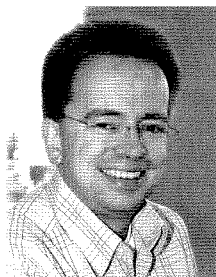


N. Luttenberger, S. Fischer, E. Maehle, D. Timmermann und V. Turau

# Multi-hybride Sensornetze



Prof. Dr.-Ing. *Norbert Luttenberger* studierte Elektrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig. Er startete seine berufliche Karriere als Entwicklungsingenieur bei der Siemens AG im Bereich Automatisierungstechnik in Erlangen, wo er von 1970-77 tätig war. Er wechselte dann an das Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung der Universität Erlangen-Nürnberg, um dort 1984 zum Dr.-Ing. promoviert zu werden. Danach arbeitete als leitender wissenschaftlicher Berater in den Abteilungen für Multimediakommunikation und für mobile Datenkommunikation des Europäischen Netzwerkzentrums der IBM in Heidelberg. 1995 wurde er auf eine Professur für Datenübertragung und Netzwerke an die Fachhochschule Gelsenkirchen berufen, und 2000 folgte ein Ruf auf die Professur für Kommunikationssysteme an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Laufende Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit den Themengebieten Drahtlose Sensornetze (DFG-Projekt SWARMS, gemeinsam mit Prof. Dr. Stefan Fischer), Netzwerksicherheit und XML-Sprachtechnologie für die Meerforschung.



*Stefan Fischer* studierte Wirtschaftsinformatik an der Universität Mannheim und promovierte dort im Jahr 1996 in Informatik. Nach einem Postdoc-Aufenthalt in Montreal, Kanada, wurde er 1998 Assistant Professor für Informationssysteme an der International University in Bruchsal. Im Jahr 2001 wechselte er auf eine Professur für verteilte Systeme an der TU Braunschweig und im November 2004 schließlich an die Universität zu

Lübeck, wo er seitdem Professor für Praktische Informatik und Leiter des Instituts für Telematik ist. Er beschäftigt sich mit den Herausforderungen, die die zunehmend allgegenwärtige Verfügbarkeit von Rechensystemen und Kommunikationsmöglichkeiten mit sich bringt. Aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich vor allem mit dem Gebiet der drahtlosen Sensornetze.



*Erik Maehle* hat sein Diplom in Informatik 1977 von der Universität Erlangen-Nürnberg erhalten und wurde dort 1982 zum Dr.-Ing. promoviert. Anschließend arbeitete er als Postdoc am IBM Forschungslabor Zürich und kehrte 1983 nach Erlangen zurück. In 1987 wurde er zum Professor für Praktische Informatik an der Universität Augsburg ernannt, 1989 wechselte er als Professor für Da-

tentechnik an die Universität-GH Paderborn. Seit 1994 ist er Professor und Direktor des Instituts für Technische Informatik an der Universität zu Lübeck. Seine Forschungsgebiete sind parallele und fehlertolerante Systeme, rekonfigurierbares Rechnen, Organic Computing sowie mobile Roboter.



*Dirk Timmermann*, Studium der Elektrotechnik an der Universität Dortmund mit Abschluss 1984 als Diplom-Ingenieur. Bis 1989 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme in Duisburg, Abteilung Signalverarbeitung und Systementwurf. Juli 1990 Promotion zum Dr.-Ing. am Fachbereich Elektrotechnik der Universität Gesamthochschule Duisburg bei Prof. Dr. Hosticka

(„CORDIC-Algorithmen, Architekturen und monolithische Realisierungen mit Anwendung in der Bildverarbeitung“). Bis 1993 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter am Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg, Abteilung Signalverarbeitung und Systementwurf. Von 1993 bis 1994 Professor für Datentechnik an der Universität-GH Paderborn, Abt. Meschede. Seit 1994 ordentlicher Universitätsprofessor (C4) an der Universität Rostock, Fakultät für Informatik und Elektrotechnik, Geschäftsführender Direktor des Instituts für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, Inhaber des Lehrstuhls für Rechner in Technischen Systemen. Forschungsinteressen sind energieoptimierte digitale Systeme, Sensornetze, Chipentwurf. Verheiratet, 3 Kinder. Website: [www.imd.uni-rostock.de](http://www.imd.uni-rostock.de)



*Volker Turau* ist Professor für Verteilte Systeme an der Technischen Universität Hamburg-Harburg und leitet dort das Institut für Telematik. Er promovierte 1984 an der Johannes Gutenberg Universität Mainz. Nach einem Postdoc-Aufenthalt an der University of Manchester war er in der GMD in Darmstadt als wissenschaftlicher Mitarbeiter tätig. Seine aktuellen Forschungsschwerpunkte sind drahtlose Sensornetze, Fehlertoleranz

in vernetzten Systemen und verteilte Algorithmen.

## 1 STANDORTBESTIMMUNG

Etwa um das Jahr 2000 herum wurde in vielen Forschungsprojekten die Vision des *Ubiquitous Computing* (UC) aufgegriffen, die von ihrem Vordenker Marc Weiser ca. zehn Jahre zuvor in [1] wie folgt beschrieben wurde: „Ubiquitous computing is the method of enhancing computer use by making many computers available throughout the physical environment ... The most profound technologies are those that disappear. They weave themselves into the fabric of everyday life until they are indistinguishable from it.“

Unter den Auspizien dieser Vision vom *Ubiquitous Computing* nahmen und nehmen die Sensornetze eine besondere Rolle ein: Nicht nur sollen diese Netze unerkennbar in den Alltag eingewoben sein, ihrem Benutzer unsichtbar und ohne weitere Belästigungen (z.B. durch Aufforderungen wie „Wechseln Sie Ihre Energiequelle!“) ihre Dienste erbringen – sie sollen darüberhinaus auch spontan in ihre Umgebung *ausgebracht* werden können: Die Zauberwörter heißen „spontane Vernetzung“ und „Selbstorganisation“. Und das alles soll möglich sein auf der Basis von unzuverlässiger und störungsanfälliger Funkkommunikation, von schwachen Batterien mit unvorhersehbarer Lebensdauer und von minimalistischer Staubflocken-Hardware – selbstverständlich zu vernachlässigbaren Kosten.

Zweifellos hat die UC-Vision gerade in ihrer Variante „Drahtlose Sensornetze“ (*Wireless Sensor Networks*, WSNs) eine fruchtbare Neubesinnung der Informatik ausgelöst: Wie gehen wir mit Unzuverlässigkeit um? Wie kann man Ressourcen (Rechenzeit, Speicherkapazität, Batterieladung) effizient nutzen? Wie kann der Aufwand für das Netzwerk-Management vom Benutzer hin zum Netz selber verlagert werden? Wie können Dienste für Benutzer erbracht werden, auch wenn diesem als *user interface* weder Bildschirm, noch Tastatur, noch Maus zur Verfügung stehen? Wie kann das Verhalten eines Netzes und seiner Knoten in Abhängigkeit vom aktuellen Kontext gesteuert werden, in dem sich dieses Netz befindet? Gerade in der Betonung der ressourcenbewußten Dienstleistung scheinen die Sensornetze hervorragend in die heutige Debatte von der „grünen“ Informationstechnologie zu passen, und sicherlich hat auch die (zumindest aus dem wissenschaftlichen Umfeld herührende) Nachfrage nach extrem energieeffizienten Prozessoren, Speichern und Funkschnittstellen ihren Teil dazu beigetragen, daß viele Hardwarehersteller sich dieses Themas erkennbar angenommen haben.

Bei all diesen Projekten scheint allerdings eine der beteiligten Gruppen auf der Strecke geblieben zu sein, nämlich die Gruppe der Anwender, die Sensornetze für tatsächliche Meßaufgaben – deren Lösbarkeit durch Sensornetze ja stets postuliert wurde – einsetzen wollen. War schon der erste breit bekanntgewordene Einsatz eines Sensornetzes auf dem *Great Duck Island* von schwierigen Problemen begleitet [2], so hat Matt Welsh von der Harvard University in einem zur IEEE DCROSS 2008 eingeladenen Vortrag [3] auch noch ca. sechs Jahre später sehr kritisch über seine Erfahrungen beim Einsatz eines Sensornetzes zur Vulkanbeobachtung berichtet: Insbesondere Schwierigkeiten bei der Etablierung der Validität der Meßdaten und mangelhafte Zuverlässigkeit haben große Probleme bereitet. Metriken für die „Treue“, mit der ein Sensornetz sein Einsatzgebiet abbildet („WSN fidelity“), sind nur schwach entwickelt.

Andere Anwender haben schmerzhaft erfahren müssen, daß – weit jenseits von „spontaner Ausbringung“ – selbst die vorher-

geplante Ausbringung eines Sensornetzes ein langwieriger und kostenintensiver Prozeß sein kann, dessen Wiederholung eher zu umgehen ist. Um iterative Ausbringungen zu vermeiden, muß u.a. die Software, die auf den Sensorknoten unter engen Ressourcenrestriktionen zum Ablauf gebracht wird, „*first time right*“ sein – eine Anforderung, der die heutigen Methoden des Software-Engineering nur bedingt gewachsen sind.

Versucht der Anwender schließlich, die Ausbringung eines Sensornetzes durch eine vorhergehende Simulation abzusichern, kann er sich nur einiger weniger Simulatoren bedienen, die es gestatten, sowohl die geplante „Original“-Software ablaufen zu lassen, als auch die Funkkommunikation „realistisch“ nachbilden und die darüberhinaus auch Wechselwirkungen zwischen den Sensorknoten und ihrem Einsatzgebiet berücksichtigen.

Kurz gesagt: Anwender haben schlechte Karten.

Wir wollen in diesem Aufsatz einen Weg zeigen, wie das Forschungsgebiet Sensornetze im Lichte der Erfahrungen, wie sie etwa aus der Automatisierungstechnik bekannt sind, reaktiviert und neu bestimmt werden kann. Wir verwenden dazu den Begriff der *Multi-hybriden Sensornetze*, den wir im nächsten Absatz einführen.

## 2 BEGRIFFSBESTIMMUNG

In einer wunderbar hinterlistigen Geschichte, die in [4] wiedergegeben ist, wird von einem – bis heute nach bester Kenntnis der Autoren nur fiktiven – Treffen der Ingenieure und Informatiker mit den Schamanen berichtet. Gleich von Anfang an ziehen es die Ingenieure und Informatiker vor, das Gespräch auf technische Errungenschaften zu lenken, bei denen die Ingenieure und Informatiker ihre Triumphe gefeiert haben: Fernseher, Taschenrechner, Eisenbahnen, Autos, Computer. Müssen die Schamanen davon nicht über die Maßen beeindruckt sein? Sie sind es in der Tat – weisen aber sehr zum Mißvergnügen der Ingenieure und Informatiker immer wieder darauf hin, daß all diese technischen Errungenschaften ja nur in einer Welt funktionieren, die die Ingenieure und Informatiker zuvor entsprechend ausgerichtet haben. Kann denn ein Auto fahren, ohne daß man die Welt (durch Straßen) befahrbar gemacht hat?<sup>1</sup>

Wozu diese Geschichte?

In seiner oben zitierten Vision des *Ubiquitous Computing* geht Marc Weiser unserer Meinung nach allzu großzügig mit den Voraussetzungen um, die gelten müssen, bevor das *Ubiquitous Computing* (oder irgendein anderes „Computing“) seine Wirksamkeit entfalten kann. Es klingt so, als ob die Welt keine Vorbereitung für ihre Ausstattung mit den in ihr verschwindenden Rechnern brauche, als ob sie sich so, wie sie ist, den Segnungen des *Ubiquitous Computing* darbietet.

In den Ingenieurdisziplinen sind Planung und sorgfältige Untersuchung der Machbarkeit angestammte Instrumente, die in keinem Entwicklungsprozeß fehlen. In diesem Sinne plädieren wir hier dafür, das Forschungsgebiet Sensornetze mit einigen Tugenden der Ingenieurwissenschaften auszustatten, um zu praktisch relevanten Lösungen zu kommen. Den primären An-

<sup>1</sup> Die letzte Pointe der Geschichte wird hier nicht erzählt – es sei nur verraten, daß sie dem „ältesten, weißhaarigsten (sic!) und zahnlosesten (sic!) Schamanen“ in den Mund gelegt wird.

satz zur Erreichung des gesteckten Ziels sehen wir darin, daß die „reine Lehre“, wie sie im Zitat von Marc Weiser anklingt, verlassen wird und Sensornetze unter pragmatischen Aspekten als multi-hybride Gebilde aufgefaßt werden. Wir versuchen im folgenden, diesen Begriff zu erläutern.

Hybridität bedeutet eine Kombination von zwei oder mehr vorher getrennten Technologien zu einer neuen Einheit. Die Besonderheit liegt darin, daß technische Elemente auf der Basis einer einzelnen Technologie für sich allein genommen oft schon eine Lösung darstellen, daß durch das Zusammenbringen verschiedener Technologien aber neue wünschenswerte Eigenschaften entstehen können. Dabei kann über die einfache Kombinationen von Elementen mit unterschiedlicher Technologie hinaus „hybrid“ auch bedeuten, daß unterschiedliche Technologien, die einen jeweils unterschiedlichen inneren Aufbau besitzen, gemeinsam, doppelt oder sogar mehrfach für die ein- und dieselbe Funktion bzw. Variante einer Funktion eingesetzt werden.

Hybridtechniken findet man in vielen technischen Bereichen:

- Hybridfahrzeug: Fahrzeug werden mit einem Benzin- und einem Elektromotor ausgestattet.
- Hybridnetz: Ein Netz besteht aus Lichtwellenleitern und Kupferleitungen, z.B. bei modernen DSL-Verkabelungen.
- Hybridfestplatte: Ein persistenter Speicher besteht aus einer herkömmlichen Festplatte gemeinsam mit einem Solid-State-Speicher.

Die Entstehung hybrider Systeme erfolgt in der Regel mit großem zeitlichem Abstand zur Entwicklung der einzelnen Technologien. Ausgelöst wird die Entwicklung oftmals dadurch, daß das Potential der einzelnen Technologien ausgeschöpft zu sein scheint und ein weiterer Fortschritt nicht mehr oder nur noch in sehr geringem Umfang zu erwarten ist. Dies ist beispielsweise der Hintergrund für die Entwicklung von Hybridautos. In anderen Fällen sprechen ökonomische Gründe gegen die komplette Ablösung einer Technologie durch eine neue, bessere oder effizientere Technologie. In diesem Fall ist es sinnvoller, die vorhandene Lösung mit einer alternativen Technologie zu kombinieren – ein Beispiel hierfür sind Hybridnetze.

Bei der Entwicklung multi-hybrider Systeme entsteht häufig ein Spannungsfeld zwischen den zu integrierenden Basistechnologien, handelt es sich doch vielfach um diametral entgegengesetzte Konzepte. In der Regel verfolgen diese Basistechnologien ihre eigenen Konzepte und bauen auf sehr unterschiedlichen, teils einander widersprechenden Voraussetzungen auf.

Die Forschung auf dem Gebiet der Sensornetze ist in diesem Sinne ebenfalls an einem Punkt angekommen, an dem eine Hybridisierung diskutiert werden sollte. Zwar sind viele Bereiche noch nicht in aller Tiefe erforscht worden, aber trotz intensiver nationaler und internationaler Forschungsbemühungen haben Sensornetze nicht wirklich den Sprung in die Anwendungsebene geschafft. Die von vielen Mitgliedern der *community* gesuchte Killerapplikation ist noch nicht gefunden worden (trotz einer Vielzahl von Wettbewerben). Gleichzeitig hat die Sensornetztechnologie auch noch nicht den Reifegrad erreicht, der für einen großflächigen, industriellen Einsatz (wie immer sie auch aussehen wird) erforderlich ist.

Warum sprechen wir in diesem Aufsatz nun nicht nur von hybriden, sondern von „multi-hybriden“ Systemen? Wir gehen davon aus, daß ein so komplexes System wie ein Sensornetz bezüg-

lich mehrerer „Achsen“ als hybrides System ausgelegt werden kann und je nach Anwendungsfall auch sollte. Unter einer solchen „Achse“ verstehen wir eine Menge von Gestaltungsoptionen, deren Elemente bezüglich eines dominanten Gestaltungsmerkmals geordnet sind. Ein Sensornetz kann spontan ausgebracht werden, oder es kann in ein vorbereitetes Operationsgebiet unter der Maßgabe ausgebracht werden, daß sich die Knoten bei Ausbringung spontan vernetzen, oder es kann nach einem gründlichen Planungs- und Projektierungsprozeß in Gebiet ausgebracht werden, das zuvor mit einer kompletten Infrastruktur versehen wurde. In ähnlicher Weise kann man „Achsen“ bezüglich weiterer Merkmale definieren, z.B. Mobilität oder Energieversorgung. Die – wenn auch spärlichen – praktischen Erfahrungen mit Sensornetzen lassen den Schluß zu, daß der jeweilige Anwendungsfall darüber entscheiden sollte, welche der möglichen Gestaltungsoptionen man wählt. Im Sinne eines zu entwickelnden *Sensor Network Engineering* ist man aber derzeit noch weit davon entfernt, die gegenseitigen Wechselwirkungen dieser Optionen verstanden zu haben oder gar die „beste“ Gesamtkonfiguration vorhersagen zu können.

Um die aktuelle Situation der Sensornetzforschung besser verstehen zu können, ist es sinnvoll, an das auslösende Moment dieses Zweiges des Gebietes der Verteilten Systeme zu erinnern. Am Anfang stand eine Vision: *Smart Dust* – „intelligenter Staub“. Mikro-Computer in der Größe von Staubkörnern, ausgestattet mit Prozessor, Sensoren, Funkschnittstelle und Energieversorgung, können ihre Umgebung „mit allen Sinnen“ erfassen und die gemessenen Daten anschließend selbst verarbeiten. Tausende oder sogar Millionen solcher Sensorknoten arbeiten autark und autonom und organisieren sich ohne zentrale Instanz in Netzwerken, treten drahtlos miteinander in Kontakt und stimmen ihre Aktionen aufeinander ab. Das massenhafte Ausbringen in der Umwelt kann beispielsweise mit Flugzeugen erfolgen, die Knoten werden einfach über dem Einsatzgebiet abgeworfen. Die Aussicht, eine solche Vision umzusetzen, spornte vor knapp 10 Jahren viele Forscher an, sich diesem Gebiet zu widmen.

Bis zum heutigen Tag ist diese Vision nicht Wirklichkeit geworden, und es sieht auch nicht so aus, als ob sie jemals eintreten wird. Ein Grund liegt in der Energieversorgung. Auf dem Gebiet der Energiespeicher zeichnen sich derzeit keine Entwicklungen ab, welche einen dauerhaften Betrieb eines Computers, auch nicht eines staubkorngroßen Computers erlauben, davon abgesehen, daß auch die Antennentechnik eine derartige Miniarisierung nicht zuläßt. Obwohl dies schon seit mehreren Jahren evident ist, richtet sich die Forschung noch immer an Vorgaben aus, die sich ausschließlich aus dieser Vision ableitet.

Das Bild von sehr kleinen, sehr billigen Rechnern, die in sehr großer Stückzahl selbständig ein Netz bilden, das ohne jede Wartung über Jahre hinweg betrieben werden kann, hat – trotz der Euphorie der Forscher – bei Anwendern in der Industrie nicht „eingeschlagen“. Zwar gibt es Einsatzszenarien, deren Umsetzung wirtschaftlich interessant ist, die dabei auftretenden Anforderungen sind oftmals jedoch zur Verblüffung der Beteiligten Forscher viel bescheidener, als es die *community* der Sensornetzforscher gerne hätte. Es fehlen beispielsweise die Ideen für Anwendungsfälle, in denen

- ein Multi-Hop Routing über viele Sensorknoten oder
- ein zufälliges Ausbringen der Sensorknoten

erforderlich ist. In den bekannten Szenarien mit mobilen Sensorknoten ist meist ausreichend Energie vorhanden, so daß

sich die viel zitierte Energiefrage gar nicht stellt. Stattdessen zeichnen sich Anwendungen ab, in denen die Anforderungen wesentlich moderater ausfallen. Aber es hat sich als wichtig erwiesen, Sensornetzanwendungen in existierende Anwendungen zu integrieren. Und das zu genau spezifizierten Anforderungen an Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Somit sind die ursprünglich anvisierten homogenen Netze aus Millionen gleichartig aufgebauter Sensorknoten mit Batterie und drahtloser Funkschnittstelle nicht mehr das Leitbild. Dieses Bild wird durch Netze ersetzt, die von der Hardware, der Funkschnittstelle und der Energieversorgung her sehr heterogen sind. Diese Heterogenität kann sich beispielsweise dadurch ausdrücken, daß ein kleiner Teil der Sensorknoten mobil und der Rest stationär ist. Unter den Netzknoten kann es einige Knoten mit permanenter und andere mit erschöpflicher Energieversorgung geben. Viele der bisher als selbstverständlich erachteten Voraussetzungen gelten in solchen Netzen nicht mehr. So ist es nicht zwingend notwendig, daß die Kommunikation ausschließlich drahtlos erfolgt, es ist sehr gut vorstellbar, daß auch einige der Knoten über ein drahtgebundenes Kommunikationsnetz miteinander verbunden sind. Auch die Vorstellung, daß ausnahmslos alle Sensorknoten nur über sehr bescheidene Rechen- und Speicherressourcen verfügen, sollte aufgegeben werden. Diese Argumentationslinie läßt sich noch auf weitere Gebiete wie Ausbringen („deployment“) oder Bandbreite übertragen.

Das so umrissene Einsatzfeld von Sensornetzen wirft viele neue Fragen auf, kann aber auch auf die bisher entwickelten Lösungen zurückgreifen. Die Herausforderung, die sich aus multi-hybriden Sensornetzen ergibt, liegt in der Verschränkung unterschiedlicher Lösungen und der Herausbildung neuer Verfahren. Die Verzahnung klassischer Netzstrukturen mit selbstorganisierenden Verfahren hin zu einer multi-hybriden Organisation ist die neue Vision:

- Neben der spontanen Ausbringung eines Sensornetzes in seine Einsatzumgebung gibt es auch die Instrumentierung dieser Einsatzumgebung, z.B. um die Position der einzelnen Sensorknoten mit guter Präzision einmessen zu können. Es können z.B. Landmarken eingesetzt werden, die mobile Roboter bei der Selbstlokalisierung und Navigation dienen und damit möglicherweise eine bessere Orientierung der mobilen Knoten in ihrer Umwelt ermöglichen.
- Es sind Einsatzszenarien denkbar, in denen Sensorknoten mit Aktoren ausgestattet werden, die basierend auf den Messungen der Sensorik bestimmte Aktionen durchführen. Wir sprechen dann nicht mehr von Sensornetzen, sondern von (hybriden) Sensor-/Aktornetzen.
- Zusätzlich zu fixierten Sensorknoten können in manchen Anwendungen auch mobile Knoten zum Einsatz kommen: In diesem Fall haben wir es mit einem hybriden Netz aus mobilen und stationären Knoten zu tun. Bei den mobilen Knoten kann es sich z.B. um einen „Schwarm“ mobiler Roboter handeln, dessen Mitglieder sowohl untereinander als auch mit den stationären („fixierten“) Sensorknoten kommunizieren. Je nach Einsatzgebiet können sich diese Roboterschwärme auf dem Land, in der Luft oder im Wasser bewegen. Ihre Aufgabe kann es sein, bestimmte Gebiete mit hoher Auflösung zu erkunden oder nach bestimmten kritischen Punkten zu suchen und dort Daten zu erfassen. Außerdem können mobile Knoten genutzt werden, um Daten von Sensorknoten abzuholen, die außer Reichweite des übrigen Netzes liegen, z.B. weil dazwischenliegende Knoten ausgefallen sind. Umgekehrt können auch die stationären Knoten genutzt wer-

den, um eine Kommunikationsinfrastruktur für die mobilen Knoten „aufzuspannen“

- Sensor-Input dient in bestimmten Szenarien u.U. nicht nur zur Erfassung eines Zustands des Operationsgebiets eines Sensornetzes, sondern kann in mobilen Sensornetzen u.a. auch dazu genutzt werden, die Bewegung der mobilen Knoten in einer Rückkopplungsschleife zu beeinflussen. Wir haben es in diesem Fall mit einem Netz aus geregelten und gesteuerten Knoten zu tun.
- In einem Sensornetz kann eine Infrastruktur aus Knoten vorgesehen werden, die mit Strom aus der Steckdose versorgt werden. Damit lassen sich viele Routing-Fragen, die unter der Prämisse der Energieknappheit kaum lösbar waren, einfacher lösen.
- In diesem Aufsatz wird bewußt von „Sensornetzen“ und nicht von „Drahtlosen Sensornetzen“ gesprochen. Funkkommunikation ist weniger energieeffizient und weniger zuverlässig als drahtgebundene Kommunikation – warum sollte es in bestimmten Einsatzumgebungen nicht möglich sein, beides miteinander zu kombinieren? Neben die Funkkommunikation kann in bestimmten Einsatzszenarien aber auch die optische oder akustische (Ultraschall) Kommunikation treten. Dieses Ziel wird u.a. auch von industrieller Seite mit den Initiativen WirelessHART (<http://www.hartcomm.org/>) und ISA SP100 (<http://www.isa.org/>) verfolgt.
- Sensornetze können mit einer Vielzahl von gleichen Sensoren ein und dasselbe physikalische/chemische Phänomen beobachten, oder es kann in einem Sensornetz eine größere Zahl ganz unterschiedlicher Sensoren verwendet werden. Wir sprechen von homogenen bzw. heterogenen Netzen. Eine hybride Variante, bei der eine dominante Sensorik mit einigen „Ergänzungssensoren“ gemischt wird, wobei die letzteren z.B. der Kontexterfassung dediziert sind, kann möglicherweise zu ganz neuen Erkenntnissen führen.
- Ein nach wie vor schwieriges Gebiet ist die Softwareentwicklung für Sensornetze. Hier scheint es sinnvoll zu sein, ebenfalls einen hybriden Ansatz zu verfolgen, einen Ansatz, der die klassische Netzwerksimulation mit der Emulation von Rechensystemen verbindet. In gleicher Intention kann davon gesprochen werden, daß die Simulation nicht nur zur Ermittlung von Performance-Werten dienen soll, sondern ebenso Test und Debugging unterstützen soll.

Begleitet werden soll dieser hybride Ansatz durch die Definition von Metriken für die „fidelity“ eines Sensornetzes, Metriken also, mit denen sich angeben läßt, wie „gut“ ein Sensornetz sein Einsatzgebiet erfaßt.

### 3 FORSCHUNGSTHEMEN

Multi-hybride Sensornetze: Zu anwendungsnah, und damit also kein Thema für die Forschung?

Wir meinen: Doch, sehr wohl ein Thema für die Forschung! Denn um die dargestellten Probleme lösen zu können, bedarf es systematischer Lösungen – man sollte die Anwender nicht alleine lassen und ihnen die Aufgabe stellen, durch aufwendiges Ausprobieren eine Lösung zu finden, deren Qualität und Stabilität doch nur als Zufallsprodukt bewertet werden kann.

- Brauchen wir also für Sensornetze einen Software-Entwicklungsprozeß, wie ihn die Flugzeugindustrie anwendet, bevor sie ein neues Flugzeug zu seinem Jungfernflug starten läßt? Oder gibt es weniger aufwendige Varianten?

- Multi-hybride Sensornetze zeichnen sich durch eine starke Heterogenität der Knoten aus. Wie kann die entstehende Vielfalt der Knoten effizient programmiert werden? Sind allgemeine Middleware-Ansätze zeitgemäß, oder muß eine Sensorknoten-Middleware sehr viel stärker anpaßbar an den Anwendungskontext und die Ressourcenausstattung sein?
- Simulations- und Analyseergebnisse, die im Vorfeld erarbeitet werden, haben heute wenig mit der tatsächlichen Operation des Sensornetzes zu tun; insbesondere lassen sie oft keine belastbaren Aussagen über die wirklich zu erwartenden Betriebsabläufe in einem Sensornetz zu. Wie kann man die Simulation weiter und besser in den Softwareerstellungszustand integrieren, so daß sich die Verhältnisse am Einsatzort eines multi-hybriden Sensornetzes möglichst realistisch abbilden lassen?
- Wie verknüpft man die Meßergebnisse heterogener Sensoren bzw. mehrerer Sensornetze miteinander? Wie kann eine Kalibrierung solcher heterogenen Meßinstrumente aussehen? Ist in solchen Fällen eine *in-network* Datenfusion sinnvoll?
- Lassen sich multi-hybride Sensornetze in einheitlicher Weise so modellieren, daß sich kompatible Daten- und Aktionsschnittstellen generieren lassen? Oder anders – technisch-pragmatischer – formuliert: Läßt sich z.B. der Ansatz der Sprache SensorML, die vom *Open Geospatial Consortium* (<http://www.opengeospatial.org/>) definiert wurde, und in der Messungen als Ketten von Prozessen modelliert werden, auf multi-hybride Sensornetze übertragen?
- Erlaubt man es mobilen Robotern, ihre Akkumulatoren an stationären Docking-Stationen nachzuladen, dann muß dafür eine optimale Strategie gefunden werden, eine Strategie, mit der die Weiterarbeit eines mobilen Knotens in Abhängigkeit von der Entfernung von der Docking-Station, den anstehenden Aufgaben und dem aktuellen Ladezustand geplant wird.
- Eine Frage, die bislang wenig behandelt wurde, betrifft das Echtzeitverhalten von Sensornetzen: Unter welchen Bedingungen sind Sensornetze in Lage, ihre Aufgabe unter gegebenen Zeitschranken zu erfüllen? Wie bestimmt man unter den komplexen Betriebsbedingungen eines multi-hybriden Netzes den *worst case*? Die Frage nach dem Echtzeitverhalten ist eine wichtige Teilfrage im Gesamtkontext der Bestimmung der *fidelity* eines Sensornetzes, die bereits oben angesprochen wurde.

Eine Lösung dieser und weiterer, von uns möglicherweise (noch) nicht erkannter Forschungsfragen würde es Sensornetzen sicherlich ermöglichen, für viele verschiedene Aufgabenstellungen praktisch eingesetzt zu werden.

#### 4 EIN SZENARIO

Als Folge der Klimaerwärmung werden wir uns in den folgenden Jahren auf erhebliche Veränderungen in unserer Umwelt einstellen müssen. Gerade die norddeutschen Küstenlandschaften müssen sich multiplen Problemen stellen: Neben dem

Anstieg des Meeresspiegels werden vor allem die Erhöhung der Temperatur des Wassers von Nord- und Ostsee sowie der Luft für erhebliche Veränderungen in den nördlichen Bundesländern sorgen. Eine Lösung der oben skizzierten Forschungsfragenstellungen würde eine Nutzung multi-hybrider Sensornetze in Küsten-, Insel- und Gewässerschutz ermöglichen. Dabei wären beispielsweise folgende Anwendungen denkbar:

- Mobile Unterwasserknoten messen die Wassertemperatur, -qualität und -strömung in küstennahen Gewässern und geben die Information untereinander bzw. an stationäre Sensor- und Gatewayknoten zur Datenfusionierung und Auswertung weiter.
- In geeigneten Referenzgebieten werden über geeignete Sensoren Populationsparameter wie Sauer- und Nährstoffgehalt sowie die Größe und die Dynamik des Bestands von Kleinlebewesen bis hin zum Fisch erfaßt und weitergeleitet und erlauben damit Aussagen zu Wanderungsbewegungen und mittel- bis langfristigen Entwicklungen.
- Sedimentbewegungen lassen sich großflächig kurzfristig erfassen und zu langfristigen Vorhersagen für einen adäquaten und kostenoptimalen Küstenschutz aggregieren.

In gleicher Weise läßt sich eine Vielzahl von Anwendungsszenarien für multi-hybride Sensornetze auch für andere Gebiete entwickeln.

#### 5 AUSBLICK

Mit unseren Gedanken zur zukünftigen Ausrichtung des Forschungsgebiets Sensornetze hoffen wir, einen positiven Anstoß dazu gegeben zu haben, dieses Gebiet aus dem akademischen Umfeld und ersten Anwendungen in eine *breite* Praxisphase überführen zu können. Viele Steine müssen bis zum Erreichen dieses Ziels noch aus dem Weg geräumt werden – damit er schließlich befahrbar wird. Ganz so, wie uns das Schamanen das gesagt haben: Wir müssen einen Weg erst befahrbar machen, bevor wir darauf fahren können. Wir sind sicher, daß unserer *community* bei dieser Arbeit ein erprobtes Spektrum an Methoden aus der Informatik und den Ingenieurwissenschaften zur Verfügung steht.

#### LITERATUR

Auf ein ausführliches Literaturverzeichnis wird hier verzichtet, da es angesichts der Breite der angesprochenen Thematik eher den Charakter einer Zufallsauswahl bekommen würde.

- [1] Weiser, M.: The computer for the twenty-first century. *Scientific American*, Sept. 1991, 66-75.
- [2] Mainwaring, A.; Polastre, J.; Szewczyk, R.; Culler, D.: *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, Sept. 2002.
- [3] Welsh, M.: *Sensor Networks for the Sciences: Lessons from the Field*. Invited Talk at the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems 2008 (DCOSS '08), June 11-14, 2008, Santorini Island, Greece.
- [4] Stählin, Chr.: Fortschritt und Entwicklung. In: Hesse, H. (Hrsg.): *Natur und Wissenschaft*. Tübingen 1985.