ein tendenziell linearer Zusammenhang zwischen beiden Strukturwerten zu erkennen. Die Mehrheit der regelmäßigen Strukturen sowie der unregelmäßigen Voronoi-Gitterstrukturen wiesen in beiden Eigenschaften geringere Werte als die Referenz auf. Dahingegen besaßen die meisten unregelmäßigen Gitterstrukturen basierend auf der Verbindung benachbarter Punkte in beiden Eigenschaften bessere Werte als die Referenz. In Fig. 3 sind ergänzend die Eigenschaften der jeweils besten Struktur der vier Gitter und der Referenz aufgeführt. Die besten unregelmäßigen Gitter zeigten sowohl eine höhere erste Eigenfrequenz, als auch eine geringere maximale Verformung als die Referenzstruktur.

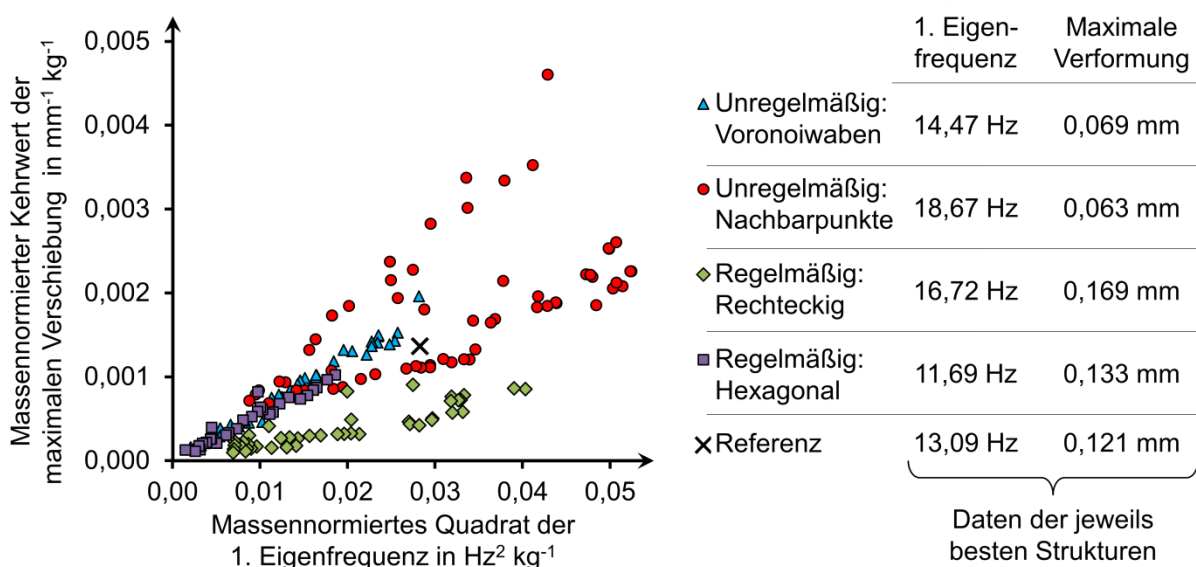


Figure 3: Darstellung der Strukturen der letzten Generation für die vier Gitter und die Referenzstruktur (links) sowie eine Auflistung der Eigenschaften der jeweils besten Gitterstrukturen und der Referenz (rechts).

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial der biologisch inspirierten Gitter- und Wabenstrukturen zur Beeinflussung des Schwingungsverhaltens von Strukturen. Hierbei führen unregelmäßige Strukturen zu deutlich höheren ersten Eigenfrequenzen und Steifigkeiten als regelmäßige. Der tendenziell lineare

Zusammenhang ist auf die für einen Einmassenschwinger gültige Proportionalität des Quadrats der ersten Eigenfrequenz zur Steifigkeit zurückzuführen. Die Streuung der Daten verdeutlicht die Möglichkeit, durch Veränderung der Struktur eine erhebliche Erhöhung der ersten Eigenfrequenz zu erreichen, während Steifigkeit und Masse konstant bleiben. Gleichermäßen lässt sich durch die Wahl einer geeigneten Gitterstruktur die Steifigkeit bei gleichbleibender Eigenfrequenz erhöhen.

Im Hinblick auf die Trägerstruktur erlauben die unregelmäßigen Gitter basierend auf der Verbindung von Nachbarpunkten eine gleichzeitige Erhöhung der ersten Eigenfrequenz um den Faktor 1.4 und der Steifigkeit um den Faktor 1.9. Dennoch liegen die maximal erreichten ersten Eigenfrequenzen von 18,67 Hz weiterhin in dem kritischen Frequenzbereichs von 1-50 Hz (Bialowons [9]), innerhalb dessen eine Anregung der Struktur zu hohen Schwingungsamplituden führen kann. Für weiterführende Untersuchungen sollte eine Anpassung der Randbedingungen vorgenommen werden, um die Steifigkeit der Gesamtstruktur und somit auch die erste Eigenfrequenz weiter zu erhöhen.

5 Fazit

Die Ergebnisse der durchgeführten Studie zeigen, dass sich die biologisch inspirierten Gitter- und Wabenstrukturen nicht nur zur Leichtbauoptimierung einsetzen lassen, sondern auch ein hohes Potenzial zur Schwingungsoptimierung bieten. Durch die Anwendung der Strukturen auf die Trägerstruktur eines Teilchenbeschleunigers ließen sich sowohl die erste Eigenfrequenz, als auch die Steifigkeit erhöhen.

6 Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt der Arbeitsgruppe „Bionischer Leichtbau“ des Alfred Wegener Instituts für die Bereitstellung der Algorithmen zur Generierung der bionischen Gitterstrukturen sowie der Abteilung MEA (Maschinen- und Experimentenaufbau) des DESY für die Unterstützung im Rahmen der Studie.

7 Referenzen

- [1] Round, F.E., Crawford, R.M. & Mann, D.G. (1990): "Diatoms: Biology and Morphology of the Genera", Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [2] Hamm, C.E., Merkel, R., Springer, O., Jurkojx, P., Maier, C., Prectel, K. & Smetacek, V. (2003): "Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection", *Nature* 421, 841-843.
- [3] Maier, M., Siegel, D., Thoben, K.-D., Niebuhr, N. & Hamm, C. (2013): "Transfer of Natural Micro Structures to Bionic Lightweight Design Proposals", *Journal of Bionic Engineering* 10, 469-478.
- [4] Heinrichs, A., Frank, P., Siegel, D. & Frank, M. (2017): "Bionische Entwicklung einer additiv gefertigten A-Säulen-Verstärkung", *Karosseriebautage Hamburg*, Springer, 43-56.
- [5] Zhu, H.X., Hobdell, J.R. & Windle, A.H. (2000): "Effects of cell irregularity on the elastic properties of open-cell foams", *Acta Materialia* 48(20), 4893-4900.
- [6] Li, K., Gao, X.-L. & Subhash, G. (2005): "Effects of cell shape and cell wall thickness variations on the elastic properties of two-dimensional cellular solids", *International Journal of Solids and Structures* 42 (5), 1777-1795.
- [7] Tekoğlu, C., Gibson, L.J., Pardoën, T. & Onck, P.R. (2011): "Size effects in foams: Experiments and modeling", *Progress in Materials Science* 56 (2), 109-138.
- [8] Rechenberg, I. (1973): "Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution", Frommann-Holzboog, Stuttgart.
- [9] Bialowons, W. (2013): "Quadrupolaufstellung", *Konstruktionsbesprechung am 02.10.2013*, DESY, Hamburg (aufrufbar unter <http://vibration.desy.de/documents/notes/>).