

# Autonomie und Robustheit in verteilten Cyber-Physical Systems

*Methoden der künstlichen Intelligenz*

Stefan Bosse und Frank Kirchner, Universität Bremen



Dr. rer. nat. Stefan Bosse arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bremen im Fachbereich Mathematik und Informatik, Fachgebiet Robotik, und ist Projektleiter und Ratsmitglied in der zentralwissenschaftlichen Einrichtung ISIS Sensorische Materialien.



Prof. Dr. Frank Kirchner leitet das Fachgebiet Robotik im Fachbereich Mathematik und Informatik der Universität Bremen und das angegliederte DFKI Institut Robotics Innovation Center mit dem Themenschwerpunkt Autonome Robotische Systeme.

Sensoren und Aktoren finden immer häufiger Anwendung in der industriellen Produktion. Traditionell werden zentralistische Ansätze für die Verarbeitung der Sensordaten und Ansteuerung der Aktoren verwendet. Zunehmende Dichte von Sensoren und Aktoren, mit gleichzeitig fortschreitender Miniaturisierung, erfordern dezentrale Datenverarbeitung in verteilten Netzwerken aus Sensoren und Aktoren. Die Künstliche Intelligenz, ein Teilgebiet der Informatik, kann wichtige Beiträge für Robustheit

und Autonomie bei der Verarbeitung und Verteilung von Daten in solchen Netzwerken liefern.

Verteilte Sensornetze und Cyber Physical Systems (CPS) gewinnen zunehmend in der technischen und industriellen Anwendung an Bedeutung. Miniaturisierte und stark ausgedehnte Netzwerke mit hoher Sensordichte, wie sie z.B. in sogenannten sensorischen Materialien mit eingebetteten aktiven Sensorknoten und Mikrosensorik Anwendung finden, benötigen dezentrale und verteilte Datenverarbeitungs- und Kommunikationskonzepte, um lokal die Ressourcen und Rechenleistung pro Knoten sowie global Kommunikationskosten und Energiebedarf klein zu halten [1].

Dabei sind Sensornetze charakterisiert durch folgende Metriken: Energieeffizienz/Lebenszeit, Latenz bei der Gewinnung und Propagierung der Sensorinformation, Qualität und Genauigkeit der Informationsgewinnung im Rahmen einer gestellten Aufgabe, Fehlertoleranz und Skalierbarkeit. Hinzuzufügen ist noch der Grad der Autonomie und Kooperationsfähigkeit einzelner Netzwerkknoten hinsichtlich Datenverarbeitung und Kommunikation. CPS sind gekennzeichnet durch ihre Interaktion mit der Umgebung und einer starken Kopplung zwischen Berechnung, Rezeption und Steuerung [1].

Sensorische Materialien [2] nehmen eine zentrale Rolle u.a. bei der

Strukturüberwachung von mechanisch belasteten Bauteilen in einer großen Vielfalt von Anwendungsfeldern ein. Dabei besteht ein sensorisches Material aus einem Trägerwerkstoff, der definierte mechanische Eigenschaften besitzt, und eingebetteten Sensorknoten, die selbst aus physikalischen Sensoren, Signalkonditionierung, Datenverarbeitungs- und Kommunikationsmodulen bestehen. Die Kommunikationsmodule ermöglichen die Vernetzung der Sensorknoten zu einem Netzwerk, sowohl drahtgebunden als auch drahtlos, insbesondere auch mit optischen Verbindungstechnologien [3]. Sensorische Materialien stellen aber auch einen wesentlichen Beitrag für robotische Systeme dar, wo sensorische Information der Umwelt gewonnen werden muss, um die Reaktion und Interaktion eines Roboters mit und in seiner Umwelt zu steuern sowie eine Zustandsschätzung des Roboters zu ermöglichen [4].

Sensorische Materialien mit dem Grenzfall Smart Dust benötigen je nach Anwendungsfall hoch miniaturisierte autonome Sensorknoten, die mit einem einzigen Mikrochip technisch realisiert werden müssen [3]. Neuere Entwicklungen fokussieren daher auf single-System-on-Chip (sSoC) Implementierungen.

Ein Netzwerk aus Sensorknoten kann als ein verteiltes Datenverarbeitungssystem angesehen werden, welches global Informationen berechnen muss, die auf lokalen Sensordaten

## Kontakt

Universität Bremen  
Fachbereich Mathematik & Informatik  
Fachgruppe Robotik  
Robert Hooke Str. 5  
28359 Bremen  
E-Mail: [sbosse@uni-bremen.de](mailto:sbosse@uni-bremen.de)  
URL: <http://www.informatik.uni-bremen.de>

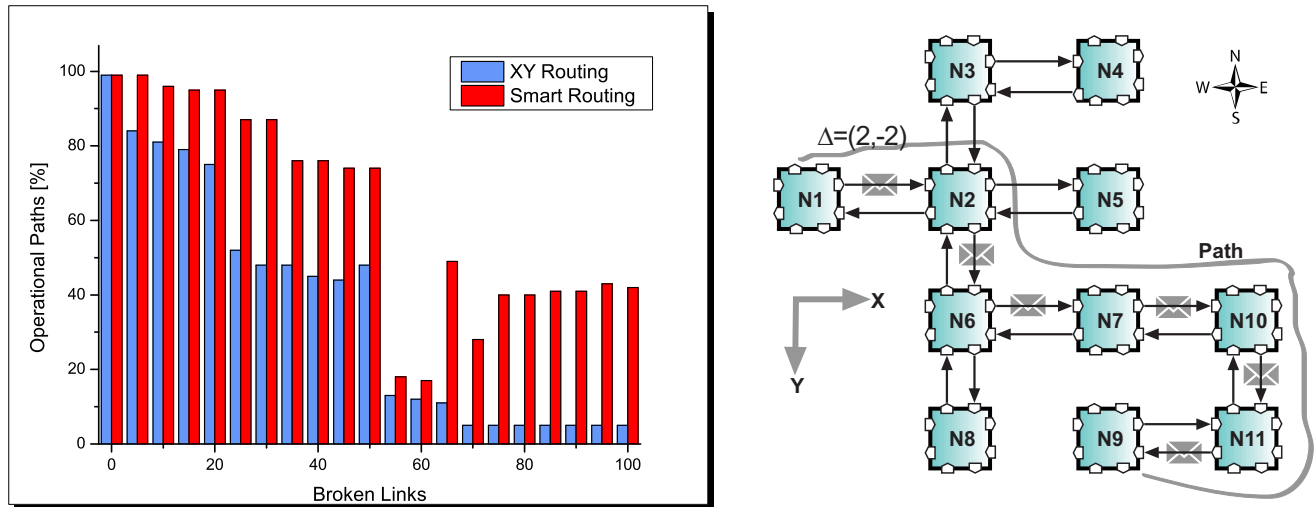


Bild 1: Nachrichtensbasierte robuste Kommunikation in unvollständigen und irregulären Sensornetzwerken mit smarten adaptiven Nachrichten (rechts) im Vergleich mit klassischen XY-Routing in einem stark gestörten Netzwerk: Ergebnisse einer Simulation (links).

beruhen. Die verteilte Datenverarbeitung, sowohl auf algorithmischer als auch systemischer Ebene, und Gruppenkommunikation stellen die Grundlage für die Informationsgewinnung dar. Netzwerke aus lose gekoppelten Sensorknoten und das Vorhandensein von technischen Störungen und Ausfällen (Sensorisches Material mit eingebetteten Sensorknoten) stellen hohe Anforderungen an Robustheit und Autonomie.

### Kommunikation

Robuste Kommunikation durch smartes adaptives Routing erhöht die Fehlertoleranz hoch-miniaturisierter Sensornetzwerke und unterstützt irreguläre und unvollständige Netzwerktopologien, mit zusätzlich fehlenden Verbindungen, wie sie in Bild 1 rechts zu sehen sind.

Das skalierbare Netzwerkprotokoll SLIP implementiert smartes adaptives und fehlertolerantes Routing auf Schaltkreisebene und dient als Basis für die folgende Methodik der dezentralen Datenverarbeitung mittels Agenten [5]. Das Protokoll unterstützt adaptive und parametrisierbare nachrichtensbasierte Kommunikation und nutzt vereinfachte Delta-Adressierung (als

klassisches Hop-Protokoll mit Peer-to-Peer Vermittlung über die einzelnen Knoten entlang eines Pfades) mit situationsabhängiger Routingselektion, die auf lokalen Informationen und historischen Informationen der Nachricht basiert, um Pfade von einem Quell- zu einem Zielknoten finden zu können. Mit diesem Netzwerkprotokoll, welches vollständig als Hardware- und Software-Implementierung vorliegt, können Nachrichten in gestörten und (bezüglich möglicher Verbindungen) unvollständigen Netzwerken zugestellt werden. Selbst bei einem Störungsgrad im Mittel von 50 % fehlerhafter Kommunikationsleitungen zwischen Nachbarknoten sind noch mehr als 50 % der möglichen Verbindungen zwischen allen Knoten erreichbar, im Vergleich zu weniger als 5 % bei normalen XY-Routing (Bild 1, links) [6].

### Künstliche Intelligenz

Bisherige klassische Ansätze der Datenverarbeitung in komplexen Sensor- und Aktornetzwerken setzen i.A. Determinismus und Korrektheit der ausführenden Komponenten (Mikroprozessoren, Kommunikation etc.) voraus. Weiterhin müssen alle Komponenten in einem solchen System-

übereinstimmende und bekannte Schnittstellen besitzen (Komponente A kann nur mit Komponente B Daten austauschen, wenn beide übereinstimmende Datenschnittstellen und Nachrichten verwenden, die im Voraus festgelegt werden). Steuerungs- und Regelungsaufgaben setzen i.A. bekannte Weltmodelle voraus, die nicht immer vollständig vorliegen, wie im Fall des Energiemanagements oder bei komplexen mechatronischen Systemen (Dynamischer Roboterarm). Weiterhin spielt eine robuste und dynamisch anpassbare Interaktion zwischen Komponenten in einem Netzwerk eine wesentliche Rolle für die Funktionalität des Gesamtsystems. Die im nächsten Abschnitt beschriebenen Agenten bilden solche Interaktion ab.

Lernverfahren bieten einem System die Möglichkeiten, 1. an veränderte Umgebungsbedingungen zu adaptieren und 2. auch ohne ein genaues Weltmodell Entscheidungen treffen zu können, wie z.B. die Beurteilung von strukturellen Eigenschaften eines Bauteils, um Überlast und Ermüdung erkennen zu können. Ein System (und auch ein Agent) ist lernfähig, wenn sich die Leistungsfähigkeit auf neuen oder unbekanntem Daten im Laufe der Zeit verbessert.

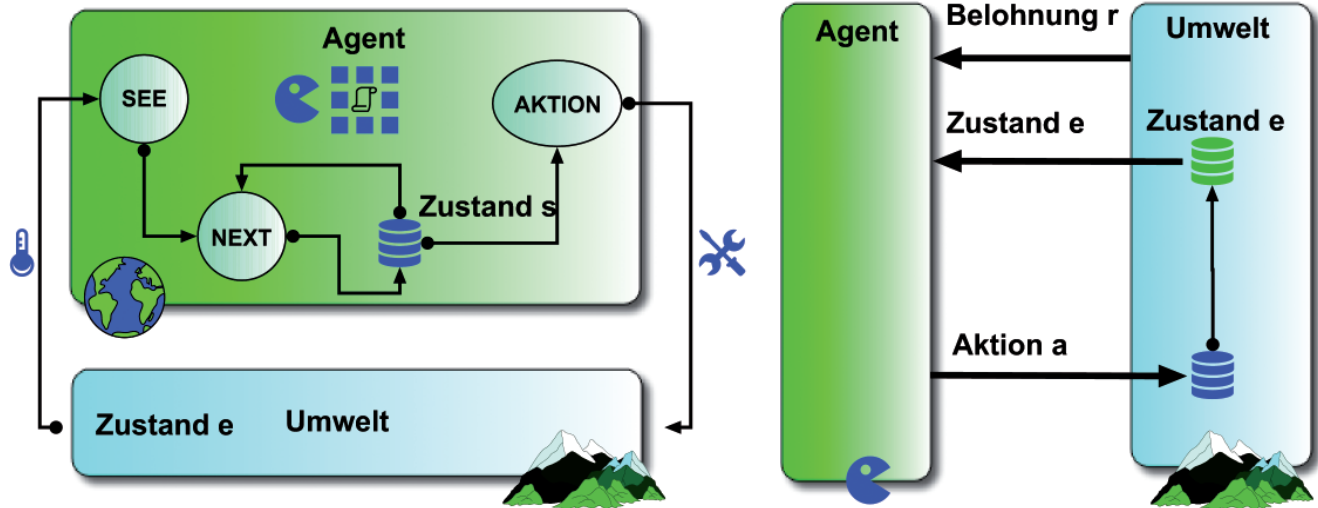


Bild 2: Zustandsbasierte Agenten nehmen ihre Umwelt wahr und verarbeiten diese Wahrnehmung, um Aktionen zu planen (links), die die Umwelt verändern können (rechts).

## Multi-Agenten Systeme

Multi-Agenten Systeme bieten verbesserte Möglichkeiten für die verteilte, robuste und semi-autonome Datenverarbeitung und Kooperation insbesondere für globales Ressourcenmanagement und um globale Ziele einer Gruppe von einzelnen autonomen Knoten sicher zustellen [7]. Verteilte Datenverarbeitung in großen Netzwerken aus eingebetteten Systemen mit smarten adaptiven Nachrichten, deren Inhalte nicht interpretiert, sondern als Programmcode auf einer virtuellen Maschine ausgeführt werden (ähnlich dem Ausführungsmodell von mobilen migrierenden Agenten) wird in [8] beschrieben, wodurch eine geringere Abhängigkeit von Nachricht und Sensorknoten erreicht wird, da der Knoten selber keine detaillierte Kenntnis über den Aufbau und die Struktur (Datentypen) der Nachricht besitzen muss, was auch zu einer Verbesserung der Systemrobustheit führt.

Es existieren mikrochip-fähige Architekturen für Multi-Agenten Systeme, geeignet für verteilte Datenverarbeitung in Sensornetzwerken [9] und Einbettung in sensorische Netzwerke von technischen Strukturen wie Greifern [4]. Agenten sind in der Lage Daten und Informationen bedarfsabhängig an andere Knoten in einem Netzwerk

oder einem Teilbereich des Netzwerks zu liefern, indem Sensorknoten lokal ebenfalls durch einen Agenten repräsentiert werden, ähnlich dem Verfahren der gerichteten Diffusion aus [10] oder verteilten Tupelraummethodiken [11], die ebenfalls Robustheit und Fehlertoleranz erreichen.

Zustands-basierte Agenten (Bild 2, links) besitzen einen internen Zustand  $i \in I$ , die bei ihren Entscheidungen auch die Vergangenheit mit einbeziehen können (Gedächtnis). Agenten nehmen Informationen ihrer Umgebung über ihre Umwelt auf, die aus einer Menge von Zuständen  $e \in E$  besteht. Eine Perzeptions-Funktion  $see$  bildet dabei die externen Umweltzustände auf eine Menge von bekannten Wahrnehmungen  $p \in PER$  ab, aus denen dann mittels einer Funktion  $action$  in Abhängigkeit des internen Zustands eine Aktion ausgeführt wird (z.B. auch Migration). Zustandsübergänge werden durch den aktuellen Zustand und der erfolgten Wahrnehmung gebildet (Funktion  $next$ ).

$$\begin{aligned} action &: I \rightarrow Act \\ next &: I \times Per \rightarrow I \\ see &: E \rightarrow Per \end{aligned}$$

Aktionen bewirken eine Änderung der Umwelt, die wiederum von dem Agenten wahrgenommen werden kann. Der Agent ist Bestandteil seiner Umge-

bung und kann daher zusammen mit der Umwelt mit einem Gesamtzustand  $s \in S$  zu einem bestimmten Zeitpunkt  $t$  beschrieben werden.

Lernfähige Agenten können ihre Leistungsfähigkeit, eine gestellte Aufgabe zu lösen, mit der Zeit verbessern, indem sie die Wirkung ihrer Aktionen auf die Umwelt analysieren. Nach einer ausgeführten Aktion erhält der Agent eine Rückkopplung in Form einer Belohnung (Verstärktes Lernen, siehe Bild 2 rechts):  $r_t = r(s_t, a_t)$ , abhängig vom aktuellen Zustand und Aktion. Es gibt Strategien  $\pi : S \rightarrow A$  die Umwelt-Zustände auf Aktionen abbilden. Ziel des Lernens durch Verstärkung ist es, dass der Agent eine optimale Strategie  $\pi^*$  lernt. Er muss somit in Abhängigkeit der Belohnung geeignete Strategien auswählen, um sein Ziel zu erreichen. Dies geschieht meistens durch eine abgeschwächte Belohnung, die auch die Vergangenheit einbezieht. Mit dieser Bewertung von einzelnen Strategien kann die optimale Strategie ausgewählt werden.

## Energiemanagement mit Agenten

Globales Energiemanagement in Sensor-Aktor-Netzwerken ist ein Anwendungsbeispiel für verteilte Daten-

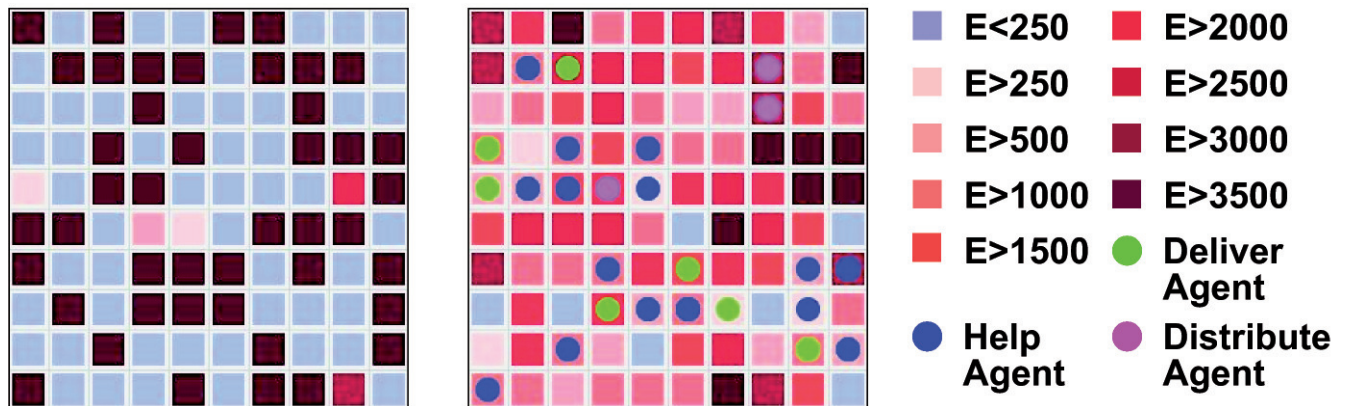


Bild 3: Simulation der Energieverteilung in einem selbstversorgenden Sensornetzwerk: links ohne Energieverteilung und Energiemanagement, in der Mitte das Ergebnis mit intelligenter Energieverteilung mittels Agenten.

verarbeitung, bei der Robustheit und Effizienz eine wichtige Rolle einnehmen. Hoch-integrierte und ausgedehnte Netzwerke benötigen neue Konzepte der Energieversorgung. Bisherige Ansätze der zentralen Versorgung sind insbesondere bei in Materialien eingebetteten Sensornetzwerken nicht mehr anwendbar und eine dezentrale Energieversorgung wird benötigt. Diese kann auf lokal gewonnene Energieressourcen (thermo- und opto-elektrische Wandlung, Energy-Harvesting [12]) aufbauen, die zwischengespeichert werden. Neben einer möglichst optimalen Verwendung der limitierten Energieressourcen stellt die Verteilung von Energie zwischen einzelnen Knoten im Netzwerk eine weitere Möglichkeit dar, die Systemstabilität und Funktion sicherzustellen. Die Übertragung der Energie kann technisch über das Kommunikationsmedium erfolgen, welches bereits vorhanden ist [13]. Agenten, die zwischen den Knoten des Netzwerks migrieren, können für die Exploration und Verteilung von Energie eingesetzt werden. Dabei verhandeln Explorationsagenten, die von Knoten mit Energie- und vorhandenen oder absehbaren Funktionsdefiziten ausgesandt werden, mit lokalen Knotenagenten über Energie. Wenn im Nachbargebiet eines anfragenden Knotens ein Knoten mit entsprechend hoher Energiereserve gefunden wird, wandelt sich der mobile Explorationsagent in einen stationären Auslieferungsgenten. Dieser sendet

Energieagenten (die Energie mitführen) zurück an den zu versorgenden Knoten. Das Verhalten ist in der folgenden Definition zusammengefasst:

**NODE:** Dieser Agent stellt die Inter-Agent Kommunikation und das lokale Energiemanagement sicher. Er versendet HELP Agenten, wenn die lokale Energiereserve eine Schwelle unterschreitet:  $E < E_{T1}$

**HELP:** Dieser Agent exploriert die Umgebung nach Knoten mit einer lokalen Energie oberhalb einer Schwelle:  $E_x > E_{T2}$ . Wenn er einen geeigneten Knoten gefunden hat, nistet sich der HELP Agent dort ein und sendet in zeitlichen Abständen DELIVER Agenten.

**DELIVER:** Dieser Agent transportiert Energie zu dem anfragenden Knoten mit help-on-way Verhalten, wobei zunächst Knoten auf dem Weg mit Energie versorgt werden.

**DISTRIBUTE:** Knoten mit sehr viel lokaler Energie  $E >> E_{T3}$  können DISTRIBUTE Agenten aussenden, die benachbarte bedürftige Knoten mit Energie versorgen.

Bild 3 zeigt die Simulation eines Netzwerks bestehend aus 100 Knoten, die sich zunächst lokal selbst mit Energie versorgen können. Dabei gibt es Knoten die genügend Energie besitzen ( $E > 1000$  Energieeinheiten/EU), und mehr als 50 %, die nicht genügend Energie lokal gewinnen können ( $E < 250$  EU), und deren Operabilität stark eingeschränkt ist.

Unter Verwendung des oben beschriebenen globalen Energiemanagements mit Agenten durch verhandelte Energiediffusion, kann eine Gleichverteilung der Energie im Netzwerk erreicht werden, bei der nur noch weniger als 5 % der Knoten nicht operabel sind.

## Fazit

Methoden der Künstlichen Intelligenz können eingesetzt werden für robuste verteilte Datenverarbeitung in komplexen Sensor- und Aktornetzwerken, deren Topologie und Randbedingungen noch nicht zum Entwicklungszeitpunkt feststehen. Agenten bieten Flexibilität und Effizienz und können gestellte Aufgaben kooperativ mit einer gemeinsamen Zielsetzung bewältigen. Eine beispielhafte Anwendung, sowohl für verteilte Datenverarbeitung als auch Kooperativität, wurde anhand globalen Energiemanagements in einem Netzwerk gezeigt. Agenten können direkt auf Mikrochip-Ebene implementiert werden, was bei hoher Miniaturisierung ein entscheidendes Entwurfskriterium ist.

## Literatur

- [1] Wattenhofer, R.: Sensor Networks: Distributed Algorithms Reloaded – or Revolutions? In: Flocchini, P.; Gasieneć, L.: Structural information and communication complexity : 13th international colloquium, SIROCCO 2006, Chester,



Technologie für  
Dienstleistungen –  
Die Zukunft erschließen  
und produktiv bleiben

13. – 14.03.2013

- Fachtagung
- Fachmesse Schwerpunkt:  
„Technologien für den Service“
- Austauschplattform

**Jetzt noch bis zum 31. Januar  
Frühbucherrabatt sichern!**

Innovative Dienstleistungen ermöglichen die Entwicklung einzigartiger Problemlösungen für die produzierende Industrie, sind wichtige Pfeiler für die Infrastruktur und oftmals der entscheidende Impulsgeber zur Gründung neuer Unternehmen. Insbesondere der Einsatz neuer Technologien ist wesentlicher Treiber für Innovationen in der Dienstleistungsbranche, da diese dazu beitragen können, Ihr bestehendes Dienstleistungsportfolio effizienter zu erbringen, neue Dienstleistungen hervorzubringen und somit Marktanteile zu sichern.

Auf dem 16. Aachener Dienstleistungsforum werden Möglichkeiten und Potenziale neuer Technologien und Lösungswege zur erfolgreichen Implementierung sowie das notwendige Change-Management aufgezeigt.

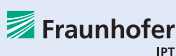
#### Ansprechpartner

FIR e. V. an der RWTH Aachen  
Dipl.-Wirt.-Ing. Dirk Wagner  
+49 241 47705-241  
E-Mail: dienstleistungsforum  
@fir.rwth-aachen.de  
Internet: www.dienstleistungsforum.de

#### Veranstalter



#### Kooperationspartner



- UK, July 2 - 5, 2006; Proceedings. Berlin 2006.
- [2] Lang, W.; Jakobs, F.; Tolstosheeva, E.; Sturm, H.; Ibragimov, A.; Kesel, A.; Lehmus, D.; Dicke, U.: From embedded sensors to sensorial materials - The road to function scale integration. In: Sensors and Actuators A: Physical 171 (2011) 1, S. 3-11.
- [3] Warneke, B.; Last, M.; Liebowitz, B., Pister, K.S.J.: Smart dust: Communicating with a cubic-millimeter computer. In: Computer 34 (2001) 1, S. 44-51.
- [4] Tracht, K.; Hogreve, S.; Bosse, S.: Intelligent Interpretation of Multiaxial Gripper Force Sensors. In: Proceedings of CIRP Conference on Assembly Technologies, CATS 2012.
- [5] Bosse, S.; Lehmus, D.: Smart Communication in a Wired Sensor- and Actuator-Network of a Modular Robot Actuator System using a Hop-Protocol with Delta-Routing. In: Proceedings of Smart Systems Integration conference, Como, Italy, 23-24.3.2010.
- [6] Bosse, S.; Pantke, F.; Kirchner, F.: Data Processing and Communication in Distributed Low-power Sensor Networks using Multi-agent Systems. In: 1st Joint International Symposium on System-Integrated Intelligence 2012.
- [7] Rogers, A.; Jennings, N.: Intelligent agents for the smart grid. In: Per Ada Magazine. doi:10.2417/2201005.003002 (2012).
- [8] Iftode, L.; Borcea, C.; Kang, P.: Co-operative Computing in Sensor Networks. In: Ilyas, M. (Hrsg): Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems. BocaRaton 2004.
- [9] Bosse, S.; Pantke, F.; Kirchner, F.: Distributed Computing in Sensor Networks Using Multi-Agent Systems and Code Morphing. In: Proceedings of the 11th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing Conference ICAISC 2012, 29.4. - 3.5.2012, Zakapone, Poland.
- [10] Intanagonwivat, C.; Govindan, R.; Estrin, D.: Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks. In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking. 11(2000) 3, S. 56-67.
- [11] Patterson, L.I.; Turner, R.S.; Hyatt, A.M.; Reilly, K.D.: Development of a fault-tolerant distributed tuple-space. In: Proceedings IEEE Southeastcon 92. New York 1992.
- [12] Shwe, Y.W.; Liang, Y.C.; Member, S.: Smart Dust Sensor Network with Piezoelectric Energy Harvesting. In: The 6th International Conference on Information Technology and Applications (ICITA 2009). Hanoi 2009.
- [13] Bosse, S.; Kirchner, F.: Smart Energy Management and Energy Distribution in Decentralized Self-Powered Sensor Networks Using Artificial Intelligence Concepts. In: Proceedings of the Smart Systems Integration Conference 2012, Session 4, Zürich, Schweiz, 22 - 23 Mar. 2012.

#### Schlüsselwörter:

Sensorische Materialien, Sensornetzwerke, Künstliche Intelligenz, Agenten, Verteilte Datenverarbeitung, System-On-Chip

#### Autonomy and Robustness in Distributed Cyber-Physical Systems and Sensorial Materials Using Artificial Intelligence Concepts

Today sensors and actuators gain increased importance in industrial production processes. Traditionally centralized processing architectures are used for sensor data processing and actuator control. Increasing sensor and actuator densities require new decentralized and distributed processing methods and architectures. Artificial Intelligence, part of computer science, can contribute to robustness and autonomy aspects concerning data processing and distribution.

#### Keywords:

Sensorial Materials, Sensor Networks, Artificial Intelligence, Agents, Distributed Computing, System-on-Chip Design