
Programmierbare Materialien – Materialien der Zukunft?

Prof. Dr. Alexander Böker

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Potsdam-Golm
Lehrstuhl für Polymermaterialien & Polymertechnologien, Universität Potsdam



Vision: Programmierbare Materialien

Die Innere Struktur des Materials bestimmt Form & Funktion



Quelle: Claytronics@Carnegie Mellon Pittsburgh, <http://www.cs.cmu.edu/~claytronics/>

Vision: Programmierbare Materialien Maßgeschneiderte Bauteilfunktionen nach Bedarf

Möglichkeit zur **lokalen Gestaltbarkeit der Werkstoffe und ihrer Eigenschaften** konsequent **weiterdenken** und im Entwicklungsprozess nutzen.

Funktionales Bauteildesign – Designparameter:

- an Stelle fester äußerer Geometrie und Materialauswahl (mit gegebenen Eigenschaften)
- tritt innere mikroskopische Materialstruktur, die programmierbare makroskopische Materialeigenschaften ermöglicht

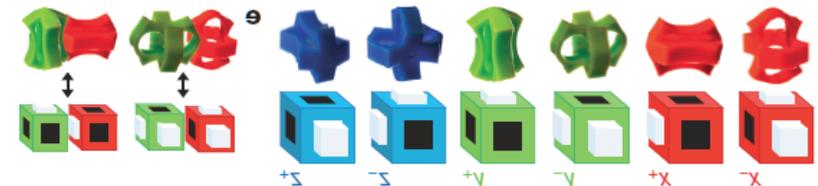


C. Coulais, et al. Nature 535 (2016) 529

Innere Struktur von **Materialien zu programmieren**, ermöglicht einen **Paradigmenwechsel im Designprozess**

Herausforderungen:

- **Materialien selbst einstellbar/programmierbar machen**
- höchste **Kontrolle über Materialien auf kleinen Längenskalen**
- **Entwicklungsplattform**, um Systemfunktionalität auf das Material herunterbrechen



Neue Gestaltungsmöglichkeiten

Wie unterscheiden sich Programmierbaren Materialien von bisherigen technischen Lösungen?

Innerhalb desselben **Programmierbaren Materials können** lokal **verschiedene Funktionen** durch das **Design der inneren Struktur** integriert werden.

Ein makroskopisch homogen erscheinendes Material kann über eine komplexe programmierbare innere Mikrostruktur verfügen.

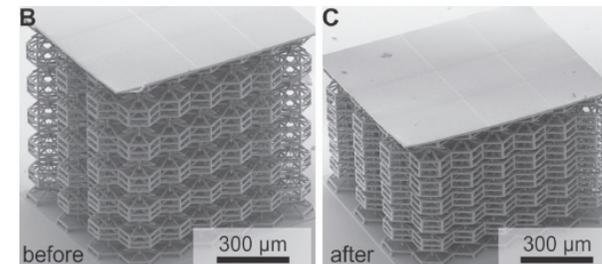
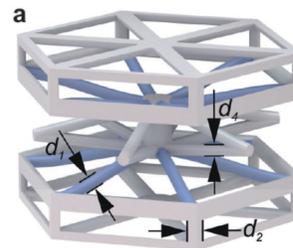
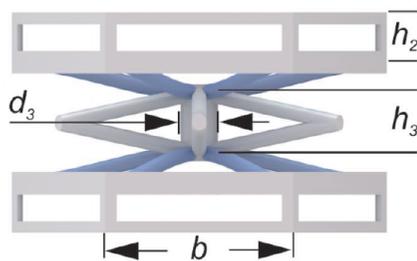
- **Materialeigenschaften** wie mechanische Eigenschaften, Transporteigenschaften oder Farbe sind **nach Bedarf veränderlich**.
- Programmierbare Materialien **passen sich automatisch** an sich **verändernde Bedingungen** in einer vorherbestimmten Weise an.
- Einfache **Systeme** aus Sensoren, Signalverarbeitung, Strukturbauteilen und Aktuatoren können **durch ein Programmierbares Material ersetzt** werden.

Auf dem Weg zur Programmierung: Wirkprinzipien

1. Mikromechanisch programmierbare Meta-Materialien mit mechanischen Triggern

Instabilität von Beul-Elementen als Bausteinen eines Metamaterials führt bei daraus aufgebauten Metamaterial-Devices zu:

- reversibler plastischer Verformung (vs. irreversible Verformung von Metallen)
- dehnratenunabhängiger Energiedissipation (vs. Viskoelastizität)
- veränderbarer elastischer Antwort



T. Frenzel, C. Findeisen, M. Kadic, P. Gumbsch and M. Wegener. Adv. Mater. 28 (2016) 5865, Bildquelle: Fraunhofer IWM

Auf dem Weg zur Programmierung: Wirkprinzipien

2. Chemisch erzeugte programmierbare Materialien mit nicht-mechanischen Triggern

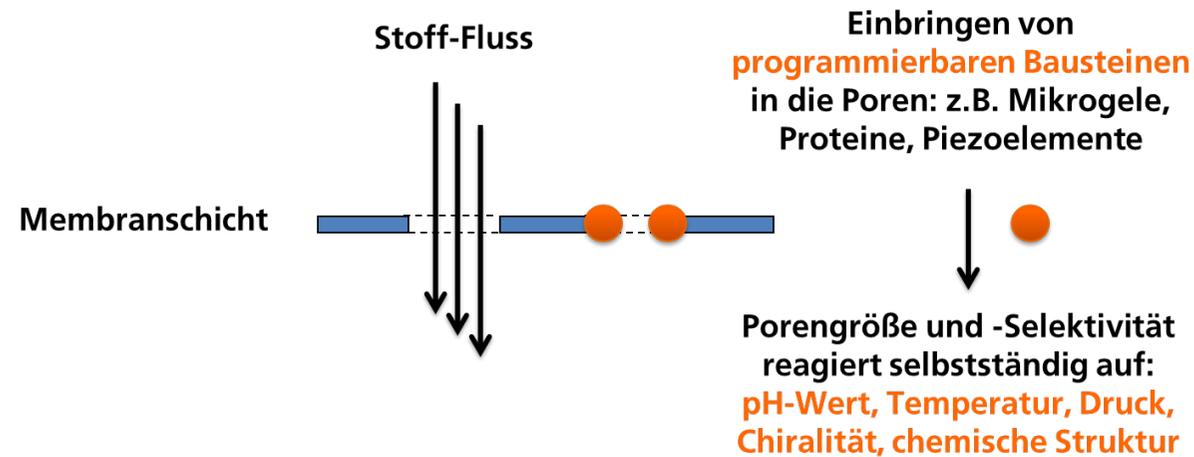
Die Programmierbarkeit basiert zumeist auf komplexen Mikrostrukturen (Domänen mit unterschiedlichen thermischen Übergängen, Kombination mikroporöser Strukturen mit thermisch oder pH-sensitiven Gelen, Einbau komplexer molekularer lichtsensitiver Einheiten in Netzwerke oder Kombinationen aus den Vorgenannten).

Beispiele:

- Polymer-basierte Materialien mit programmierbarem Mehrwege- oder reversiblen Formgedächtniseffekt
- Materialien mit programmierbarer durch Lichteinstrahlung veränderbarer Oberflächenreibung
- Mikrofiltrationsmembranen mit Mikrogelen oder Proteinen gefüllten Poren → programmierbare Permeabilität
- 3D gedruckte Strukturen mit programmierbarem Formgedächtniseffekt (4D-Druck)

Im Fokus der Forschung

Programmierbare Permeabilität

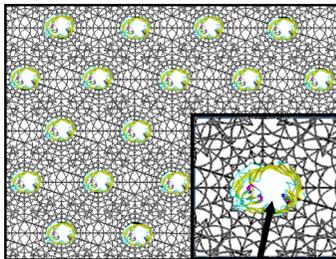


- Stoffdurchlässigkeit kann durch variable Porengröße variiert werden
- Filtermaterial steuert seine Eigenschaften in der Anwendung selbständig in Abhängigkeit von pH-Wert, Temperatur oder Druck etc.
- Die Kombination mit mechanischer Programmierung durch eine innere Strukturierung ermöglicht eine Verstärkung dieser Effekte, z.B. für Selbstreinigung oder Überdrucksteuerung, bis hin zu Enantiomeren-Trennung

Beispiel: Ultradünne funktionale Protein-Polymer Membranen

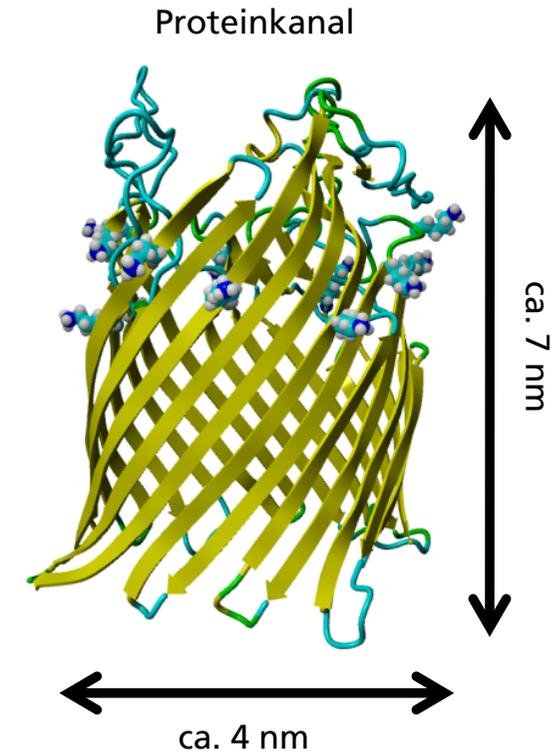
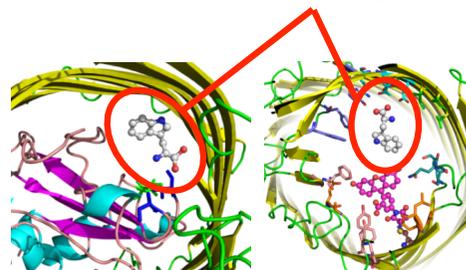
- Natürliche Proteinkanäle (z.B. aus E. coli) fungieren als Poren in einer Kunststoffschicht
- Die Membranen können auf unterschiedliche *Selektivitäten programmiert* werden: Separation aufgrund von:
 - Größe, Ladung, intermolekularen Wechselwirkungen oder *Chiralität (Enantiomerentrennung)*

Membran von oben



Porendurchmesser: 3-4 nm

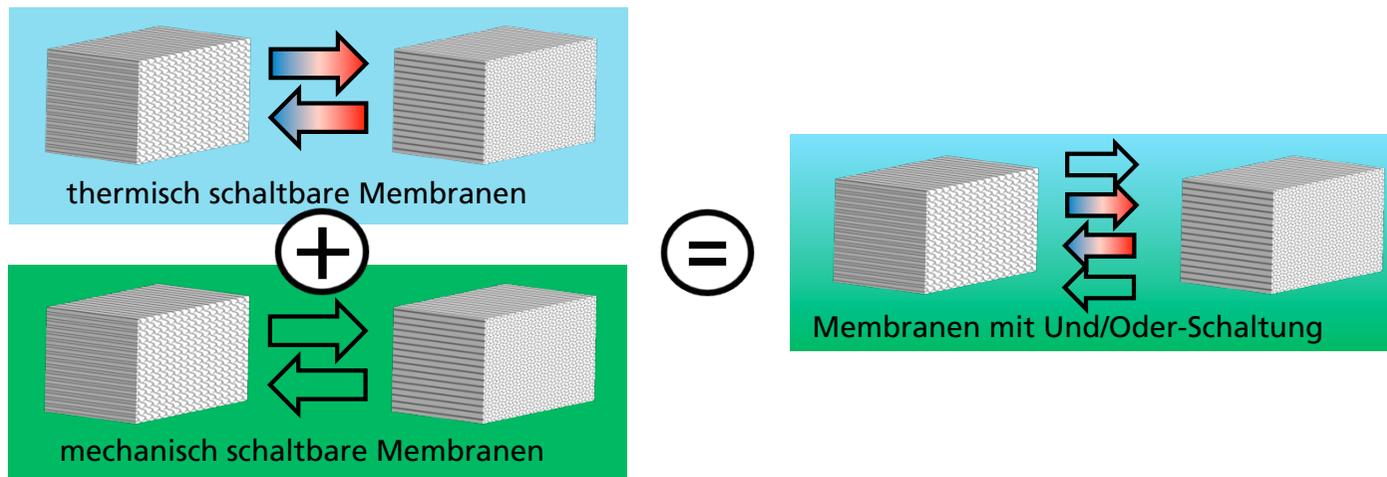
Chirale Region



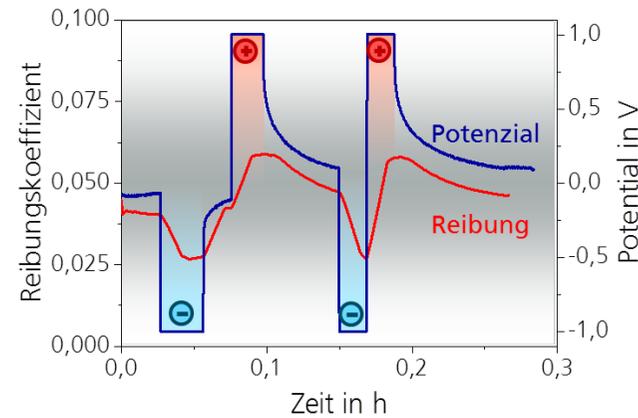
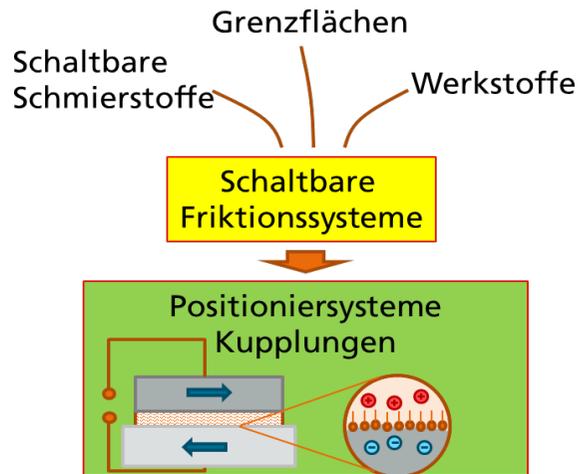
Biomaterials **2016**, 107, 115-123; Soft Matter **2017**, im Druck; Patentanmeldung EP16160714.8

Beispiel: Thermisch und mechanisch Programmierung von Membranen

- Programmierung von Membranmaterialien zwecks Realisierung von Formgedächtniseigenschaften (Einweg- und Zweiweg-Effekten)
- Veredelung von Membranmaterialien mit Metamaterialien
- Realisierung thermisch und/oder mechanisch schaltbarer Membranen zur Kontrolle der Porosität/ Permeabilität
- Verbesserung der Reinigungsleistung bspw. für Antifouling-Behandlungen



Im Fokus der Forschung Programmierbare Reibung, Kupplungs- und Positioniersysteme



Bildquelle: Fraunhofer IWM

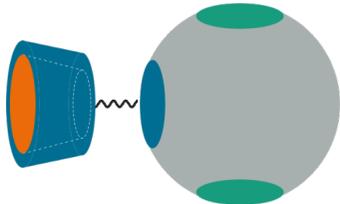
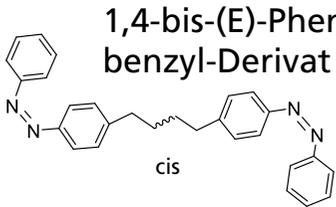
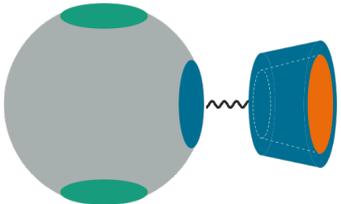
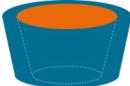
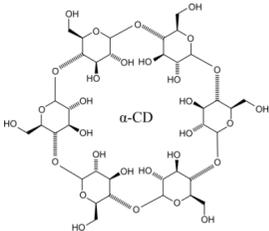
Lösungsansatz

Durch lokale Programmierung der Oberflächeneigenschaften und ionische Flüssigkeiten in Schmierstoffen können **Reibung durch elektrische Felder steuerbar** gemacht werden. Dies erlaubt die Konzeption „ruckfreier“ Kupplungen.

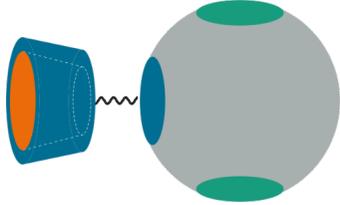
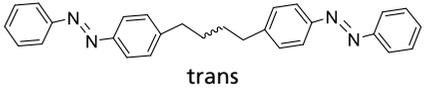
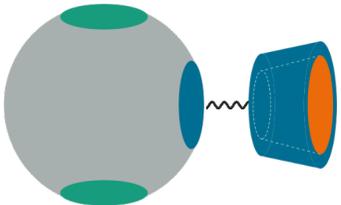
Lokale Ausrüstung der Oberflächen mit reversiblen Vernetzern erlaubt **optische Reibungssteuerung** in Präzisions-Positioniersystemen.

Beispiel: Optisch schaltbare Reibung für Positioniersysteme

α -Cyclodextrin



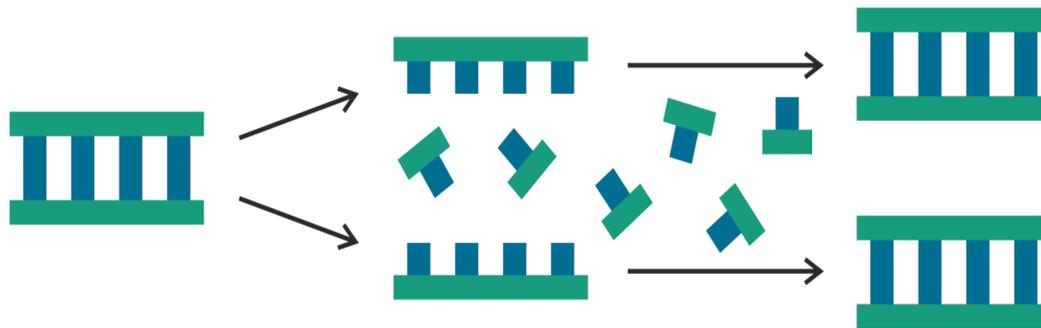
350nm \rightleftharpoons 450nm



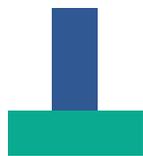
Das Konzept der Natur der Programmierung – DNS

Programmierte Bausteine

- Künstliches Material kann sich selbst replizieren
⇒ Analogie zur Polymerase Kettenreaktion zur DNS-Vervielfältigung



- **Voraussetzung:** *multi-direktionale Wechselwirkungen der Bausteine – hier: Trivalenz*



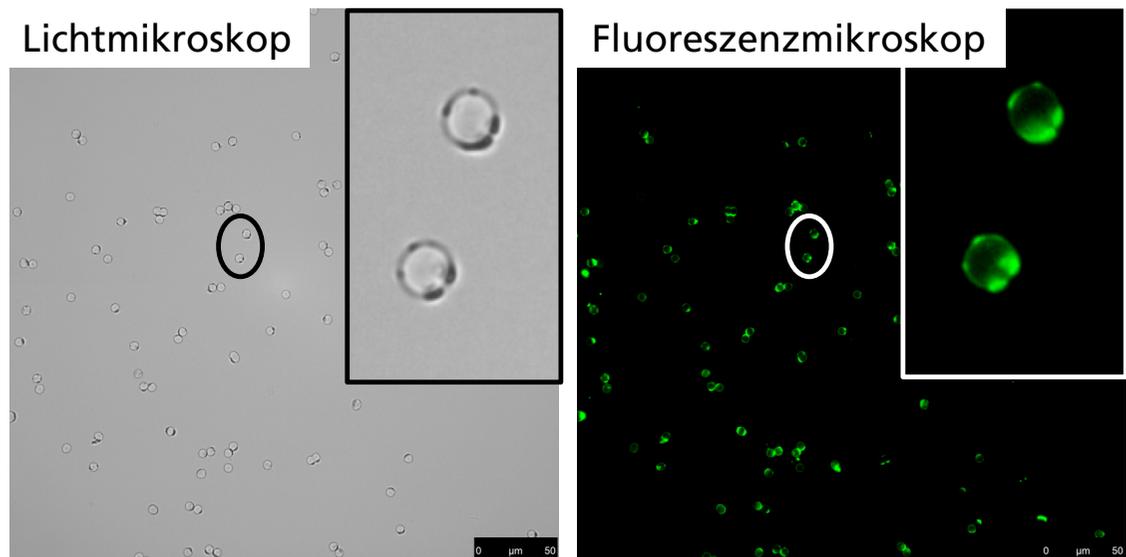
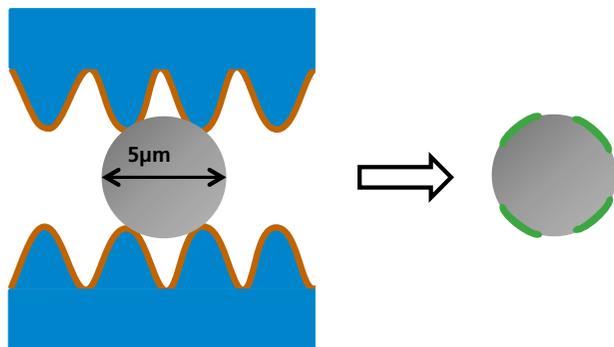
Nukleobase
(reversibel)
Phosphodiester-
Rückgrat (irreversibel)



Tri-valenter Kolloid
(Nano bis Mikro)

Beispiel: Multiple Patches zur Erkennung/Programmierung auf Kolloiden

- Skalierbare Drucktechnik
- $\lambda(\text{Patch}) \approx 1 - 3 \mu\text{m}$



Proof of Concept: 5 μm Partikel bedruckt von zwei Seiten mit fluoreszierendem Polymer

Programmierbare Materialien

Anwendungen und Antworten auf gesellschaftliche Herausforderungen

- Abwasseraufbereitung
- Pharmaindustrie/Wirkstoffreinigung
- Lebensmittelindustrie (z.B. Molkereiprodukte)
- Organ-Assist-Systeme
- Bioanalytik
- Controlled Release Systeme
- Positioniersysteme (Mikromechanik, Maschinenbau,)
- Pump- und Dosiersysteme (Medizintechnik,)
- Wärmemanagementsysteme (Gebäude, Kleidung)



1. Gesundheit, demografischer Wandel und Wohlergehen
2. Ernährungs- und Lebensmittelsicherheit
3. Sichere, saubere und effiziente Energie
4. Klimaschutz, Umwelt, Ressourceneffizienz und Rohstoffe

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fraunhofer IAP

Wissenschaftspark Potsdam-Golm

Geiselbergstr. 69

14476 Potsdam

Telefon +49 331 568-1112

Fax +49 331 568-3000

E-Mail alexander.boeker@iap.fraunhofer.de

www.iap.fraunhofer.de