



Modellierung und Anwendung 3D-gedruckter Gitterstrukturen

Florian Finsterwalder, Britta Nestler, Reinhard Bauer

Lemgo, 20.10.2023

Personen



Prof. Dr. Britta Nestler

Institut f. Digitale Materialforschung, HKA
Institut für Angew. Materialforschung, KIT

Hintergrund / Erfahrung

- Ausbildung: Physik/Mathematik, RWTH
- Promotion, RWTH Aachen
- HKA seit 2001, KIT seit 2010

Schwerpunkte / Projekte

- Materialmodellierung
- Mikrostruktursimulation
- High Performance Materials Computing



Prof. Dr. Reinhard Bauer

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Hintergrund / Erfahrung

- Mathematiker und Informatiker
- Industrieerfahrung: RWE, ABB
- HKA seit 2019

Schwerpunkte / Projekte

- Algorithmik und Optimierung



Prof. Dr. Florian Finsterwalder

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Hintergrund / Erfahrung

- Ausbildung: Chemie / Chemieing. KIT
- Promotion Fraunhofer ICT
- Industrie:
Johnson Matthey (3 J), Daimler (17 J)
- HKA seit 2018

Schwerpunkte / Projekte

- Additive Fertigungskonzepte
- Industr. Prozesskette der add. Fertigung

Gitter-Strukturen mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten

F&E-Bedarf gibt es bei der anwendungsoptimierten Berechnung, Modellierung und Realisierung dieser Strukturen

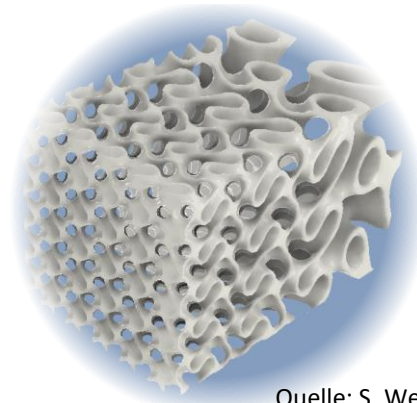
Energiewende

- Katalysatorträger
- Leistungsfähige Stoffaustauscher, z.B. Befeuchtung, Extraktion
- Elektrodenstrukturen für Batterien / Elektrolyseure / Brennstoffzelle
- Filtrationstechnik

Nachhaltigkeit

Biodiversität

- Bio-Substrate
- Sensor-Elektroden



Quelle: S. Weber, H-KA

Gradienten-Gyroid-Struktur

Ressourceneffizienz

- Wärmetauscher
- Medizinische Implantate (Knocheneinbau)
- Leichtbau- und Dämpfungsstrukturen für belüftete Schuhsohlen, Helme

Gesundheit und Sport

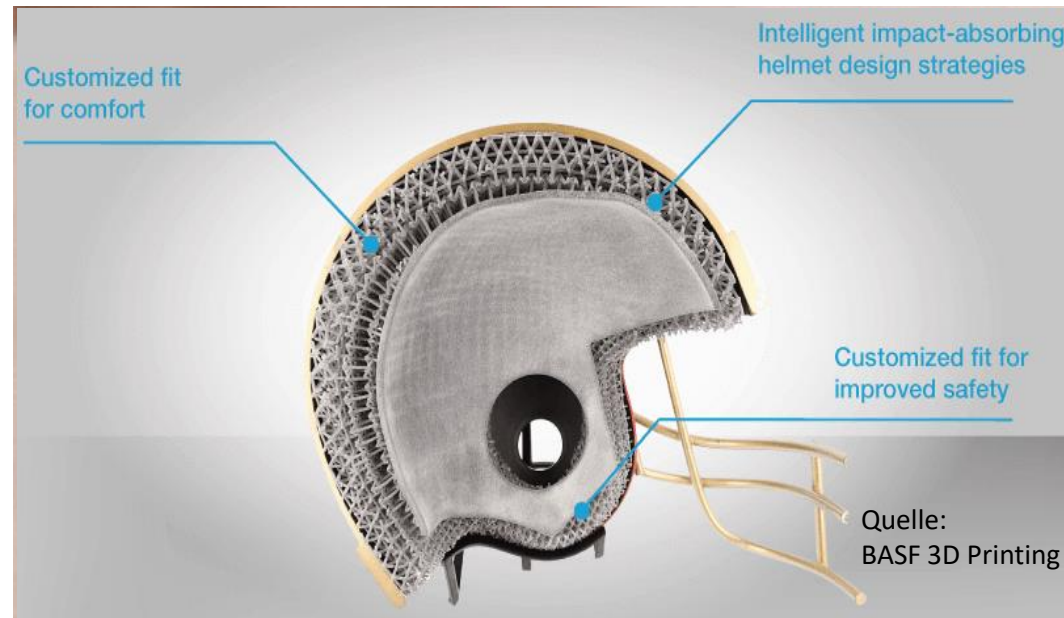
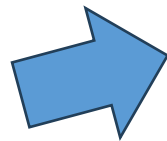
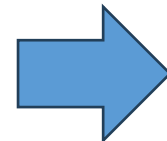
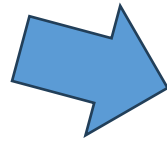
Ziel: Maßgeschneiderte zelluläre Strukturen mittels additiver Fertigung

Dämpfungsstrukturen am Beispiel eines Schutzhelms

Dämpfung →
lokale Kompressibilität

Belüftung →
lokale Permeabilität

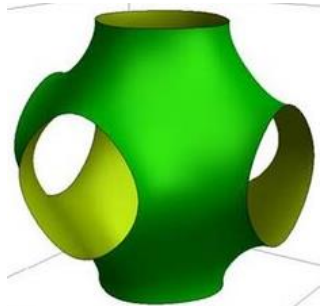
Tragekomfort am Kopf →
maximale Porenweite
(möglichst fein)



Ziel:
„Generatives Design“ einer
Struktur als Lösung eines
Optimierungsproblems
unter den
Randbedingungen des
Anforderungsprofils:
„**Form Follows Function**“

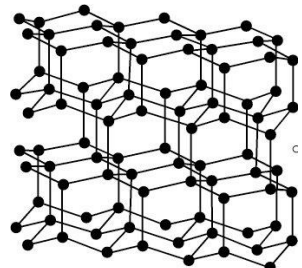
Heute: überwiegend marketinggetriebenes Designprodukt,
Funktion sekundär → „Function Follows Form“

Vom mathematischen / physikalischen zum realen Modell

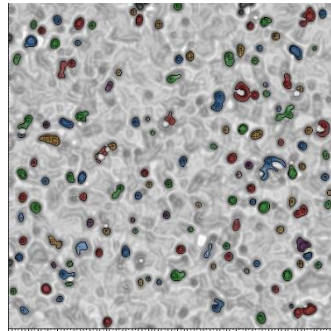


Schwarz-P-Gyroid

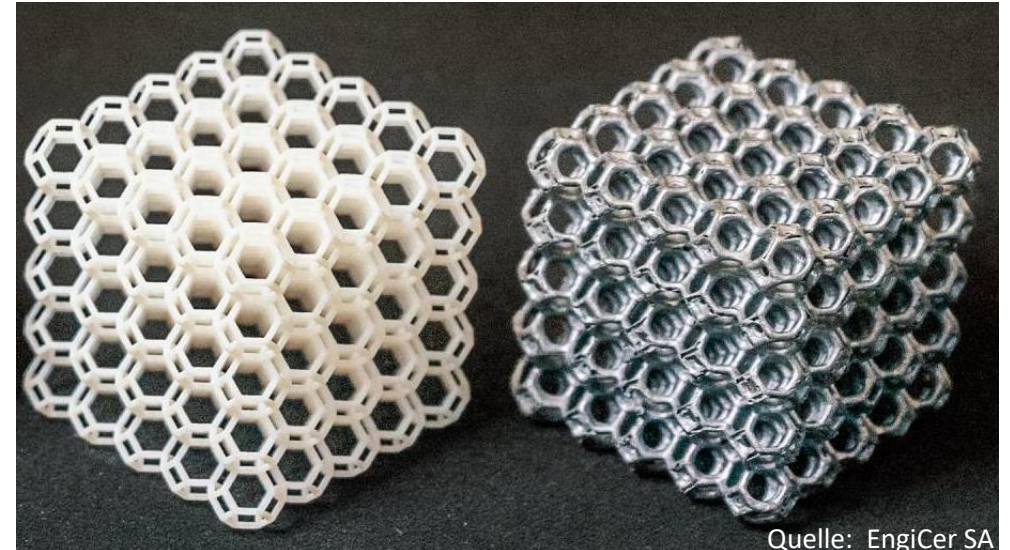
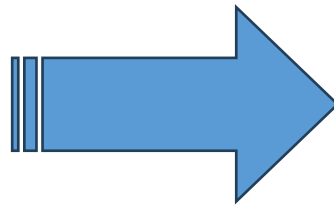
$$\varphi(x, y, z) = \cos(\alpha x) + \cos(\beta y) + \cos(\gamma z)$$



Diamantstruktur



Bsp. Porenanalyse



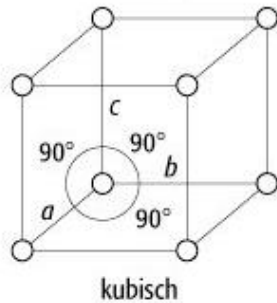
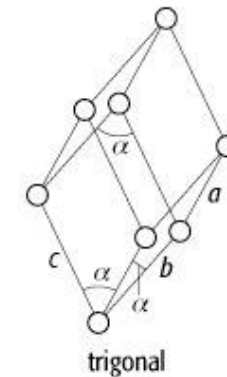
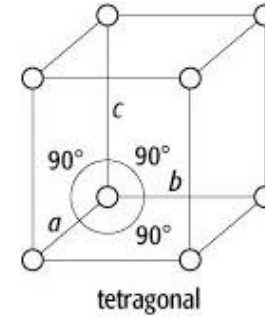
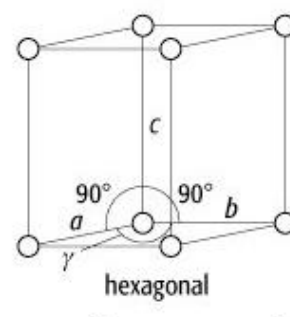
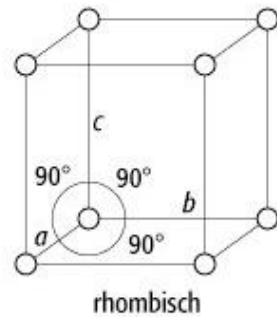
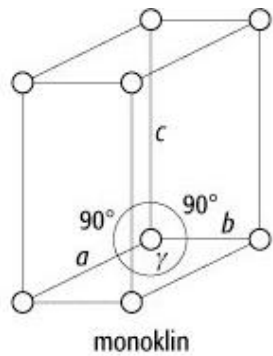
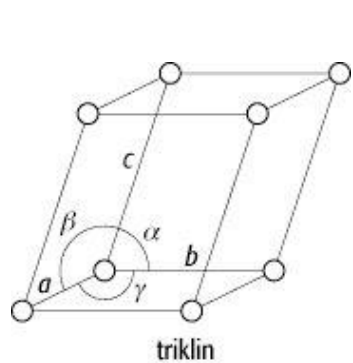
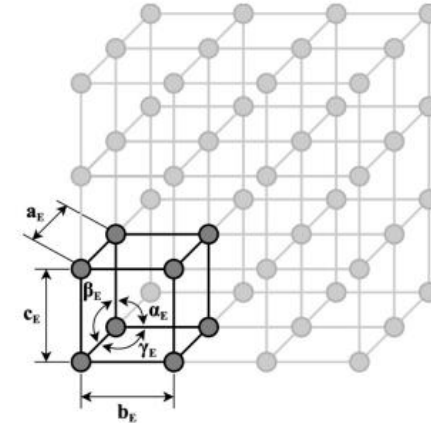
Quelle: EngiCer SA

Mathematisches / Physikalisches Modell

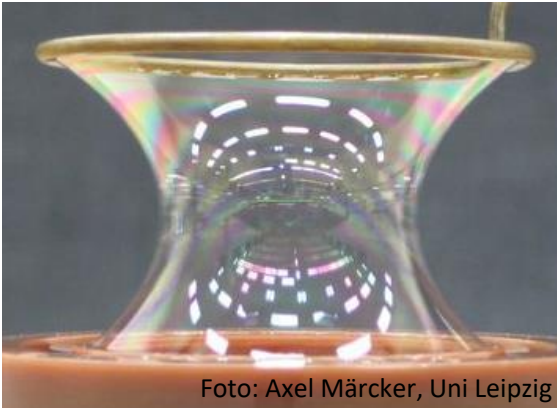
3D-gedruckte Strukturen

Gitterstrukturen → Kristallsysteme

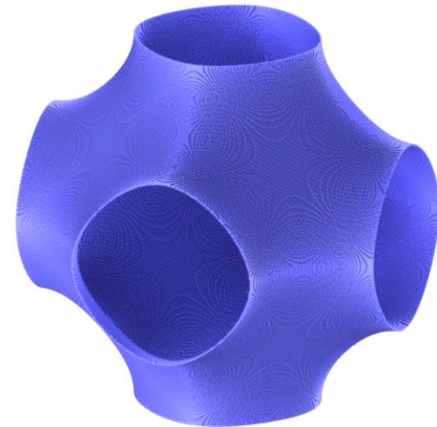
- Definition einer **Elementarzelle** mit entsprechender Symmetrie
- Bildung von Gitterstrukturen durch Translation entlang der Raumachsen → periodische Muster
- Es gibt auch geordnete aperiodische Strukturen („Quasikristalle“)



Beispiel periodische Strukturen: Triperiodische Minimalflächen



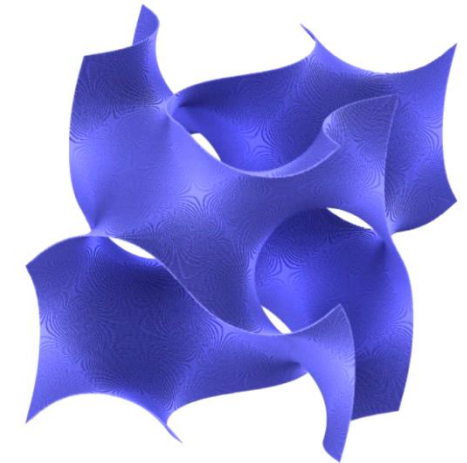
Seifenhaut-Minimalfläche
zwischen 2 Kreisringen
(Katenoid)



Schwarz-P-Oberfläche

$$\begin{aligned}\varphi(x, y, z) = & \\ & \cos(\alpha x) + \\ & \cos(\beta y) + \\ & \cos(\gamma z) = 0\end{aligned}$$

Es gibt ein Innen und Außen
→ 2 Halbräume
→ Anwendung z.B. für
Wärmetauscher



Schoen-Gyroid

$$\begin{aligned}\varphi(x, y, z) = & \\ & \cos(\alpha x) \cdot \sin(\beta y) + \\ & \cos(\beta y) \cdot \sin(\gamma z) + \\ & \cos(\gamma z) \cdot \sin(\alpha x) = 0\end{aligned}$$

Vorgehend zur Modellierung von Gitterstrukturen

Beschreibung Elementarzelle (Funktion, Datenpunkte)



Erzeugung einer Punktwolke (Voxels)



Vermaschung / Bereinigung / Glättung

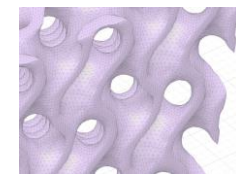
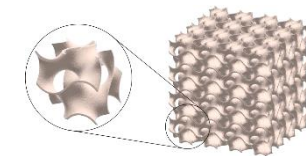
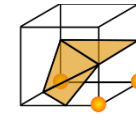
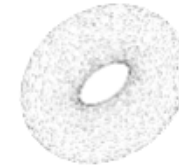


Vervielfältigung (Translation)



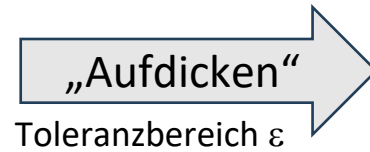
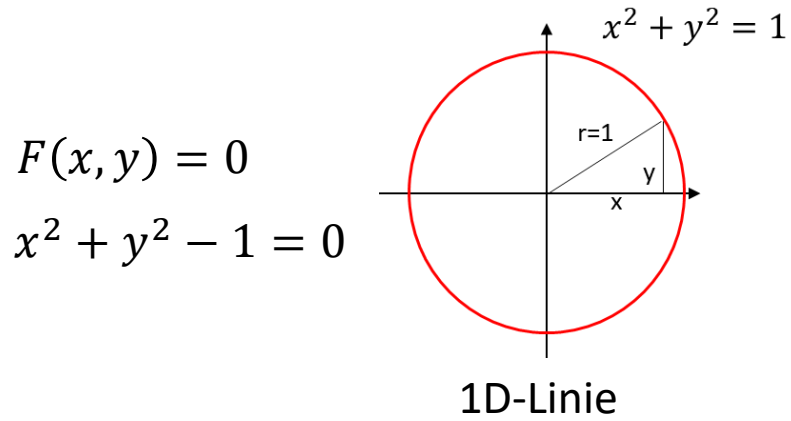
Oberflächenmodell (STL, 3MF)

$$F(x, y, z) - c = 0$$

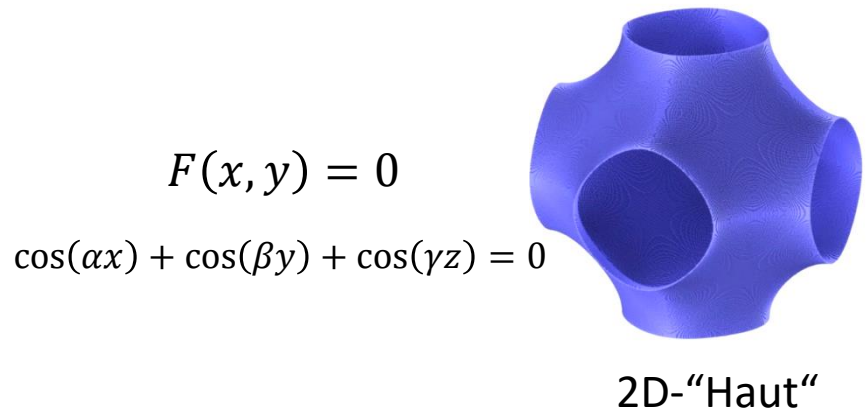
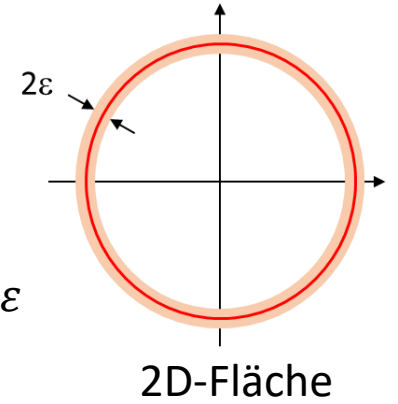


ggf. Datenkompression

Von der mathematischen Funktion zum realen Objekt



$$|F(x, y)| \leq \varepsilon$$
$$|x^2 + y^2 - 1| \leq \varepsilon$$
$$\Leftrightarrow 1 - \varepsilon \leq x^2 + y^2 \leq 1 + \varepsilon$$

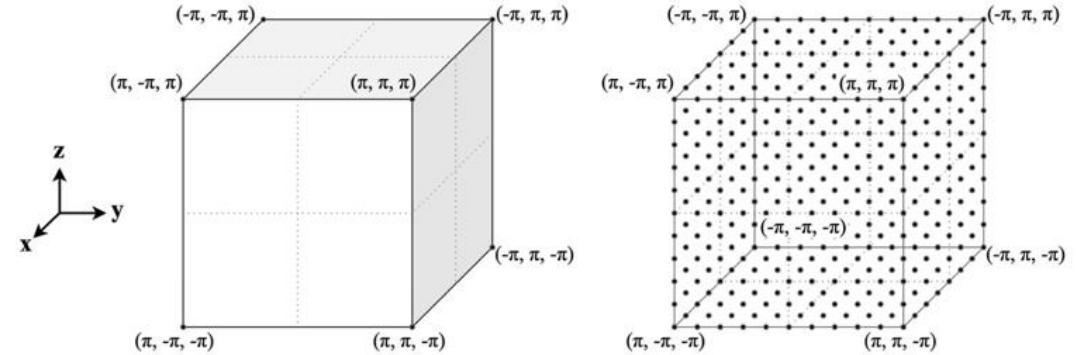


$$|F(x, y, z)| \leq \varepsilon$$
$$|\cos(\alpha x) + \cos(\beta y) + \cos(\gamma z)| \leq \varepsilon$$

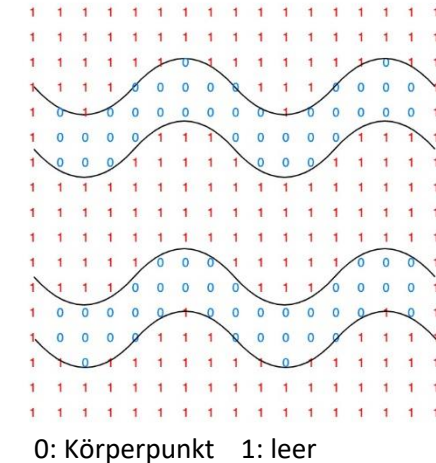


Generierung des Volumenmodells als Punktwolke

- Diskretisierung der Elementarzelle in ein Punktraster

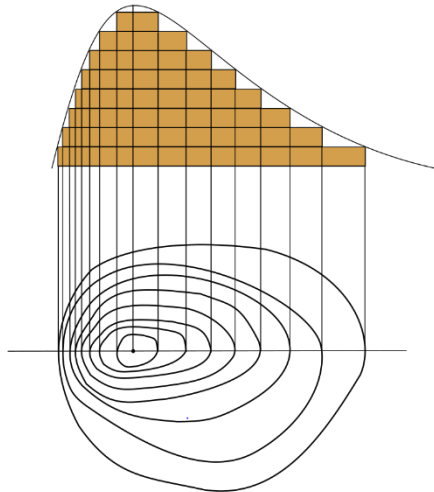


- Körperpunkte sind diejenigen Punkte, die innerhalb des Streifens liegen $|F(x, y, z)| \leq \varepsilon$
- Volumenberechnung:
Körpervolumen = Raumerfüllung · Hüllvolumen
Raumerfüllung = Körperpunkte / Rasterpunkte
Porosität = 1 - Raumerfüllung

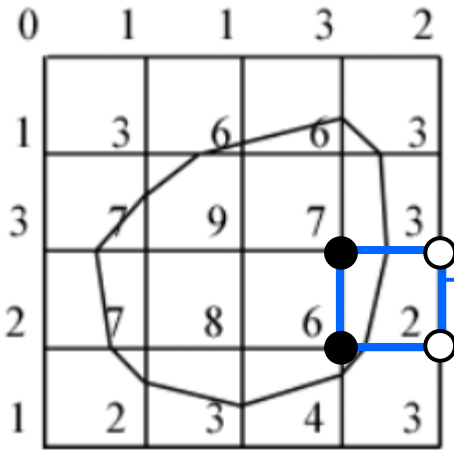


Vermaschung der Punktwolke zu einem Oberflächenmodell (2D)

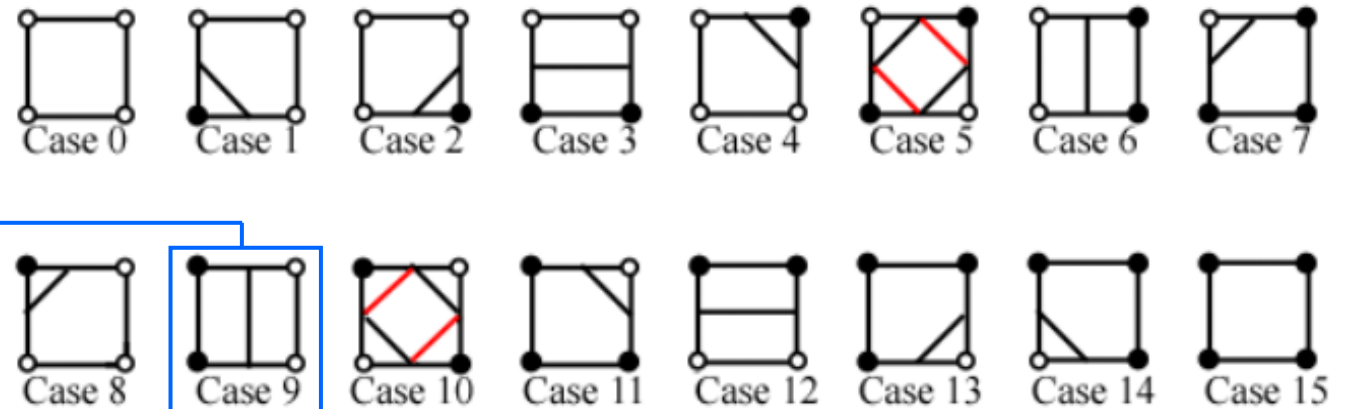
Aufgabe: Identifikation von Isolinien (2D) bzw. Isoflächen (3D) mithilfe von „Marching Squares / Cubes“



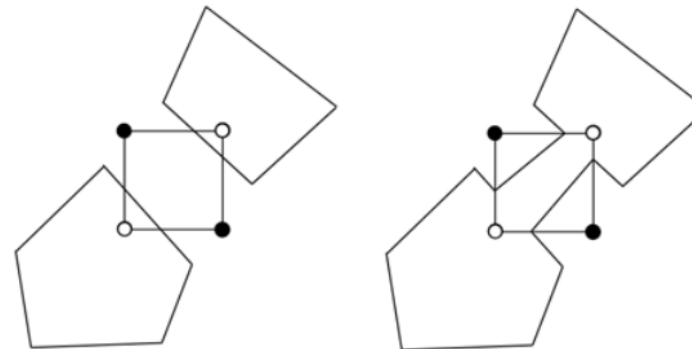
Höhenprofil



Bsp. im 2D: Konstruktion Isolinie mit Schwellwert 5



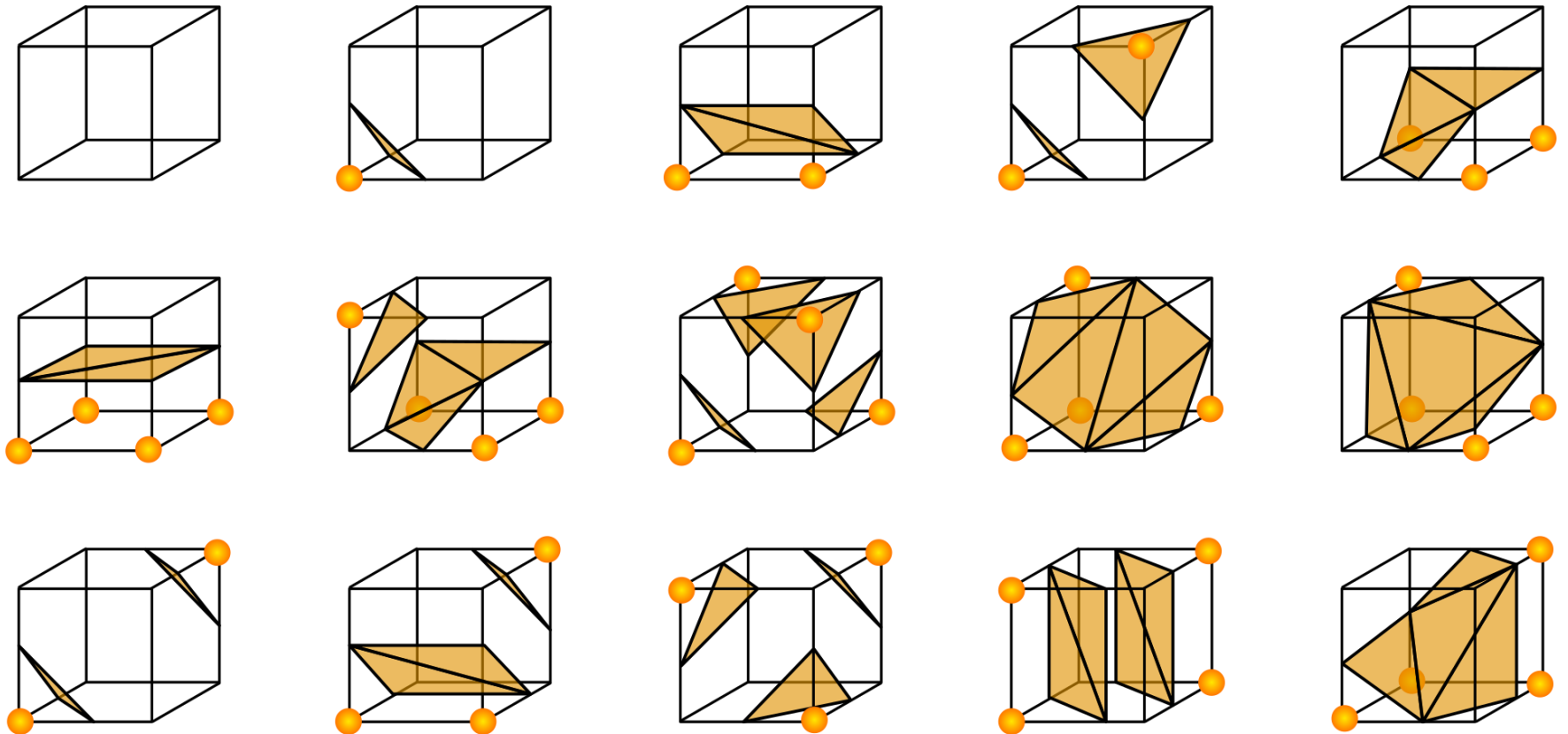
Fall 10 (und 5) sind nicht eindeutig:
2 Arten der Segmentierung möglich



Vermaschung der Punktwolke zu einem Oberflächenmodell (3D)

Aufgabe: Identifikation von Isolinien (2D) bzw. Isoflächen (3D) mithilfe von „Marching Cubes“

- Übertragung Marching Squares ins 3D
→ Marching Cubes
- Reduktion der $2^8 = 256$ Betrachtungsfälle aufgrund von Symmetrie auf 15
- Auflösung von nicht eindeutigen bzw. widersprüchlichen Fällen



Ergebnis der Triangulierung mittels Marching Cubes

- Speicherung z.B. als STL-File
- Marching Cubes hat auch Unzulänglichkeiten – z.B. werden Kanten angefast

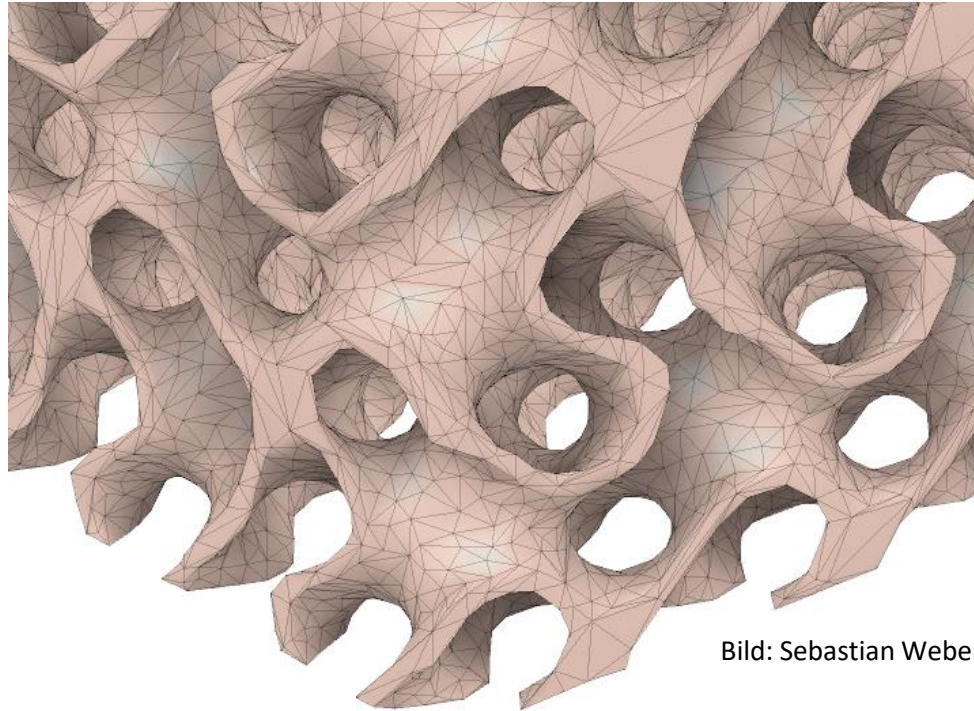
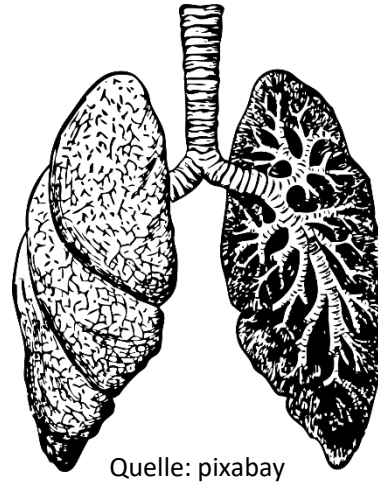


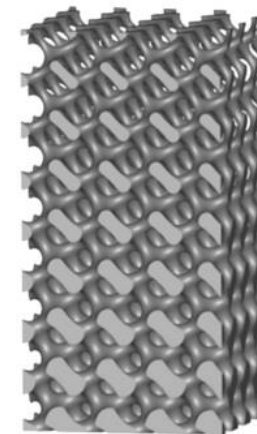
Bild: Sebastian Weber, HKA

Gradientenstrukturen - Beispiele aus der Natur

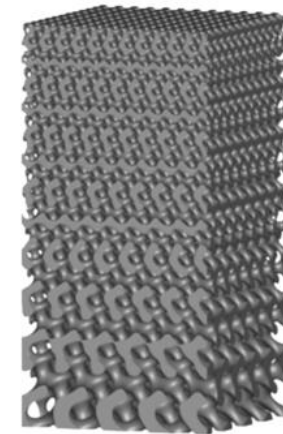


Arten von Gradienten

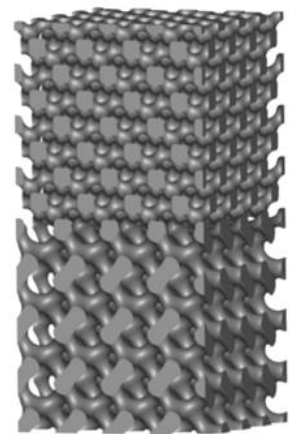
- Dichtegradient (1)
- Zellgrößengradient (2)
- Strukturgradient (3)



(1)



(2)



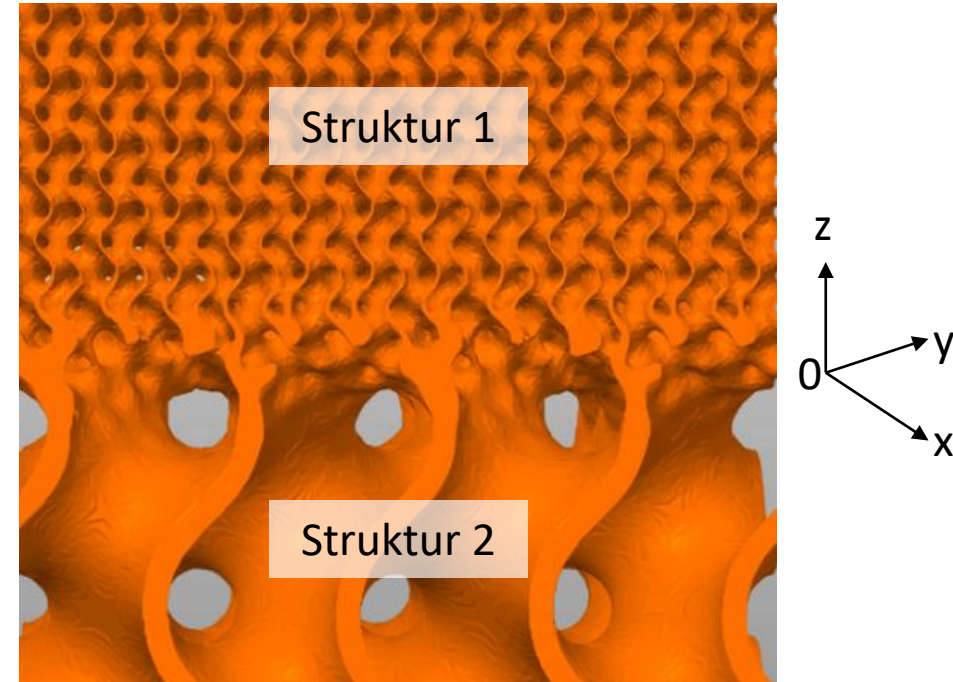
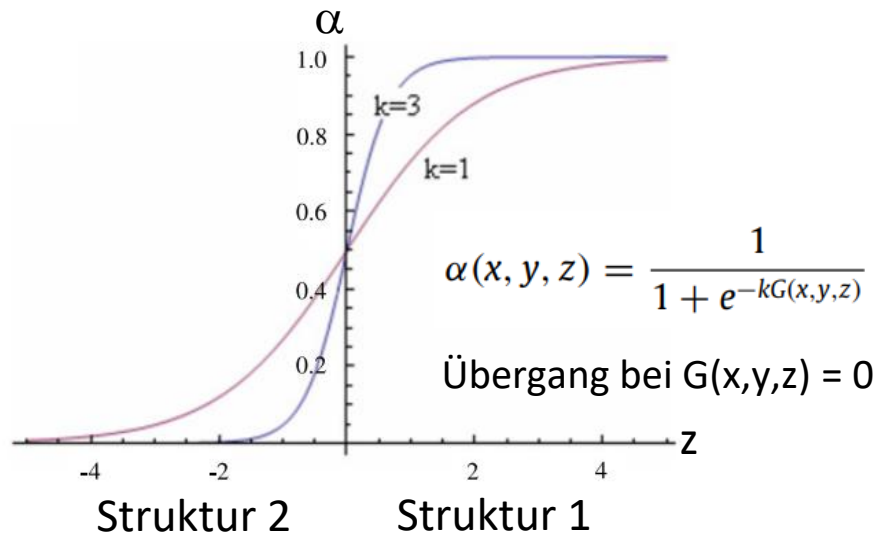
(3)

Modellierung von Strukturgradienten

Hybride Strukturen ϕ_{hyb} durch Überlagerung (Linearkombination) von Unterstrukturen ϕ_1, ϕ_2

$$\phi_{hyb}(x, y, z) = \alpha(x, y, z)\phi_1(x, y, z) + (1 - \alpha(x, y, z))\phi_2(x, y, z)$$

α : Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1
Verlauf in Form einer Sigmoid-Funktion

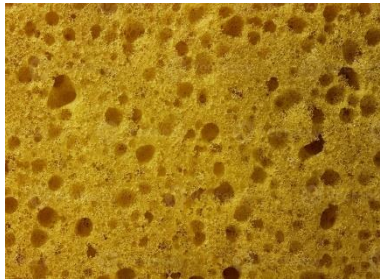


$k = 3; G(x,y,z) = z$

Bild: Sebastian Weber, HKA

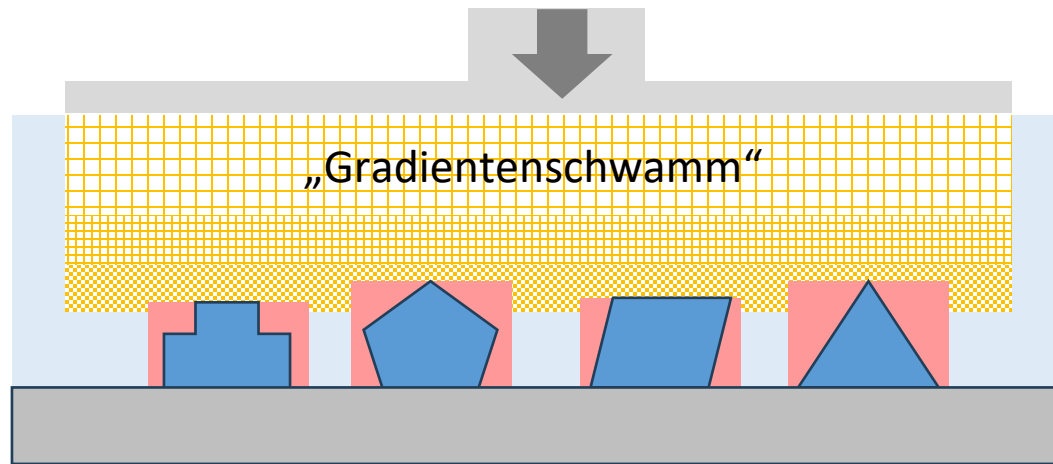
Anwendungsbeispiel: Schwammstruktur zur Bauteilfixierung

Schwammstruktur zur Fixierung der Bauteile während der Stützmaterialentfernung durch Auswaschen
(automatisierter und bauteilschonender Prozess)



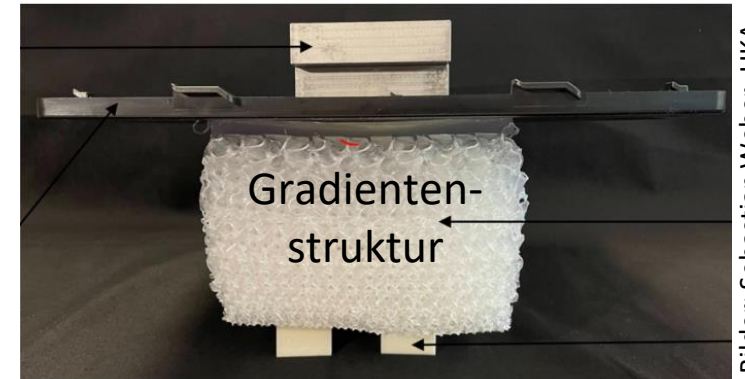
Konventioneller
Schwamm

- lokal konstante Porenverteilung

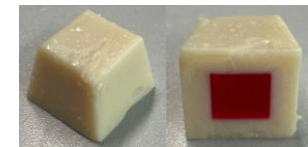


Schwammstruktur mit gradierter Porenverteilung

- In Bauteilnähe feinporig → kein Verhaken der Bauteile
- In der Entfernung großporig → gute Durchströmung
- Konstante Porosität



Bilder: Sebastian Weber, HKA



Gedruckte Test-Bauteile (InkJet)

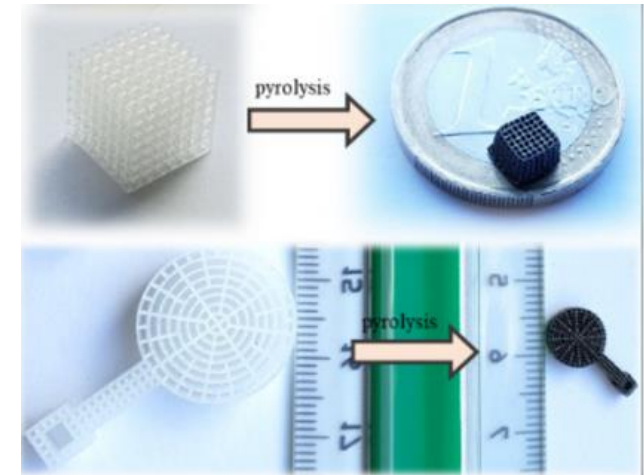
Zusammenfassung und Ausblick

- Prozesskette vom Datenmodell zum druckbaren Bauteil beschrieben
- Kombination von Strukturen → Functional Graded Materials

Nächste Schritte:

- Generierung optimierter Strukturen mittels (evolutionärer) Such-Algorithmen
- Neue Materialien und Anwendungsfelder, insbesondere für Kunststoffe, z.B. in Sensorik oder Verfahrenstechnik:
 - 3D-gedruckte Elektrodenstrukturen mit höherer Leistung
 - neue 3D-Strukturen in Kombination mit neuen Materialien, z.B. ionenleitende, permselektive Membranmaterialien in der VT

Ausblick: Elektrodenstrukturen aus SLA-Prekursoren durch Pyrolyse



B. Rezaei et al.
doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108834

Herzlichen Dank!



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



Florian Finsterwalder

+49 721 925 1925

TEMPORÄRE E-MAIL ADRESSE: florian.finsterwalder@h-ka-w.de