

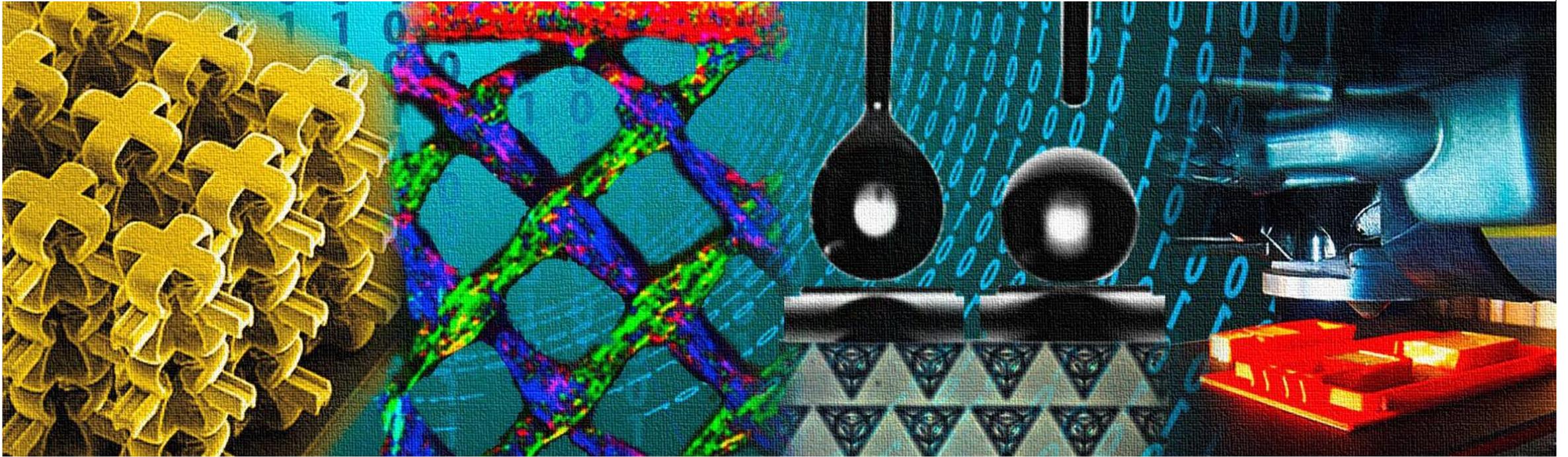
FRAUNHOFER FORSCHUNGSCLUSTER PROGRAMMIERBARE MATERIALIEN **PRODUKTENTWICKLUNG (PE) & MECHANIK (PM)**

NORTEC, Hamburg, 24.01.2020

Tobias Lichti, Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, Kaiserslautern

Linda Weisheit, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Dresden

Thorsten Pretsch, Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung, Potsdam-Golm



AGENDA

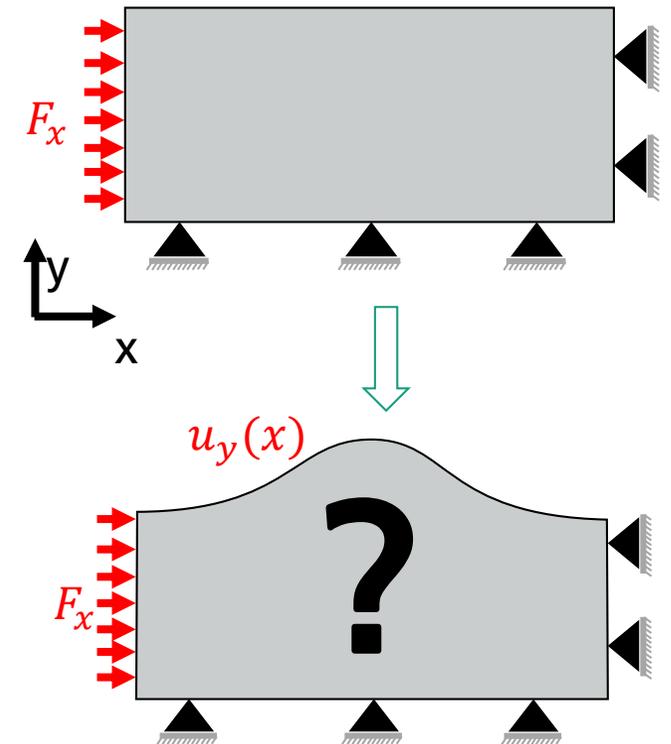
- Motivation
- Forschungsthemen
- Kompetenzfeld Formgedächtnispolymere
- Einheitszellenkonzept für Programmierbare Metamaterialien (PM)
 - Multiskalenoptimierung
 - Homogenisierung
 - Topologieoptimierung
- Pilotprojekt – Peristaltik
- Zusammenfassung und Ausblick

MOTIVATION (1/2)

„Ich hätte gerne ein Material mit einer programmierbaren äußeren Verformung“

- Klassischer Ansatz: Entwicklung eines Systems
 - Umsetzung über technisches System (Sensoren, Regler, Aktuatoren, Mechatronik)
- Ansatz mit PM: Integration der Funktionalität in das Material
 - „Programmierung“ des Materials auf Ebene der „Mikrostruktur“
 - Lokal angepasste Form und Eigenschaften
 - Zeitlich veränderliche Form und Eigenschaften
 - Anpassung der Form oder Steifigkeit an den Betriebszustand (Temperatur, Druck,...)
 - Umschalten über äußeren Trigger

Trigger: mechanische Belastung



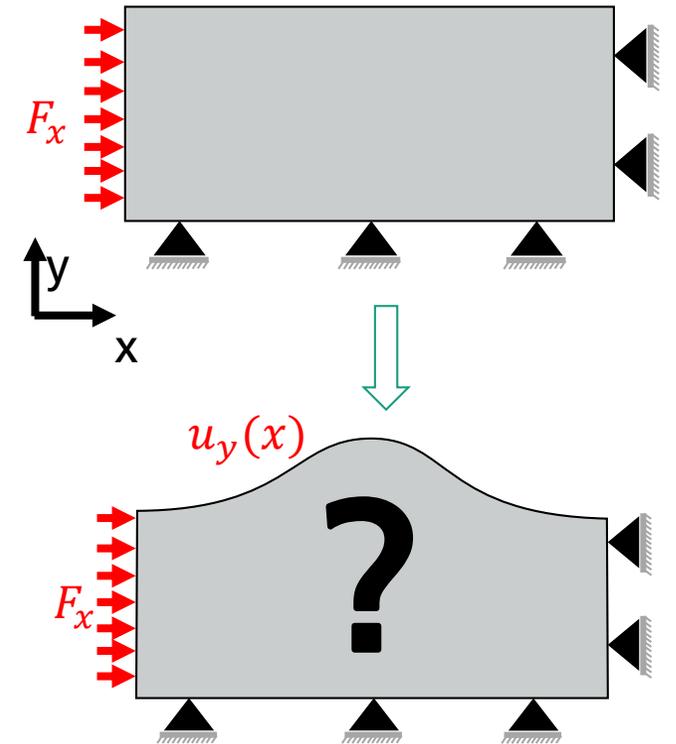
Programmierte äußere Form

MOTIVATION

(2/2)

- Substitution ganzer Systeme durch ein Programmierbares Material
 - Große Freiheiten durch zusätzliche Designparameter auf Materialebene
- ↕
- Reduzierte Komplexität des Bauteils
 - Erhöhte Komplexität des Materialverhaltens
- Neuer Umgang mit Materialien im Konstruktionsprozess erforderlich
- Konstrukteur kann sowohl äußere Form als auch innere Struktur des Materials anpassen.

Trigger: mechanische Belastung



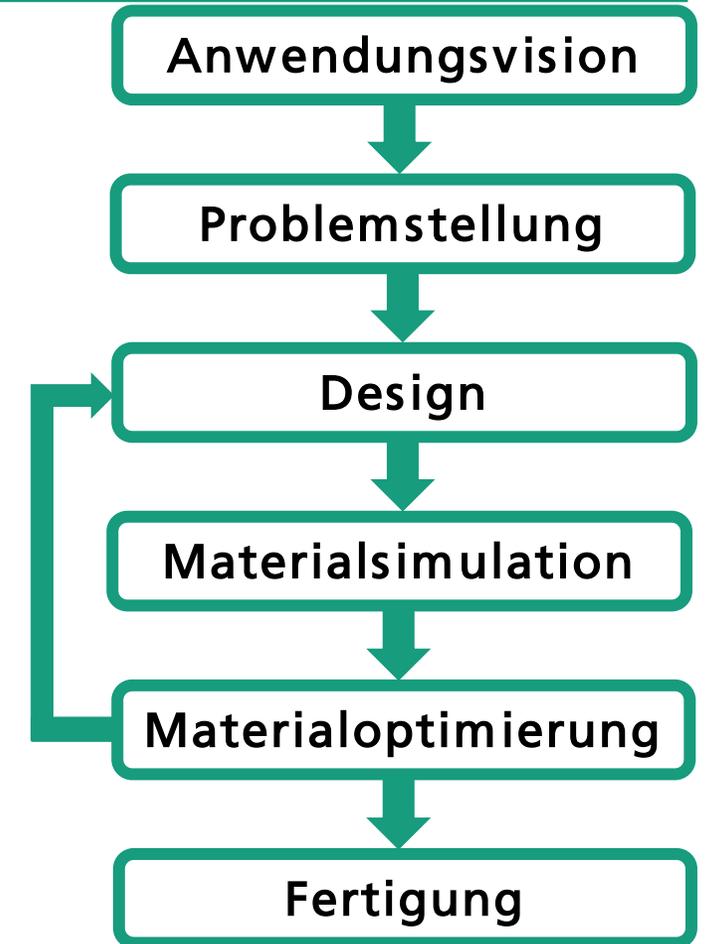
Programmierte äußere Form

FORSCHUNGSTHEMEN

(1/4)

Zu- und Umgang mit PM erleichtern/ermöglichen, Einsatzschwelle senken

- Entwicklung eines **Workflows** zur Produktentwicklung mit PM

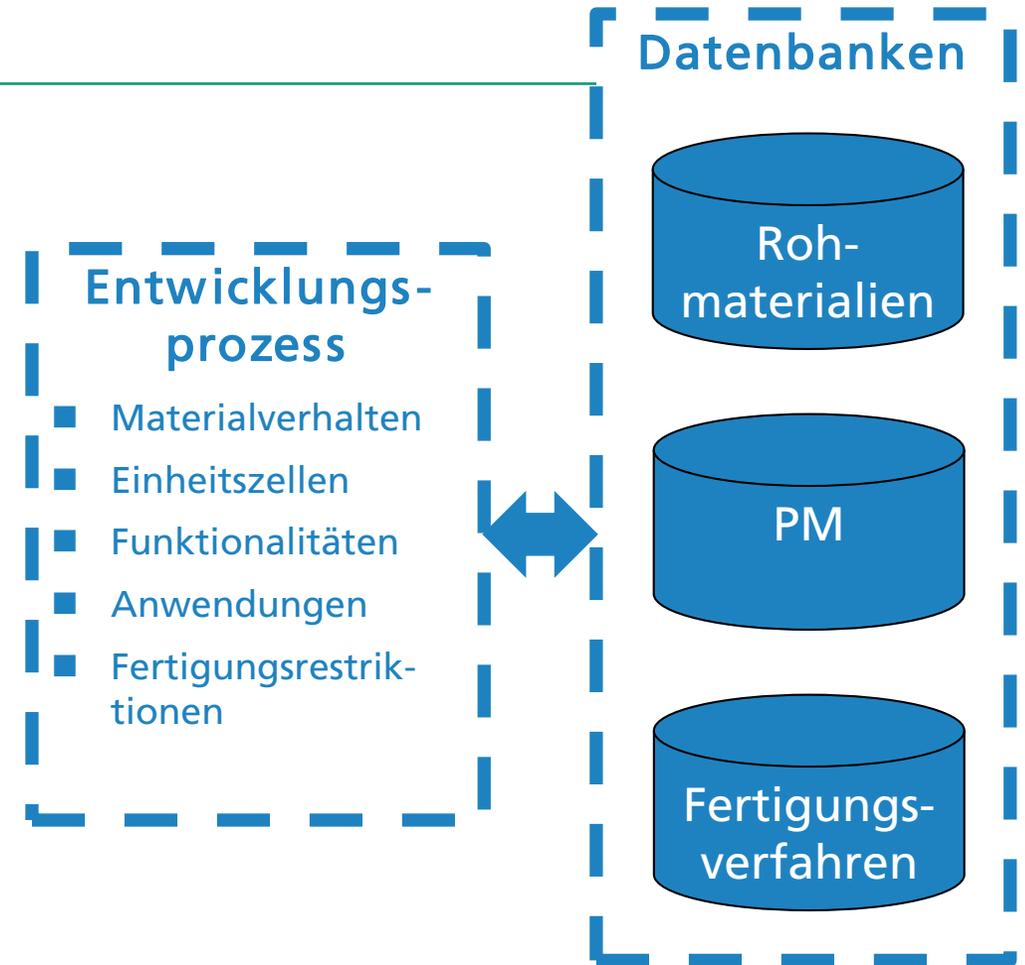


FORSCHUNGSTHEMEN

(2/4)

Zu- und Umgang mit PM erleichtern/ermöglichen, Einsatzschwelle senken

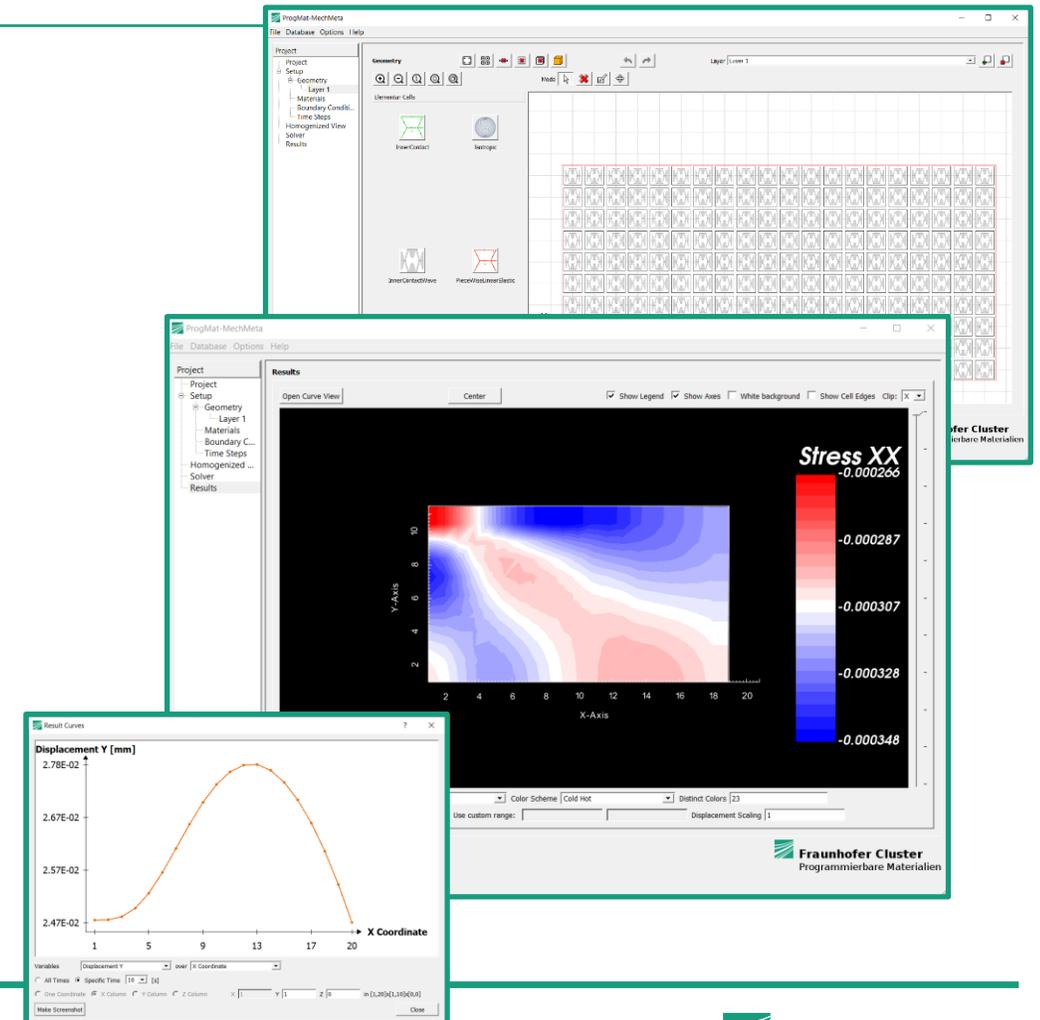
- Entwicklung eines **Workflows** zur Produktentwicklung mit PM
- Bereitstellung von **Datenbanken** mit bereits bekannten PM, Herstellungsverfahren und Anwendungsbeispielen



FORSCHUNGSTHEMEN (3/4)

Zu- und Umgang mit PM erleichtern/ermöglichen, Einsatzschwelle senken

- Entwicklung eines **Workflows** zur Produktentwicklung mit PM
- Bereitstellung von **Datenbanken** mit bereits bekannten PM, Herstellungsverfahren und Anwendungsbeispielen
- Bereitstellung eines **Entwicklungstools** für den Umgang mit PM
 - Entwurf, Strukturanalyse, Strukturoptimierung
 - Zugriff und Verwaltung der Datenbanken zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und Festhalten von Entwicklungsergebnissen

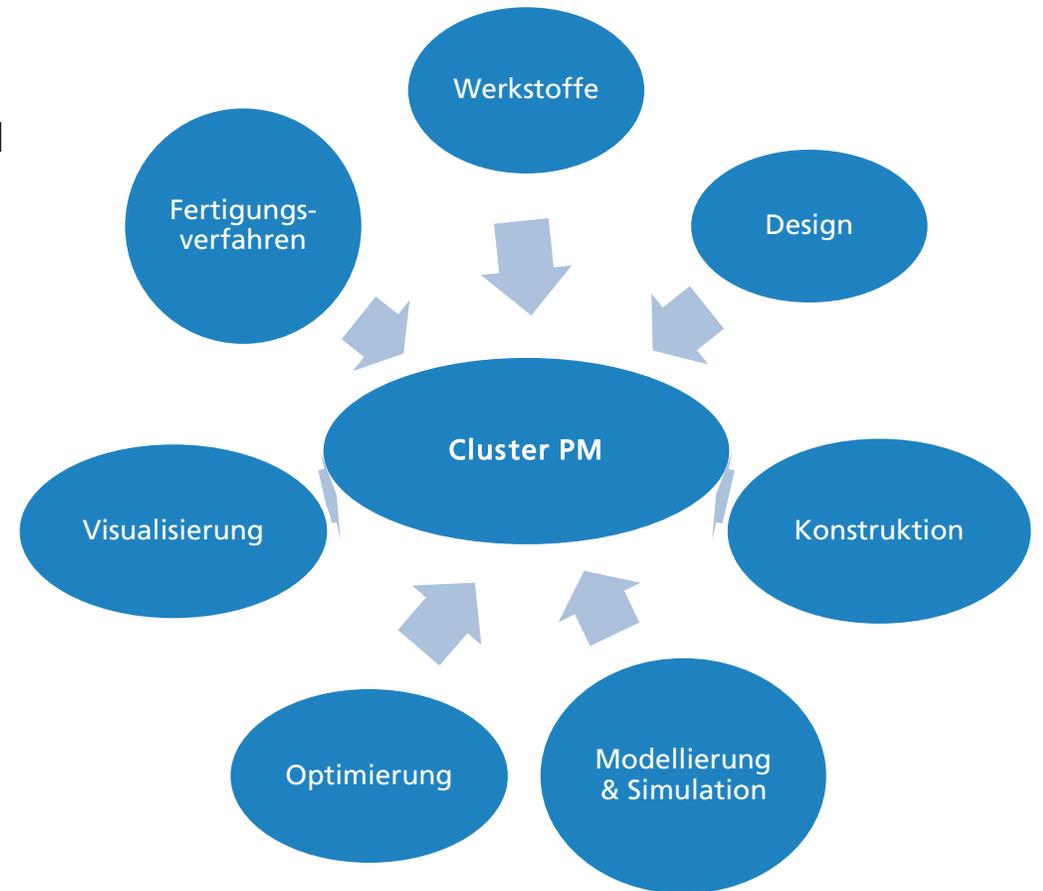


FORSCHUNGSTHEMEN

(4/4)

Zu- und Umgang mit PM erleichtern/ermöglichen, Einsatzschwelle senken

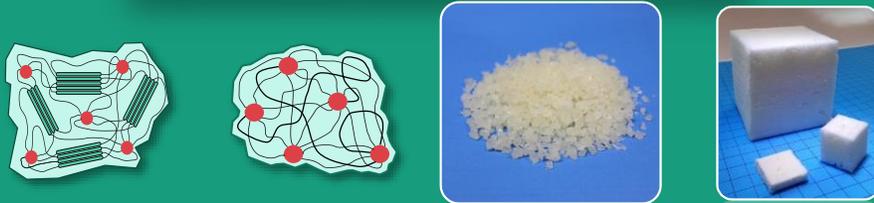
- Entwicklung eines **Workflows** zur Produktentwicklung mit PM
- Bereitstellung von **Datenbanken** mit bereits bekannten PM, Herstellungsverfahren und Anwendungsbeispielen
- Bereitstellung eines **Entwicklungstools** für den Umgang mit PM
 - Entwurf, Strukturanalyse, Strukturoptimierung
 - Zugriff und Verwaltung der Datenbanken zur Unterstützung des Entwicklungsprozesses und Festhalten von Entwicklungsergebnissen
- Bündeln und Koordinieren von Kompetenzen innerhalb des Clusters



KOMPETENZFELD FORMGEDÄCHTNISPOLYMERE

Polymere mit Zweiweg-Formgedächtniseffekt verfügen über eine »IF...THEN...ELSE«-Schaltfunktion. Nur wenn ein bestimmter, für die Initiierung eines Schaltvorgangs geeigneter Stimulus appliziert wird, dann kommt es tatsächlich zu einer Formänderung.

Synthese und Verarbeitung

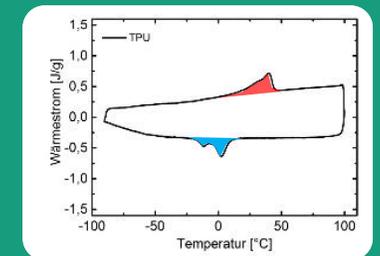
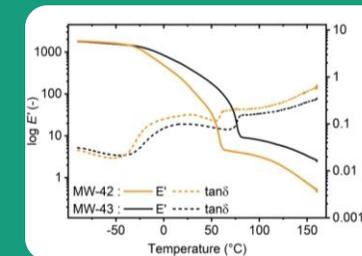


- applikationsbezogenes Maßschneiden von Eigenschaftsprofilen
- spezielle Eigenschaften / Funktionalitäten
- Verarbeitung aus der Schmelze
- Additive / Füllstoffe

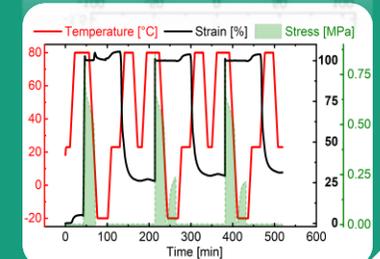


Charakterisierung

- Polymereigenschaften
- chemisch / physikalisch
 - Stabilität / Funktionalität



- Formgedächtniseigenschaften
- neue Programmierungsmethoden
 - Quantifizierung der Formgedächtniseigenschaften / Aktuation

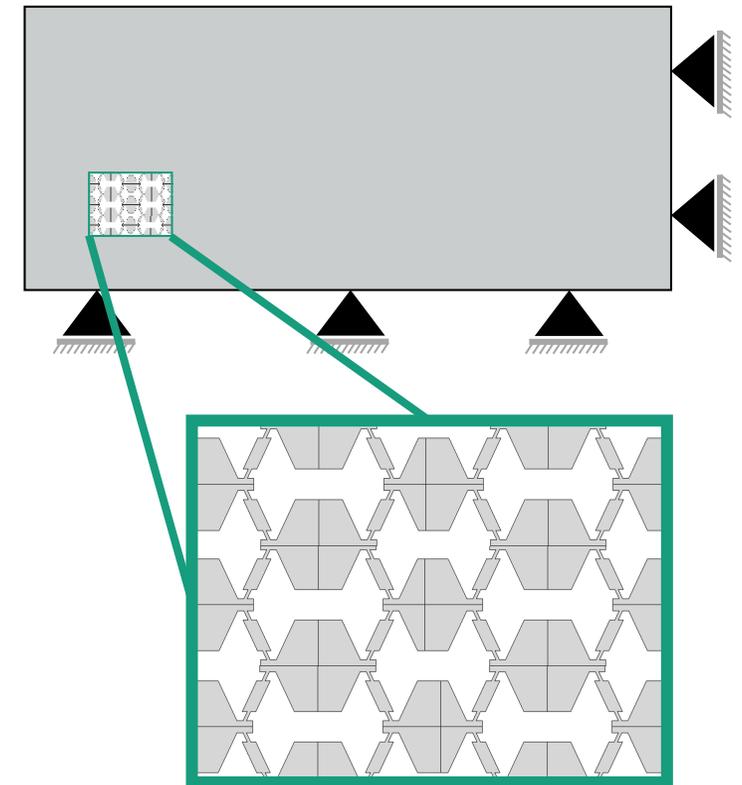


AGENDA

- Motivation
- Forschungsthemen
- Kompetenzfeld Formgedächtnispolymere
- Einheitszellenkonzept für Programmierbare Metamaterialien (PM)
 - Multiskalenoptimierung
 - Homogenisierung
 - Topologieoptimierung
- Pilotprojekt – Peristaltik
- Zusammenfassung und Ausblick

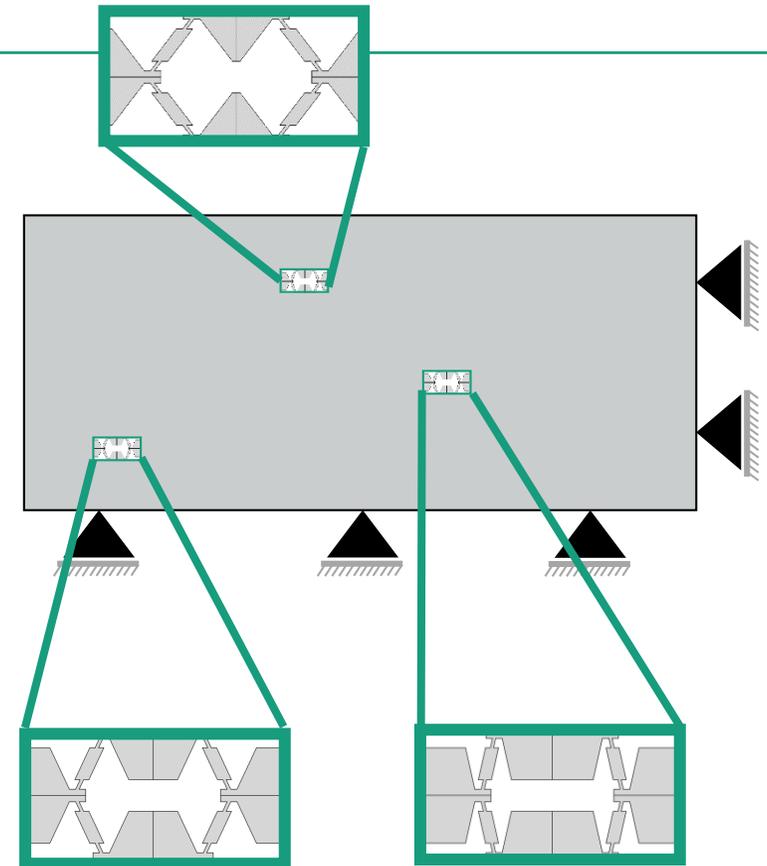
EINHEITSZELLENKONZEPT (1/3)

- Ein (mechanisches) PM kann als Verbund von Einheitszellen gleichen oder unterschiedlichen Typs aufgefasst werden, welche in einem Array angeordnet sind und miteinander kombiniert werden.
- Einheitszellen bestehen aus Balken, Gelenken, inneren Kontakten,
- Basismaterial: Metall, Elastomer, Polymer oder auch Formgedächtnislegierungen
- Implementierung verschiedener Funktionen und Effekte, u.a:
 - Auxetisches Material
 - Bistabilität
 - Adaptive Steifigkeit
 - Formgedächtniseffekte



EINHEITSZELLENKONZEPT (2/3)

- Durch Kombination vieler Einheitszellen (EZ) erhält man auf der Makroebene ein **Programmierbares Material**.
 - Skalenunterschied zwischen EZ und Bauteil hinreichend groß \rightarrow viele EZ ($100^3 \dots 1000^3$, oder mehr)
- Makroskopisches Materialverhalten wird durch Auswahl der EZ und ihrer Geometrieparameter bestimmt.
 - Dies führt zu Verhaltensmerkmalen, welche in einem natürlichen Material nicht zu finden sind.
 - Ermöglichen von reversiblen Schalten zwischen verschiedenen Zuständen (bspw. eben \leftrightarrow ausgebeult, weich \leftrightarrow steif)



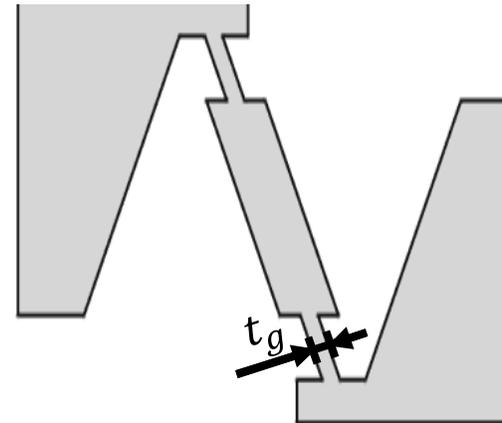
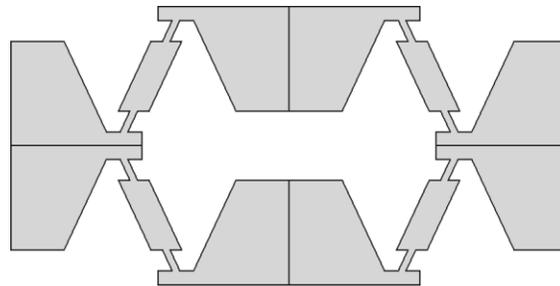
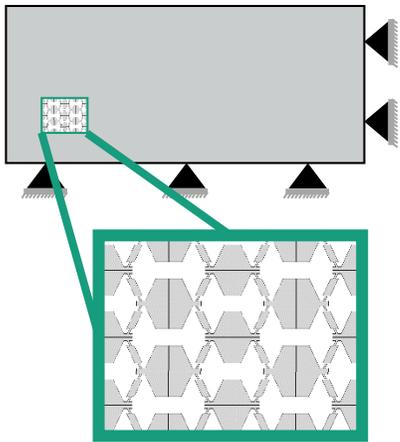
EINHEITSZELLENKONZEPT

(3/3)

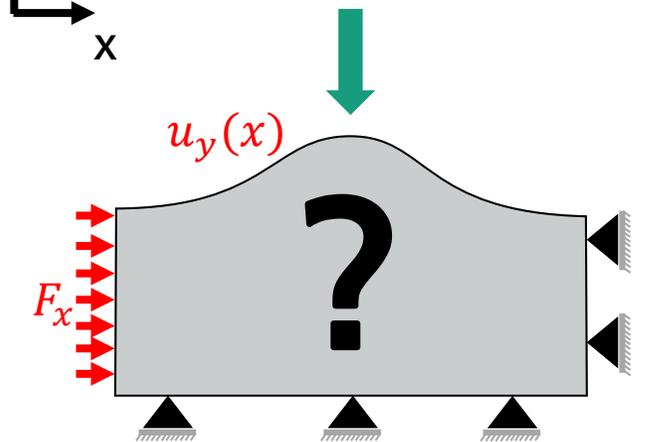
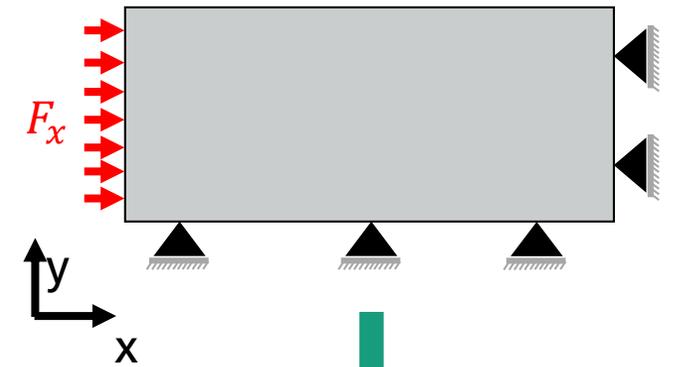
- Ein oder mehrere Geometrieparameter pro EZ → viele Möglichkeiten das Material anzupassen
- **Aber:** Viele Designvariablen führen zu einem komplexen Optimierungsproblem, welches eine numerische Lösung erfordert.
 1. Wie müssen die Geometrieparameter auf **Mikroebene** verteilt werden, um ein gewünschtes **makroskopisches** Verhalten zu erhalten?
→ Multiskalenoptimierung
 2. Wie muss die **Geometrie** der **Einheitszelle** aussehen, um gewünschte **Eigenschaften** (Steifigkeit, Querkontraktion, ausgeprägte Bistabilität) aufzuweisen und um ihre **Funktion robust** zu erfüllen?
→ Topologieoptimierung

MULTISKALENOPTIMIERUNG (1/6)

- Problemstellung: Bei einer äußeren Belastung F_x soll mein Material die äußere Verformung $u_y(x)$ aufweisen
 - Es soll eine Verteilung der Gelenkdicken $t_g(x, y)$ bestimmt werden, so dass das deformierte Einheitszellen-Verbund eine vorgegebene Form annimmt.
- Zielfunktion: Makroskopische Verformung
- Designvariablen: Geometrieparameter



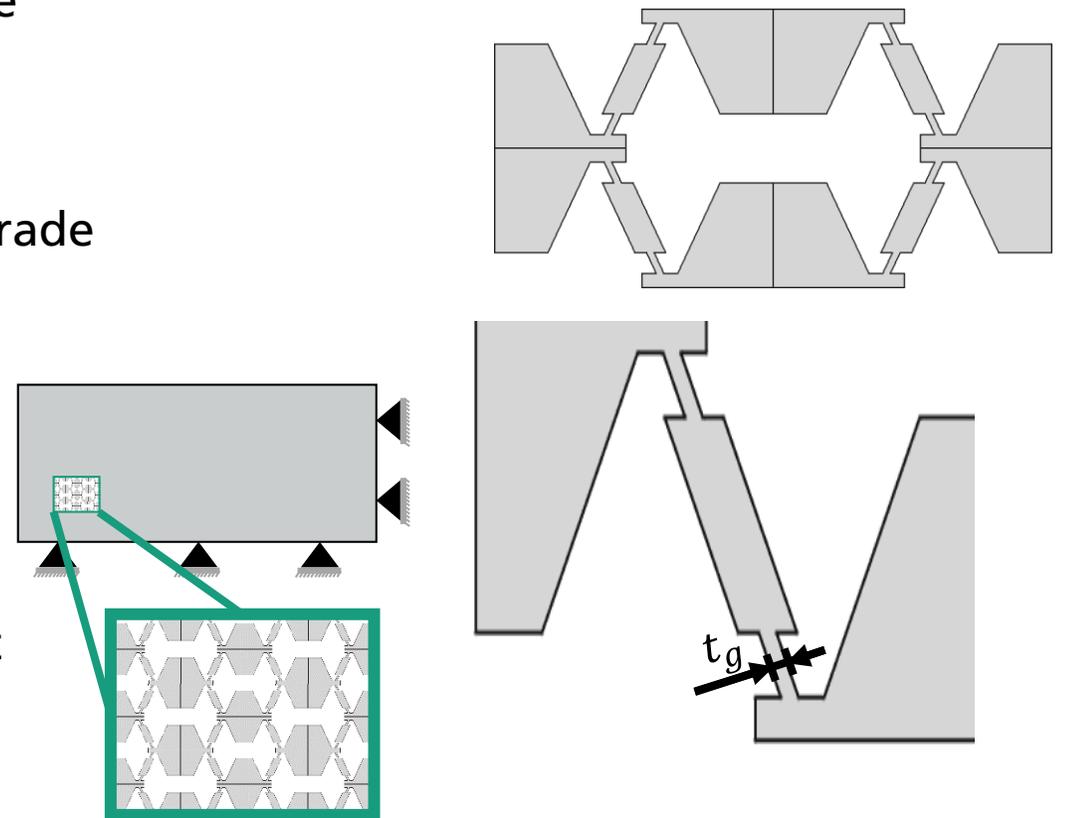
Trigger: mechanische Belastung



Programmierte äußere Form

MULTISKALENOPTIMIERUNG (2/6)

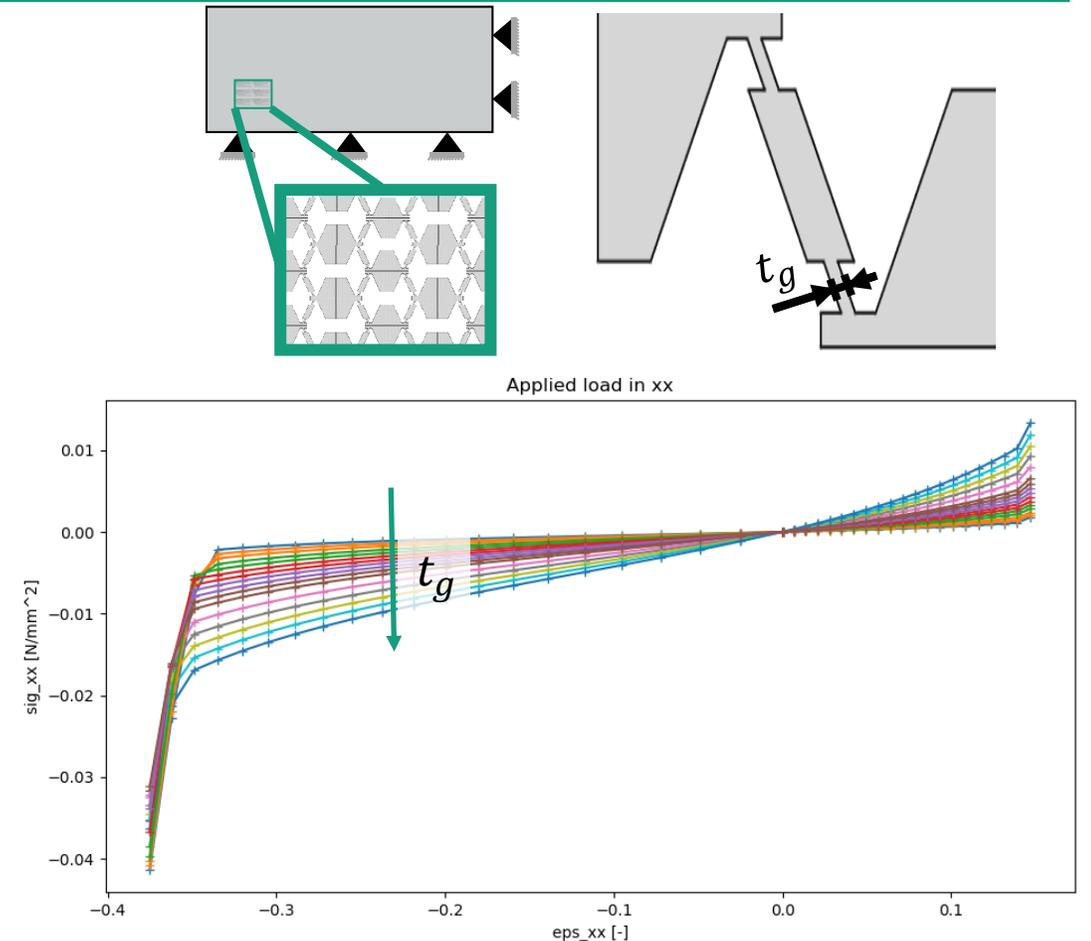
- Problem: Eine Simulation mit voll aufgelöster Geometrie bis auf Mikroebene ist sehr rechenaufwendig
 - Beispiel:
 - 100x100x100 Einheitszellen
 - ca. 10.000 Knoten pro Zelle
 - 3 Freiheitsgrade pro Knoten
- } 30×10^{10} Freiheitsgrade
(30 Milliarden)
- In jedem Optimierungsschritt muss die Struktursimulation durchgeführt werden
 - Rechenzeiten von mehreren Tagen möglich
- Idee: **Homogenisierung** des mechanischen Verhaltens der Einheitszelle und Simulation des Arrays mit dem **Ersatzmodell** der homogenisierten EZ



MULTISKALENOPTIMIERUNG - HOMOGENISIERUNG

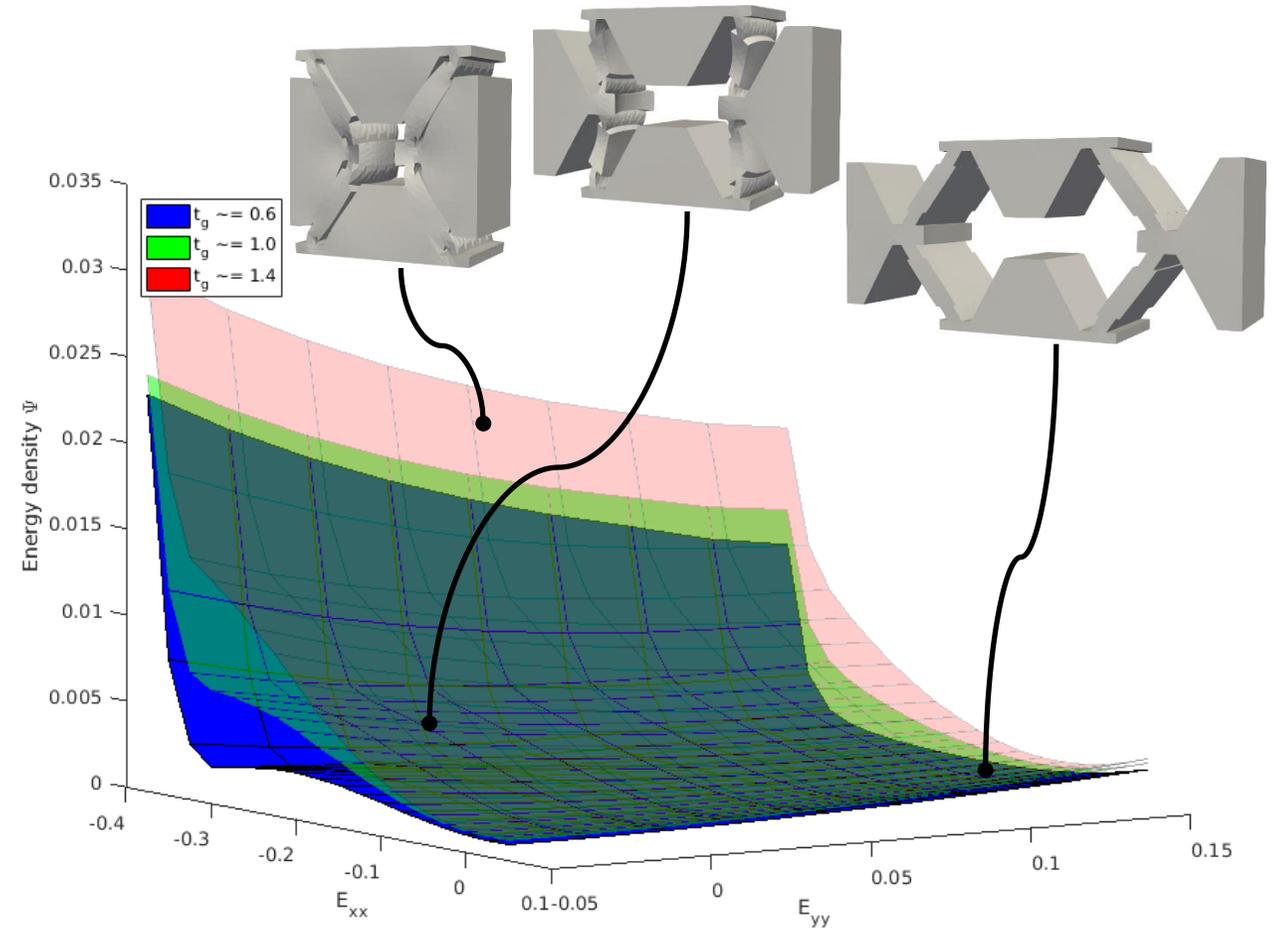
(3/6)

- EZ wird als repräsentativen Volumenelementen (RVE) für ein PM aufgefasst
- Mech. Deformation des RVE abhängig vom Belastungszustand und den Geometrieparametern (hier: t_g)
- Aufstellen eines Ersatzmodells für das RVE
 - Datenbasierter Ansatz
 - Erzeugung von Datenpunkten für jede EZ



MULTISKALENOPTIMIERUNG - HOMOGENISIERUNG (4/6)

- Erzeugung von Datenpunkten:
 - Gegeben:
 - t_g : EZ Gelenkdicke
 - $[E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, E_{xy}, E_{xz}, E_{yz}]$: Verzerrungsfeld
 - Gesucht:
 - Ψ : Spannungs-Verzerrungs-Energie in der EZ
 - $\Psi = \Psi[t_g, E_{xx}, E_{yy}, E_{zz}, E_{xy}, E_{xz}, E_{yz}]$
 - Interpolation zwischen den Datenpunkten im R^7 (oder höher)
 - Spannungen und Steifigkeiten erhält man aus den Ableitungen
- Es sind sehr viele Datenpunkte notwendig (und somit Simulationen ($1 \times 10^3 \dots 1 \times 10^4$))
→ Nutzung von Fraunhofer Rechenzentren
- Hohe Nichtlinearität der EZ stellen eine Herausforderung dar.

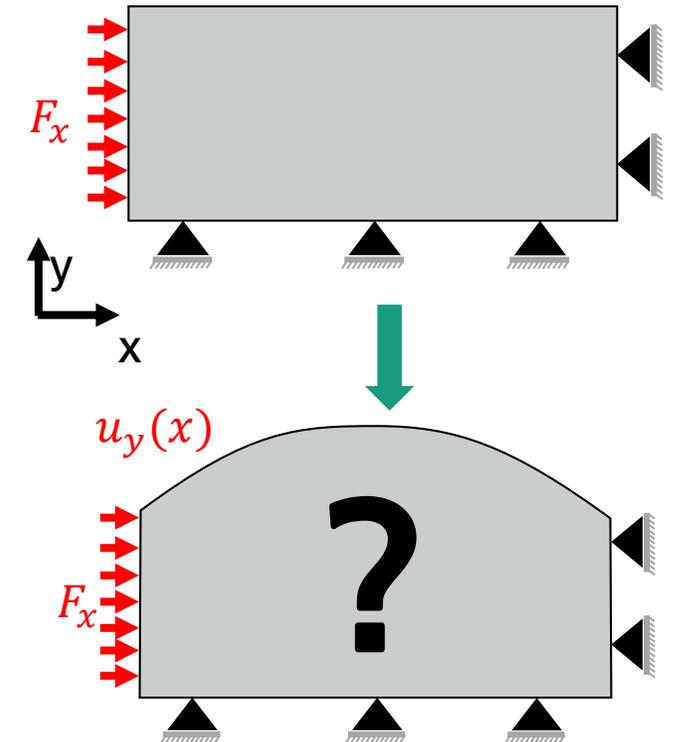


MULTISKALENOPTIMIERUNG - BEISPIEL

(5/6)

- Versuchsaufbau:
 - Array aus 20x10 EZ
 - Loslagerung am rechten und unteren Rand
 - Seitliche Linienlast F_x
- Zielfunktion:
 - Parabelförmige Verschiebung am oberen Rand
- Designvariable:
 - E-Modul der Einheitszellen

Trigger: mechanische Belastung



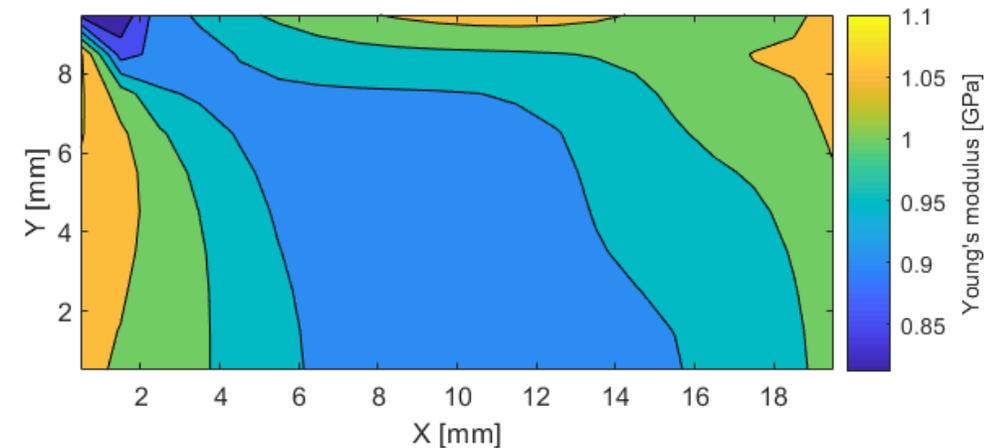
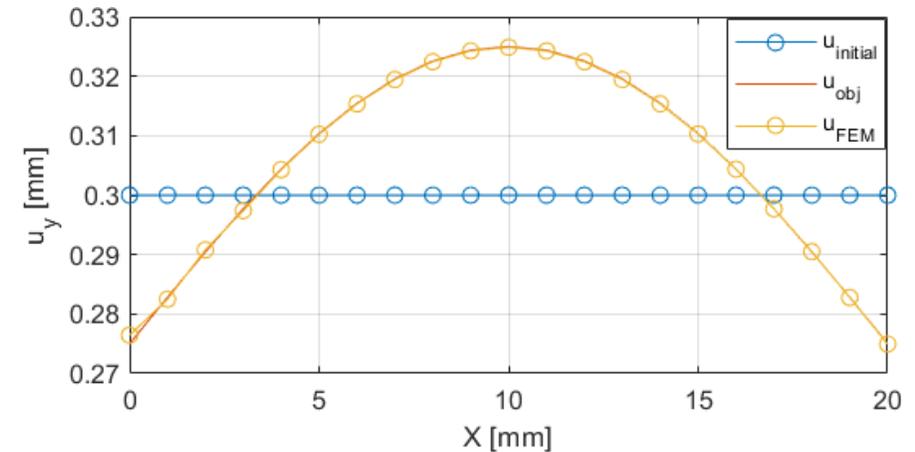
Programmierte äußere Form

MULTISKALENOPTIMIERUNG – BEISPIEL

(6/6)

■ Ergebnis:

- Konvergenz nach ca. 20 Iterationen
- Bis auf eine kleine Abweichung am Rand wird die Zielfunktion sehr gut getroffen
- Mit Hilfe der Homogenisierung kann das Optimierungsproblem innerhalb weniger Sekunden gelöst werden
- Selbst bei dieser einfachen Problemstellung ist die errechnete Verteilung der Designvariable nicht trivial



TOPOLOGIEOPTIMIERUNG (1/3)

- Problemstellung: Wie muss meine Einheitszelle aussehen, um sich stark auxetisch zu verhalten?
→ Es soll eine Materialverteilung bestimmt werden, so dass die Einheitszelle die gewünschten mech. Eigenschaften aufweist.
 - Zielfunktion: Mechanisches Verhalten der Einheitszelle
 - Designvariable: Materialverteilung
- Erstellung eines Kataloges von Einheitszellen
- Optimieren bestehender EZ hinsichtlich der Robustheit ihrer Funktion durch Berücksichtigung von Fertigungsungenauigkeiten

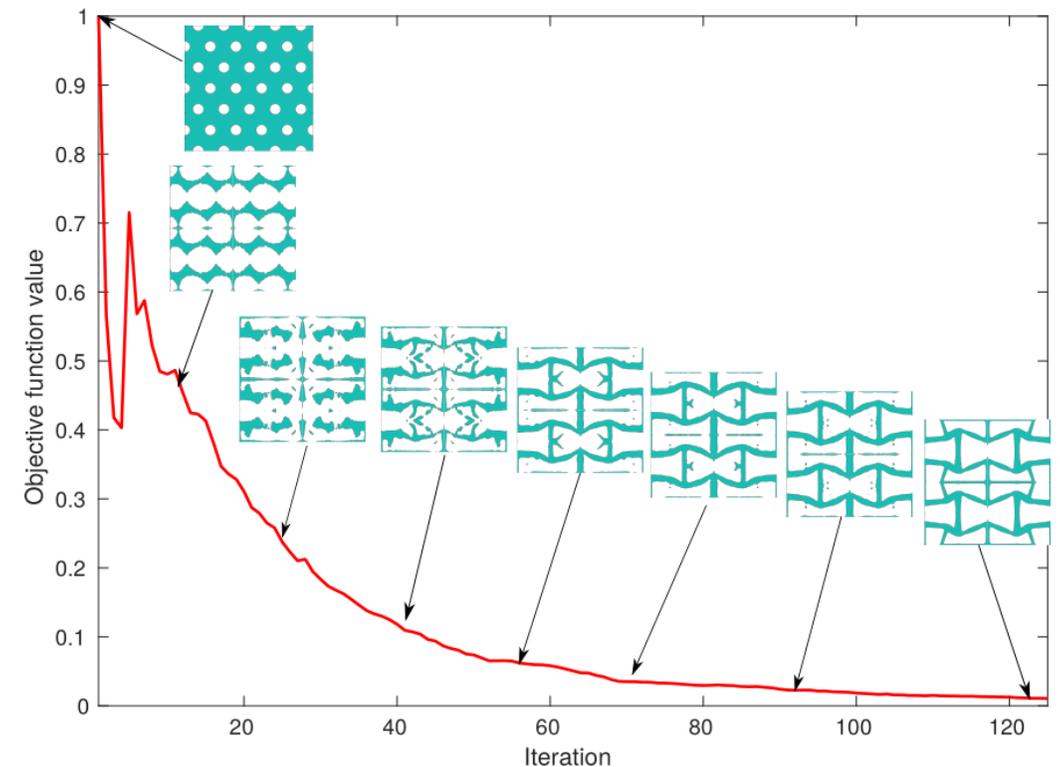


Abb: Topologieoptimierung einer auxetischen Einheitszelle [1]

[1] Nguyen, Chuong V. et al. "Three-dimensional topology optimization of auxetic metamaterial using isogeometric analysis and model order reduction." ArXiv abs/1908.11449 (2019): n. pag.

TOPOLOGIEOPTIMIERUNG – BEISPIEL

(2/3)

■ Versuchsaufbau:

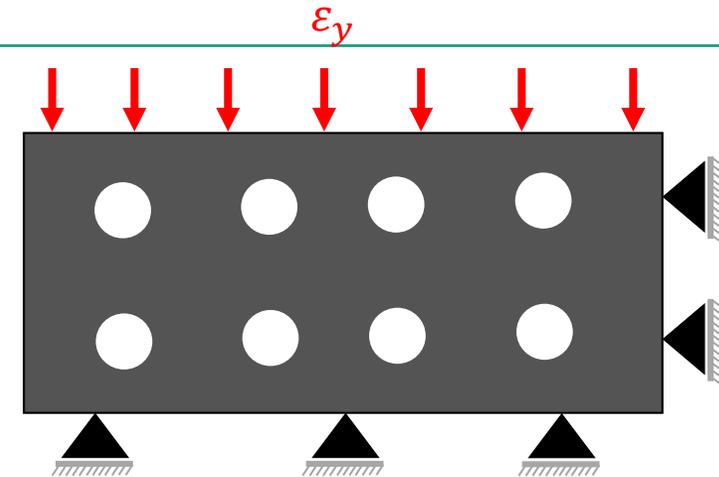
- Struktur mit Poren, 240x120x60 Voxel
- Porosität im undeformierten Zustand: $\Phi_0 = 8.78\%$

■ Zielfunktion:

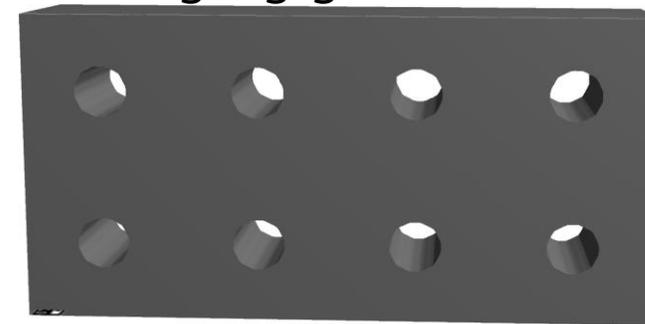
- Maximales Schließen der Poren unter der Last $\varepsilon_y \approx 20\%$
→ $\min \left[\frac{\Phi_F}{\Phi_0} \right]$, Φ_0, Φ_F : Porosität des undeformierten und deformierten Zustandes

■ Designvariable:

- Materialverteilung bei konstanter Porosität Φ_0



Ausgangsgeometrie A



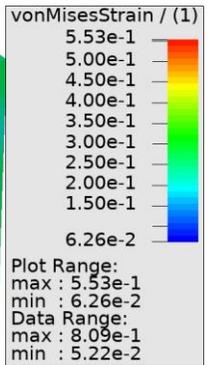
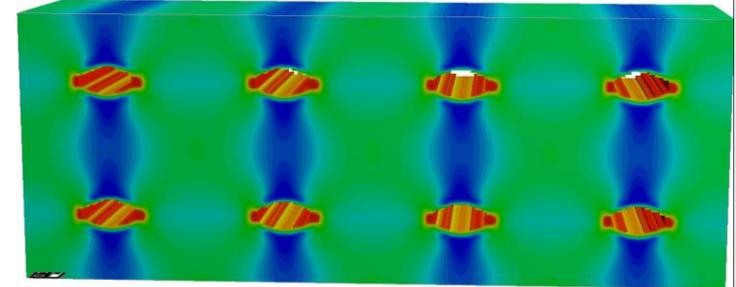
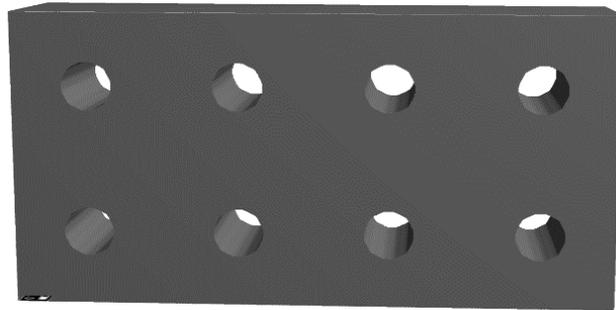
TOPOLOGIEOPTIMIERUNG – BEISPIEL

(3/3)

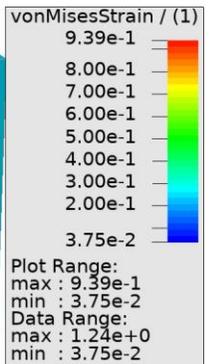
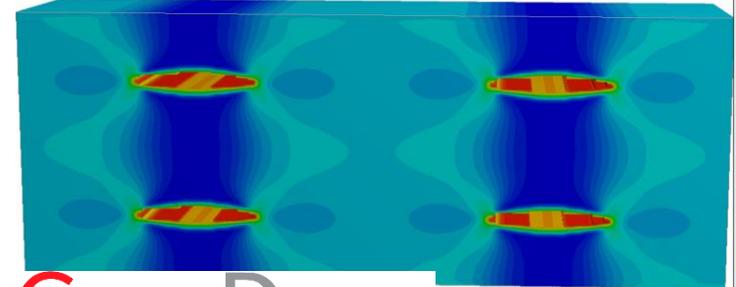
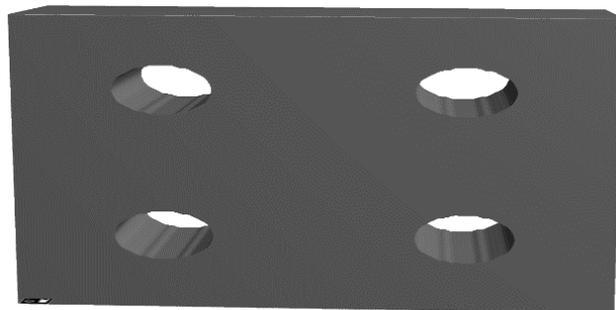
Ergebnis:

- Durch Veränderung von Geometrie und Anzahl der Poren wird die Zielfunktion minimiert

Ausgangsgeometrie A, $\frac{\Phi_F}{\Phi_0} = 0.53$



Optimierte Geometrie B, $\frac{\Phi_F}{\Phi_0} = 0.32$

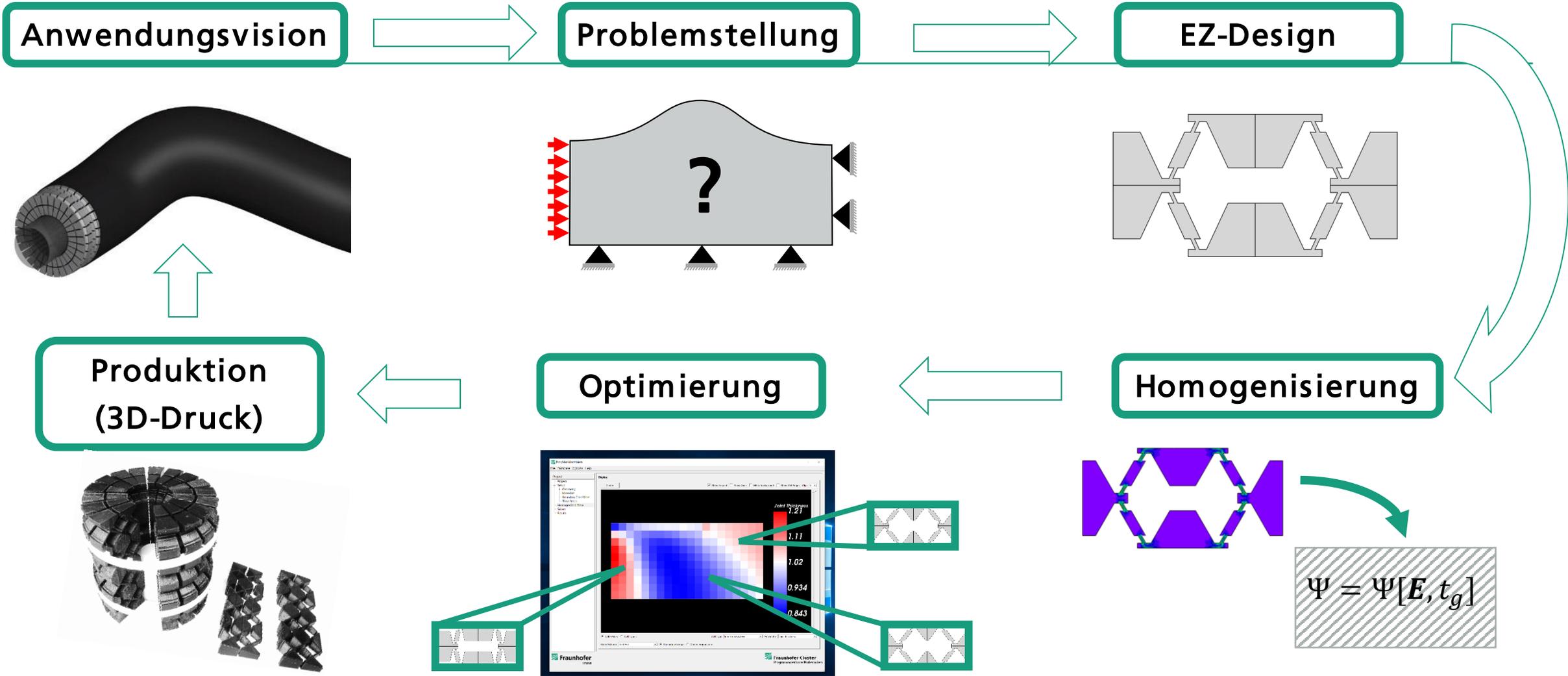


GEO DICT

AGENDA

- Motivation
- Forschungsthemen
- Kompetenzfeld Formgedächtnispolymere
- Einheitszellenkonzept für Programmierbare Metamaterialien (PM)
 - Multiskalenoptimierung
 - Homogenisierung
 - Topologieoptimierung
- Pilotprojekt – Peristaltik
- Zusammenfassung und Ausblick

PILOTPROJEKT - PERISTALTIK



ZUSAMMENFASSUNG

- **Programmierbare Materialien eröffnen große Möglichkeiten im Umgang mit Werkstoffen ...**
 - Substitution ganzer Systeme durch ein PM
 - Große Freiheit im Materialdesign, Materialeigenschaften mit großen lokalen und zeitlichen Gradienten
- **...sowie neue Herausforderungen**
 - Hohe Komplexität durch vielfältige Möglichkeiten der Einflussnahme
 - Kompetenzen im Bereich Design/Konstruktion, Simulation/Optimierung und Werkstofftechnik/Fertigung werden im CPM vereint
- Erarbeitung von Workflows für den Umgang mit PM und die Einbettung in klassische Konstruktionsprozesse
- Entwicklung von Werkzeugen und Algorithmen zur Simulation und Optimierung von PM
- Fertigung von Demonstratoren

AUSBLICK

- Weiterentwicklung Algorithmen und Werkzeugen, um PM beherrschbarer zu machen
 - Modellierung und Optimierungsalgorithmen
 - Fertigung und Skalierung (Fertigung von sehr vielen und/oder sehr kleinen Einheitszellen)
- Insbesondere für mögliche Anwendungen ist Input aus der Industrie wichtig
 - Bedarf/Notwendigkeit an einer Lösung mit PM in einer Anwendung ist oft nur für Experten auf diesem Gebiet sichtbar

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



- Fraunhofer Cluster of Excellence Programmable Materials:
<https://www.fraunhofer.de/en/research/key-strategic-initiatives/programmable-materials.html>
- Fraunhofer-Forschungscluster Programmierbare Materialien:
<https://www.fraunhofer.de/de/forschung/prioritaere-strategische-initiativen/programmierbare-materialien.html>