

SMARTE ADAPTIVE MATERIALIEN UND AGENTEN

PD Dr. Stefan Bosse

University of Koblenz-Landau, Fac. Computer Science
University of Bremen, Dept. Mathematics & Informatics

6.3.2019

sbosse@uni-bremen.de

INHALT

1. Einführung
2. Optimierung und Adaptierung
3. Verteilte Systeme und Agenten
4. Das Multiagentensystem
5. Das Experiment und Simulation
6. Zusammenfassung
7. Referenzen

EINFÜHRUNG

SMARTE MATERIALIEN

Ein intelligentes Material bietet die folgenden Hauptmerkmale:

Wahrnehmung

Perzeption unter Verwendung verschiedener Arten von Sensoren, z. B. Messen von Dehnung, Verschiebung, Temperatur, Druck und Kräften;

Änderung

Änderung lokaler Material- und Struktureigenschaften durch Aktuatoren, z. B. Steifigkeits- oder Dämpfungsänderung;

Integrierte Informations- und Kommunikationstechnologien

Datenverarbeitung, Sensorfusion, Steuerung, Maschinelles Lernen

Verteilter Ansatz

Lokale Sensorverarbeitung und Aktuatorsteuerung - Globale Zusammenarbeit und Koordination.

Self-* Fähigkeit

Robustheit, Selbstorganisation, Selbstadaptivität, Selbstheilung

SMARTE MATERIALIEN

Smarte Materialien: Fusion von Sensorischen- und Adaptiven Materialien mit Informationsverarbeitung

Sensorisches Material

Ein Material oder Struktur mit integrierter **Sensorik** und **Datenverarbeitung** (ICT)

Adaptives Material

Ein Material mit integrierter Sensorik, Datenverarbeitung und **Aktoren**, die Materialeigenschaften steuern und ändern können

Robotisches Material

Ein Material oder eine Struktur mit integrierter Sensorik, Datenverarbeitung und **Aktoren**, die Materialeigenschaften oder Strukturformen steuern und ändern können

Adaptronisches Material

Synonym für robotisches Material (oder vice versa)

SMARTE MATERIALIEN

Skalen

Mikroebene

Eigenschaften und Strukturgrößen der Materialien und Werkstoffe

Mesoebene

Eigenschaften und Strukturgrößen von Mikrosystemen

Makroebene

Eigenschaften und Strukturgrößen von robotischen Systemen

Stellvariablen

1. Struktureigenschaften (Netzwerkstrukturen)
2. Mechanische und Materialeigenschaften

SMARTE MATERIALIEN

Aktoren

Thermisch stimulierte Polymere (Thermoplaste), optisch stimulierte Polymere, aktiv angetriebene Mikroaktoren, Ferrofluide, ..

Sensoren

Temperatur, Dehnung, ..

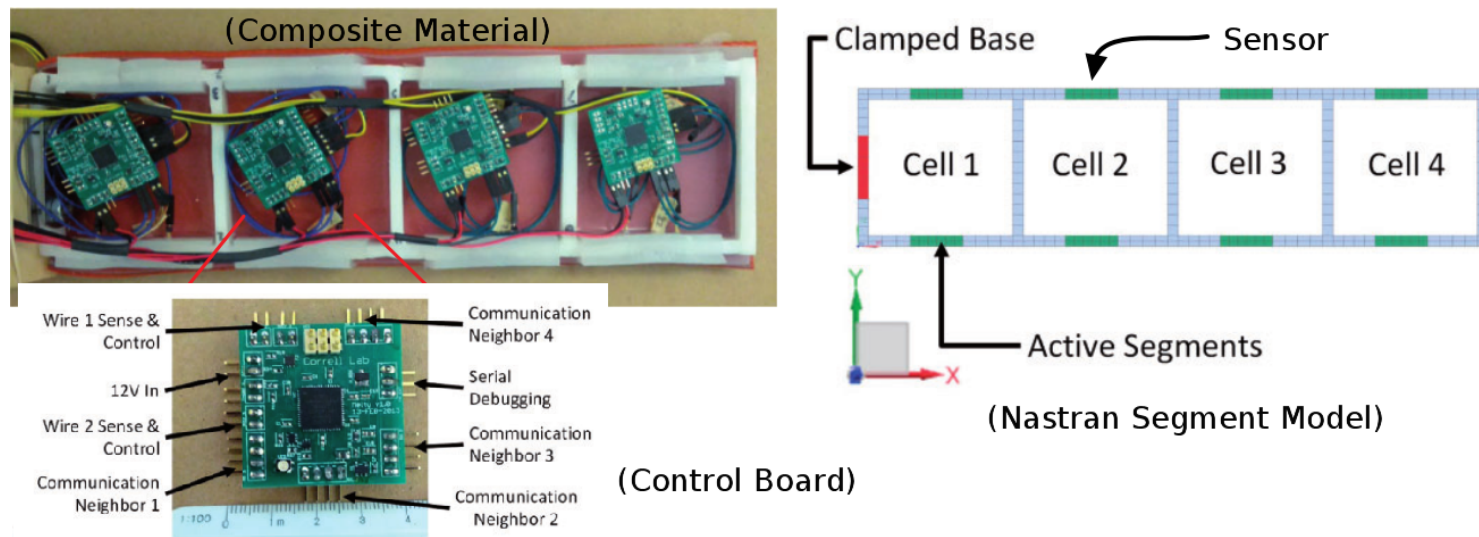


Abb. 1. Beispiel einer adaptiven robotischen Struktur (Mesoebene, Thermoplaste und Dehnungssensoren in Balkenstruktur) [1]

SMARTE MATERIALIEN

Bioinspirierter Ansatz

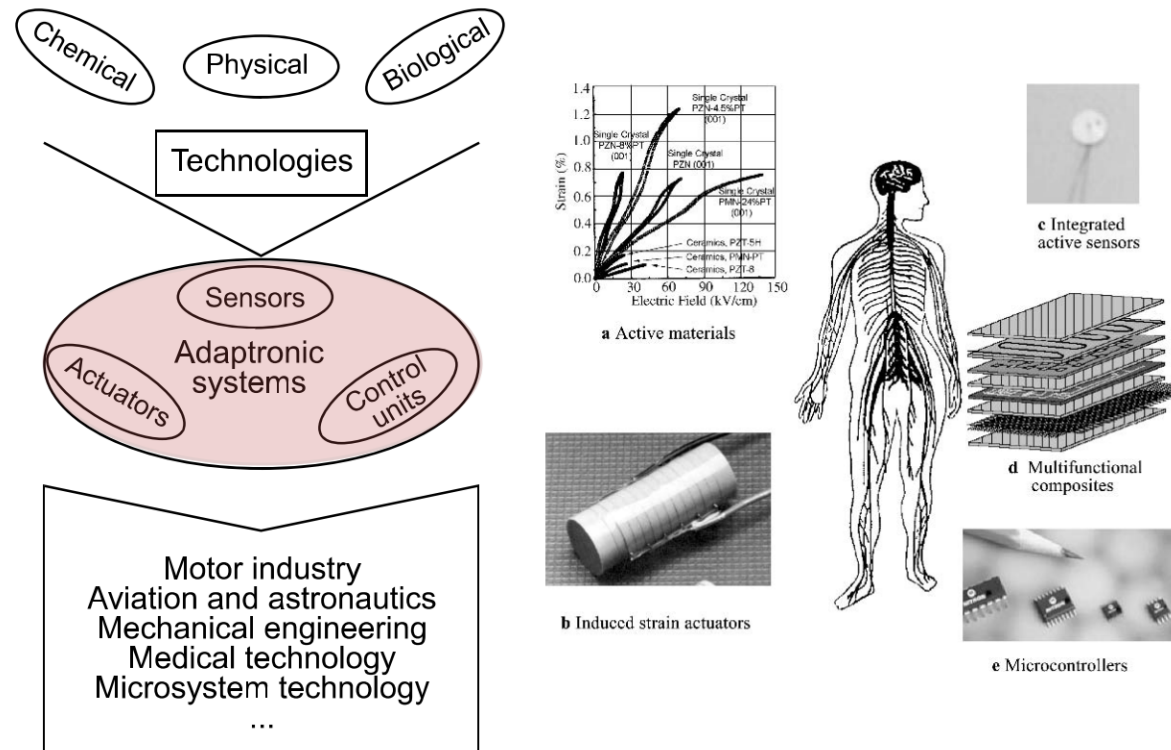


Abb. 2. Der bioinspirierte Ansatz für robotische Strukturen: a) aktive Materialien, b) induzierte Dehnungsaktuatoren, c) integrierte aktive Sensoren; d) multifunktionale Kompositionen, e) Mikrocontroller [8]

SMARTE MATERIALIEN

Photosensitive Polymere

- » Unter Einfluss von (UV) Licht verändert sich die Verkettung von Polymeren was zu einer Formänderung führt

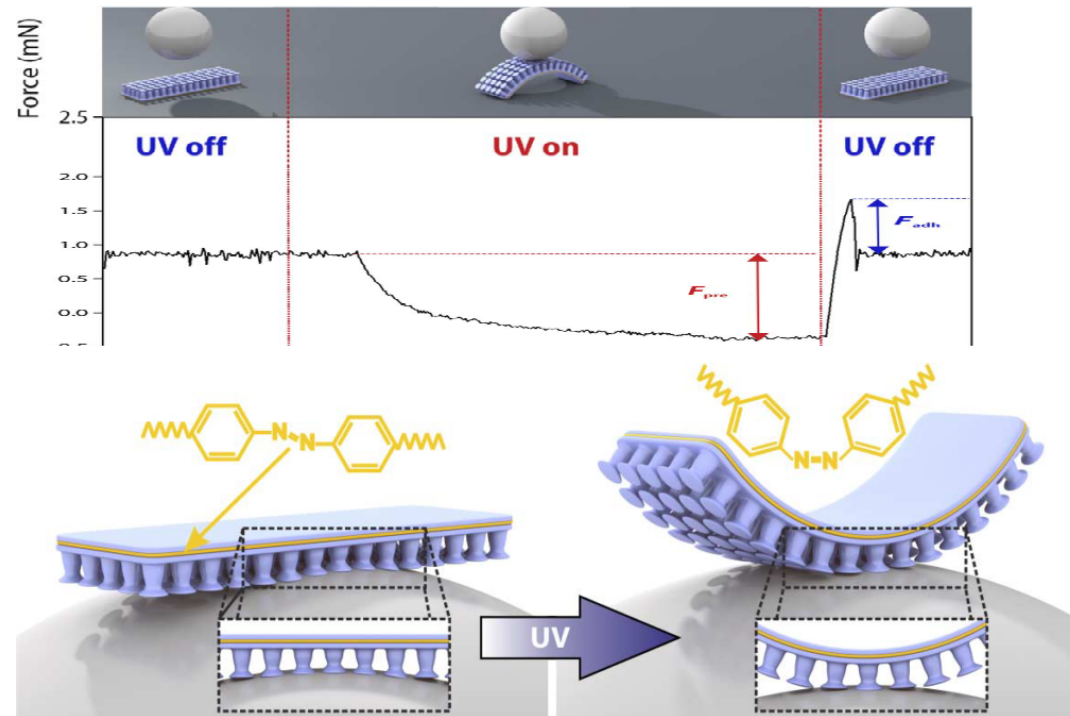


Abb. 3. Bioinspired photocontrollable microstructured transport device (BIPMTD, Uni Bremen, Staubitz, [7])

PROGRAMMIERBARE MATERIE

- ▶ Im Prinzip ein robotisches System (Material) auf Meso- bis Makroebene
- ▶ Robotisches Material mit **strukturellen Rekonfigurationseigenschaften** → Topologie
- ▶ Reine Strukturoptimierung, keine Materialadaption möglich



Abb. 4. Beispiel Claytronic [3]

ROBOTISCHE MATERIALIEN

- ▶ **Adaptives Material** → Mikroebene, kontinuierliches Material, diskrete Sensor-Aktor Knoten
- ▶ **Robotisches Material** → Mesoebene, kontinuierliches Material, aber segmentiert, diskrete Sensor-Aktor Knoten
- ▶ **Grundprinzip:** Kontinuierliche Materialeigenschaften mit diskreter bereichsbasierter Berechnung

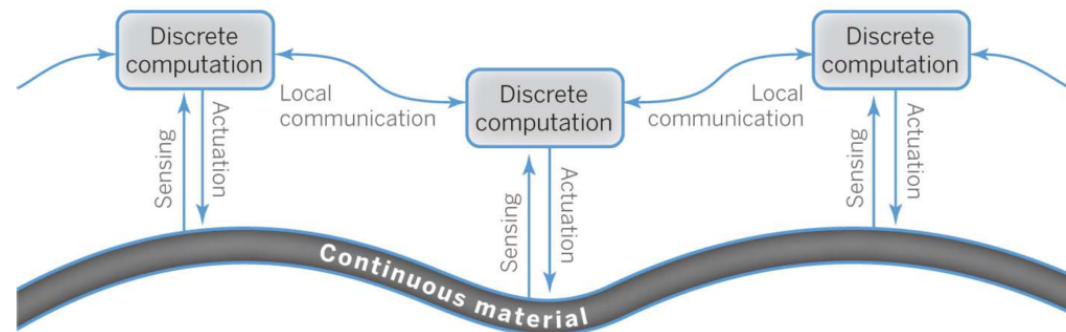


Abb. 5. Adaptives und robotisches Material: Architektur [4]

Grenzfall

- ▶ Übergang von robotischen zu adaptiven Materialien ist fließend; Grenze nicht klar definiert
 - » Verkleinerung des Aktionsvolumens/bereichs eines Sensor-Aktor Knotens
 - » Verkleinerung von Sensoren und Aktoren
 - » Übergang von diskreten auf kontinuierliche Sensoren und Aktoren (Sensormaterial ..)

Beispiel Mechanische Innere Dehnungsenergie

$$U = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^N u_i \approx 1/2 \int_V \varepsilon^T \sigma \varepsilon dV$$

$$u_i \in V = \sum_{j=1}^n d_j^2$$

[5,6] ε : Lokaler Dehnungstensor, σ : Lokaler Spannungstensor

SENSORISCHE MATERIALIEN

Sensorische Materialien sind Materialintegrierte Intelligente Sensorische Systeme [9]



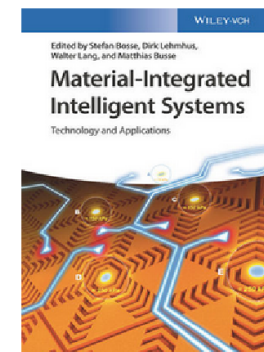
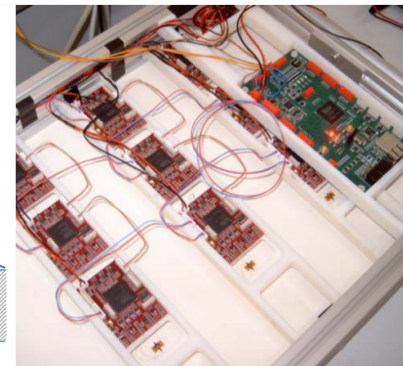
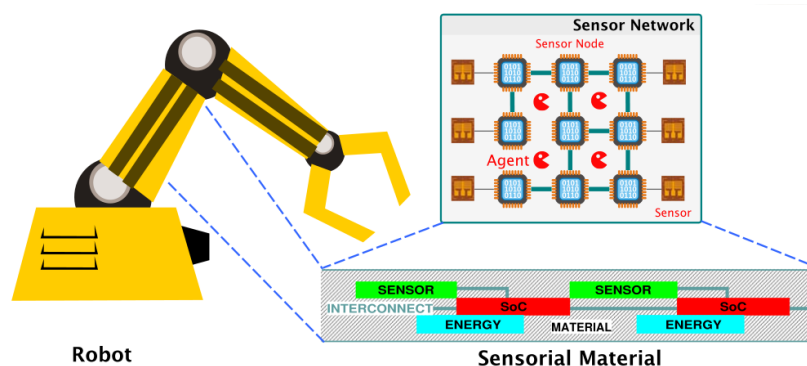
MATERIALINTEGRIERTE SENSORISCHE SYSTEME

Material. Technische Strukturen, wie z. B. mechanische Strukturen in robotischen Systemen, e-Textilien, Windradflügeln, Flugzeugstrukturen, usw.

Sensor. Messung einer physikalischen Größe, Wandlung i.A. in elektrische Größe, **Intrinsisch** (innerer Zustand / Stimulus), **Extrinsisch** (von außen her angeregt), z.B. Dehnungssensorik

Sensorisches System. Zusammenschluss von Sensoren, Elektronik, Kommunikation und Energieversorgung in Sensornetzwerken

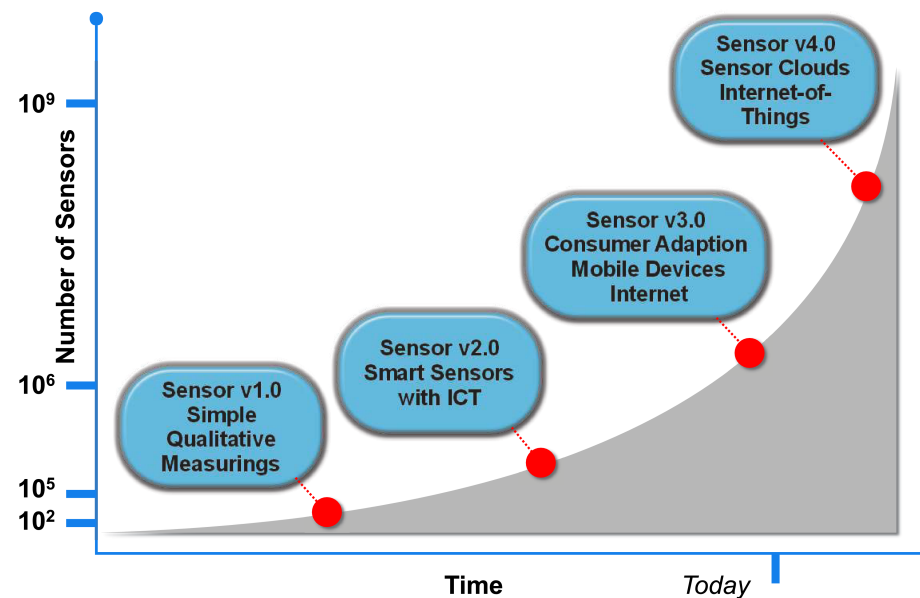
Sensorisches Material. Integration oder Applikation eines sensorischen Systems in Materialien oder Strukturen [9]



SENSOREVOLUTION

Intelligente Sensoren und Erhöhung der Sensordichte

- ▶ Entwicklung von Sensoren mit integrierten Informations- und Kommunikationstechnologien
 - » Generation 1: Diskrete Sensoren, getrennte Sensorverarbeitung
 - » Generation 2: Integrierte Smarte Sensoren
 - » Generation 3: Netzwerke und Internetkonnektivität
 - » Generation 4: Sensorclouds, IoT, MIIS



MATERIALINTEGRATION

Integrationsgrad

Bedingt durch Anwendung und Technologie sind verschiedene Integrationsgrade von Sensornetzwerken möglich:

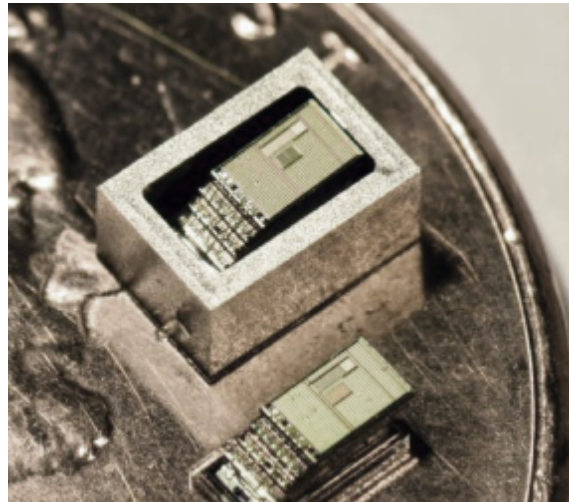
1. **Externe Sensorik**, externe Überwachung → Immer möglich, keine speziellen Technologien erforderlich
2. **Oberflächenapplikation** → Meistens möglich, erfordert allgemein verfügbare Klebtechnologien
3. **Oberflächenintegration** → Außenbereich eines Materials oder einer Struktur → Erfordert spezielle Fertigungstechnologien
4. **Volumenintegration** → Innenbereich eines Materials oder einer Struktur → Erfordert spezielle Fertigungs-, Sensor-, und Datenverarbeitungstechnologien
5. **Intrinsische Materialeigenschaften** → Sensormaterial

RECHNERTECHNOLOGIEN

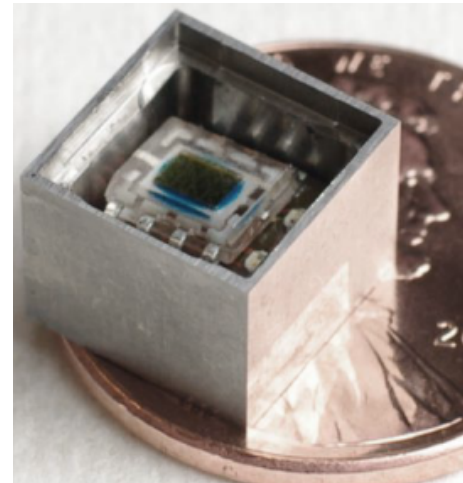
Existierende “Nano”-Computer:

- ▶ Smart Dust → Vision Millionen lose gekoppelter Nano-Computer
 - » Eingebettet in Materialien
 - » Auf Oberflächen verstreut
 - » Dispergiert in Flüssigkeiten, Folien, ..
 - » ungefähr 10mm^3 Volumen

Micro Mote M3



ELM System



Smart Dust

- » Kommunikation: Optisch; Laser, LED
- » Energieversorgung: Optisch; Fotozelle
- » Energiespeicher: Dünnschichtbatterie
- » Sensorik: Temperatur, Licht

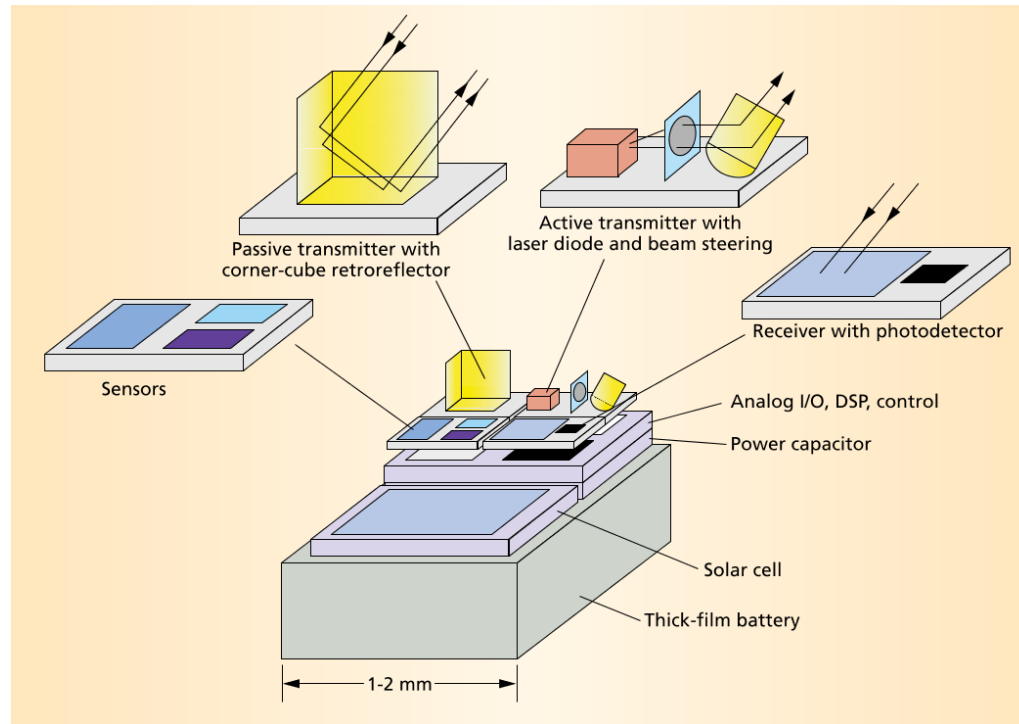
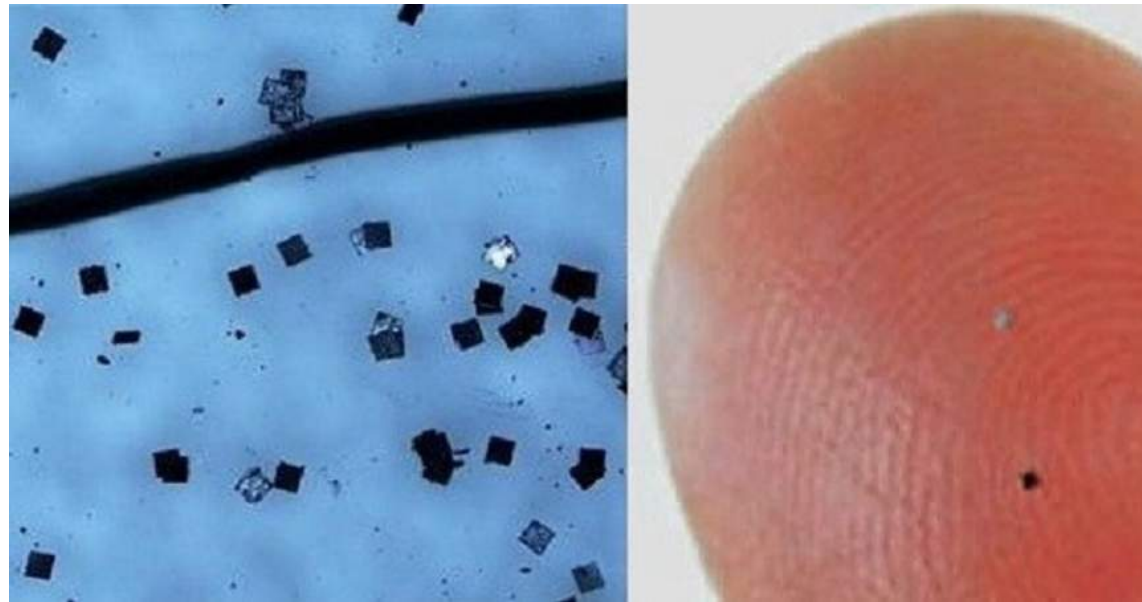


Abb. 6. Aufbau einer Smart Dust Mote [2]

Smart Dust Reloaded

- ▶ Hitachi entwickelte bereits 2006 einen 0.15 x 0.15 Millimeter großen, 7.5 µm dicken Microchip der:
 - » Drahtlose Kommunikation und Energieversorgung via RFID → (2.45 GHz Mikrowelle) ermöglicht, einen
 - » 128 Bit ROM Speicher, und einen
 - » einfachen Mikroprozessor enthielt.



[Hitachi]

RECHNERTECHNOLOGIEN

- ▶ Erweiterung mit (einfachen) Analog-Digital Wandlern für aktive Sensorknoten möglich
- ▶ **Problem:** Speicher!
 - » Für sinnvolle Sensordatenverarbeitung und verteilte Kommunikation werden wenigstens 8kB ROM und 8kB RAM benötigt!
- ▶ Integration von Sensoren eher hybrid als monolithisch
 - » Wobei primäre Dehnungssensorik in adaptiven Materialien benötigt wird → ebenfalls Siliziumprozess

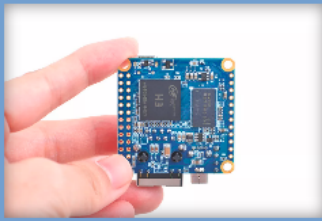
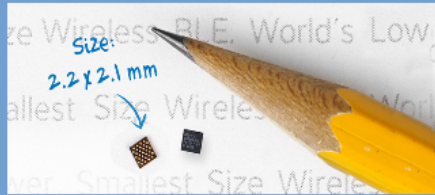
MATERIALINFORMATIK

Bedeutung:

1. Rechnen in Materialien (Verteilte Datenverarbeitung in Materialien)
 2. Rechnen von Materialien (Data Science, KI, ..., um neue Materialien zu entwickeln)
- ▶ Normalerweise wird die Berechnung von Sensorerfassung und Steuerung getrennt
 - ▶ Smarte Materialien stellen die enge Verbindung zwischen
 - » Berechnung,
 - » Kommunikation,
 - » Sensorerfassung und
 - » Steuerung mit lose gekoppelten Nano-Computern dar.

MATERIALINFORMATIK

- ▶ Algorithmische Skalierung und Verteilung sind erforderlich
 - » **Verteilte Systeme** können als eine große Maschine behandelt werden
- ▶ Mooresches Gesetz sagte starke Miniaturisierung voraus
- ▶ Jedoch die Informatik und deren Methoden konnten nicht immer folgen → Lücke zwischen Hardware und Software

		
Chip Area 650mm ²	7mm ²	1mm ²
Computing Power 50000 MIPS/4GB	7000MIPS/1GB	12MIPS/1K
Electrical Power 40W	2W	20mW

MATERIALINFORMATIK

Eine normalisierte Recheneffizienz eines Computers (nur unter Berücksichtigung der Datenverarbeitungseinheit) kann definiert werden durch:

$$\epsilon = \frac{C}{AP}$$

A

Chipfläche in mm²

C

Rechneleistung in Mega Instruction per Second (MIPS)

P

Elektrische Leistungsaufnahme in W

Die Recheneffizienz kann verwendet werden, um verschiedene Computer und Geräte zu vergleichen, d.H. einen Skalierungsfaktor anzugeben:

$$s = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$$

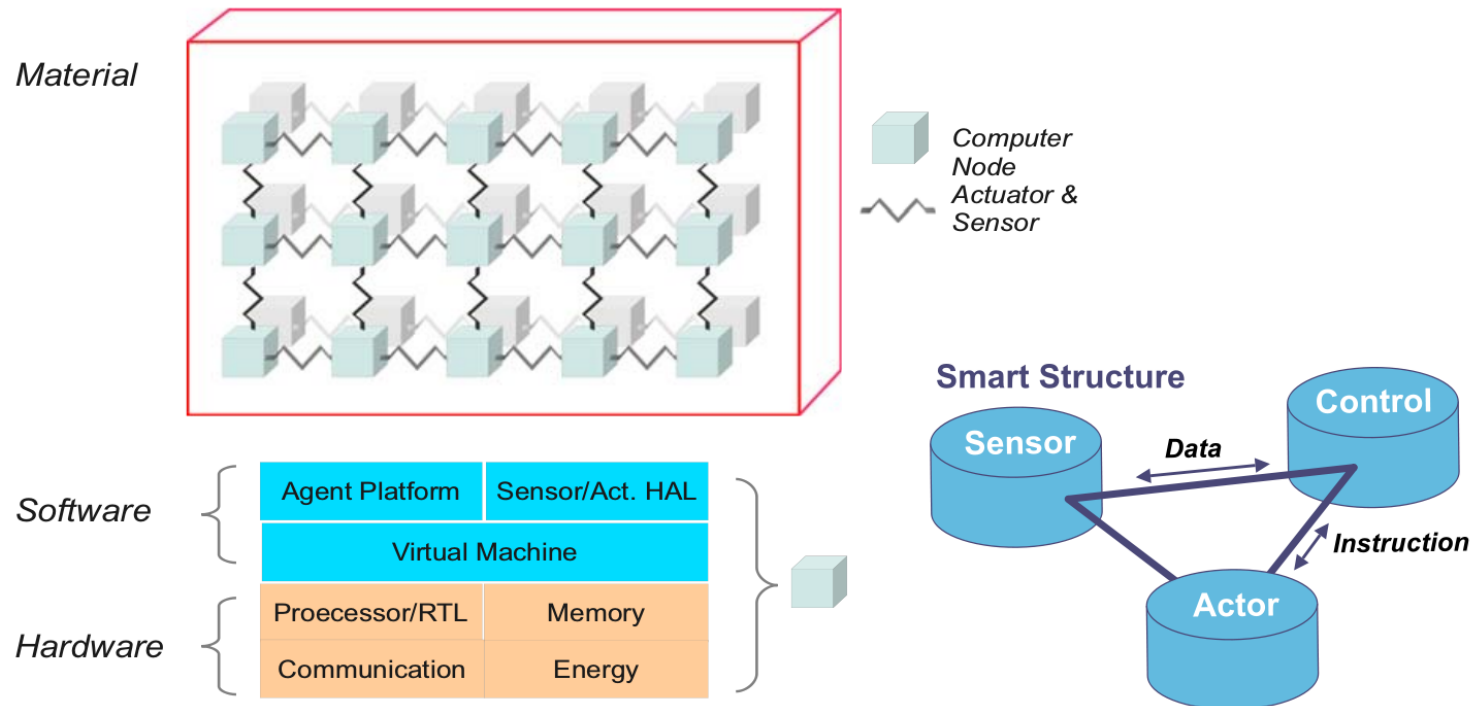
MATERIALINFORMATIK

	Micro Mote (M3)	ELM System	Atmel Tiny 20	Freescall KL03	ARM Cortex Smart Phone
Processor	Arm Cortex M0	C8051F990 (SL)	AVR	Arm Cortex M0+	Arm Cortex A9
Clock	740kHz max.	32kHz	-	48MHz	1GHz
CPU Chip Area	0.1mm ²	9mm ²	1mm ²	4mm ²	7mm ² /ROM
Sensors	Temperature	-	-	-	Temp, Light, Sound, Accel., Press., Magn.
Communication	900MHz radio, optical	optical	electrical	-	3G/4G, WLAN, USB, Bluetooth, NFC
Harvester, Battery	Solar cell, Thin film	Solar cell, Coin	-	-	-
Power Consumption	70mW / CPU	160mW / CPU	20mW	3mW @ 48MHz	100mW avg.,
Manufacturing	180nm CMOS	-	-	-	40nm CMOS
Package	Wire bonded	Silicon Stack	PCB	Single Chip	Single Chip
Computing Eff. ϵ	150	0.02	0.6	4.0	0.53

INTELLIGENTES ROBOTISCHES MATERIAL

Strukturmodell

1. **Mechanisches Modell:** Feder-Masse Modell (Mehrkörperphysik)
2. **Informatorisches Modell:** Netzwerk aus Sensor- und Aktorknoten
→ Erfassen, Handeln, Verarbeiten
3. **Kommunikationsmodell:** Maschennetzwerk → **Daten- + Anweisungsströme**



INTELLIGENTES ROBOTISCHES MATERIAL

- ▶ Jedes Element enthält einen eingebetteten Computer, der als Knoten in einem Kommunikationsnetzwerk betrachtet wird.
- ▶ Jeder **Knoten** bietet:
 - » Datenverarbeitung (Prozessor oder Digitallogik-RTL),
 - » Daten- und Programmspeicher,
 - » Kommunikation,
 - » Energieversorgung und Energiemanagement.
- ▶ Da die verteilte Erfassung und Steuerung des Materials durch einen agentenbasierten Ansatz erfolgen soll, muss jeder Knoten eine Agentenverarbeitungsplattform (APP) bereitstellen → **Virtualisierung**.
- ▶ Agenten müssen über eine **Hardware-Abstraktionsschicht (HAL)** auf **Sensoren und Aktoren** zugreifen, die von der APP bereitgestellt wird.

OPTIMIERUNG AND ADAPTIERUNG

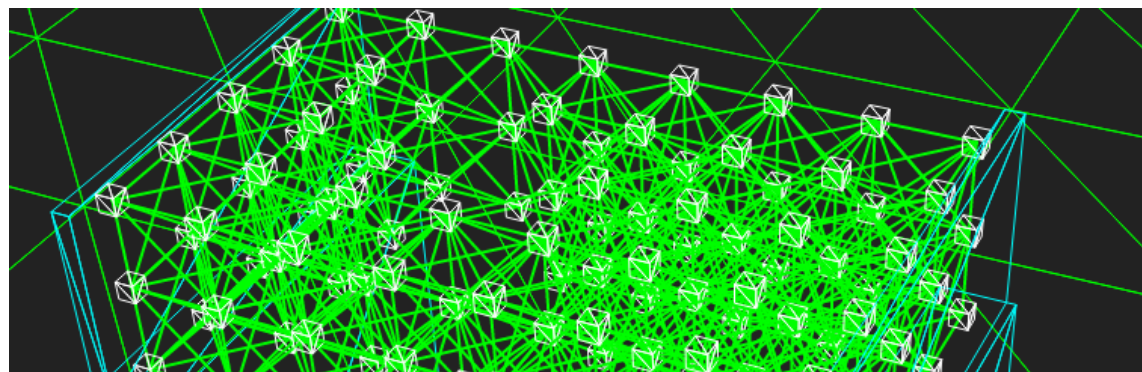
PHYSIKALISCHES MODELL

- ▶ Eine Komponente aus einem intelligenten adaptiven Material besteht aus einem Netzwerk mit:
 - Masse- oder Körperknoten oder Materialbereichen,
 - Verbindungselemente mit parametrisierbaren Eigenschaften.

Mehrkörperphysik Modell

Körpermasseknoten mit Federn, die Knoten verbinden:

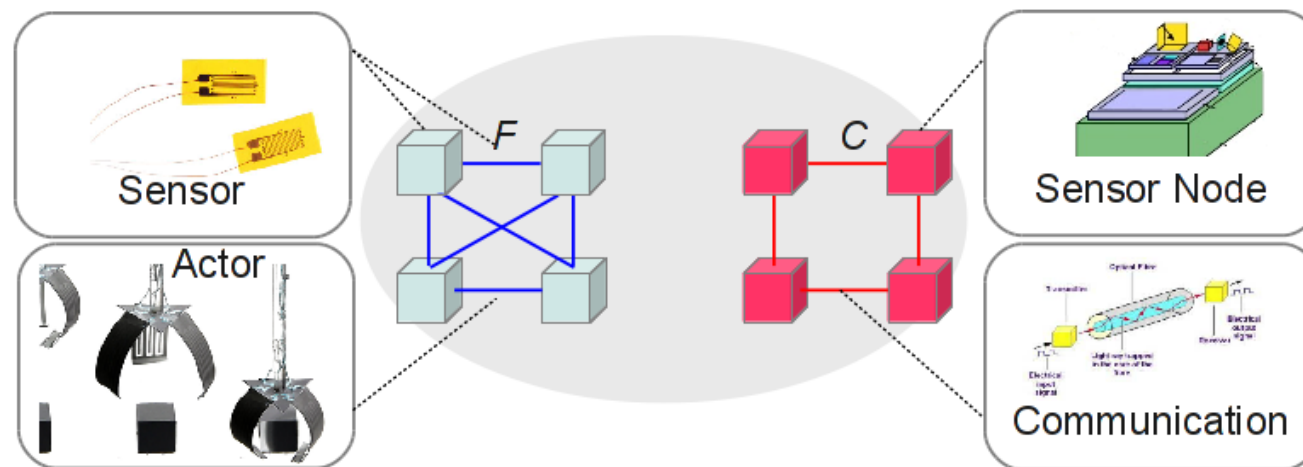
- Eine Feder ist ein Stellglied mit zwei *Stellvariablen*:
Steifigkeit s , Dämpfung d
- Jede Feder ist auch ein Dehnungssensor, der den Sensorwert σ liefert → Für Berechnung der *Beobachtungsvariable*



DATENVERARBEITUNGSMODELL

- ▶ Das diskrete Netzwerk aus Sensor-Aktor Knoten wird in einem dreidimensionalen Maschennetzwerk angeordnet
- ▶ Im Mehrkörpermodell bedeutet ein Masseknoten = ein Rechnerknoten im Netzwerk!

Smartes Mehrkörpermaterialmodell



- » D.h. das physikalische und informatische Netzwerk überlappen sich
- » Die Masseknoten sind mit bis zu 24 Nachbarknoten über die Federn = Aktoren verbunden

OPTIMIERUNGSGZIELE

Verringerung globaler und lokaler Spannungen, Dehnungen oder Kräfte von beliebig geformten Komponenten unter verschiedenen Lastsituationen

Kontroll- und Optimierungszyklus

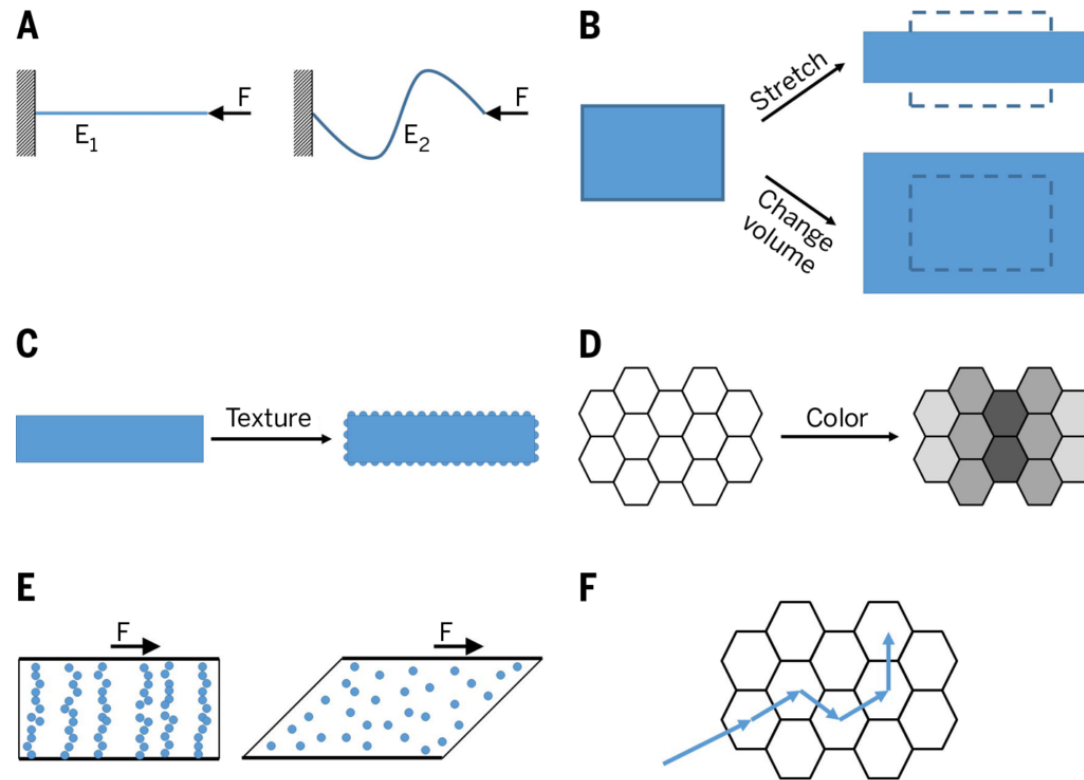
1. Wahrnehmung der Materialzustandes mit Sensoren (Sensorik)
2. Vergleich lokaler und globaler Beobachtungsvariablen
3. Änderung von **Materialparametern** durch Aktuatoren

-
- » Optimierung zur **Entwurfszeit**
 - » Optimierung zur **Laufzeit**

ADAPTION ZUR LAUFZEIT

- ▶ Die In-Situ-Aktuatoren eines robotsichen Materials ändern die Materialeigenschaften des Basismaterials:
 - A. Änderungen der **Steifigkeit** und
 - B. Änderungen des **Volumens** könnten Roboter ermöglichen, die die Form verändern;
 - C. Änderung des **Aussehens**;
 - D. Änderung des Aussehens und der Oberflächentextur ermöglichen künstliche Häute.
 - E. Selbstheilende und sich selbst regenerierende robotische Materialien könnten Venensysteme verwenden, die durch Flüssigkeiten mit variabler Viskosität oder
 - F. durch **Umleitung** adaptive Verbindungen durch das Material ermöglichen.

ADAPTION ZUR LAUFZEIT



[4]

Abb. 7. Robotisches Material: Möglichkeiten der Adaption (sowohl Struktur als auch Materialeigenschaften) [4]

MULTIPHASENTOPOLOGIEOPTIMIERUNG

Optimierung zur Entwurfszeit

- ▶ Ursprünglicher Ansatz nach Burblis et al. [5]:

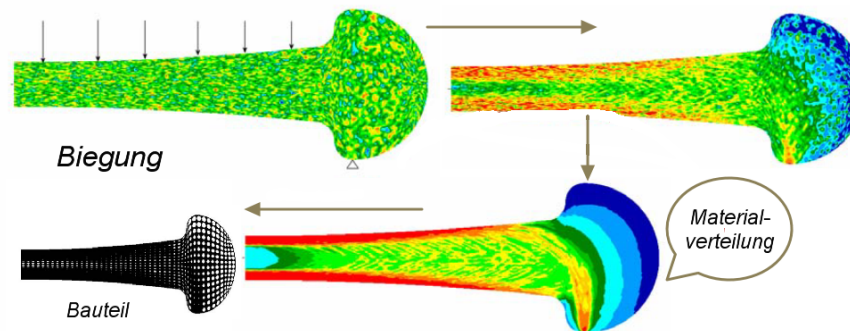
*Die Mehrphasen-Topologieoptimierung **ändert die Topologie oder Form der Struktur nicht**. Es findet eine **optimale räumliche Verteilung** mehrerer unterschiedlicher Materialien statt, um höchste Steifigkeit zu erreichen.*

- ▶ Eine Anwendung der Multiphasen-Topologieoptimierung besteht darin, ein optimales Porositätsdesign einer mechanisch (statisch) belasteten Struktur zu erzeugen - ähnlich der Porositätsverteilung in Knochen
- ▶ Die Steifigkeit einer mechanisch belasteten Struktur wird durch **räumliche Umverteilung** mehrerer offenzelliger Stoffe (Schäume) mit unterschiedlichen Porositäten p optimiert!
 - » Annahme: Porositätsabhängige elastische Eigenschaften

MULTIPHASE TOPOLOGIEOPTIMIERUNG

- ▶ Ziel ist die Minimierung der totalen Dehnungsenergie $U \rightarrow \min$ der Struktur / des Materials durch Umverteilung
- ▶ Annahme: Die Struktur wird in eine Menge von finiten Volumen mit **unterschiedlichen Materialien** $\{m_1, m_2, \dots\}$ unterteilt, die verschiedene Elastizitätsmatrizen D besitzen
- ▶ Durch geeignete Verteilung lässt sich unter Annahme von Belastungssituationen eine **Minimierung** von U erzielen, gegeben durch [5]:

$$\min U \sim \sum_{m_1} \varepsilon_i^T D_1 \varepsilon_i V_i + \sum_{m_2} \varepsilon_i^T D_2 \varepsilon_i V_i + \dots + \sum_{m_n} \varepsilon_i^T D_n \varepsilon_i V_i$$



ε : Dehnungstensor, D : Spannungstensor

MULTIPHASENTOPOLOGIEOPTIMIERUNG

Optimierung zur Laufzeit

- ▶ Dynamische Umverteilung der Materialsteifigkeiten bei:
 - » Veränderter Lastsituation
 - » Veränderten Anforderungen (andere Verwendung eines Bauteils)
 - » Störungen und Defekten des Materials (→ Selbstheilung)
- ▶ Makroskopische Materialbereiche könnten mit robotischen Materialien umverteilt werden
 - » Hier jedoch: **Aktuierte Material- und strukturbereiche mit veränderlichen mechanischen Eigenschaften**

ALGORITHMEN

Globales Modell	Segmentiertes Modell	Nachbarschaftsmodell
- Die globale Beobachtungsvariable x wird zur Berechnung einer Korrektur der Zielvariablen s verwendet. - Die Korrekturfunktion k_x verwendet das Verhältnis der lokalen und globalen Beobachtungsvariable	- Das Netzwerk ist in Segmente unterteilt - Die Beobachtungsvariable wird für jedes Segment berechnet - Die Zielvariable wird für jedes Segment berechnet	- Nachbarschaftsknotenverhandlung - Die Beobachtungsvariable ist auf den einzelnen Knoten begrenzt - Vertauschen von Inkrementen der Stellvariablen
<pre> do with $x \in \{\epsilon, \sigma, U\}$ $X := 0;$ $\forall n \in \mathbb{N}$ do $X := X + x_n$ $X := X / \mathbb{N}$ $\forall n \in \mathbb{N}$ do $r_n := k_x(x_n / X, s_n)$ $s_n := s_n * r_n$ until $Err < Err_0$ </pre>	<pre> do with $x \in \{\epsilon, \sigma, U\}$ $\forall S_i \in \mathbb{S}$ do $X_{s,i} := 0;$ $\forall n \in S_i$ do $X_{s,i} := X_{s,i} + x_n$ $X_{s,i} := X_{s,i} / S_i$ $\forall n \in S_i$ do $r_n := k_x(x_n / X_{s,i}, s_n)$ $s_n := s_n * r_n$ until $Err < Err_0$ </pre>	<pre> do with $x \in \{\epsilon, \sigma, U\}$ $\forall \{n_i, n_j \in N \mid i \neq j \wedge$ $pos(n_i) - pos(n_j) = 1\}$ do if $x_i / x_j < 1 \wedge$ $s_i - \Delta s > s_0 \wedge$ $s_j + \Delta s < s_1$ then $s_i := s_i - \Delta s$ $s_j := s_j + \Delta s$ end if always </pre>

ALGORITHMEN

- ▶ Das **Grundprinzip der Optimierung** verwendet einen
 - » **Verhältnisparameter** r , der auf der Beziehung der **Beobachtungsvariablen** (entweder ε , σ oder U) zu einem räumlich erweiterten Ensemblewert dieser Variablen (Mittelwert) basiert.
 - » Der **Verhältnisparameter** r wird auf die **Steifigkeitsvariablen** von Elementen des Materials / der Struktur angewendet um diese zu verändern.
- ▶ Das **System und Netzwerk** besteht aus:
 - » Einer Menge aller Knoten: $\mathbb{N}$;
 - » Einer Menge aller Segmente, die Knoten gruppieren: $\mathbb{S}$, und
 - » Segmenten mit einer Untergruppe von Knoten: $\mathbb{N}_S \subset \mathbb{N}$.
- ▶ Der **segmentierte Algorithmus** führt die Modifikation von Elementen aus, die in Segmenten basierend auf lokal begrenzten Daten partitioniert sind.

ALGORITHMEN

- ▶ Der **Nachbarschafts-Algorithmus** führt die Elementmodifikation nur zwischen zwei benachbarten Knoten durch (Punkt-zu-Punkt).
- ▶ Es gibt verschiedene Ansätze und Funktionen k_U , die den **aktuellen Verhältnisparameter** unter Verwendung der Dehnungsenergie U (= Beobachtungsvariable x) berechnen.

VERTEILTE SYSTEME UND AGENTEN

VERTEILTE VS. ZENTRALE SYSTEME

- ▶ **Das vorgestellte Optimierungsproblem ist inherent verteilt:**
Sensoren (Sensordaten) und Aktoren sind verteilt
- ▶ Klassischer Ansatz in SHM und Sensornetzwerken:
 - » Verteilte Sensorerfassung
 - » Zentrale Sensordatenauswertung
- ▶ Die zentrale Sensorverarbeitung und Aktuatorsteuerung ist aus Skalierungs- und Effizienzgründen nicht auf die vorgeschlagene intelligente Struktur und das Materialmodell anwendbar.
- ▶ Die Ressourceneinschränkungen verbieten den Einsatz herkömmlicher Datenverarbeitungs- und Kommunikationsarchitekturen.
- ▶ Darüber hinaus ist es aus Gründen der Robustheit und Flexibilität wünschenswert, Hardware und Software vollständig zu entkoppeln.

Agenten

- » (Mobile) Agenten sind autonome Softwareeinheiten die vorzugsweise in verteilten Umgebungen eingesetzt werden können

VERTEILTE VS. ZENTRALE SYSTEME

- » Multiagentensystemen bestehen aus einer Vielzahl einzelner Agenten die lokal zusammen ein globales Ziel erreichen → Emergenzverhalten
- » Das Berechnungs- und Kommunikationsmodell des Agenten bietet erforderliche Entkopplung von Hardware und Software.
- *Agenten zeichnen sich durch*
 - » ihre lose Kopplung an die zugrunde liegende Agentenverarbeitungsplattform (APP),
 - » ihre Fähigkeit zur Zusammenarbeit und Koordination, Mobilität (von Agentenprozessen) und schließlich
 - » zur Bildung selbstorganisierender und selbstanpassender Systeme aus.

Paradigma: Die Zerlegung eines komplexen Problems in mehrere kleine Entitäten mit niedrigem Komplexitätsgrad wird idealerweise vom Agentenmodell widergespiegelt.

DAS MULTIAGENTENSYSYSTEM



SENSORDATENVERTEILUNG

- ▶ Jeder Knotenagent sendet seine Sensorwerte an benachbarte Knoten innerhalb eines Bereichs vom Radius 1
- ▶ Damit wird die Menge der Sensoren, die jeder Knoten benötigt, gebildet
- ▶ Signale werden für die Sensorverteilung mithilfe von Δ -Distanz-Routing verwendet

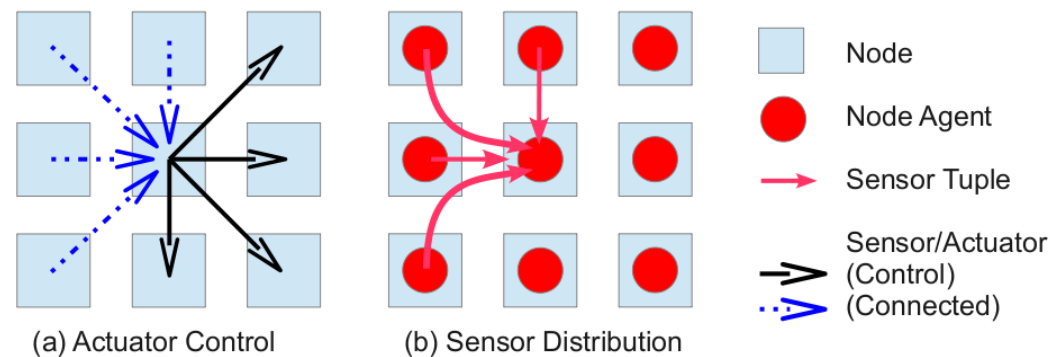


Abb. 8. Sensorverteilung durch benachbarte Knoten mithilfe von Signalen (oder Tupeln)

VERTEILTE BERECHNUNG DER BEOBACHTUNGSVARIABLEN

- ▶ **Globale** Berechnung in einem großen verteilten Netzwerk ist teuer und schwierig (Ausfälle)
 - Random Walk und gerichtete Diffusion können **zur** Näherung einer globalen Beobachtungsvariable verwendet werden
- ▶ **Der segmentierte** Ansatz erfordert eine Netzwerksegmentierung
 - Ohne zentrale Instanz schwierig;
 - Stattdessen wird ein schwebendes Segmentfenster um **jeden** Knoten gelegt
 - Jeder Knoten kann von allen direkten Nachbarn beobachtet werden (Richtung Norden, Süden, Westen, Osten, oben, unten)
 - Eine *verkettete Verteilung* von Daten wird in jedem Segment verwendet (N Knoten $\leftrightarrow$ N Segmente!)
 - Werte der Beobachtungsvariablen mit Abstand $r = 1$ und $r = 2$ werden von jedem Knoten erfasst, um den Regionswert zu ermitteln

VERTEILTE BERECHNUNG DER BEOBACHTUNGSVARIABLEN

Abstand $r = 1$

Kann von direkten Nachbarn beobachtet werden

Abstand $r = 2$

Direkte Nachbarn liefern auch Werte von ihren Nachbarn (entgegen der Anforderungsrichtung)

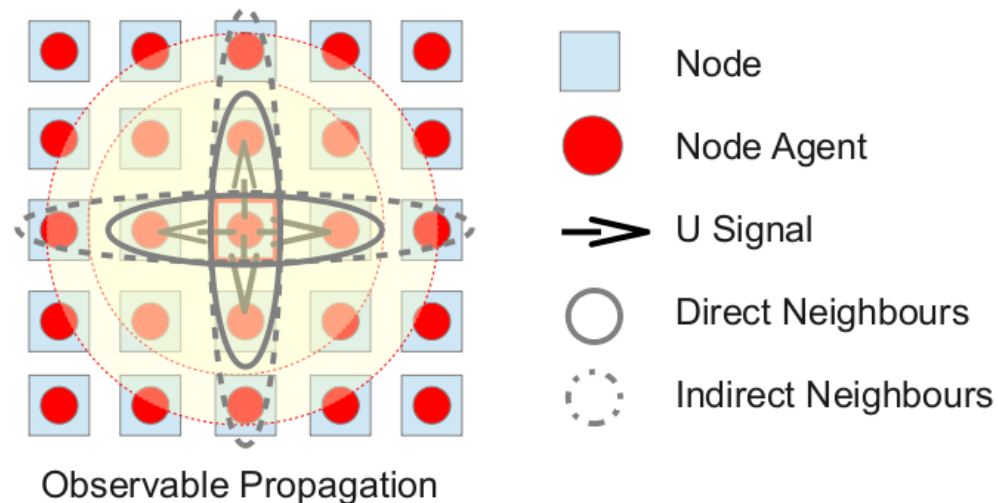


Abb. 9. Verteilung von beobachtbaren Nachbarwerten für die Akkumulation von Regionen mithilfe von Signalen (oder Tupeln)

VERTEILTE ANPASSUNG

- ▶ Der globale Algorithmus und der Segmentalgorithmus brauchen keine weitere Koordinierung der Verteilung
- ▶ Nachdem der beobachtbare Bereich (global oder segmentiert) berechnet wurde, können die Aktoren (Federn) jedes Knotens basierend auf dem Verhältnis des lokalen und regionalen Beobachtungsvariable modifiziert werden
- ▶ Der Ansatz der Nachbarschaftsverhandlungen erfordert keine regionale Beobachtungsvariable

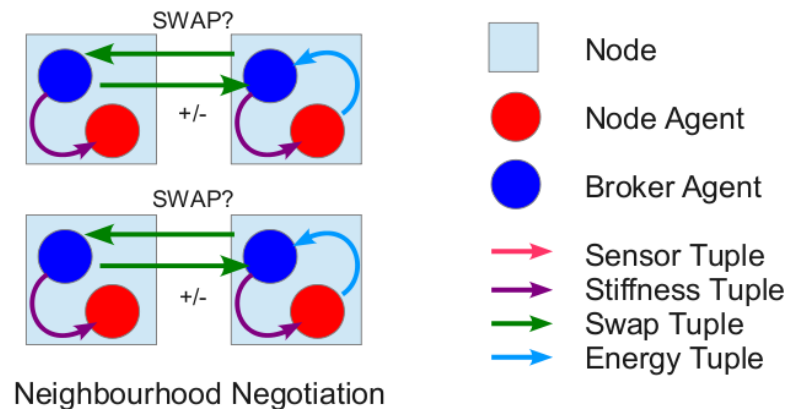


Abb. 10. Die Verhandlung wird zwischen zwei Nachbarknoten verwendet, um eine Neukonfiguration der Steifigkeit in der Region zu erreichen

DAS EXPERIMENT UND SIMULATION

DIE SIMULATION

- ▶ Aufgrund der derzeit noch beschränkten technologischen Möglichkeiten wurde auf eine Simulation zurück gegriffen → **Machbarkeitsstudie**
- ▶ Um ein robotisches oder adaptives Material simulieren zu können bedarf es verschiedener Modelldomänen:
 - » Mechanische und **physikalisches Modell** des Materials oder der Struktur
 - » Modelle der **Sensoren und Aktoren**
 - » **Datenverarbeitungsmodell** (Perzeption und Steuerung)
 - » **Kommunikationsmodell** (Datenaustausch)
 - » **Energiemodell**

Es muss eine enge Kopplung von mechanischer/physikalischer Simulation und der Datenverarbeitung/Kommunikation der Agenten geben!

DER SIMULATOR SEJAM2

- ▶ Multidomain:
 - A. **Mehrkörperphysik** (MBP) mit gekoppelten Masse-Feder Systemen
 - B. **Datenverarbeitung** mit Agenten und Agentenplattformen
 - C. **Kommunikationsnetzwerke**
- ▶ Alle Domänen sind gekoppelt, d.h.
 - » **Virtuelle Sensoren** werden aus der MBP Simulation gewonnen
 - » Die Agenten können auf die Sensoren programmatisch zugreifen
 - » Die Agenten können **virtuelle Aktoren** (Federn) direkt in der MBP verändern (Steifigkeit, Dämpfung)
 - » Die Agenten können sich im dem virtuellen Kommunikationsnetzwerk bewegen (mobiler Code)
- ▶ Simulation nahezu in Echtzeit (bzw. in real zu erwartenden Zeitskalen)

DER SIMULATOR SEJAM2

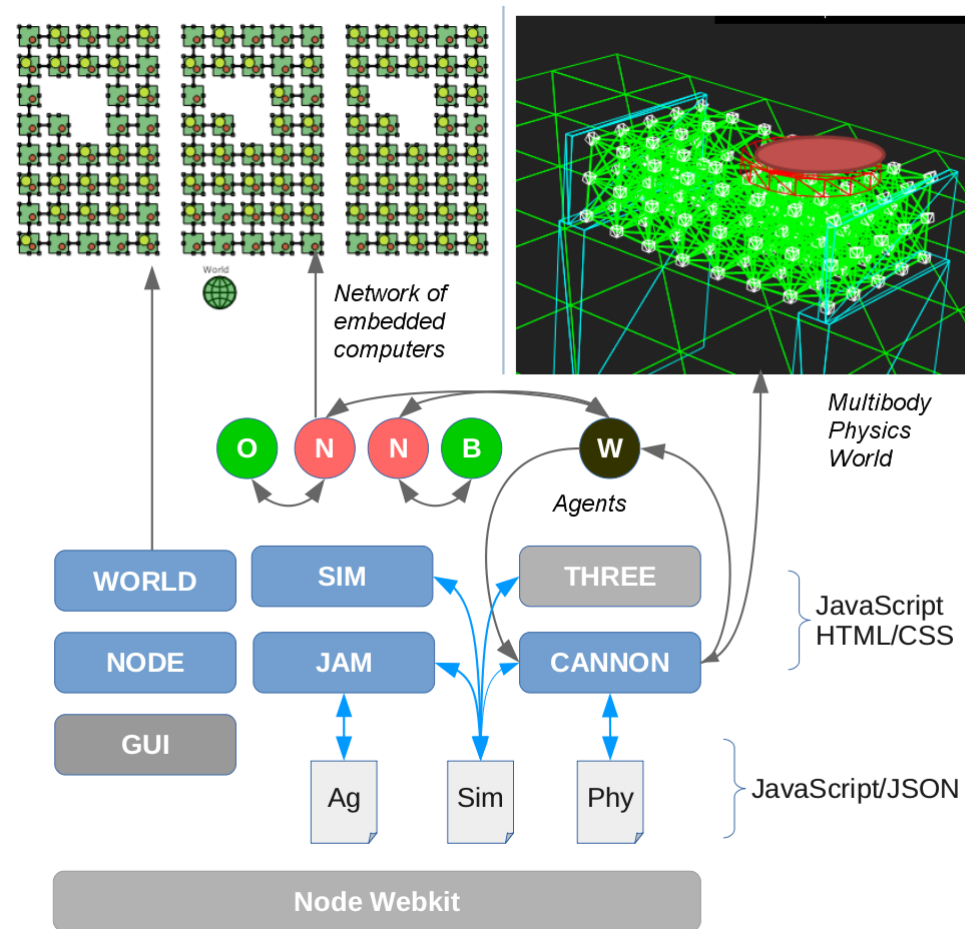
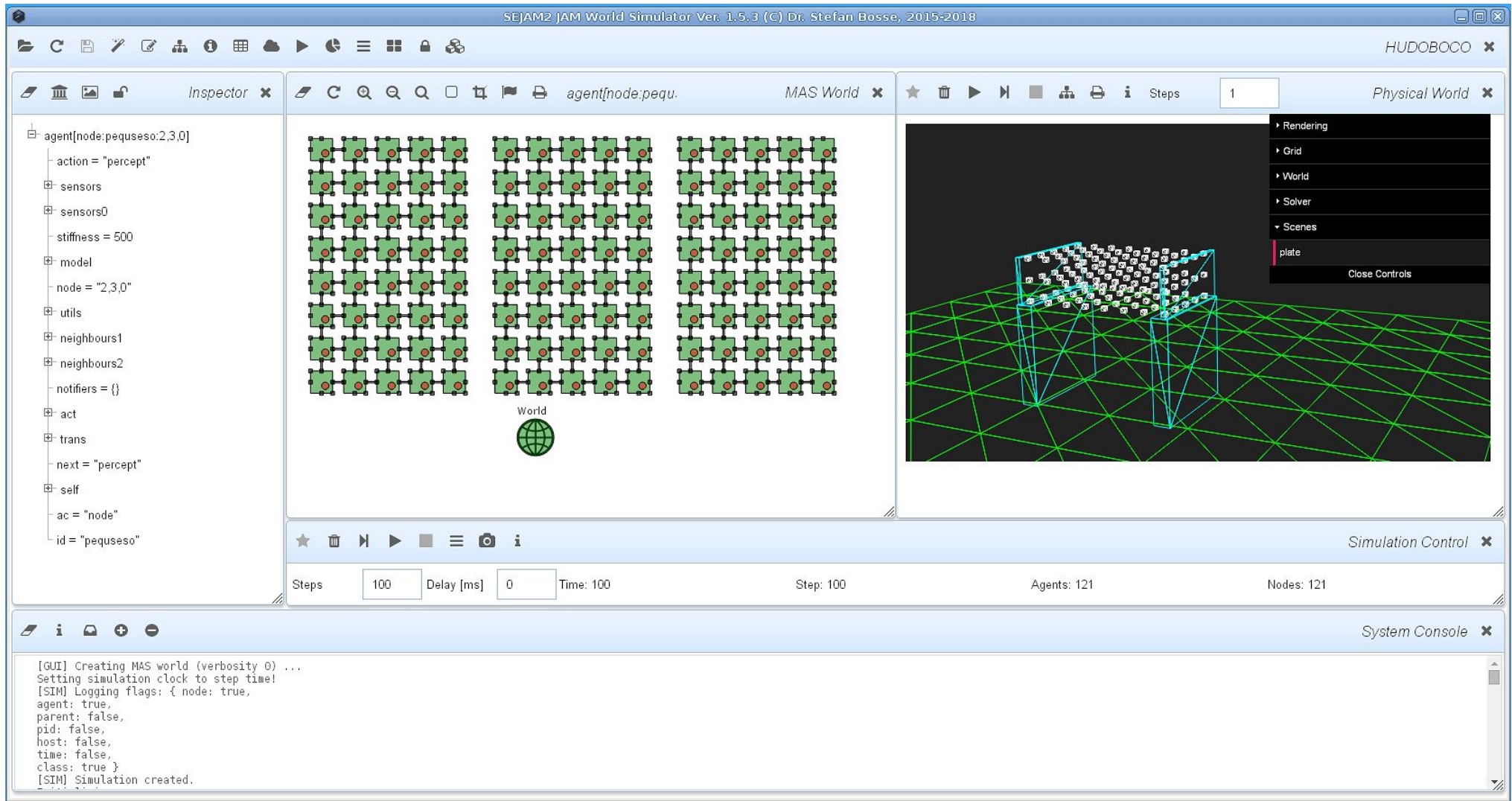


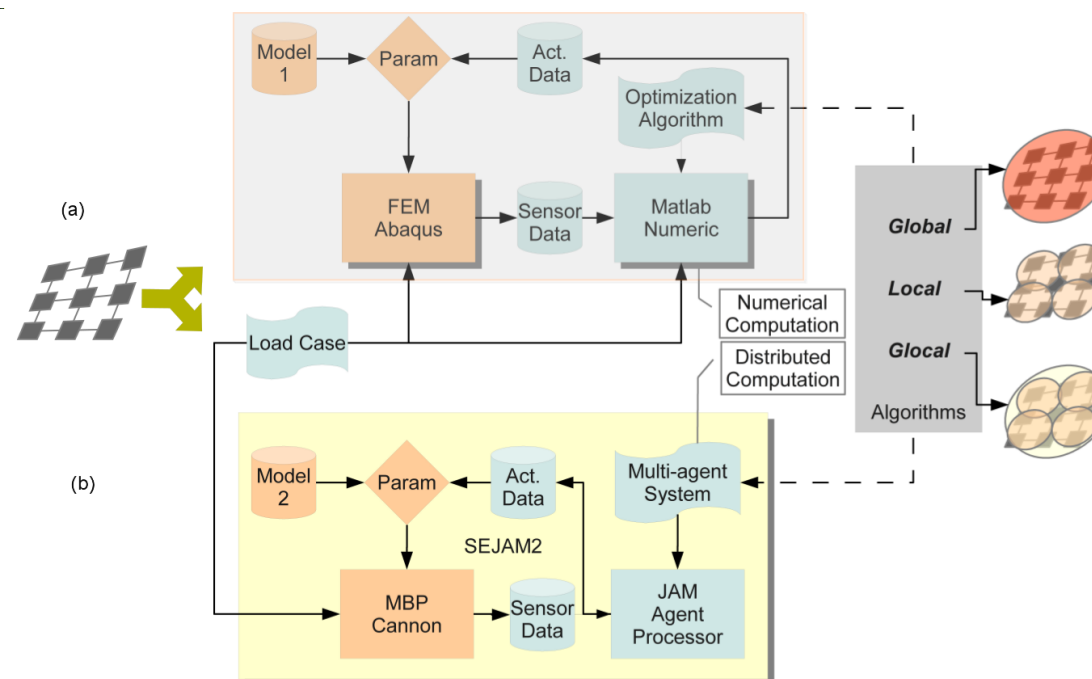
Abb. 11. Softwarearchitektur des Multidomain Simulators SEJAM2

DER SIMULATOR SEJAM2



KOMPLEXES SIMULATIONSFRAMEWORK

- ▶ **MBP** lässt nur eine Näherung der dynamischen Verhaltenssimulation von Materialien (eher Strukturen) zu - Vorteil: geringe Rechenzeit
- ▶ **FEM** bietet genauere Lösung und Untersuchung des statischen Verhaltens von Materialien und Strukturen
- ▶ Neben **MAS** und **MBP** Simulation ist eine Einbindung und Kopplung von **FEM** Werkzeugen wie Abaqus möglich

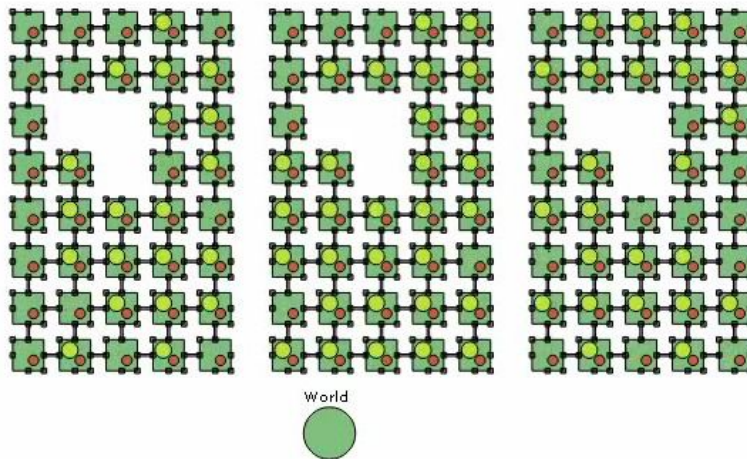


DIE SIMULATION

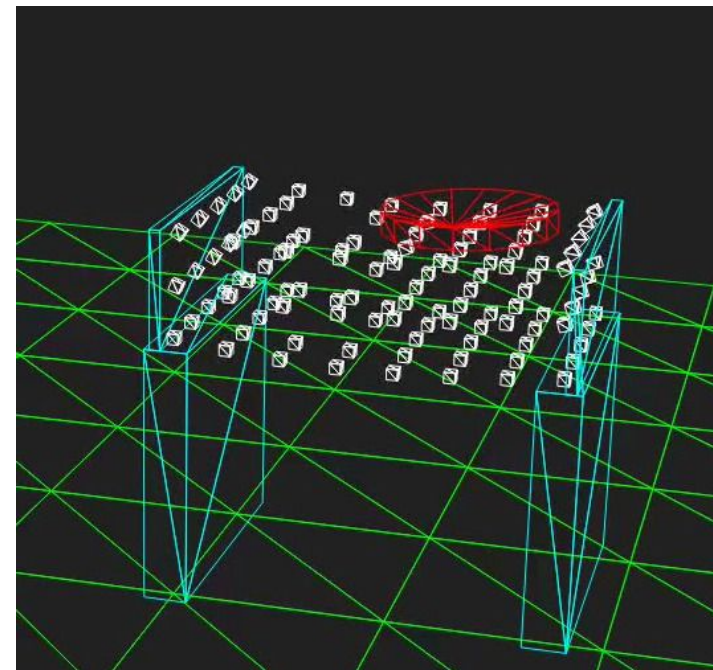
- ▶ Platte mit Loch und Zylinderkörper als Belastung
 - » Netzwerk aus 8x5x3 Knoten (Masseknoten und Eingebettete Rechner)

MAS Welt

- ▶ Das ereignisbasierte Agentenverhalten aktiviert die Verarbeitung nur wenn sich Sensordaten ändern



Physikalische Welt



DIE SIMULATION

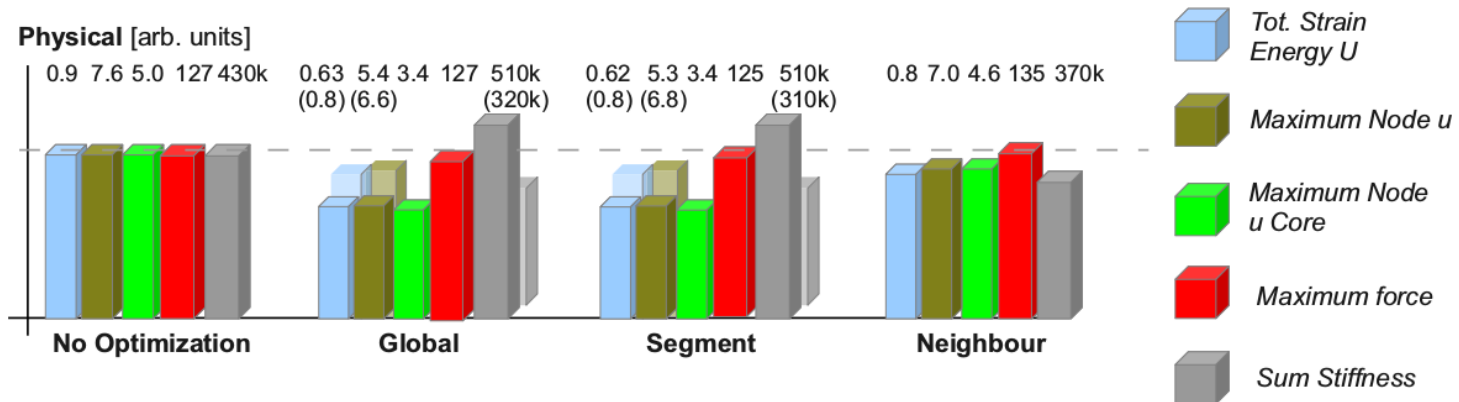


Abb. 12. Simulationsergebnisse der Struktur unter Belastung mit der Zielvariable (Optimierungsziel) Globale und lokale Dehnungsenergie U/u

- » Reduktion der inneren Dehnungsenergie um mehr als 30% möglich
- » Globaler (zum Vergleich) und segmentierter Ansatz liefern annähernd gleiche Ergebnisse!

ZUSAMMENFASSUNG

- » Smarte Materialien besitzen **perzeptive und adaptive** Eigenschaften
- » **Integration** von Material, Sensor, Aktor, Datenverarbeitung, Kommunikation, Energie
- » Adaption von Materialien und Strukturen auf unterschiedliche Last- und Betriebssituation ist ein **Minimierungsproblem**
- » Die Datenverarbeitung in adaptiven Materialien muss dezentral und **verteilt** umgesetzt werden → Skalierbarkeitsproblem!
- » Die **Simulation** von smarten adaptiven Materialien erfordert die enge Kopplung von Datenverarbeitung und Physik
- » **Multiagentensysteme** sind geeignet um verteilte, robuste und selbstorganisierende Datenverarbeitung eines Minimierungsproblems zu ermöglichen
- » Es konnte anhand einer Fallstudie die Eignung von MAS und dezentraler **lokaler Optimierung** mit globalen Ziel gezeigt werden

REFERENZEN

1. M. A. McEvoy and N. Correll, *Thermoplastic variable stiffness composites with embedded, networked sensing, actuation, and control*, Journal of Composite Materials, vol. 49, no. 15, 2015.
2. B. Warneke, M. Last, and B. Liebowitz, *Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer*, Computer, 2001.
3. S. C. Goldstein, J. D. Campbell, and T. C. Mowry, *Programmable Matter*, Computer, 2005.
4. M. A. McEvoy and N. Correll, “Materials science.- Materials that couple sensing, actuation, computation, and communication,” Science, vol. 347, no. 6228, 2015.
5. A. Burblies and M. Busse, *Computer Based Porosity Design by Multi Phase Topology Optimization*, in Multiscale & Functionally Graded Materials Conference (FGM2006), Honolulu, October 15 th -18 th 2006 MS 5 “Topology Optimization”, 2006.
6. S. Bosse, D. Lehmhus, *Material-integrated cluster computing in self-adaptive robotic materials using mobile multi-agent systems*, Cluster Computing, doi 10.1007/s10586-018-02894-x, Online First, 2019 ISSN 1386-7857
7. E. Kizilkan, J. Strueben, A. Staubitz, and S. N. Gorb, *Bioinspired photocontrollable microstructured transport device*, Science Robotics2, vol. 2, no. 2, 2017.
8. H. Janocha, Ed., *Adaptronics and Smart Structures*, 2nd ed. Springer, 2007.
9. S. Bosse, D. Lehmhus, W. Lang, M. Busse (Ed.), *Material-Integrated Intelligent Systems: Technology and Applications*, Wiley, ISBN: 978-3-527-33606-7 (2018)