



**„Grand Challenges der Technischen Informatik“
Report
März 2008**

Prof. Dr. Michael Beigl, Technische Universität Braunschweig
Prof. Dr. Uwe Brinkschulte, Universität Karlsruhe (TH)
Dr. Fridtjof Feldbusch, Universität Karlsruhe (TH)
Prof. Dr. Dietmar Fey, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Prof. Dr. Stefan Fischer, Universität zu Lübeck
Prof. Dr. Christian Hochberger, Technische Universität Dresden
Prof. Dr. Rolf Hoffmann, Technische Universität Darmstadt
Prof. Dr. Wolfgang Karl, Universität Karlsruhe (TH)
Dr. Jochen Krebs, Altair Engineering GmbH
Dr. Jürgen Kleinöder, Universität Erlangen-Nürnberg
Prof. Dr. Klaus Lagally, Universität Stuttgart
Dr. Falk Langhammer, Living Pages Research GmbH
Prof. Dr. Paul Lukowicz, Universität Passau
Prof. Dr. Peter Marwedel, Technische Universität Dortmund
Prof. Dr. Erik Maehle, Universität zu Lübeck
Prof. Dr. Christian Müller-Schloer, Universität Hannover
Dr. Burghardt Schallenberger, Siemens AG
Prof. Dr. Hartmut Schmeck, Universität Karlsruhe (TH)
Prof. Dr. Djamshid Tavangarian, Universität Rostock
Dr. Wolfgang Trumler, Universität Augsburg
Prof. Dr. Theo Ungerer, Universität Augsburg
Prof. Dr. Klaus Waldschmidt, Johann-Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt

Koordinator: Prof. Dr. Theo Ungerer, Sprecher FA ITG 6.1/GI 3.1 (ARCS)

INHALT

Executive Abstract	5
Anwendung 1: Ambient Assisted Living	9
Herausforderungen	
A 1.1: Selbstorganisierende Kooperation in Ad-hoc-Konfigurationen.....	11
A 1.2: Infoergonomische Systeme	11
A 1.3: Zuverlässigkeit, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit	12
A 1.4: Erkennen von komplexen Aktivitäten und Situationen aus einfachen Sensordaten.....	12
A 1.5: Miniaturisierung und niedriger Energieverbrauch der Komponenten.....	12
A 1.6: Effiziente Nutzung der Energie und Nachhaltigkeit	12
A 1.7: Verstehen menschlichen Verhaltens.....	12
Anwendung 2: Smart Mobility.....	13
Herausforderungen	
A 2.1: Ad-hoc-Routingverfahren.....	15
A 2.2: Komplexe Datenverarbeitung unter engen Ressourcen- und Zeitbedingungen	15
A 2.3: Zuverlässigkeit, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit	15
A 2.4: Energieeffizienz, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit.....	15
A 2.5: Technische Lösungen zur Verkürzung der Einführungsphase.....	16
Anwendung 3: Service-Roboter	17
Herausforderungen	
A 3.1: Höhere Leistungsfähigkeit der Komponenten.....	17
A 3.2: Energieeffizienz.....	17
A 3.3: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit	17
A 3.4: Selbstorganisation und Adaption.....	18
Grand Challenge 1: Omnipräsente Informationsverarbeitung	19
Herausforderungen	
GC 1.1: Interoperabilität.....	21
GC 1.2: Selbstorganisierende Konfiguration und Kooperation	21
GC 1.3: Effiziente Filterung der Information.....	21
GC 1.4: Datenintegrität, Zuverlässigkeit und Sicherheit.....	21
A 2.1: Ad-hoc-Kooperation.....	22

Grand Challenge 2: Zukünftige Kommunikationsnetze.....	23
Herausforderungen	
GC 2.1: Gestaltung und Beherrschung komplexer Kommunikationssysteme	25
GC 2.2: Radikal neue Kommunikationsnetze	25
GC 2.3: Nachhaltige Kommunikationssysteme	25
GC 2.4: Hochdichte ubiquitäre Netzwerke	26
GC 2.5: Virtuell und real kollaborierende Systeme	26
GC 2.6: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Fehlerrobustheit und Sicherheit..	27
Grand Challenge 3: Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit	28
Herausforderungen	
GC 3.1: Vertrauen in unsicheren Umgebungen	30
GC 3.2: Kriterien für die Bewertung von Vertrauen.....	30
GC 3.3: Validierung	30
Grand Challenge 4: Organic Computing Techniken.....	31
Herausforderung	
GC 4.1: Kontrolle von Selbstorganisation und Emergenz	32
GC 4.2: OC-Architekturen	32
GC 4.3: Selbst-X-Eigenschaften	33
GC 4.4: Sicherheit, Robustheit und Vertrauenswürdigkeit.....	33
GC 4.5: Entwurfsverfahren, Entwurfswerkzeuge und Entwurfsmethodik	33
GC 4.6: Verständlichkeit für den Menschen	34
GC 4.7: Lernverfahren.....	34
GC 4.8: Inspiration aus der Gehirnforschung und Bionik: Aktivität, Motivation und Emotionen.....	34
GC 4.9: Komplexitätsreduktion.....	35
GC 4.10: Organisationswissenschaften	35
GC 4.11: Anwendungsgebiete.....	36
Grand Challenge 5: Energieeffizienz, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit	37
Herausforderungen	
GC 5.1: Optimierungen der Architekturen.....	39
GC 5.2: Modellbildung.....	39
GC 5.3: Optimierung der Systemarchitektur.....	39
GC 5.4: Energieoptimierung für PCs und Serversysteme	39

GC 5.5: Energieoptimierung aus Sicht der eingebetteten Systeme	40
GC 5.6: Energie Scavenging	40
GC 5.7: Konstruktion energieeffizienterer technischer Systeme	40
GC 5.8: Reduktion des Energieverbrauchs	40
Grand Challenge 6: HW-, SW-Architekturen und Werkzeuge für Multi-Core- und Many-Core-Prozessoren.....	41
Herausforderungen	
GC 6.1: Hardwarestrukturen für Multi- und Many-Cores.....	43
GC 6.2: Energiemanagement auf dem Prozessor-Chip.....	44
GC 6.3: MPSoC-Entwurfsmethoden	44
GC 6.4: Neue Modellierungs- und Analyseansätze für MPSoCs.....	44
GC 6.5: Systemarchitekturen, Tools und Entwicklungsumgebungen für Multi-Cores....	45
GC 6.6: Betriebssysteme und Virtualisierung	45
GC 6.7: Techniken zur Erhöhung der Verlässlichkeit und Fehlertoleranz	45
GC 6.8: Neue parallele Programmiersprachen.....	45
GC 6.9: Neue Multi-Core-Anwendungen	45
Grand Challenge 7: Hardware-, Software-Architekturen und Werkzeuge für massiv parallele Systeme und GRID-Computer	46
Herausforderungen	
GC 7.1: Verteilte nach OC-Prinzipien arbeitende Grid-Middleware.....	48
GC 7.2: Entwicklung von Metriken zur effizienten Grid-Nutzung.....	49
GC7.3: Programmierumgebungen für heterogene Grid-Strukturen.....	49
GC7.4: Energie-bewusste Zugriffs-Strategien in Grid-Architekturen	49
Grand Challenge 8: Unkonventionelles Rechnen	50
Herausforderungen	
GC 8.1: Selbstorganisierende rekonfigurierbare Architekturen basierend auf nano-skalierten aktiven Bauelementen.....	51
GC 8.2: Nutzung passiver nanotechnischer Bauelemente.....	52
GC 8.3: Zelluläre Architekturen und Automaten	52
GC 8.4: Theorie komplexer adaptiver Systeme	52
GC 8.5: Interdisziplinäre Projekte für Anwendungen und Entwurf integrierter smarterer Systeme (Smart systems integration)	52

Executive Abstract

Die rasante Entwicklung in der Informationsverarbeitung hat dazu geführt, dass rechnerbasierte Geräte bereits heute unser tägliches Leben fast komplett durchdrungen haben. Die in der Technischen Informatik entwickelten Lösungen bieten dem Menschen zukünftig Unterstützung in allen Lebensbereichen. Assistenzsysteme im Gesundheits- und Lebensbereich, in Verkehrs- und Automobiltechnologie und im Bereich der Service-Roboter werden in den Grand Challenges als Anwendungsbeispiele für solche technischen Unterstützungen für die Menschen aufgegriffen. Diese Unterstützungen sollen dem Menschen in unaufdringlicher Weise zur Verfügung gestellt werden. Wir wollen auch in einer sauberen Umwelt leben, in der sparsam mit den Rohstoffen und Ressourcen umgegangen wird. Technische Informationssysteme können einerseits durch ihre elektrische Leistungsaufnahme zu einer Verschärfung der globalen Umwelt- und Ressourcenprobleme führen, haben jedoch auch die Potenz durch intelligente Steuerungen zu einer Verringerung der Leistungsaufnahme technischer Systeme und zu einem geringeren CO₂-Ausstoß beizutragen. Für unsere Industriegesellschaft gilt es aber auch, Arbeitsplätze zu erhalten und neue zu schaffen.

Diese Ziele stellen hohe Herausforderungen an die Technische Informatik, von der notwendigen Grundlagenforschung bis hin zu den Anwendungsbereichen.

Die Grand-Challenge-Initiative der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) und der Informationstechnischen Gesellschaft (ITG) zeigt Forschungs- und Entwicklungsthemen der Technischen Informatik auf, die zu einer langfristigen Arbeitsplatzsicherung beitragen können. Von Interesse sind Themen, die zu Anwendungen und Produkten führen können, die eine besondere industrielle Bedeutung in den nächsten zwanzig Jahren haben könnten, um zukünftige Geschäftsfelder durch zielgerichtete und frühzeitige Vorfeldforschung zu unterstützen.

Das Leitungsgremium des GI/ITG-Fachausschusses ARCS hat die Notwendigkeit erkannt, diese Themenstellungen zu formulieren, und auf der Sitzung am 15.3.2006 die Initiative „Grand Challenges der Technischen Informatik“ ins Leben gerufen. Unter fachlicher Zuarbeit der angegliederten Fachgruppen wurden mögliche Themenfelder erarbeitet. Auf einem Workshop des GI/ITG-Fachausschusses ARCS am 31.10.2006 sind schließlich die im Folgenden ausgearbeiteten Themen ausgewählt worden. Mit der Sitzung des Leitungsgremiums der Fachbereichs 3 „Technische Informatik“ am 13.3.2007 wurde die Grand-Challenge-Initiative auch auf GI-Fachbereichsebene weitergeführt. Parallel dazu wurde vom BMBF das Forschungsförderprogramm IKT 2020¹ erarbeitet, dessen Themen mit den hier erarbeiteten Fragestellungen teilweise überlappen.

Als „Grand Challenges der Technischen Informatik“ wurden insgesamt acht Themenbereiche ausgewählt. Sie bilden die Schlüsseltechnologien („Enabling Technologies“) für zukünftige industrielle Anwendungen und erfordern, mit Nachdruck erforscht zu werden. Der folgende Bericht stellt die acht „Grand Challenges der Technischen Informatik“ vor. Es wurden drei Anwendungsgebiete mit voraussichtlich hoher wirtschaftlicher Bedeutung ausgewählt, an denen stellvertretend für eine Vielzahl ähnlicher Anwendungen die Notwendigkeit der Lösung der genannten Herausforderungen aufgezeigt wird. Für die Formulierung und Ausarbeitung der einzelnen Themenstellungen wurde jeweils eine Arbeitsgruppe mit Experten auf den jeweiligen Gebieten eingesetzt.

¹siehe: <http://www.bmbf.de/pub/itk2020.pdf>

Die drei Anwendungsgebiete können unter dem Oberbegriff „Smart Machines and Environments“ betrachtet werden und sind im Einzelnen:

A1: Ambient Assisted Living

A2: Smart Mobility

A3: Service-Roboter

Ambient Assistant Living steht für Assistenzsysteme im Gesundheits- und Lebensbereich. Ähnliche technische Anforderungen stellen sich auch für Krankenzimmer und Operationsäle im Krankenhaus, Reha-Kliniken, Seniorenheime und Seniorenwohnungen, Fitnesstrainer u.v.m.

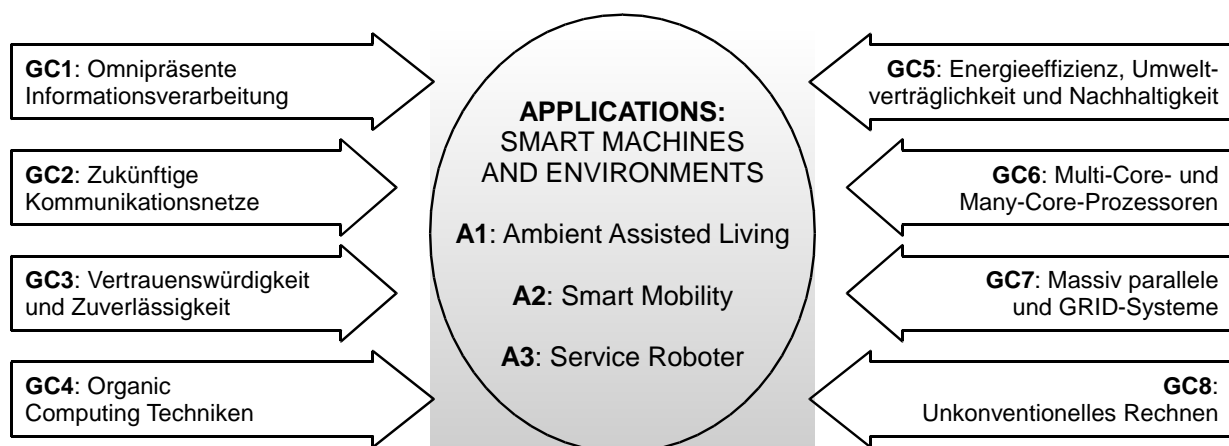
Smart Mobility durch Car-to-Car- und Car-to-Infrastructure-Kommunikation betrifft unser liebtes Verkehrsmittel, das Auto, das sicherer, komfortabler, robuster und vor allem umweltfreundlicher werden soll.

Service-Roboter können im Haushalt, in Bürogebäuden und in öffentlichen Gebäuden eingesetzt werden, um Routinarbeiten oder Reinigungsarbeiten zu erledigen.

Die sich daraus ergebenden wissenschaftlichen Herausforderungen betreffen

- den Umgang mit Information,
- die Kommunikation mit und zwischen technischen Geräten,
- die Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit der Infrastruktur,
- Techniken der Komplexitätsreduktion und -bewältigung,
- den verantwortungsbewussten Umgang mit Energie,
- Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit bei der Herstellung, im Betrieb und der Entsorgung informationstechnischer Geräte und
- neue Rechner-Entwicklungen, um die damit erreichbaren höheren Verarbeitungsleistungen für die Anwendungsziele verfügbar zu machen.

Die acht Grand Challenge Themen (GC1 bis GC8) der Technischen Informatik sind in der folgenden Abbildung dargestellt:



GRAND CHALLENGES DER TECHNISCHEN INFORMATIK

Omnipräsente Informationsverarbeitung (GC1) umfasst die Aspekte des überall verfügbaren Zugriffs, der verteilten Speicherung und Verwaltung von Informationen. Neu ist hier insbesondere die Integration von Sensorsystemen ins allgemein verfügbare, heute durch das Internet gegebene Wissensnetz, so dass komplexe Informationen über Vorgänge der realen Welt online abgefragt werden können. Wichtige Herausforderungen betreffen dafür die Interoperabilität und Integrität der Datenbestände, die Konfiguration und Kooperation der Informationsquellen, die Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit der Quellen sowie geeignete Filterungsmechanismen, die den Anforderungen des Persönlichkeitsschutzes beim Zugriff genügen und die gewünschten Informationen möglichst zutreffend bereit stellen.

Zukünftigen Kommunikationsnetze (GC2), in drahtgebundener oder drahtloser Form, müssen hinsichtlich ihrer Technologien, logischen Strukturen, Protokollen und Effizienz weiter entwickelt werden. Denn sie sind die Voraussetzung für jede Art verteilter Informationsverarbeitung, zu der das Sammeln, Zusammenfassen, Interpretieren und Verteilen gehört.

Unser tägliches Handeln in allen Lebensbereichen wird wesentlich davon bestimmt, inwieweit wir Objekten unserer Umwelt Vertrauen entgegenbringen können. Dies gilt insbesondere für informationsverarbeitende Systeme, die Dienstleistungen erbringen. GC3 befasst sich mit den verschiedenen Facetten von *Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit* wie der Korrektheit, der Sicherheit (im Sinne von „security“), der Verlässlichkeit (im Sinne von „safety“ und „dependability“), der Verfügbarkeit, der Zuverlässigkeit, der Robustheit, dem vertraulichen und bestimmungsgemäßen Umgang mit Information (Privatheit) und den Fragen der Haftbarkeit, d.h., ob das System tatsächlich die zugesagte Leistung erbringt und wer für ein Fehlverhalten des Systems verantwortlich ist.

Derart komplexe verteilte Informationssysteme, wie sie die Zukunft noch verstärkt bringen wird, können nur mit neuen Techniken zur Beherrschung der Komplexität verwaltet werden. Ziel des *Organic Computing* (GC4) ist es, die wachsende Komplexität der uns umgebenden Systeme durch Mechanismen der Selbstorganisation zu beherrschen und an den Bedürfnissen der Menschen zu orientieren. Ein „organisches Computersystem“ soll sich entsprechend den gewünschten Anforderungen dynamisch und selbstorganisierend den Umgebungsverhältnissen anpassen. Das heißt, es soll sich abhängig vom konkreten Anwendungsbedarf selbstorganisierend, -konfigurierend, -optimierend, -heilend, -schützend, -erklärend (abgekürzt unter dem Begriff der Selbst-X-Eigenschaften), vorausschauend und umgebungsbewusst verhalten. Hierbei stellen sich die Herausforderungen der Kontrolle von Selbstorganisation und Emergenz, der Entwicklung geeigneter Organic-Computing-Architekturen und der Entwicklung geeigneter Selbst-X-Techniken.

Die aktuelle Diskussion um den Verbrauch an Rohstoff-Ressourcen und den durch Treibstoffgas aus Verbrennungsprozessen zur Energieerzeugung folgenden Klimawandel muss auch von der Technischen Informatik aufgegriffen werden. Der durch moderne Kommunikations- und Rechentechnik verursachte Energieverbrauch steigt von Jahr zu Jahr. GC5 widmet sich einer der Grand Challenges der Menschheit: *Energieeffizienz, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit*. Die Herausforderungen bestehen in der Erforschung energieeffizienter Techniken in der Hardware, in der System-Software und sogar in den Anwenderprogrammen / in den Anwendungen. Neben der Verringerung des Energieverbrauchs auf allen Ebenen informationstechnischer Systeme sollen jedoch auch die Möglichkeiten der Energieersparnis durch bessere elektronische Steuerungen in Autos, Flugzeugen, Kraftwerken und Maschinen bis hin zu Heizungen in Wohn- und Geschäftshäusern erforscht werden. Darüber hinaus müssen Lösungen für ein umweltscho-

nende und nachhaltig ressourcenschonende Herstellung, Betrieb und Entsorgung informationstechnischer Geräte gewährleistet werden.

Die Prozessorentwicklung befindet sich derzeit mitten in einem grundlegenden Paradigmenwechsel. Trotz auch weiterhin zu erwartenden hohen Steigerungsraten bei der Anzahl der Transistoren pro Chip ist eine weitere Erhöhung der Taktrate zur Steigerung der Performanz in dem Maße, wie sie in der letzten Dekade zu beobachten war, nicht mehr möglich. In Zukunft wird die Leistungssteigerung vornehmlich durch die Integration mehrerer Prozessorkerne (Cores) auf einem Chip erreicht werden. Der Grand Challenge 6 *Hardware-, Software-Architekturen und Werkzeuge für Multi-Core- und Many-Core-Prozessoren* greift diese Thematik auf. Daraus entstehende Forschungsfragestellungen betreffen nicht nur die Hardware-Entwicklung sondern insbesondere auch die Software, da neue Betriebssysteme und Software-Tools bis hin zu neuen parallelen Programmiersprachen von Nöten sind. Existierende, heute meist sequentielle Anwendungsprogramme müssen geeignet parallelisiert werden und neue Multi-Core-Anwendungsprogramme werden entstehen. In der Betriebssystemforschung erscheint insbesondere der Ansatz einer Virtualisierung, welche die Hardware-Struktur gegenüber der Anwendung weitgehend verbirgt, von besonderem Interesse.

Zur Lösung der vielen drängenden Probleme der Menschheit ist die Bereitstellung sehr hoher Rechenleistung durch Hochleistungsrechner notwendig. GC7 betrifft deshalb *Hardware-, Software-Architekturen und Werkzeuge für massiv parallele Systeme und GRID-Computer für das Hochleistungsrechnen*. Die Integration von Multi-Core-Prozessoren in Parallelrechnersysteme wird zu einem Performanzsprung bei Hochleistungsrechnern und Grid-Computern führen. Kennzeichnend für Grid-Systeme ist das Überwinden administrativer Einheiten, d.h. einer rein lokalen Administration, beim Zusammenschluss der Ressourcen und beim transparenten Zugriff auf diese. Mit hohen Rechenleistungen im Peta-FLOPS-Bereich werden viele von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren durchgeführte Simulationen genauere und damit brauchbarere Werte liefern.

Unkonventionelles Rechnen (GC8) bezeichnet ein zumeist interdisziplinär ausgerichtetes Forschungsgebiet mit dem Ziel neue und alternative Methoden für die Rechentechnik zu entwickeln, die sich stark von der klassischen von-Neumann-Architektur unterscheiden. Dazu zählt man u.a. Optisches Rechnen, DNA Computing, Quantenrechnen, Rechnen unter Nutzung von Nanostrukturen („nano computing“) oder auch die analoge Rechentechnik. Ein großes wirtschaftliches Potential besitzen hier die nano-elektromechanischen Systeme.

Im Folgenden werden die drei Anwendungen und die acht Grand Challenge Themen im Einzelnen vorgestellt. Pro Thema wird zunächst in die Problematik und den Stand der Technik eingeführt und daraus werden dann Herausforderungen an die Technische Informatik abgeleitet.

Anwendung 1: Ambient Assisted Living

P. Lukowicz, Universität Passau, J. Kleinöder, Universität Erlangen; M. Beigl, Technische Universität Braunschweig, B. Schallenberger, Siemens AG., D. Tavangarian, Universität Rostock

Als Folge der Fortschritte im Bereich der Medizin und der sozialen Sicherungssysteme werden die Menschen immer älter. Um 1900 waren gerade 5% der Bevölkerung in Deutschland 60 Jahre alt, heute sind es bereits 24%. Auch der Anteil der Siebzig- bis Hundertjährigen und der noch älteren steigt sehr schnell an. Im Jahre 1970 waren nur 265 Menschen hundert Jahre alt, heute leben bereits etwa 10.000 Personen in Deutschland, die 100 Jahre alt und älter sind, und im Jahre 2025 werden nach UN-Angaben über 44.000 Menschen in Deutschland älter sein als 100 Jahre. Man rechnet für das Jahr 2050 mit 117.700 Personen älter als 100 Jahre in Deutschland. Die Gruppe der „Hochaltrigen“ erfährt weltweit die größte Wachstumsrate. Man geht davon aus, dass nur ein Drittel dieser Bevölkerungsgruppe in der Lage ist, selbst den Alltag zu meistern. Zwei Drittel dieser Gruppe der Hochbetagten ist entweder hilfebedürftig oder sogar schwer pflegebedürftig.

Das Ziel des „Ambient Assisted Living“ ist es, durch den Einsatz neuer Technologien die Umgebung, in der sich ältere Menschen aufhalten, so zu gestalten, dass für die betroffenen Personen ein hoher Grad an Selbständigkeit erhalten werden kann, ihre Sicherheit erhöht wird und die Kommunikation mit ihrem sozialen Umfeld verbessert wird. Dazu gehören auch die Unterstützung bei alltäglichen Verrichtungen, die Gesundheits- und Aktivitätsüberwachung, der Zugang zu sozialen, medizinischen und Notfallsystemen und die Erleichterung sozialer Kontakte. Damit sollen eine verbesserte Lebensqualität und intensivere soziale Teilnahme älterer Menschen am gesellschaftlichen Leben erreicht, aber auch neue Geschäftsfelder erschlossen und effizientere und persönlichere Gesundheits- und Sozialdienste ermöglicht werden.

Von Seiten der Europäischen Gemeinschaft wurde ein European Action Plan mit dem Thema „Ageing Well in the Information Society“² erstellt, doch auch innerhalb des VDE und von der Bundesregierung sind Initiativen unter dem Namen „Ambient Assisted Living“ ins Leben gerufen worden³.

Das AAL-Szenario ist jedoch nicht nur auf die Unterstützung älterer Menschen beschränkt, sondern könnte bezogen auf eine Klinik beispielhaft wie folgt aussehen: Ärzte, Pfleger und Patienten führen mobile Geräte mit sich, die die Übermittlung von Informationen ermöglichen aber noch Zusatzfunktionalität anbieten. Die mobilen Geräte dienen dabei als Nutzerschnittstellen zu einer Vielzahl von Sensoren sowie als Schnittstelle zu elektronischen Patientenakten. Ärzte können ihr mobiles Gerät auch benutzen, um Informationen auf elektronischem Weg mitzunehmen und diese Daten dann auf andere Displays zu übertragen, um die Anzeigequalität zu verbessern oder Zusatzinformationen zu den Daten zu erhalten. Außerdem kann durch das personalisierte Zugriffsgerät sichergestellt werden, welche Person lesend und schreibend auf die Daten Zugriff nimmt.

Darüber hinaus ist der Trend in unserer Gesellschaft zu beobachten, dass die Menschen mehr für den Erhalt ihrer Gesundheit investieren wollen. Im Durchschnitt wird bereits heute ein Zehntel

² <http://www.aal-europe.eu/> , bzw.

http://ec.europa.eu/information_society/activities/einclusion/policy/ageing/launch/index_en.htm

³ <http://www.aal-deutschland.de>

des Bruttosozialproduktes für den Gesundheitssektor ausgegeben. Als Konsequenz aus dieser Entwicklung gehen wir davon aus, dass der Bedarf an Geräten, Systemen und Dienstleistungen, die nicht nur älteren und kranken Menschen helfen, ihren Alltag besser zu bewältigen, sondern auch jüngeren Menschen bei einem gesundheitsbewusster Leben helfen („Personal Health and Care“), in den nächsten 10 Jahren eine überdurchschnittliche Steigerungsrate erfahren wird. Die Gesundheitsbranche wird damit als wichtiger Wirtschaftsfaktor in erheblichem Maße an Bedeutung gewinnen.

Als Beispiel könnten die Vorarbeiten an der Fraunhofer-Einrichtung Systeme der Kommunikationstechnik (ESK) in München genannt werden. Im Bereich „Personal Health and Care“ wird ein selbstorganisierendes Assistenzsystem („Fitness-Coach“) auf Basis einer mobilen Geräteplattform zur Information und Motivation der Patienten vorgeschlagen. Ziel des Fitness-Coachs ist es u.a., die Nutzer in Abhängigkeit von ihren eigenen Verhalten und den Vorgaben des Fachpersonal zu gezielten Übungen im Fitness-Bereich zu motivieren, die Organisation der Übungen weitestgehend zu übernehmen und deren Durchführung in Verbindung mit dem Gesundheitszustand des Gasts zu überwachen. Die Ergebnisse sollen in Form einer persönlichen Fitnesskurve (Fitness-Analyse) und für das medizinische Fachpersonal dokumentiert werden. Hierzu ist es notwendig, dass der Fitness-Coach mit diversen mobilen oder auch stationären Geräten, Sensoren, Aktoren und auch mit Planungs- bzw. Datenbanksystemen verbunden ist und mit diesen interagiert. Beispiele für die im System eingebundenen Subsysteme sind: Sensorsysteme am Körper für die Überwachung der Herz-/Kreislauffunktion oder die Gelenkbelastung, Fitness-/Trainingsgeräte zur Einstellung der Geräteparameter, Patientendatenbanken und der Interaktion mit dem Facility Management.

Unsere Zukunftsszenarien betreffen deshalb eine Vielzahl von Überwachungs-, Diagnose- und Therapiegeräte, die teilweise am Körper getragen werden, drahtlos miteinander und mit ortsfesten Geräten bzw. einer medizinischen Datenbank kommunizieren (siehe GC 2). Die medizinischen Geräte werden vielfach batteriebetrieben sein und müssen den Anforderungen eines geringen Energieverbrauchs und der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit bei der Herstellung, im Betrieb und bei der Entsorgung genügen (siehe GC 5). Diese Geräte sollen sich mit Hilfe von Techniken der Selbstorganisation, wie sie im Bereich Organic Computing (siehe GC 4) erforscht werden, selbständig zu einem Gesamtsystem zusammenfügen und verwalten. Im Gegensatz zu heute noch weitgehend unverbundenen und meist stationären Geräten wird den Betroffenen eine größere Bewegungsfreiheit ermöglicht. Automatisches Erkennen von potentiell kritischen Situationen und die Ableitung von Handlungsoptionen und -vorschlägen erlauben präventive und praktische Unterstützung. Persönlichkeitsschutz, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit (siehe GC 3) sind dabei wichtige Voraussetzungen. Für die Akzeptanz bei den betroffenen Personen spielt auch die unaufdringliche Nutzung der Geräte eine wesentliche Rolle.

Der Anwendungsbereich der medizinischen und sozialen Unterstützung potentiell hilfebedürftiger Personen stellt nicht die einzige Anwendung der dafür zu entwickelnden informationstechnischen Methoden dar. Die hier tragenden Technologien führen grundsätzlich zum technischen Verstehen menschlichen Verhaltens in bestimmten Situationen. Solche Situationen entstehen nicht nur in häuslicher oder klinischer Umgebung. So können z.B. auf Basis derselben Technologien in Produktionsprozessen Arbeitslasten der individuellen Tagesform eines Arbeiters angepasst werden (Workload-Management), in Stadien können drohende Paniksituationen rechtzeitig de-eskaliert werden, im Straßenverkehr werden kritische Verhaltensmuster erkannt und zur präventiven Gefahrenentschärfung genutzt. Mit dieser breiten Anwendbarkeit der hinter Ambient

Assisted Living stehenden Technologien ergibt sich eine sowohl gesellschaftlich als auch kommerziell weitreichende und nicht hoch genug einzuschätzende Bedeutung.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Die Herausforderung für die Technische Informatik besteht darin, verteilte, dynamisch konfigurierbare Systeme aus Sensoren, Aktuatoren und Verarbeitungseinheiten zu entwerfen. Diese Systeme müssen robust, zuverlässig, sicher und vertrauenswürdig sein sowie stromsparende und miniaturisierte Komponenten enthalten (siehe GC 5). Die Schnittstellen zu den Nutzern müssen ergonomischen Gesichtspunkten im Hinblick auf Nutzung durch Senioren und kranken Menschen genügen. Daraus ergeben sich folgende konkrete Herausforderungen:

A 1.1: *Selbstorganisierende Kooperation in Ad-hoc-Konfigurationen.* Die physische Umgebung wird durch „intelligente“ Alltagsgegenstände angereichert, die sich verbinden, deren Zusammensetzung sich jedoch unvorhersehbar ändern bzw. den geforderten Anforderungen anpassen kann. Diese „intelligenten“ Alltagsgegenstände müssen in der Lage sein, spontan und ohne menschliche Anleitung die Situationen zu erkennen sowie sinnvoll miteinander zu kommunizieren und zu kooperieren, um den Nutzer zielgerichtet zu unterstützen.

A 1.2: *Infoergonomische Systeme.* Die infoergonomischen Systeme stellen eine Erweiterung der bestehenden ergonomischen Systeme mit intelligenten Komponenten dar. Sie sind Objekte mit hohem Adaptivitätsgrad zur Erfüllung individueller Ergonomieanforderungen zu jeder Zeit und an jeder Stelle für jeden Menschen. Das Ziel der Infoergonomie ist es, intelligente Systeme zu entwickeln, die in der Lage sind, sich den individuellen Bedürfnissen der Menschen adaptiv anzupassen und um ihnen ein Instrument zum Erhalt oder zur Wiederherstellung ihrer Gesundheit in die Hand zu geben. Zudem sollen sich die Menschen bei der Nutzung solcher Systeme wohl fühlen. An die künftigen infoergonomischen Systeme und Gegenstände werden folgende Anforderungen gestellt:

- Sie müssen adaptiv und individuell einstellbar sein.
- Sie müssen ihre Komplexität vor den Nutzern verbergen und besonders einfach zu bedienen sein. Bei der Zielgruppe handelt es sich meist um ältere Menschen mit wenigen Erfahrungen im Umgang mit komplexen Apparaten.
- Sie dürfen den normalen Lebensablauf nicht stören (keine Geräusche, keine Gerüche, keine mechanischen Hindernisse).
- Sie müssen umweltverträglich sein.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, bedarf es den Einsatz von umfangreichen Hard- und Software-Komponenten. Die in den letzten Jahren eingesetzte Entwicklung von hochkomplexen, verteilt arbeitenden eingebetteten Systemen kommt diesem Trend entgegen. Alltagsgegenständen erhalten damit eine integrierte und damit „verborgene“ Intelligenz. Die Technische Informatik spielt bei der Entwicklung infoergonomischer Systeme eine zentrale Rolle und leistet damit für diesen rasant wachsenden Markt einen großen Beitrag. Die geeignete Kombination von Hard- und Software und der Aufgabenteilung zwischen diesen und den Komponenten anderer Gebiete oder Bereiche (Sensoren, Aktuatoren, ihre Vernetzung u. ä.) gehören zu den hier anstehenden Aufgaben.

A 1.3: *Zuverlässigkeit, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit.* Vertrauen in Systeme und in Personen ist eine wichtige Eigenschaft die unser tägliches Handeln in allen Lebensbereichen wesentlich bestimmt. Natürlich erwarten wir auch von technischen Systemen, dass dieses Vertrauen gerechtfertigt ist und dass diese Systeme vertrauenswürdig sind und zuverlässig arbeiten. Dafür müssen geeignete „Vertrauensmetriken“ entwickelt werden, die beim Zusammenspiel der Geräte diese bezüglich ihrer Zuverlässigkeit, Vertrauenswürdigkeit und Funktion bewerten.

A 1.4: *Erkennen von komplexen Aktivitäten und Situationen aus einfachen Sensordaten.* Zum Erkennen von komplexen Aktivitäten aus einfachen Sensordaten müssen Kontexte automatisch erkannt, miteinander abgeglichen und aufbereitet werden. Es muss dabei von physikalischen Daten abstrahiert und eine Gesamtsituation erkannt werden. Das sichere Erkennen einer Situation ist Voraussetzung für die Ableitung von Handlungsoptionen und -empfehlungen. Dazu sind fortgeschrittene Schlussfolgerungsmethoden erforderlich.

A 1.5: *Miniaturisierung und niedriger Energieverbrauch der Komponenten.* Die Sensor- und Aktuatorkomponenten sowie die am Körper getragene Verarbeitungseinheiten müssen miniaturisiert sein, um nicht als störend empfunden zu werden. Der Energieverbrauch muss sehr gering sein, um häufigen Batteriewechsel zu vermeiden. Im Idealfall sollten diese Komponenten so entworfen werden, dass sie ihre gesamte benötigte Energie aus der Umwelt beziehen.

A 1.6: *Effiziente Nutzung der Energie und Nachhaltigkeit.* Der Beitrag der Technischen Informatik zur effizienten Nutzung von Energie lässt sich nicht nur bei dem Szenario im Gesundheitsbereich aufzeigen. Sinnvoll wäre es, die benötigte Energie gleich dort zu erzeugen, wo sie benötigt wird. Betrachtet man generell „Smart Homes“, so lässt sich das Potential der Nutzung von Solaranlagen (zur Erzeugung elektrischer oder von Wärmeenergie) oder des Ersatzes von persönlicher Mobilität durch fortgeschrittene Telekommunikation demonstrieren.

A 1.7: *Verstehen menschlichen Verhaltens.* Um gefährlichen Notfällen vorzubeugen, müssen Anomalien im menschlichen Verhalten erkannt werden können. Für eine erfolgreiche Prävention reicht das einfache Registrieren von Aktivitätszuständen wie Liegen, Sitzen, Stehen bei weitem nicht aus. So lassen sich z.B. aus unbewussten Veränderungen von komplexen Verhaltensmustern bestimmte sich anbahnende gravierende Gesundheitsbeeinträchtigungen Tage im Voraus erkennen. Dazu müssen entsprechende informationstechnische Modelle über das menschliche Verhalten und menschliche Intentionen entwickelt werden. Individuell typischerweise wiederkehrende Verhaltensweisen werden durch Lernverfahren in die Modelle eingepreßt.

Anwendung 2: Smart Mobility

P. Lukowicz, Universität Passau, M. Beigl, Technische Universität Braunschweig, B. Schallenger, Siemens AG

Automobiltechnologie als tragende Lösung für den Individualverkehr muss sich insbesondere den Herausforderungen der Verkehrssicherheit, aber auch der Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit (GC 5) stellen:

- Umweltverträglichkeit: Hier ist insbesondere eine signifikante Reduktion der Schadstoffemission durch bessere Katalysatortechnik bzw. alternative Antriebstechnik gefordert. Industriepolitisch gesehen muss mit weiteren Verschärfungen der Abgasnormen gerechnet werden.
- Nachhaltiger Ressourceneinsatz: Wegen der schwindenden Erdölvorkommen ist eine drastische Verbrauchsreduktion und effizientere Nutzung des Kraftstoffs (Wirkungsgrad-erhöhung) sowie der zunehmende Einsatz von Hybridtechnologie gefordert.
- Verkehrssicherheit: Für den Schutz aller Verkehrsteilnehmer sind weiterführende Ansätze in den Bereichen der aktiven Unfallvermeidung und des Personenschutzes bei Unfällen gefragt.
- Erhöhung des Fahrkomforts: Durch besseren Fahrkomfort wird ein entspannteres und damit sicheres Reisen ermöglicht.
- Erhaltung der Mobilität: Trotz steigender Komplexität der Elektronik muss die Automobiltechnik zuverlässig funktionieren, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten.

Hochperformante Prozessoren und Steuergeräte sind notwendige Voraussetzung für umweltfreundliche und energieeffiziente Technologien im Kraftfahrzeug. Hier ist insbesondere der Einsatz von Multi-Core-Prozessoren (GC 6) in den Steuergeräten notwendig. Solche für den Einsatz in Kraftfahrzeugen geeigneten Prozessoren müssen jedoch erst noch entwickelt werden. Weiterhin müssen geeignete echtzeitfähige und standardisierte Betriebssysteme entwickelt und die komplexen Steuerungsalgorithmen parallelisiert und angepasst werden.

Moderne Autos besitzen heute eine Vielzahl an Sensoren und Aktuatoren, so dass sie unmittelbar in einer komplexen Art und Weise auf das Geschehen in der Umgebung und die Aktionen des Fahrers zu reagieren vermögen. Diese Sensoren und Aktuatoren müssen für die oben genannten Ziele verfügbar gemacht werden, d.h. sie müssen mit den Steuergeräten in geeigneter Weise kommunizieren (GC 2). Ihre Konfiguration und Reaktion bei Ausfällen muss dynamisch und mit geringem oder keinem personellen Aufwand möglich sein. Dafür erscheinen die im GC 5 zu erforschenden Organic Computing Techniken besonders geeignet.

Darüber hinaus verfügt der Fahrer über vielfältige Allgemeininformationen über die Verkehrssituation der Region, die er gerade durchfährt, sei es über das Radio, einen dedizierten Verkehrs-service oder Wechselschilder. Diese Informationsquellen tragen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und des Verkehrsflusses bei, sind aber noch unvollständig und schöpfen die durch moderne Informationstechnik gegebenen technischen Möglichkeiten bei weitem nicht aus. So kann eine neue Qualität der Sicherheit und der Verkehrsflussoptimierung gewonnen werden, wenn die zeitliche Sicherheitslücke zwischen den unmittelbar reaktiv wirksamen Fahrzeugsicherheitskomponenten (ABS, ESC etc.) und der heute von außen ins Fahrzeug gebrachten allgemeinen Information (TMC etc.) geschlossen werden kann. Dazu sind einem Fahrzeug seiner spezifischen Fahrsituation entsprechend angemessene Informationen mit Relevanz für die nächsten Fahrminu-

ten zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen sind heute in der Regel prinzipiell an verschiedenen Orten vorhanden (Radiostationen, Verkehrszentralen, Autobahnmeistereien, Fahrbahnsensoren, vorausfahrende Fahrzeuge etc.), aber nicht zum erforderlichen Zeitpunkt individuell verfügbar. Erst der flächendeckende Austausch und die Zusammenführung solcher Informationen sowohl zwischen Fahrzeugen (Car-2-Car, C2C) als auch zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur (Car-2-Infrastructure, C2I) verspricht hier eine Lösung. Das Ziel einer „Smart Mobility durch Car-to-Car- und Car-to-Infrastructure-Kommunikation“ ist es, die Fülle der in der Fahrzeugtelematik, in der Verkehrsüberwachung und allgemein im Netz vorhandener Informationen gezielt zur Unfallvermeidung und zur Erhöhung der Verkehrseffizienz zu nutzen.

Dabei gilt es, neben den technischen Lösungen Geschäftsmodelle zu entwickeln, die erst den Durchbruch für C2C- und C2I-Lösungen ermöglichen. Die Frage, wer zahlt wofür, muss beantwortet werden, wobei im Zeitalter des Web 2.0 innovative Modelle durch neuartige Kooperationsansätze vorstellbar sind. Technisch kostengünstige Lösungen verringern hier ebenfalls die Einstiegsbarrieren.

Unter anderem versprechen C2C- und C2I-Lösungen folgende Verbesserungen:

- In kritischen Situationen kann eine sofortige Benachrichtigung der Fahrer/innen von Fahrzeug zu Fahrzeug die Unfallgefahr reduzieren. Dies ist besonders wichtig bei gefährlichen Straßenverhältnissen (Vereisung, Aquaplaning) oder bei Hindernissen, die durch die Sensorik im Auto nicht erfasst werden können (z.B. Pannenfahrzeug hinter einer Kurve).
- Auch in weniger kritischen Situationen kann mit einer C2C-Kommunikation ein Fahrer besser über den aktuellen Verkehr in seiner unmittelbaren Umgebung informiert und auf potentiell kritische Situationen vorbereiten werden. Solche kritische Situationen können sich aufgrund der Wetterverhältnisse (z.B. reduzierte Sicht), der Straßenführung (z.B. Kreuzungen, Tunnel) oder besonderer Verkehrsteilnehmer (z.B. Kinder, Radfahrer) ergeben.
- Zur Erfassung und Steuerung der Verkehrsströme kann das Fahrzeug selbst als Sensor für die Verkehrssteuerung dienen. Fernziel wäre hier eine selbstorganisierende Verkehrssteuerung auf Fahrzeugebene, also eventuell sogar ohne Ampeln und ohne zentrale Komponenten.
- Neben den sicherheits- und verkehrstechnisch relevanten Informationen kann C2C und C2I auch zum Bereich Infotainment und Komfort beitragen. So könnte C2C in sogenannte Location-based-Services mit einbezogen und es könnten beispielsweise Informationen über Warteschlangen an Tankstellen ausgetauscht werden. Dazu gehört auch die Einbeziehung der Verkehrs- und Parkplatzsituation, der Zugang zur Netzwerkinfrastruktur und das Herunterladen von Informationen mit touristisch oder gastronomisch interessanten Inhalten, eine drahtlose Fahrzeugdiagnostik, das Synchronisieren von Daten zwischen Haus, Fahrzeug und verschiedenen Dienstleistungsanbietern (z.B. Musik-Downloads) und die Nutzung der Garage als Docking-Station für die Autoelektronik.

Insgesamt ist C2C und C2I ein Thema, das sowohl aus gesellschaftlicher Sicht (Sicherheit, Energiesparen, Klimadebatte) als auch aus wirtschaftlicher Sicht von hoher Relevanz ist.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

C2C sollte kurz vor einem Ereignis eingreifen, das zu einem Unfall führen könnte. Dabei werden Informationen zwischen Fahrzeugen in einem Umkreis von bis zu 1000 m berücksichtigt. Mit Multi-hop-Technologie (siehe GC 2) könnte die Reichweite weiter erhöht werden. Der Erfolg der Car2Car-Anwendungen hängt von der Verbreitung (min. 10% Marktdurchdringung) ab. Dabei muss das System mit dynamischen Ad-hoc-Konfigurationen umgehen können, die sehr kurzfristig entstehen und wieder „auseinanderreißen“ können. Für das Netzwerkmanagement müssen die Ergebnisse aus Standardisierungsaktivitäten, z.B. aus dem Car-to-Car-Konsortium, herangezogen und angewandt werden.

Für die Technische Informatik ergeben sich die folgenden konkrete Herausforderungen:

A 2.1: Ad-hoc-Routingverfahren. Da sich die Fahrzeuge mit einer hohen Geschwindigkeit bewegen und die Reichweite der in Frage kommenden Kommunikationsverfahren eher klein ist, ist eine Erweiterung der Reichweite durch Multi-hop-Kommunikation wünschenswert. Verglichen mit vielen konventionellen Multi-hop-Problemstellungen ist hier vor allem die sehr hohe Dynamik und Kurzlebigkeit der Konfigurationen hervorzuheben.

A 2.2: Komplexe Datenverarbeitung unter engen Ressourcen- und Zeitbedingungen. Bereits auf der Ebene eines einzelnen Fahrzeugs ist es eine Herausforderung, aus der Fülle vorliegender Sensordaten die für das Fahrzeug und den Fahrer relevanten Informationen heraus zu filtern. Die C2C- und C2I-Kommunikation führt zu einer noch größeren Informationsmenge. Dabei sind die von anderen Fahrzeugen und der Infrastruktur stammenden Daten auf Grund fehlender Hintergrundinformation unter Umständen schwieriger zu bewerten als die eigenen Sensordaten. Andererseits macht die C2C-Kommunikation nur dann Sinn, wenn es zu einem Zuwachs an nutzbarer und nützlicher Information und nicht nur zu weiteren Sensordaten führt. Somit ist die Fusion und Abstraktion der Daten zu sinnvoll verwertbaren Informationen ein zentrales Thema.

A 2.3: Zuverlässigkeit, Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit. Durch den englischen Begriff „Safety“ wird noch stärker als mit den deutschen Begriffen Sicherheit und Zuverlässigkeit der Schutz des Menschen vor körperlichen Gefahren betont. Dieser muss in eingebetteten Systemen durch „harte“ Echtzeitanforderungen an die Programme beim Hardware- und Software-Entwurf sowie durch Verifikation oder weitgehende Validierung der Hardware- und Software-Algorithmen berücksichtigt werden. Die Verkehrstechnik stellt sehr hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit und Sicherheit. Die Ad-hoc-Kommunikation stellt diesbezüglich eine besondere Herausforderung dar. Die Notwendigkeit, schnell und spontan Kooperationen mit Geräten einzugehen, die dem eigenen System zuvor völlig unbekannt waren, bietet eine Vielzahl von Angriffspunkten und potentiellen Fehlerquellen. Um den Anforderungen der Verkehrstechnik dennoch gerecht zu werden, müssen Sicherheit und Zuverlässigkeit auf allen Ebenen des Systementwurfs berücksichtigt werden.

A 2.4: Energieeffizienz, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit: Weiterhin kann die Technische Informatik einen wesentlichen Beitrag zur CO₂-Reduktion leisten. Es ist bekannt, dass die aktuellen und vor allem die zukünftig verschärften Schadstofffreiheitsstufen nur mit Hilfe weiterer Entwicklungen in der Technischen Informatik realisiert werden können. Für die Realisierung alternativer Antriebssysteme wird die Technische Informatik eine zentrale Rolle spielen. Um die notwendige hohe Leistungsfähigkeit für die dabei eingesetzten Steuergeräte zu erreichen, ist der Übergang zur Multi-Core-Technologie (siehe GC 6) zwingend erforderlich.

A 2.5: Technische Lösungen zur Verkürzung der Einführungsphase. C2C-Kommunikation setzt voraus, dass eine hohe Zahl von am Verkehr teilnehmenden Fahrzeugen mit WLAN-Modulen ausgestattet ist und ein lückenloser Kommunikationspfad zwischen den Fahrzeugen besteht. Das ist insbesondere in der Einführungsphase nicht gegeben mit der Problematik, dass zunächst nicht nutzbare Technik in Neuwagen eingebaut werden müsste. Was aber bereits heute zum Standard gehört, ist das Mobilfunkmodul oder das Mobiltelefon im Fahrzeug. Daher bietet es sich an, die Orts- und Zeitstempel eines Fahrzeugs in regelmäßigen Zeitintervallen über Mobilfunk an dezentral organisierte Server zu übertragen, auf denen dann zum Beispiel in einer Peer-to-Peer Overlay-Struktur das Routing von Informationen zwischen Fahrzeugen einer verkehrskritischen Region ausgeführt werden kann. Die Server können dann wieder über Mobilfunk die relevanten Informationen an genau die Fahrzeuge senden, die es angeht.

Anwendung 3: Service-Roboter

E. Maehle, Universität zu Lübeck

Nach einer Studie, 'World Robotics 2007' (www.worldrobotics.org) der International Federation of Robotics (IFR) waren bis Ende 2006 ca. 40.000 Service-Roboter für den professionellen Gebrauch weltweit im Einsatz. Mit 23% stellen die Roboter für Verteidigungs-, Sicherheits- und Rettungszwecke die größte Gruppe dar, gefolgt von Feld-Robotern wie z. B. Melk-Robotern mit 16% sowie Reinigungs- und Unterwasser-Robotern mit jeweils 14%. Bau- und Abriss-Roboter sind mit 10%, Medizinische Roboter mit 9% und mobile Plattformen für den allgemeinen Gebrauch mit ca. 8% vertreten. Die restlichen ca. 6% betreffen sonstige Anwendungen wie Logistik, Inspektion z. B. von Rohrleitungen oder Werbeeinsätze z. B. als Museumsführer. Weitaus höhere Stückzahlen erreichen Service-Roboter für den persönlichen und privaten Einsatz mit ca. 2,4 Mio. Einheiten für den häuslichen Gebrauch bis Ende 2006 und ca. 1,1 Mio. für Unterhaltung und Freizeit. Der Preis dieser Maschinen ist allerdings wesentlich niedriger als der der professionellen Roboter. Die größte Gruppe hierbei sind Roboter zum Staubsaugen im Haushalt.

Dieser Markt ist noch recht jung: Haushaltsroboter sind in größeren Stückzahlen z. B. erst seit ca. 2001 auf dem Markt und die Prognosen bis zum Jahr 2010 sagen ein weiteres Anwachsen der Installationen voraus. Von 2007 bis 2010 wird die Installation von 35.500 neuen professionellen Service-Robotern sowie ca. 1,3 Mio. neuen Haushalts-Robotern und 2,2 Mio. neuen Unterhaltungs- und Freizeit-Robotern für den persönlichen Gebrauch erwartet. Deutschland nimmt bei den traditionellen Industrie-Robotern bereits eine vordere Position ein, und es bestehen sehr gute Voraussetzungen, dass die deutsche Industrie auch bei dem viel versprechenden Zukunftsmarkt der Service- und Haushaltsroboter eine wichtige Rolle einnimmt und neue Arbeitsplätze geschaffen werden können.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Robotik ist ein sehr interdisziplinäres Gebiet zwischen Maschinenbau, Automatisierungstechnik, Informatik und den einzelnen Anwendungsgebieten. Eine Schlüsselstellung nehmen dabei verteilte eingebettete Systeme ein. Bereits heute sind in einem Service-Roboter typischerweise eine ganze Reihe von vernetzten Mikrocontrollern und teilweise auch Spezialhardware im Einsatz.

A 3.1: *Höhere Leistungsfähigkeit der Komponenten.* Mit steigenden Anforderungen an die Anwendung und dem Einsatz leistungsfähiger Sensoren wie Kameras oder Laser-Scannern steigt der Bedarf an Rechenleistung stark an. Hier sind neue Hardware- und Software-Architekturen sowie Werkzeuge für heterogene System-on-Chip-Architekturen (SoCs), Multi-Core-Prozessoren (GC 6), aber auch massiv parallele Systeme z.B. zur Bildverarbeitung gefragt.

A 3.2: *Energieeffizienz.* Da es sich vorwiegend um mobile autonome Systeme handelt, spielt die Minimierung des Stromverbrauchs eine zentrale Rolle (GC 5).

A 3.3: *Sicherheit, Zuverlässigkeit und Vertrauenswürdigkeit.* Die direkte Interaktion der meisten Service-Roboter mit dem Menschen stellt hohe Anforderungen an die Sicherheit und die Zuverlässigkeit der Service-Roboter (GC 3).

A 3.4: *Selbstorganisation und Adaption.* Ein wesentlicher Ansatz, die Komplexität dieser Systeme in den Griff zu bekommen und eine hohe Vertrauenswürdigkeit zu erreichen, ist Organic

Computing (GC 4). Hierbei soll wie beim organischen Vorbild durch Selbstorganisation eine ständige Adaption sowohl an die permanent sich ändernde Umwelt als auch an Fehlersituationen erreicht werden.

Grand Challenge 1: Omnipräsente Informationsverarbeitung

P. Lukowicz, Universität Passau; M. Beigl, Technische Universität Braunschweig; B. Schallenger, Siemens CT

Zwei der herausragenden informationstechnischen Entwicklungen der letzten Jahre sind die zunehmende Omnipräsens des Netzwerkzugangs und die Kumulation des in elektronischer Form zugänglichen Wissens. Letzteres betrifft zum einen die allseits bekannte Fülle an Informationen, die im Internet zu finden sind, zum anderen jedoch die von Sensoren „live“ erfassten Daten. Google hat derzeit über 8 Milliarden Webseiten zugreifbar. Das bedeutet, dass zu praktisch jeder nur denkbaren Fragestellung - ob Kuchenrezept, seltene Krankheit oder komplexe wissenschaftliche Fragestellung - relevante, elektronische Informationen verfügbar sind. Dabei ist die über Google zugreifbare Information nur die sprichwörtliche Spitze des Eisbergs. Gemäß einer IDC Studie⁴ wurden im Jahre 2006 161 Exabyte (161 Milliarden Gigabyte) in elektronischer Form gespeichert. Bis 2010 soll diese Menge auf fast 1000 Exabyte ansteigen.

Während der volumenmäßige Anstieg in erster Linie auf die steigende Menge und die Qualität (Auflösung) von Multimediadaten zurückzuführen ist, verbirgt sich hinter den obigen Zahlen ein weiterer wichtiger Trend - ein exponentielles Wachstum an verfügbaren Informationsquellen. Dieses Wachstum beruht auf zwei Entwicklungen: (1) einer rapiden Verbreitung teils hochkomplexer, eingebetteter Sensorik und (2) der zunehmenden Vernetzung von mit solcher Sensorik ausgestatteten Geräten und Systemen. Dabei wird Information aufgenommen, die grundlegend anders ist, als das bisherige im Netz verfügbare Wissen. Letzteres ist statisch, sozusagen enzyklopädisch. Ins Netz eingebundene Sensoren bieten hingegen die Möglichkeit, die Vorgänge in der realen Welt „live“ zu erfassen und zu analysieren. Somit sind sie orthogonal und komplementär zu dem klassischen Internetwissen.

Ein einfaches Beispiel sind bereits kommerziell eingesetzte Systeme, bei denen auf Schuhe aufgeklebte RFID-Etiketten die Onlineverfolgung von Marathonwettbewerben erlauben. Ein um Größenordnungen komplexeres Beispiel ist das moderne Automobil. Die Sensorik reicht von der internen Diagnose (z.B. Reifendruck), über Sitzbelegung, Fahreraktivität (Schlaferkennung), GPS Koordinaten, Bewegungsdaten, Fahrbahneigenschaften (z.B. Eiswarnung) bis hin zu heute noch experimentellen Kollisionsvermeidungssystemen, die mit Radar und Kameras eine komplexe Analyse der Verkehrssituation anstreben.

Die Thematik „Omnipräsente Informationsverarbeitung“ umfasst die Aspekte des omnipräsenten Zugriffs, der omnipräsenten Speicherung und Verwaltung von Informationen. Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden:

- Ein signifikanter Teil des menschlichen Wissens ist bereits in elektronischer Form vorhanden und teils durchsuchbar.
- Derzeit werden immer mehr Sensorsysteme ins Netz integriert, so dass komplexe Informationen über Vorgänge der realen Welt online abgefragt werden können.

4

http://www.emc.com/about/destination/digital_universe/pdf/Expanding_Digital_Universe_IDC_WhitePaper_022507.pdf

- Der Zugriff auf die obigen Informationen ist fast immer und überall möglich.

Aus diesen drei Thesen folgt die Vision, dass im Prinzip überall und zu jeder Zeit auf Informationen im Netz zugegriffen werden könnte, die für die augenblickliche Situation relevant sind. Man betrachte ein Auto, das vor einer unübersichtlichen Kurve zum Überholen ansetzt. Unter normalen Umständen ist die Verkehrslage so, dass selbst bei entgegen kommendem Verkehr genug Zeit zum Bremsen oder Ausweichen über die Standspur bleibt. Trotzdem kann es zu einer Unfallsituation kommen, die mit technischen Mitteln vermeidbar wäre: aus der Gegenrichtung nähert sich ein Auto mit überhöhter Geschwindigkeit, in der Kurve gibt es eine Baustelle, die die Standspur blockiert, eine glatte Fahrbahn verlängert den Bremsweg. Die Informationen, die notwendig wären, um in dieser Situation einen Unfall zu verhindern, sind im Prinzip in elektronischer Form vorhanden. Beide Fahrzeuge kennen über ihre Navigationssysteme ihre Position und Geschwindigkeit. Die Baustelle ist im Computer des Straßenbauamtes verzeichnet. Selbst die Information über die Glätte könnte vorhanden sein, wenn vorher bei einem Fahrzeug in der Kurve ESP aktiviert worden wäre. Das Problem ist, dass die notwendigen Informationen nicht zusammengebracht bzw. (im Falle des ESP Signals) gar nicht erst gespeichert werden, und damit dem Fahrer im entscheidenden Moment nicht zur Verfügung stehen.

Das Beispiel illustriert ein grundsätzliches Problem: Informationen sind nur dann nützlich, wenn sie in richtiger Kombination, zum richtigen Zeitpunkt an den richtigen Empfänger gelangen. Die Existenz eines effizienten Suchmechanismus ist eine notwendige, aber nicht eine ausreichende Voraussetzung. Darüber hinaus muss es eine Instanz geben, die zum richtigen Zeitpunkt die Suche nach den richtigen Stichworten initiiert und die wesentlichen Ergebnisse zusammenfasst. Bei der heute üblichen Nutzung des Internets ist dies kein Problem. Der am Rechner sitzende Benutzer weiß genau, welche Information er braucht und kann dediziert danach suchen. Allerdings wird dadurch der Anwendungsbereich des Systems auf eine sehr spezielle Situation beschränkt: stationäre Benutzer in einer büroartigen Umgebung.

Wir verwenden den Begriff „omnipräsenter Informationszugriff“ für Szenarien, die keinen solchen Beschränkungen unterliegen und die Nutzung elektronischer Informationsquellen immer und überall erlauben. Die Herausforderung besteht dabei darin, dem Benutzer in einer jeden Situation automatisch exakt die Information zukommen zu lassen, die für ihn auf Grund der jeweiligen Vorgänge in seiner Umgebung und seiner derzeitigen Aktivität relevant ist. In ähnlicher Weise kann man sich vorstellen, dass ein System automatisch zu jedem Zeitpunkt die Daten (Bild-, Audio- und Sensordaten) aufzeichnet, die für den Benutzer sinnvoll sein könnten. Hier sprechen wir von einer „omnipräsenten Informationsverwaltung und Speicherung“. In beiden Fällen ist es entscheidend, aus der Fülle verfügbarer Sensordaten und Hintergrundwissen in Echtzeit die Bedürfnisse des Benutzers zu ermitteln und die für die Sammlung der Informationen notwendigen Schritte einzuleiten.

Eine allgemeine Realisierung des Konzeptes eines omnipräsenten Informationszugriffs ist offensichtlich nicht praktikabel. Ein System, das in jeder nur denkbaren Situation immer erkennen könnte, was der Benutzer benötigt, müsste die Welt ähnlich oder gar besser als ein Mensch „verstehen“. Hier stößt man auf Probleme, die in der Künstlichen Intelligenz seit Jahrzehnten ungelöst und zum Teil prinzipiell nicht lösbar sind. Andererseits ist es durchaus denkbar und sinnvoll, für konkrete, eingeschränkte Anwendungsszenarien Mechanismen zu entwickeln, welche die Kooperation zwischen verschiedenen Informationsquellen verbessern und vorhandene Sensorinformation zu einem der jeweiligen Situation angepassten Umgang mit Information nutzen.

Bedeutung für die Anwendungsszenarien: Techniken des omnipräsenten Zugriffs, der Speicherung und der Verwaltung von Information sind für alle drei oben skizzierten Anwendungsszenarien relevant. Unterstützungssysteme („Ambient Assisted Living“) für ältere, kranke und pflegebedürftige Personen benötigen eine hohe Informationsqualität. C2C- und C2I-Systeme haben sowohl aus gesellschaftlicher Sicht (Sicherheit, Energiesparen, Klimadebatte) als auch aus wirtschaftlicher Sicht hohe Relevanz. Roboter der Zukunft tauschen ähnlich wie Autos der Zukunft Informationen untereinander und mit der Infrastruktur aus. Sie arbeiten mit Menschen „Hand in Hand“ und benötigen umfassendes „On-line“-Wissen über ihre Umgebung. Weitere Gebiete, in denen das Konzept des omnipräsenten Informationszugriffs eine wichtige Rolle spielt, sind Unterhaltungselektronik, Mobilkommunikation, Ausrüstung für Einsatzkräfte und Medizintechnik.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Für die Technische Informatik ergeben aus dem Konzept der omnipräsenten Information vielfältige technische und wissenschaftliche Herausforderungen:

GC 1.1: *Interoperabilität.* Die immer wiederkehrende Frage der Einbindung der verschiedenen Standards für Kommunikation, Datenkodierung und auch der Remote-Ausführung von Anwendungen gewinnt im Zusammenhang mit der spontanen Kooperation zwischen verschiedenen Informationsquellen an besonderer Bedeutung.

GC 1.2: *Selbstorganisierende Konfiguration und Kooperation.* Die Frage, wie eine Gruppe von Informationsquellen (z.B. Fahrzeugen im Beispiel der C2C- und C2I-Systeme der Anwendung A2 „Smart Mobility“), die sich zufällig begegnen, herausfinden kann, wer mit wem welche Informationen wie austauschen soll, ist eine der zentralen Forschungsfragen. Dabei geht es darum, eine Konfiguration zu finden, die allen beteiligten einen Gewinn ermöglicht und dabei möglichst effizient mit den Ressourcen (vor allem der Bandbreite) umgeht und Randbedingungen wie die Privatsphäre berücksichtigt.

GC 1.3: *Effiziente Filterung der Information.* Ein Grundkonzept der omnipräsenten Information ist die Bereitstellung der richtigen Information zur richtigen Zeit und am richtigen Ort. Das System muss dazu schnell, oft mit sehr beschränkten Ressourcen (z.B. im Falle eines mobilen Gerätes), aus einer Vielzahl oft unzuverlässiger, einfacher Sensordaten eine komplexe Situationsanalyse durchführen, um herauszufinden, was, wann und wo „richtig“ ist. Neben Fragestellungen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz, die hier zweifelsohne vorhanden sind, sind eine effiziente Sensordatenverarbeitung und frühe Sensorfusion die Schlüsselprobleme. Im Datenbankbereich sind Fusion und Abstraktion von großen Datenbeständen seit langem ein Forschungsthema. Allerdings wird dort offline auf festen Datenbeständen gearbeitet. Das Konzept der omnipräsenten Information setzt hingegen an vielen Stellen eine Echtzeitverarbeitung voraus. Dabei muss teils auf unvollständiger Information gearbeitet werden, bzw. es muss an Hand eines kleinen Ausschnittes entschieden werden, ob und welche Daten als nächstes angefordert werden. In diesem Bereich existieren derzeit nur wenige geeignete Verfahren.

GC 1.4: *Datenintegrität, Zuverlässigkeit und Sicherheit.* Viele der Anwendungsbereiche des omnipräsenten Informationszugriffs haben hohe Anforderungen an die Integrität, Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme (siehe auch GC 3). Dies ist bei C2C- und C2I-Systemen, Pflege-, Gesundheits- und Sicherheitsanwendungen offensichtlich. Aber auch im Unterhaltungsbereich spielen Privatsphäre, Schutz vor SPAM und Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle. Wie dies im Zu-

sammenhang mit komplexer Ad-hoc-Kooperation zwischen unterschiedlichen Systemen und der möglichst breiten Nutzung verschiedener Informationsquellen zu garantieren ist, ist ein offenes Problem.

GC 1.5: *Ad-hoc-Kooperation*. Geräte unterschiedlicher Hersteller müssen sich schnell auf eine Kooperation einigen können. Es werden Protokolle und Algorithmen benötigt, die ein schnelles Finden relevanter Kooperationspartner ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind effiziente Kommunikationsverfahren, insbesondere Ad-hoc-Routing ein wichtiges Thema. Zwischen den Geräten der verschiedenen Partner müssen entsprechende Interoperabilitätsstandards akzeptiert sein. Es werden hohe Anforderungen an die Geschwindigkeit gestellt, zudem liegen enge Ressourcenbeschränkungen vor, weshalb sich vorwiegend hardwarenahe Lösungen anbieten werden.

Grand Challenge 2: Zukünftige Kommunikationsnetze

M. Beigl, Technische Universität Braunschweig; S. Fischer, Universität zu Lübeck

In den zukünftigen Informationssystemen wird der Umfang und der Durchsatz von Kommunikationsnetzen weiter steigen – nach der Revision des Gilderschen Gesetzes wird sich die Bandbreite alle 12 Monate verdoppeln⁵ und nach Poors Vermutung bei analogem Wachstum die Anzahl der Rechnerknoten. Da der Wert der Kommunikation nach Metcalfs Gesetz quadratisch mit der Anzahl der Teilnehmer steigt, werden Kommunikationsnetze zukünftig zu einem entscheidenden Faktor für die Gewährleistung korrekter Funktionalität in Informationssystemen.

Zahl und Dichte der Kommunikationsendgeräte wird auch durch den Einsatz neuer Technologien wie RFID-Systemen, polymerbasierten oder Offset-gedruckten Schaltungen und vernetzten Sensorsystemen erheblich steigen. Mehrere Dutzend vernetzter Informationsgeräte pro Quadratmeter erscheinen so langfristig als möglich. Die unterschiedlichen Aufgaben, die solche Geräte zu erledigen haben, führen zu einer zunehmenden Diversifizierung und Heterogenität der Kommunikationsnetzwerke, bei gleichzeitig wachsender Notwendigkeit, Kompatibilität zwischen Kommunikationsnetzwerken zu erreichen. Der Kommunikationsfluss zwischen Endpunkten wird spontan über veränderliche Netzwerkabschnitte und -technologien geleitet und dabei vielfältige Netzwerkprotokollgrenzen passieren. Dabei wird nicht nur der Nutzer eines Dienstes oder Konsument von Information, sondern auch der Erbringer des Dienstes oder der Information mobil sein. Peer-to-Peer-Ansätze werden neue Anwendungsbereiche finden und weiterentwickelt werden – zum Beispiel im Bereich des Grid-Computing. Multimediabasierte Informationssysteme werden zudem extrem hohe Anforderungen an Kommunikationsnetze stellen. Insgesamt wird aber eine Vielzahl von Koordinationsstilen nebeneinander existieren, die von Rechnersystemen nach Bedarf ad hoc verwendet werden können.

Dies erfordert radikal neuartige Kommunikationsarchitekturen jenseits der klassischen geschichteten Architekturen, die in der Lage sind, vielfältige Kommunikationsnetze abzubilden. Die Entwicklung geht dabei hin zu semantisch reichhaltigeren, z.B. selbstbeschreibenden Architekturkonzepten. Dynamisch adaptierende Kommunikationsnetzwerke, Software-gesteuerte Hardware (z.B. Software Radio) und selbstorganisierende Systemansätze (z.B. Organic und Autonomic Computing) werden völlig flexible Gestaltungsmöglichkeiten für Kommunikationsnetze im Sinne von Active Networks ermöglichen. Neuartige, semantisch orientierte Middlewareansätze erlauben ein spontanes, leichtgewichtiges Zusammenschalten von Diensten, aber auch die Fusion von Menschen betriebener (sozialer) Netzwerke und vollautomatisierter Dienste. In diesem Zusammenhang wird die Bedeutung Web-orientierte Kommunikation und XML-basierte Austauschformate weiter wachsen.

Lokalität der Kommunikationsbeziehungen wird durch die hohe Anzahl lokal miteinander vernetzter Systeme eine immer größere Rolle spielen und damit neue Ansprüche an Kommunikationsnetze stellen. Gleichzeitig erlaubt die lokale Kommunikation auch die parallele Nutzung von verfügbaren Kommunikationskanälen. Es ist hier zu erwarten, dass bei den vornehmlich lokal operierenden Systemen – Sensorsysteme, RFID-Systeme – die Grenzen zwischen sensorischer Erfassung und Kommunikation verschwinden werden. Lokale Kommunikation mobiler Geräte

⁵ Coffman, K. G. and Odlyzko, A. M. 2002. Internet growth: is there a "Moore's law" for data traffic?. In *Handbook of Massive Data Sets*, J. Abello, P. M. Pardalos, and M. G. Resende, Eds. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 47-93.

sowie ubiquitär in unsere (alltägliche) Umgebung eingebrachte Kommunikationssysteme erfordern darüber hinaus den Aufbau spontaner Kommunikationsverbindungen ohne Vorwissen über die Fähigkeiten, Protokolle und angebotenen Dienste des Kommunikationspartners.

Die beschriebenen zukünftigen Kommunikationsnetze erfordern deshalb auch Autonomie und Selbstorganisation ohne Notwendigkeit des Eingriffs eines Administrators oder gar eines Nutzers. Die Fähigkeit der Systeme, im Hintergrund zu agieren, wird durch die Einbettung von Informationstechnologie in eine Vielzahl von Gegenständen und Infrastrukturen ermöglicht. Eine hohe Anzahl von Geräten erlaubt es auch, kollaborative, ad hoc zusammenarbeitende Kommunikationsnetze zu gestalten. Diese können durch spontane Zusammenarbeit neue Dienste erbringen, welche mittels nur eines der Computersysteme nicht leistbar wären.

Computer werden in Zukunft in immer weiteren Bereichen eingesetzt, auch in langlebigen Gütern und Infrastrukturen. Dies erfordert die Entwicklung sehr nachhaltiger Kommunikationsnetzwerke. Hohe Lebensdauer bedeutet aber für mobile Systeme auch, möglichst sparsam mit der zur Verfügung stehenden Energie umzugehen (siehe auch GC5). Ein Teil dieser mobilen eingebetteten Geräte wird z.B. parasitär mit Energie versorgt werden, ein anderer Teil der Systeme wird mit einer Batterieladung für die Lebensdauer auskommen müssen. Da die Kommunikation bei mobilen Geräten für einen Großteil des Energiebedarfs verantwortlich ist, stehen hier innovative energiesparende Kommunikationsprotokolle und neuartige Netzwerkansätze im Mittelpunkt des Interesses.

Mit den oben genannten Entwicklungen können neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Diese werden immer weiter in die Bereiche des Alltags und der industriellen Anwendung vordringen, in denen hohe Zuverlässigkeit, Robustheit und Sicherheit unabdingbar sind. In neuen, spontan miteinander arbeitenden Systemen sind auch Grundlagen zu bearbeiten, wie etwa die Bestimmung geeigneter vereinheitlichter Beschreibungen für die oben genannten Eigenschaften und grundlegenden Steuerungsmethoden (siehe auch GC3). Die Bedeutung der Sicherheit wird weiter zunehmen. Im allgemeinen Fall ist dies nicht auf die reine Netzsicherheit beschränkt, sondern der Selbstschutz erstreckt sich auf die gesamte, immer wichtiger werdende Infrastruktur. Sicherheit soll dabei sowohl in der Betriebsphase als auch in der Entstehungsphase des Kommunikationssystems betrachtet werden. In der Entstehungsphase werden Sicherheitseigenschaften aufgrund des Systementwurfs automatisch ermittelt, z.B. mittels formaler Methoden, die auf beweisbare Weise die gewünschten Sicherheitseigenschaften erzeugen. In der Betriebsphase können Kommunikationssysteme mittels adaptiver Mechanismen Selbstschutz gegenüber Spam, Viren etc. erzielen. Hier können Methoden aus den Lebenswissenschaften, vor allem aus der Biologie hilfreich sein.

Anwendungen im Bereich Multimedia werden immer weiter wachsende Anforderungen an die Kommunikationsnetze der Zukunft stellen. Anwendungen hier sind etwa virtuell zusammenarbeitende Arbeitsgruppen, z.B. um weltweit an einem Projekt zu arbeiten, oder um ein Musikstück entfernt miteinander zu proben. Es kommt zu einer „Renaissance“ des Festnetzes: Neue breitbandige Dienste und immersive Anwendungen sowie Umgebungen mit ambienter Intelligenz haben enorme Anforderungen an die Kommunikationsdienste mit extrem hohen Datenraten, verbunden mit niedriger Latenz. Die verfügbare Bandbreite der Übertragungsmedien wird allerdings nicht in der gleichen Weise wachsen können wie die benötigte Bandbreite. Dem stehen wirtschaftliche Überlegungen und auch prinzipielle physikalische Rahmenbedingungen entgegen. So ist z.B. das Frequenzspektrum, das für ortsunabhängige und ungerichtete kabellose Kommunikation verwendet werden kann, nicht beliebig erweiterbar. Diese Beschränkung der zur Verfügung stehenden Kommunikationsmedien in Kombination mit dem zunehmenden Wert der Kommuni-

kation wird zu einer Verteuerung der verfügbaren Medien einerseits führen – was z.B. an dem Preis für UMTS-Frequenzen ablesbar ist. Für zukünftige kabelgebundene und kabellose Kommunikationsnetze wird es deshalb gleichermaßen wichtig sein, existierende Medien besser ausnutzen zu können, wobei Bandbreite erweitert und Latenzzeiten minimiert werden müssen. Dies wird eine höhere Fehlerrate auf den Kommunikationsmedien zur Folge haben, die dann wiederum vom Kommunikationsnetz zu behandeln sind. Diese sich eigentlich widersprechenden Ziele können nur durch neue Ansätze von Kommunikationsnetzwerken – z.B. Network Coding – gelöst werden. Folglich sind Forschungen zur Optimierung der Ausnutzung der existierenden Kommunikationsnetze notwendig, die mit möglichst radikalen Ansätzen einen hohen Effizienzgewinn erreichen können.

GC 2.1: *Gestaltung und Beherrschung komplexer Kommunikationssysteme.* Die hohe Komplexität in drahtgebundenen und drahtlosen Netzwerken ist schon heute schwer zu gestalten und zu beherrschen. Eine Herausforderung besteht darin, neue Architekturansätze jenseits existierender Kommunikationssysteme zu entwickeln, die aber gleichzeitig in der Lage sind, aktuelle, insbesondere dienstorientierte Architekturansätze (SOA), zu umfassen. Die Analyse der notwendigen Eigenschaften für zukünftige Kommunikationssysteme, der notwendigen Koordinationsstile und Entitäten ist ebenso notwendig wie die Entwicklung neuer Modelle und Techniken.

Für die Beherrschung der Komplexität werden Techniken der Selbstorganisation (Organic Computing, Autonomic Computing, siehe GC4) und Semantik der Kommunikationsvorgänge eine entscheidende Rolle spielen. Die Nutzung semantischer Beschreibung innerhalb von Kommunikationssystemen erlaubt eine selbstorganisierende Mechanik innerhalb der Kommunikationsvorgänge und der darauf aufbauenden Anwendungen. Ebenso muss an neuen Verfahren zur Formulierung des gewünschten Verhaltens (Policies) von Netzen geforscht werden, um Werkzeuge bereitzustellen, mit denen solche Policies in das Netzmanagement für neue Kommunikationsnetze übertragen werden können.

GC 2.2: *Radikal neue Kommunikationsnetze.* Die Herausforderungen für zukünftige Kommunikationsnetze können nur durch radikal neue Ansätze für Kommunikationsnetzwerke bewältigt werden. Optimierungsziele für solche Netzwerke sind die Erhöhung der Spontaneität – Stichwort Ad-hoc-Netzwerke –, Ermöglichung einer hohen Heterogenität der Kommunikationspartner bei gleichzeitiger Zusicherung einer minimalen Kompatibilität zueinander. Dazu kommen Herausforderungen wie Maximierung der Bandbreite, Minimierung der Mediennutzung, hohe Fehlerraten im Netzwerk, unvorhersagbare Kommunikationsbedingungen etc. Durchgreifend neue Netzwerke sollen nicht nur auf die hier dargestellten Optimierungsziele hin, sondern auch frei definiert entwickelt werden. Oft müssen Verbesserungen um eine Größenordnung oder mehr erreicht werden, auch um Kommunikationsnetzen neue Anwendungsfelder zu erschließen. Neue Techniken wie Network-Coding und probabilistische Übertragungsansätze scheinen entsprechendes Potenzial zu besitzen. Weitere Ansätze sind zu erforschen und deren Eigenschaften gegenüberzustellen.

GC 2.3: *Nachhaltige Kommunikationssysteme.* Kommunikationssysteme werden immer langlebiger. Daraus können zwei Herausforderungen abgeleitet werden: Zum einen sind Kommunikationsnetze zu entwickeln, die sehr lange Zeitspannen überdauern können. Zum zweiten werden Kommunikationsnetze benötigt, die möglichst sparsam mit der für die Durchführung der Kommunikation notwendigen Energie umgehen, um die Ressourcen insbesondere von mobilen Kommunikationsteilnehmern zu schonen (siehe auch GC 5). Im Bereich nachhaltiger Kommunikationsprotokolle sind eine ganze Reihe von Fragestellungen zu beantworten: Wie können Netze und

Protokolle so gestaltet werden, dass sie auch noch nach dutzenden Jahren sinnvolle Dienste leisten? Wie gestaltet man Kommunikationsnetze langlebig? Was sind geeignete Entwurfsmethoden? Welche Arten von Netzen eignen sich besonders? Wie wird die Kompatibilität zwischen verschiedenen Kommunikationssystemen auch nach langer Zeit beherrscht? Wie können Alterungseffekte – resultierend aus z.B. der Erhöhung der Fehlerrate über die Zeit – beherrscht werden? Welchen Beitrag leisten hier neue Techniken wie etwa Software-Defined Radio? Die Forschung an nachhaltigen Kommunikationssystemen kann dabei Ansätze der Linguistik, aber auch biologisch und organisch inspirierte Ideen nutzen. Energiesparende Kommunikationsnetze wiederum erfordern zum Teil sehr hohe Effizienzsteigerungen (bis zu Faktor 1000) gegenüber bisherigen Ansätzen, um Laufzeiten von mehreren Jahren oder Jahrzehnten mit einer Batterie bzw. die Versorgung über parasitäre Energieversorgung (z.B. gewonnen aus Bewegungsenergie, Temperaturunterschiede) zu ermöglichen. Ansätze der Mischung der analog/digitalen Codierung von Daten zeigen erste Möglichkeiten für solche Effizienzgewinne, weitere Verfahren sind zu entwickeln.

GC 2.4: *Hochdichte ubiquitäre Netzwerke.* Die Anzahl der Knoten innerhalb eines Kommunikationsnetzwerkes wird zum Teil sehr hoch werden. Z.B. sind in einem Regal mit RFID-bestückten Produkten mehrere dutzend oder gar hundert Artikel innerhalb einer Kommunikationszelle vorhanden. Solche Netzwerke stellen neue Herausforderungen an die Übertragungsverfahren, Medienzugriff, Routing, Informationsdarstellung, Informationszugriff etc., für die eine neue Klasse von Kommunikationsnetzwerken benötigt wird. Innerhalb dieser Netzwerke wird auch die Lokalität der Kommunikationsbeziehung eine Rolle spielen, da die Wahrscheinlichkeit für die Nutzung einer Information mit der Entfernung zu dessen Quelle abnehmen wird. Existierende Protokollansätze können nur sehr eingeschränkt mit diesen neuen Bedingungen umgehen, neue Verfahren sind deshalb zu entwickeln.

Hochdichte Netze werden ubiquitär auftreten und Techniken des Ubiquitous Computing, insbesondere die Erkennung der Umwelt und deren Aktivität mittels Sensorik, nutzen. Auch werden diese Systeme gegebenenfalls mittels Aktuatorik direkt mit Menschen in Interaktion treten. Diese Art der Informationsübermittlung wird ein Teil der Gesamtkommunikation solcher Systeme darstellen. Die Herausforderung ist es deshalb, Kommunikationssysteme bereitzustellen, die eine Integration Sensor/Aktuator-basierter und (digitaler) Medien basierter Kommunikation erlaubt.

GC 2.5: *Virtuell und real kollaborierende Systeme.* Immer mehr Bereiche der realen Welt werden im Rechner modelliert bzw. in IT-Anwendungen eingebunden. Die Virtualisierung von Alltagsgegenständen lässt das „Web of Things“ Realität werden. Die Überlagerung physikalischer Aktivitäten und virtueller Informationsströme in abstrakter (z.B. mittels Workflows) oder in konkreter Weise (z.B. Second Life) stellt den Beginn einer neuen Entwicklung der direkten Echtzeit-Kollaboration zwischen virtuellen Systemen und der realen Welt dar. Vernetzung, Informationsfluss, Angebot und Nutzung von Diensten kann dabei wechselseitig zwischen realer und virtueller Welt, aber auch innerhalb der virtuellen Welt erfolgen. Von der Anwendungsseite her stehen hier Techniken der Kollaboration über Kommunikationsnetze und Multimedia-Anwendungen im Vordergrund. Diese werden zur Organisation von Zusammen-Arbeit (CSCW), oder Zusammen-Freizeit (Social Networks) verwendet werden. Technisch stehen hier Web-Service Technologien, Mash-Ups und Grid-Technologien im Vordergrund.

Die Integration der verschiedenen Konzepte, Techniken und Anforderungen stellt eine hohe Herausforderung für Kommunikationsnetze der Zukunft dar. Neben dem Integrations- und Komplexitätsaspekt sind als weitere Herausforderungen die Erhöhung von Bandbreite und die Verringerung der Latenz zu nennen. Letztere ist unabdingbar, um die für viele Anwendungen notwendige

natürliche Überlagerung von Medien zu ermöglichen. Es ist zu erwarten, dass zur Beherrschung der Komplexität Semantik von Kommunikationsvorgängen eine große Rolle spielen wird. Arbeiten an formalen Beschreibungen der Semantik der Kommunikationssysteme und Forschung an semantikbasierter Dienstsuche müssen weitergeführt werden.

GC 2.6: *Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Fehlerrobustheit und Sicherheit*. Zukünftige Kommunikationssysteme werden unter wesentlich widrigeren Umständen und Umgebungen agieren müssen als derzeitige Kommunikationsnetze. Dennoch müssen Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Wartbarkeit, Fehlerrobustheit und Sicherheit gewährleistet werden (sogenannte RAMSS-Kriterien, siehe auch GC 3). Dies steht zunächst im Widerspruch zu den oben genannten Optimierungskriterien wie höherer Energieeffizienz, höhere Flexibilität und höhere Autonomie. Die Herausforderung hier ist es, grundlegend neue Konzepte zur Auflösung dieser Widersprüche zu finden, und technische Lösungen zur Realisierung der Konzepte vorzuschlagen.

Grand Challenge 3: Vertrauenswürdigkeit und Zuverlässigkeit

E. Maehle, Universität zu Lübeck; H. Schmeck, Universität Karlsruhe (TH); K. Waldschmidt, Universität Frankfurt

Vertrauenswürdigkeit ist eine wichtige Eigenschaft von Gegenständen (z. B. Fahrzeug oder Geldautomat) und Personen in unserer Umwelt. Unser tägliches Handeln in allen Lebensbereichen wird wesentlich davon bestimmt, inwieweit wir Objekten unserer Umwelt Vertrauen entgegenbringen können. Dies gilt insbesondere für informationsverarbeitende Systeme, die Dienstleistungen erbringen. Besonders für den Nutzer einer selbstorganisierenden, anpassungsfähigen Dienstleistung stellt sich die Frage, warum er Vertrauen in das Verhalten des Dienstes setzen sollte bzw. wie sich Vertrauen entwickeln kann. Der Entwickler und Betreiber eines derartigen Dienstes muss sich fragen, welche Methoden bereit gestellt werden müssen, um den für eine Akzeptanz notwendigen Grad des Vertrauens aufzubauen und zu bewahren, insbesondere, wenn dieser Dienst in beliebigen Einsatzumgebungen bereitgestellt werden soll, deren Vertrauenswürdigkeit nicht garantiert werden kann.

Vertrauenswürdigkeit hat dabei viele Facetten:

- *Korrektheit*: Wird die gewünschte Dienstleistung tatsächlich erbracht (z. B. eine Überweisung im Home-Banking)? Hier werden Methoden der formalen Verifikation von Software und Hardware benötigt sowie systematische, leistungsfähige Testmethoden. Das Thema wird seit mehr als 20 Jahren intensiv bearbeitet. Für Hardware-Verifikation gibt es zahlreiche kommerzielle Werkzeuge, im Bereich der Software hat sich die formale Verifikation aber nur eingeschränkt in der Praxis durchgesetzt, in sicherheitskritischen Anwendungen ist sie jedoch unerlässlich. Für verteilte und insbesondere für selbstorganisierende, adaptive Systeme sind Korrektheit und formale Verifikation herausfordernde Themen aktueller Forschung.

- *Sicherheit* (im Sinne von „*security*“): Verhindert das System unberechtigte Zugriffe? Dies hat besondere Bedeutung beim Einsatz von Diensten in unsicheren Umgebungen: Hier muss der Dienst so gestaltet sein, dass er keinen unberechtigten Zugriff zulässt. Der Nutzer muss die Authentizität des Dienstes überprüfen können, d.h. er muss entdecken können, ob die Identität des Dienstleisters verfälscht oder der Dienst verändert wurde. Dies geschieht in der Regel über digitale Signaturen. Die Trusted Computing Initiative⁶ entwickelt hierzu Industriestandards und unterstützende Hardware wie das Trusted Platform Module, das bereits in zahlreiche (vor allem mobile) Geräte integriert ist.

- *Verlässlichkeit* (im Sinne von „*safety*“ und „*dependability*“): Dies ist eher ein Oberbegriff für eine Reihe von Eigenschaften, die in der Informatik bereits seit langem meist unter dem Aspekt der Fehlertoleranz untersucht werden. Dazu zählen insbesondere *Verfügbarkeit*, *Zuverlässigkeit* und *Robustheit*:

- *Verfügbarkeit*: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein System oder Dienst zur Verfügung steht, wenn er benötigt wird? Bei vielen Anwendungen wird erwartet, dass Dienste zu jeder Zeit angeboten werden, die Nichtverfügbarkeit kann zu einem starken Vertrauensverlust führen. Standardansätze zur Gewährleistung hoher Verfügbarkeit bestehen darin, Systeme ausreichend redundant zu betreiben, so dass stets mindestens ein System zur Ausführung von Diensten

⁶ <https://www.trustedcomputinggroup.org/home>

bereitsteht. Dies ist beispielsweise in sicherheitskritischen Bereichen unerlässlich, aber auch bei ökonomischen Anwendungen wie elektronischen Börsen. In jedem Fall ist hier abzuwägen zwischen dem Aufwand zur Erhöhung der Verfügbarkeit und dem Schaden, der durch Nichtverfügbarkeit eintreten würde.

- *Zuverlässigkeit*: Anders als bei der Korrektheit geht es hier darum, ob ein System auch bei Veränderungen seiner Einsatzbedingungen seine Funktion korrekt erfüllt. So müssen im Energiebereich Spannung und Frequenz des Stroms stets garantiert werden und im elektronischen Handel müssen Transaktionen vollständig ausgeführt werden, selbst wenn erforderliche Systemkomponenten zeitweise nicht zur Verfügung stehen. Es gibt vielfältige Verfahren aus dem Bereich der Fehlertoleranz, um vorgegebene Anforderungen bezüglich der Zuverlässigkeit einhalten zu können; für vernetzte, selbstorganisierende Systeme sind jedoch neue Ansätze erforderlich.

- *Robustheit*: Wie empfindlich reagiert ein System auf Veränderungen in der Umgebung oder auf unsachgemäße Nutzung? Hier geht es weniger um die Reaktion auf fehlerhafte Zustände, sondern um die Anpassungsfähigkeit eines Dienstes. Ein Beispiel ist die Nutzung eines Mobiltelefons innerhalb und außerhalb von Gebäuden, in Fahrzeugen oder im Zug, ein anderes die Unempfindlichkeit einer Tastatur gegenüber verschüttetem Kaffee.

- *Privatheit*: Wird ein Dienst benötigte private Informationen vertraulich und bestimmungsgemäß behandeln? Personalisierte Dienste sind auf persönliche Daten angewiesen, deshalb geht es hier bezüglich vertrauenswürdiger Nutzung persönlicher Daten nicht nur um den Datenschutz, sondern auch um die Möglichkeit des Nutzers, über „Policies“ den Umgang mit seinen Daten kontrollieren zu können. Protokoll-Standards für diesen Bereich sind zwar vorhanden, haben sich aber bisher nur eingeschränkt durchgesetzt. Die Ansätze des Trusted Computing beschäftigen sich insbesondere auch mit dieser Thematik.

- *Funktion und Leistung*: Funktioniert das System so wie es soll? Wird das System tatsächlich die zugesagte Leistung erbringen? Hier geht es um Dienstgütevereinbarungen, an denen die Leistung des Systems gemessen werden kann. Insbesondere bei Veränderungen von System- oder Umgebungsparametern und bei selbstorganisierenden Systemen ist dies ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem.

- *Haftbarkeit*: Wer ist für Fehlverhalten des Systems verantwortlich? Die Haftung für das Verhalten von Systemen ist meist klar geregelt, wenn jedoch Systeme sich selbsttätig an veränderte Rahmenbedingungen anpassen, so kann es zu unerwünschten Ereignissen kommen, bei denen nicht klar ist, wer die Verantwortung trägt. Hier sind rechtswissenschaftliche Beiträge erforderlich.

Diese Auflistung macht deutlich, wie stark das Thema „Vertrauenswürdigkeit“ über die Nutzung kryptographischer Verfahren hinausgeht. Die hier aufgeführten Eigenschaften beschreiben zwar wichtige Einzelaspekte der Vertrauenswürdigkeit, sie beschränken sich jedoch alle darauf, objektive Eigenschaften eines Systems zu untersuchen. In Bezug auf die Akzeptanz eines Systems von Dienstleistungen durch den Menschen ist Vertrauenswürdigkeit jedoch auch eine dynamische Eigenschaft, die sich durch die subjektiven Erfahrungen mit der Nutzung von Diensten verändern kann und auch durch soziale Beziehungen des Menschen beeinflusst wird (hier spielt unter anderem die *Reputation* eines Dienstes eine wichtige Rolle). Dieser dynamische und stärker subjektiv geprägte Aspekt der Vertrauenswürdigkeit wird in der bisherigen Forschung zum Thema „Verlässlichkeit“ kaum berücksichtigt, er wird jedoch entscheidenden Einfluss auf den Erfolg verteilter Dienstleistungsarchitekturen haben.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Herausforderungen für die Forschung über „Vertrauenswürdige Informatik-Systeme“ ergeben sich vor allem bei der Nutzung verteilter Dienstarchitekturen.

GC 3.1: *Vertrauen in unsicheren Umgebungen.* Für die oben genannten Aspekte des Vertrauens müssen Verfahren entwickelt werden, die es erlauben, auch in unsicheren Umgebungen Dienste einzusetzen, sofern ein erforderlicher Grad an Vertrauen vorhanden ist. Anders als beim „Trusted Computing“ geht es hier nicht um eine binäre Entscheidung über das Vorliegen unerlaubter Manipulationen, sondern um eine graduelle Abstufung. Dies erfordert eine geeignete Methodik, um beim Angebot eines Dienstes ein ausreichend hohes „Anfangsvertrauen“ zu erzeugen. Der Grad des Vertrauens sollte aufgrund positiver Erfahrungen mit der Nutzung eines Dienstes wachsen können. Bei den selbstorganisierend betriebenen Peer-to-Peer-Netzen ist dies ein wichtiges Thema aktueller Forschung. Ein Vertrauensverlust aufgrund von Fehlverhalten wird weitere Methoden benötigen, um verloren gegangenes Vertrauen wieder gewinnen zu können. Vertrauen setzt dabei nicht voraus, dass ein System zu 100% fehlerfrei funktioniert, es erfordert vielmehr eine Abwägung zwischen Kenntnissen möglichen Fehlverhaltens und den Fähigkeiten des Systems, in Interaktion mit seiner Umwelt die Risiken unerwünschter Folgen fehlerhaften Verhaltens zu minimieren. Andererseits wird ein hochzuverlässiges System nicht per se notwendigerweise als vertrauenswürdig angesehen, die subjektive Einschätzung der Vertrauenswürdigkeit hängt von weiteren Faktoren ab.

Hier wird man mit Sicherheit Zertifikate einsetzen, mit denen Eigenschaften des zu nutzenden Systems oder Dienstes aufgrund einer formalen Prüfung durch unabhängige Dritte zugesichert werden, ergänzt durch Reputationsmechanismen, die Zusicherungen von Eigenschaften aufgrund von Erfahrungen darstellen.

GC 3.2: *Kriterien für die Bewertung von Vertrauen.* Für eine systematische Konstruktion vertrauenswürdiger Systeme (im Sinne eines „Trust Engineering“) wird es erforderlich sein, geeignete qualitative und quantitative Kriterien für die Charakterisierung und Bewertung von Vertrauen zu entwickeln. Selbstorganisierende, adaptive (bzw. autonome oder organische) Systeme werden aufgrund der Dynamik ihrer Veränderungen spezielle Herausforderungen darstellen.

GC 3.3: *Validierung.* Schließlich wird es erforderlich sein, in unterschiedlichen Anwendungsfeldern die Wirkung der entwickelten Methodik zu überprüfen, um allgemeingültige Verfahrensweisen und Erkenntnisse ableiten zu können.

Grand Challenge 4: Organic Computing Techniken

C. Müller-Schloer, Universität Hannover; H. Schmeck, Universität Karlsruhe (TH); U. Brinkschulte, Universität Karlsruhe (TH), F. Feldbusch, Universität Karlsruhe (TH); W. Trumler und Th. Ungerer, Universität Augsburg

Technische Systeme werden infolge der Fortschritte der Mikroelektronik sowie der Rechner- und Softwaretechnik immer komplexer. Sie werden künftig charakterisiert sein durch sehr große Zahlen relativ autonomer, kooperierender und intelligenter Subsysteme, die über Sensoren die Umwelt erkennen, sich an wechselnde Situationen adaptieren und selbstorganisierend vorgegebene Ziele erreichen. Unter Komplexität soll hier verstanden werden, dass durch die Menge beteiligter Komponenten (seien sie in Hardware oder Software) und ihre Wechselwirkungen untereinander das Gesamtsystem vom Menschen nicht mehr vollständig verstanden wird und emergente Effekte aufweist, die mit konventionellen Methoden des Systementwurfs nicht oder nur schwer erfassbar sind. Um die Chancen solcher Systeme zu nutzen und ihre Risiken zu beherrschen, sind ein tieferes Verständnis solcher Systeme, die Kontrolle des kollektiven Verhaltens ihrer Komponenten, die Beherrschung von Nicht-Determinismus und die praktische Umsetzung komplexer, technischer Systeme durch Architekturen, Werkzeuge und Entwurfsverfahren notwendig.

Die klassischen Methoden zur Beherrschung von Komplexität haben zur Entwicklung von sehr leistungsfähigen Systemen geführt, und dieser Weg wird auch weiter beschritten werden. Dennoch gibt es Bereiche, in denen ergänzende und neue Verfahren nötig sind. So kann durch die Vernetzung der Komponenten komplexer technischer Systeme gewünschtes oder ungewünschtes emergentes Verhalten entstehen. Beim klassischen Entwurf wird emergentes Verhalten jedoch explizit ausgeschlossen. Zulassen und Kontrollieren der Emergenz sollte das Ziel neuer Methoden zur Beherrschung von Komplexität sein. Das Potential an neuartigen Systemen, das sie erschließen könnten, ist enorm groß.

Der Begriff des „Organic Computing (OC)“ entstand während eines Workshops über Zukunftsthemen der Technischen Informatik des GI/ITG-Fachausschusses „Architekturen von Rechensystemen ARCS“⁷. Die Ergebnisse des Workshops wurden in einem Positionspapier der GI und der ITG zusammengefasst, das den Ausgangspunkt für das seit Juli 2005 bestehende DFG-Schwerpunktprogramm 1183 „Organic Computing“ darstellt. Ziel des Organic Computing ist es, die wachsende Komplexität der uns umgebenden Systeme durch Mechanismen der Selbstorganisation zu beherrschen und an den Bedürfnissen der Menschen zu orientieren. Ein „organisches Computersystem“ soll sich entsprechend den gewünschten Anforderungen dynamisch und selbstorganisierend den Umgebungsverhältnissen anpassen. Das heißt, es soll abhängig vom konkreten Anwendungsbedarf selbstorganisierend, -konfigurierend, -optimierend, -heilend, -schützend, -erklärend (abgekürzt unter dem Begriff der Selbst-X-Eigenschaften) verhalten und umgebungsbewusst (adaptiv, kontext-sensitiv) handeln.

Eng verwandt mit den Zielen des Organic Computing ist das von IBM propagierte Autonomic Computing. Inspiriert durch die Funktionalität des vegetativen Nervensystems wird ein Mana-

⁷ Unabhängig davon wurde der Begriff auch im Kreis von Neuroinformatikern und Biologen im Rahmen des Symposiums „Organic Computing – Towards Structured Design of Processes“ (Heinz Nixdorf Museum in Paderborn) verwendet. Beide Entwicklungslinien des OC arbeiten inzwischen eng zusammen.

gement von Rechensystemen vorgeschlagen, das auf Veränderungen der Umwelt selbstständig reagiert, um die gewünschte Funktionalität des Systems aufrecht zu erhalten. Dafür werden eine Reihe von Selbst-X-Eigenschaften autonomer Systeme postuliert: Im Vordergrund steht das Selbstmanagement der Systeme, dies bedingt Eigenschaften der Selbstkonfiguration, der Selbstoptimierung, der Selbstheilung und des Selbstschutzes. Während die Ziele des Organic Computing stark auf die Untersuchung selbstorganisierender und insbesondere eingebetteter oder ubiquitärer Systeme ausgerichtet sind, steht beim Autonomic Computing mehr das Selbstmanagement der Serversysteme und großer verteilter Rechnersysteme im Vordergrund.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Deutschland ist weltweit führend in vielen Bereichen der Automobiltechnik, Verkehrstechnik, Automatisierungstechnik und Telekommunikation. Zur Wahrung und zum Ausbau dieser Führungsposition ist es nötig, frühzeitig die Möglichkeiten adaptiver und selbstorganisierender Systeme zu nutzen und die absehbaren Probleme zu lösen. Es geht dabei nicht mehr um die Frage, ob selbstorganisierende Systeme entstehen werden, sondern darum, wie wir sie beherrschen können.

Die Erhaltung von Arbeitsplätzen und deren zusätzliche Schaffung setzen voraus, dass künftige IT-bestimmte Systeme mit vertretbarem Entwicklungsaufwand zuverlässig hergestellt werden können. Hohe Qualität und eine Orientierung an den Bedürfnissen des menschlichen Benutzers stehen dabei im Vordergrund.

Wir sehen die folgenden Herausforderungen an die Informatikforschung:

GC 4.1: *Kontrolle von Selbstorganisation und Emergenz.* Bei komplexen, verteilten Systemen können unerwartete Effekte des Zusammenwirkens auftreten. Die aus dieser Wechselwirkung entstehenden Systemänderungen sind ein Ergebnis von Selbstorganisationseigenschaften. Ergeben sich aus dieser Selbstorganisation globale, systemweite Ordnungseffekte, so spricht man von Emergenz. Selbstorganisation und Emergenz können positiv (erwünscht) oder negativ sein. Heute fehlt noch weitgehend das Verständnis solcher Effekte (Mikro/Makro-Effekt). In technischen Systemen besteht zusätzlich die Herausforderung, diese Effekte im laufenden System zu erkennen und in der gewünschten Richtung zu beeinflussen. Wir benötigen Mechanismen, um negative Emergenz zu unterdrücken, ihre Folgen zu tolerieren oder gewollt positive Emergenz hervorzurufen. Trotz guter Ansätze durch z.B. verteilte Observer-/Controller-Architekturen ist die Steuerung und Kontrolle der selbstorganisierenden Systeme ein ungelöstes Problem. Es fehlen das systematische Verständnis und theoretische Beschreibungsmöglichkeiten der Konfigurierbarkeit von Systemen. Vielversprechende Ansätze sind Konfigurationsraummodelle, welche die Gesamtheit aller möglichen Zustände und die zugelassenen vs. verbotenen Konfigurationen beschreiben.

GC 4.2: *OC-Architekturen.* Natürliche Systeme wie das Gehirn sind gekennzeichnet durch vielfältige Rückkopplungsschleifen und sich gegenseitig überwachende Kontrollstrukturen. Vermutlich ist der Kontrollaufwand im Gehirn weitaus höher als der für das eigentliche Produkktivsystem. Komplexe technische Systeme werden in Zukunft eine ähnliche Dichotomie aufweisen. Die Überwachungs- und Steuerungsebene könnte dabei langfristig ebenfalls aufwändiger werden als die Produktivebene. Zu den in dieser Überwachungsebene zu lösenden Aufgaben gehören die Beobachtung und Beurteilung sowie die Koordination dynamischer und adaptiver Subsysteme, die Bewertung von Alternativkonfigurationen, Kooperations- und Konfliktlösungsverfahren und

die Durchführung von Rekonfigurationen. Wir benötigen standardisierte Bausteine für eine solche OC-Architektur, die Definition von Schnittstellen und Protokollen, Ein-/Ausgabemechanismen, flexible Middleware sowie Ontologie- und Inferenz-basierte Verfahren für die Suche nach Konfigurationsvarianten.

GC 4.3: *Selbst-X-Eigenschaften*. Eine weitere Anforderung betrifft die Bedien- und Wartbarkeit komplexer Systeme. Das Zusammenwirken vieler vernetzter Komponenten führt zu unvorhergesehenen Effekten. Hier soll das System um Möglichkeiten der Selbstbeobachtung und Selbstkontrolle erweitert werden. Die Selbst-X-Anforderungen der Selbstkonfiguration, der Selbstoptimierung, der Selbstheilung, des Selbstschutzes sollen in einer ganzheitlichen Architektur umgesetzt werden, um Selbstmanagement komplexer Systeme zu erreichen. Vorgänge innerhalb des Systems werden erfasst, analysiert, Maßnahmen zur Anpassung, Verbesserung oder Reparatur ausgewählt und vom System weitgehend ohne Eingriff des Menschen durchgeführt. Eine solche ganzheitliche Architektur ist durch eine Observer-/Controller-Architektur gegeben, bei der Observer (Monitoring des zu überwachenden Systems und Analyse der Monitordaten) und Controller (Planung der Maßnahmen und Ausführung) zu Rückkopplungsschleifen zusammengefasst sind. Das System organisiert und wartet sich auf diese Weise selbst. Zunächst wird ein System durch diese zusätzlichen Eigenschaften komplexer und teurer. Dort, wo Bedienbarkeit und Wartbarkeit die Komplexität eines Systems beschränken, ist diese Erweiterung aber sehr sinnvoll. Performanzsteigerungen durch Adaptivität und Kosteneinsparungen beim Support rechtfertigen hier diese Vorgehensweise.

GC 4.4: *Sicherheit, Robustheit und Vertrauenswürdigkeit*. Die Selbstorganisationstechniken des Organic Computing ermöglichen in vielen Anwendungsbereichen neue wesentlich effizientere, leichter wartbare und anpassungsfähige Computersysteme. Durch Selbstorganisation kann aber auch aus den individuellen Handlungen einzelner Komponenten nicht vorhersehbares Verhalten entstehen, das auf die aktuelle Umgebung nachteilig wirkt. In vielen Anwendungsbereichen kann dies aber nicht toleriert werden. So ist beispielsweise in sicherheitskritischen Anwendungen das Einhalten bestimmter Verhaltensgarantien eine absolut notwendige Voraussetzung. Für Anwendungen, die personalisierte Dienstleistungen anbieten, sind dagegen Datenschutz und Integrität von Daten unabdingbar. Das im menschlichen Zusammenleben unabdingbare Vertrauensprinzip, die Verlässlichkeit von Verhaltensvorhersagen, muss auch auf technische Systeme ausgedehnt werden. Allgemein gilt: Organic-Computing-Systeme können und werden in vielen Bereichen nur dann eingesetzt, wenn sie vertrauenswürdig sind. Vielversprechende Ansätze dazu sind wiederum Observer-/Controller-Architekturen, die Zustandsraumüberwachung mittels Guarding und Assertions, Stabilitätskontrolle, die Unterscheidung von Selbst- und Fremdkomponenten (Immunsystem) sowie Erkennung und Schutz vor Angriffen.

Robustheit ist die Eigenschaft eines Systems, auch unter Störeinflüssen einen definierten Zustandsraum nicht zu verlassen. Wir benötigen Maßzahlen zur Beurteilung von Robustheit. Kann man für den Systementwurf dessen Robustheit vorgeben und danach das System entwickeln?

GC 4.5: *Entwurfsverfahren, Entwurfswerkzeuge und Entwurfsmethodik*. OC heißt im Extrem, dass sich die Systeme selbst entwerfen – zumindest aber, dass sie sich zur Laufzeit anpassen. Der Vorteil liegt in der Entstehung effizienter und an die jeweilige Situation angepasster Systeme, die mit klassischen Methoden ausgeschlossen sind. So findet ein sich selbst organisierendes System eine Kodierung von Information, wie sie für die Aufgabenstellung besonders geeignet ist und nicht unbedingt so, wie sie für das Verständnis des Menschen zu sein hat. Äußere Rahmenbedingungen gesetzt durch die Umwelt oder durch den Menschen bestimmen das Verhalten des

entstehenden Systems. Basiselemente werden teils systematisch, teils zufällig zu Strukturen zusammengesetzt und parametrisiert. Das Ergebnis wird fortwährend automatisch evaluiert und verbessert, bis es die gestellten Anforderungen erfüllt. Durch die fortwährende Evaluation ist Emergenz bei diesem Entwurfsstil kein Problem, sondern sogar wünschenswert. Problematisch ist hier, dass unsere vorhandenen Methoden nicht ausreichen, solch einen Entwurfsstil umzusetzen. Man braucht geeignete Basiselemente für das Anpassen und die Feinabstimmung. Man braucht Vorstrukturierungsmethoden und auf Aufgabenstellungen und Basiselemente abgestimmte Algorithmen, um den (Selbst-)Entwurfsprozess zu beschleunigen. Auch bedarf es Strategien, um das System mit einfachen Aufgabenstellungen zu beginnen und mit komplexeren Aufgaben wachsen zu lassen. Solche Vorgehensweisen sind für den selbstorganisierenden Entwurf bisher noch nicht ausreichend untersucht.

Wenn Systeme sich selbst entwerfen, so dürfen sie dies nur innerhalb vorgegebener Grenzen. Also muss die formale Spezifikation einerseits Vorgaben (Soll-Ziele), andererseits zusätzliche Freiheitsgrade enthalten. Es entsteht so eine „Fuzzy“-Spezifikation. Ein anderer Ansatz zur Beschränkung der Freiheitsgrade ist ein Constraint-based-Design. Analog zu Software-Systemen, welche zunächst nur über Testfälle beschrieben werden, könnte man im Systementwurf vorgehen. Es werden nur Constraints beschrieben: Das System darf alles, was nicht verboten ist.

GC 4.6: *Verständlichkeit für den Menschen.* Ein wesentlicher Aspekt für beherrschbare komplexe Systeme ist deren Verständlichkeit für den Menschen. Ein selbstorganisierendes adaptives System stellt eine besondere Herausforderung an die Nutzerschnittstelle dar. Zwei Extreme sind vorstellbar. Einerseits kann man dem Nutzer immer die interne Aufgabenverteilung darstellen (d.h. das Systemverhalten ist prinzipiell nachvollziehbar, aber der Benutzer wird mit Information überladen), oder man stellt dem Benutzer nur die Ergebnisse dar (d.h. das Systemverhalten ist nicht nachvollziehbar, aber die Präsentation ist effizient). Im ersten Fall müssen Mechanismen der Selbsterklärung erdacht werden, um die komplexen dynamischen Organisation des organischen Systems nach außen verstehbar zu machen. Zum anderen müssen geeignete Techniken entwickelt werden, die mit den OC-Algorithmen interagieren und geeignete Abstraktionen finden, um die Aspekte Benutzerfreundlichkeit und Vertrauenswürdigkeit abzudecken.

GC 4.7: *Lernverfahren.* Adaptive und selbstorganisierende Systeme müssen lernfähig sein. Lernverfahren ermöglichen während des Betriebs eines organischen Rechnersystems dessen Optimierung sowie die Vorhersage von Ausfällen. Lernen basiert auf z. T. zufälligen Explorationen des Entwurfsraums. Dabei können Fehler passieren. Trotzdem darf es nicht zu unerwünschten oder gefährlichen Zuständen kommen. Nötig ist eine Beschränkung des Lernraums und damit zielgerichtetes Lernen („design space self-exploration“). Mittels Guards kann man eine Hülle um das System bilden, welche nur legale Aktionen nach außen dringen und aktiv werden lässt.

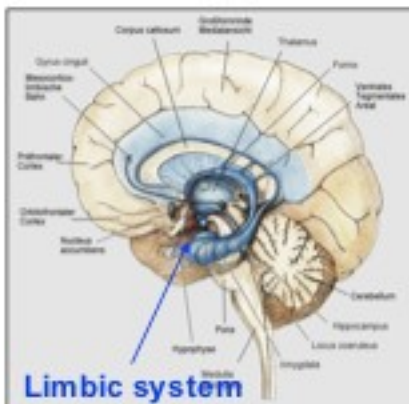
Da die Anwendungen häufig im Bereich der eingebetteten Systeme liegen, ist Lernen mit begrenzten Ressourcen wichtig. Ein Ansatz für die Beschleunigung des Lernvorgangs könnte im „Idea Seeding“ liegen: In Analogie zum kulturellen Dialog zwischen Menschen werden Ideen (z.B. Regeln beim Classifier-System) aus anderen Individuen importiert und ggf. angepasst. Analog zum Gen („gene“) wurde dafür der Begriff Meme geprägt.

Lernen ist grundsätzlich zeitaufwändig und erfordert viele (Fehl-)versuche. Mithilfe modellbasierter Ansätze kann das Lernen simulativ und damit schneller sowie ohne unmittelbare Auswirkung auf die Umgebung erfolgen. Erst überprüfte Lösungen werden freigegeben.

GC 4.8: *Inspiration aus der Gehirnforschung und Bionik: Aktivität, Motivation und Emotionen.* Damit Systeme sich selbst konfigurieren, optimieren, heilen oder schützen können, müssen zu-

mindest einige Komponenten aktiv werden, d.h. sie verfolgen eigene Ziele. Dieses Verhalten lässt sich mit Eigenschaften wie Motivation, Trieben oder Selbstbewusstsein beschreiben.

Im Gehirn scheinen Emotionen eine zentrale Rolle zu spielen. Sie beeinflussen oder modulieren



das rationale, bewusste Verhalten. Es muss untersucht werden, ob Emotionen auch in technischen Systemen, etwa in Form künstlicher hormoneller Überflutung – verursacht durch eine Art limbisches System –, bestimmte Operationsmodi auslösen können. Auch für die Mensch-Maschinen-Interaktion können Emotionen genutzt werden. Denkbar (und bei Robotern bereits untersucht) ist der Ausdruck interner Systemzustände in Form von Emotionssymbolen. Umgekehrt kann sich das System auch dem Emotionszustand des Benutzers anpassen.

Es gibt Grundprinzipien im Gehirn, die möglicherweise auch für technische Systeme interessant sind. Beispielsweise arbeitet das Gehirn mit Antagonismen (Sympathicus, Parasympathicus), wobei das Gesamtsystem dann optimal funktioniert, wenn beide im Gleichgewicht sind. Kann man dieses Prinzip technisch nachbauen und nutzen?

Der Vorgang des Erkennens im visuellen System ist hoch nicht-linear. Er beinhaltet ein vielfaches Hin- und Herschicken und Modifizieren von Informationen, so lange, bis eine minimale Übereinstimmung zwischen Sinneseindruck und gespeicherter Erinnerung erreicht ist. Können auch technische Systeme nach einem solchen Ping-Pong-Prinzip arbeiten?

Ähnlich der Bionik kann die Natur als Inspiration für weitere Algorithmen und Verfahren der Informatik dienen. Beispiele dafür sind ein künstliches Immunsystem zu Abwehr von (Computer-) Viren und die Verwendung von Computer-Hormonen zum Informationsaustausch.

GC 4.9: *Komplexitätsreduktion*. Ein alternativer Ansatz verfolgt die *Komplexitätsreduktion* als Entwurfskriterium. Man geht beim Entwurf der Basiselemente nicht an die Grenzen des Machbaren, sondern reduziert das System auf das Nötigste zur Erfüllung der vorgesehenen Aufgaben, um es einfach und wartbar zu halten. Das Teile-und-Herrsche-Prinzip wird rigide eingehalten und die Zahl von Wechselwirkungen in Hinblick auf das Zusammenfügen / Vernetzen solcher Systeme klein und überschaubar gehalten. Man bleibt dabei, was den Umfang der Funktionalität der Teilsysteme angeht, absichtlich unter den technischen Möglichkeiten, um aus einfachen Teilsystemen beherrschbare komplexe Systeme zusammensetzen zu können. Für solche Verfahren sollten sich Maße zur Quantifizierung der Systemkomplexität entwickeln lassen. Der derzeitige Trend zur Integration vieler Prozessoren auf einem Chip und die Vernetzung vieler Rechensysteme erfordern diese Methode der Komplexitätsbeherrschung.

GC 4.10: *Organisationswissenschaften*. Im Kern untersucht das Organic Computing die Organisation komplexer Systeme. Vorbilder sind häufig natürliche Systeme (so etwa das System „Ameisenhaufen“). Aber auch Firmen, Wirtschaftssysteme und menschliche (politische) Gesellschaften funktionieren nach ähnlichen Prinzipien. Können allen derartigen Systemen gemeinsame Grundprinzipien identifiziert und ggf. genutzt werden? Können die Observer-/Controller-Prinzipien auch auf Organisationen, Firmen oder Gesellschaften angewandt werden? Eine quantitative und simulative Analyse solcher Systeme würde die Diskussion folgender Fragen erlauben: Wie wird Stabilität von Kollektiven erreicht? Welche Ereignisse können Systeme aus einem Gleichgewichtszustand in einen anderen bringen? Was ist die optimale Mischung von egoisti-

schen und altruistischen Verhaltensweisen der Systemelemente? Kann durch die Nachbildung balancierter egoistischer bzw. altruistischer Verhaltensweisen die Organisationsform technischer Systeme verbessert werden?

GC 4.11: *Anwendungsgebiete*: Insbesondere muss die Überführung relevanter Ergebnisse aus der OC-Grundlagenforschung in die industrielle Praxis gefördert werden. Lücken bestehen u.a. auf den Gebieten der Architekturen, der Sicherheit, der Entwurfsverfahren und -werkzeuge und der Anwendungen für selbstorganisierende adaptive Systeme. Gesucht werden anwendungsspezifische Lösungen möglichst mit Demonstratoren aus den Bereichen der Automobiltechnik, Verkehrstechnik, Fabrikautomatisierung, Mechatronik, Gebäudetechnik, Sicherheitstechnik und der adaptiven Energieversorgung.

Grand Challenge 5: Energieeffizienz, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit

U. Brinkschulte, Universität Karlsruhe (TH); W. Karl, Universität Karlsruhe (TH); P. Marwedel, Technische Universität Dortmund; Th. Ungerer, Universität Augsburg

Die aktuelle Diskussion um den Verbrauch an Rohstoff-Ressourcen und den durch Treibstoffgas aus Verbrennungsprozessen zur Energieerzeugung folgenden Klimawandel muss auch von der Technischen Informatik aufgegriffen werden. Der durch moderne Kommunikations- und Rechentechnik verursachte Energieverbrauch steigt von Jahr zu Jahr. So liegt der weltweite Energieverbrauch aller Computer nach Schätzungen des World Watch Institute bei etwa 240 Mrd. Kilowattstunden pro Jahr; dies entspricht etwa dem jährlichen Energieverbrauch Brasiliens.⁸ Die geschätzten 450 000 Server von Google verbrauchen soviel Strom wie eine ganze Stadt.⁹ Der Forderung nach einer größeren Nachhaltigkeit muss sich die Technische Informatik durch das Forschungsziel eines möglichst geringen Energieverbrauchs durch Informations- und Kommunikationstechnologie stellen. Dazu gehört die Verringerung des Energieverbrauchs von Heim- und Arbeitsplatzcomputern (PCs) von Servern und Serverfarmen sowie von informationstechnischen Geräten (Handys, Handhelds, Laptops) und Steuereinheiten in technischen Geräten. Die Reduktion des Energiebedarfs von Mikroprozessoren, Mikrocontrollern und Speicherkomponenten stellt daher eine große Herausforderung für die Technische Informatik dar.

Durch den Einsatz in immer kleiner werdenden mobilen Geräten, z.B. im Bereich von Sensornetzen oder dem Ubiquitous Computing, ist die verfügbare Energiemenge durch Batterien oder Akkumulatoren begrenzt. Es gilt, möglichst lange mit der vorhandenen Energie auszukommen. Des Weiteren soll so wenig Energie wie möglich in Wärme umgesetzt werden, um eine Überhitzung zu vermeiden.

Um diesen Themenkreis genauer zu betrachten, müssen wir zunächst die Begriffe Energie (*Energy*) und Leistung (*Power*) unterscheiden. Leistung bezeichnet einen Energiefluss pro Zeit, Energie ist Leistung mal Zeit. Auf elektrische Geräte übertragen bezeichnet Leistung die aufgenommene bzw. verbrauchte Energie pro Zeit. Ein Mikroprozessor mit einer Leistung von 10 Watt verbraucht also jede Sekunde eine Energie von 10 Wattsekunden, nach einer Minute wurden entsprechend 600 Wattsekunden verbraucht. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Leistungsaufnahme oder der Verlustleistung, da die elektrische Leistung in einem Mikroprozessor praktisch vollständig in Wärme umgewandelt wird.

Die Verringerung der Leistungsaufnahme und die Verringerung des Energieverbrauchs sind zwar verwandte, jedoch nicht in jedem Fall identische Ziele. Eine Verringerung der Leistungsaufnahme kann sogar zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs führen. Möchte man die Betriebszeit eines batteriebetriebenen Systems erhöhen oder hat man die von Rechensystemen verursachten volkswirtschaftlichen Kosten und Umweltbelastungen im Blick, so ist natürlich der Energieverbrauch das primäre Optimierungsziel. Kommt es hingegen mehr auf Reduktion der Temperatur an, so wird man versuchen, die Leistungsaufnahme (Verlustleistung) zu reduzieren. Dies ist insbesondere bei Hochleistungsmikroprozessoren von Bedeutung, da dort, wie bereits erwähnt, die Prozessortemperatur mittlerweile die mögliche Verarbeitungsgeschwindigkeit be-

⁸ http://www.at-mix.de/umweltschutz_und_pc.htm

⁹ <http://www.itseccity.de>

grenzt. Um dem Rechnung zu tragen, wird zum Vergleich solcher Prozessoren heute häufig die auf die Leistungsaufnahme normierte Verarbeitungsgeschwindigkeit (*MIPS / Watt, Million Instructions Per Second / Watt*) benutzt.

Welche Techniken zur Verringerung von Energieverbrauch und Leistungsaufnahme sind nun bei Mikroprozessoren und Mikrocontrollern denkbar? Im Wesentlichen lassen sich drei Ansätze unterscheiden: Verringerung der Taktfrequenz, Verringerung der Versorgungsspannung und Optimierung der Architektur.

Die Verringerung der Taktfrequenz ist zunächst ein einfacher und wirkungsvoller Weg, die Leistungsaufnahme zu reduzieren. Bei CMOS-Schaltungen fließt idealer Weise nur beim Wechsel des logischen Pegels ein Strom, da nur zu diesem Zeitpunkt ein leitfähiger Pfad geöffnet wird und die internen Kapazitäten umgeladen werden. Bei realen CMOS-Schaltungen kommt zu dem Stromfluss beim Wechsel des logischen Pegels noch ein weiterer, ständiger Stromfluss hinzu, der im Wesentlichen durch Leckströme innerhalb der Schaltung verursacht wird. Diese Leckströme entstehen, da die Widerstände zwischen den Leiterbahnen der integrierten Schaltung nicht unendlich hoch sind. Die Leckströme wachsen mit zunehmender Integrationsdichte, weil sich hierdurch der Abstand und damit der Widerstand zwischen den Leiterbahnen verringert. Die gesamte Leistungsaufnahme einer realen CMOS-Schaltung teilt sich also in einen dynamischen, von der Taktfrequenz abhängigen Teil und einen statischen, durch Leckströme verursachten Teil auf, welcher von der Taktfrequenz unabhängig ist. Durch Verringerung der Taktfrequenz verringert sich also die Leistungsaufnahme. Da jedoch die für eine Aufgabe benötigte Verarbeitungszeit umgekehrt proportional zur Taktfrequenz ansteigt und die Leistungsaufnahme durch den konstanten Leckstromanteil weniger als proportional zur Taktfrequenz abnimmt, steigt der Energieverbrauch mit abnehmender Taktfrequenz an. Energie- und Leistungseinsparungen ergeben sich erst, wenn zusätzlich zur Taktfrequenz auch die Versorgungsspannung reduziert wird. Dies ist eine sinnvolle Maßnahme, da die maximale Taktfrequenz einer CMOS-Schaltung proportional zur Versorgungsspannung ist. Es ergibt sich ein kubischer Zusammenhang zwischen Leistungsaufnahme und Taktfrequenz bzw. Versorgungsspannung für den Energieverbrauch. Zur Durchführung einer Aufgabe ist dieser Zusammenhang quadratisch.¹⁰

Die Technische Informatik ist nicht nur ein Verbraucher von elektrischer Energie. Sie kann vielmehr große Beiträge zur Reduktion des Verbrauchs an elektrischer Energie (bzw. von deren Wandlung in Wärme) liefern. Hierfür seien hier einige Beispiele angeführt:

- Mittels Technischer Informatik gelingt die Konstruktion schadstoffärmerer und energieeffizienterer Systeme. Beispiele dafür sind moderne Verbrennungsmotoren, die nur durch den Einsatz von Konstruktions- und Simulationssoftware beim Entwurf sowie durch Einsatz leistungsfähiger Steuereinheiten zur Regelung der Motoreinspritzung die heute üblichen Standards erreichen.
- Die Technische Informatik trägt während des Betriebes von Systemen zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes bei. Beispiele dafür sind moderne Klimaregelungen oder die Steuerung von Produktionsprozessen, die durch Modellierung und Analyse des Prozessverlaufs energieeffizienter gestaltet werden können. Die Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie soll künftig mit Hilfe der Methoden aus der Technischen Informatik dezentraler organisiert sein, um so Verteilungsverluste zu reduzieren und Energiereserven zu nutzen

¹⁰ U. Brinkschulte, Th. Ungerer: Mikrocontroller und Mikroprozessoren, 2. Auflage, Springer Verlag, 2007

(siehe hierzu die Ausschreibung „E-Energy“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie). Große, noch weitgehend ungenutzte Potenziale ergeben sich durch eine intelligente Lenkung der Verkehrsströme (z.B. gleichmäßigere Auslastung von Autobahnen und Stauumfahrungen durch künftige *Car-To-Car*-Datenübermittlung).

- Die Verteilung von Dokumenten erfolgt heute bereits vielfach elektronisch. Weitere Schritte wären möglich, wenn gesicherte Authentifizierungstechniken weit verbreitet wären. Die Vision vom „papierlosen Büro“ aus den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts hat sich in der Praxis kaum umsetzen lassen – hier bestehen jedoch große Potenziale zur Reduzierung des Energieverbrauchs. Geeignete IT-Systeme und organisatorische Maßnahmen können hier viel bewirken.
- Durch die Nutzung der Telekommunikationstechniken (speziell der breitbandigen Internetverbindungen) gibt es bereits heute vielfach die Möglichkeit zur Mitarbeit an bestimmten Geschäftsprozessen von entfernten Standorten aus. Die elektronische, internetbasierte Kollaboration vermindert den Pendler- und Reiseverkehr und hat dadurch das Potenzial zur deutlichen Reduktion der verkehrsbedingte CO₂-Produktion. Vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft wird die Nutzung dieses Potenzials immer wichtiger.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

GC 5.1: *Optimierungen der Architekturen*. Eine Herausforderung besteht darin, die Architektur eines Mikroprozessors oder Mikrocontrollers derart zu optimieren, dass die Leistungsaufnahme ohne Einbußen in der Verarbeitungsgeschwindigkeit und damit der Energiebedarf für die Bearbeitung einer Aufgabe gesenkt werden kann. Hier sind eine Reihe von Maßnahmen denkbar: Eine Reduktion der energieintensiven externen Busaktivitäten kann den Energieverbrauch von Prozessoren beträchtlich senken. Eine Erhöhung der Code-Dichte verringert den benötigten Speicher und die Anzahl der Buszyklen zur Ausführung eines Programms. Ein dynamisches Power-Management befähigt den Prozessor, selbstständig nicht benötigte Komponenten zu erkennen und abzuschalten.

GC 5.2: *Modellbildung*. Um die komplexen Zusammenhänge zwischen Architektur, Mikroarchitektur, Leistungsaufnahme und Energiebedarf möglichst frühzeitig im Entwicklungsprozess von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern zu analysieren, sind genaue Modelle des Energieverbrauchs auf hoher Abstraktionsebene erforderlich. Je besser diese Modelle, desto genauer und früher kann durch Simulationen die Architektur und Mikroarchitektur von Rechensystemen bewertet und verbessert werden.

GC 5.3: *Optimierung der Systemarchitektur*. Nicht nur auf Ebene der Prozessoren kann der Energiebedarf verringert werden, auch eine Optimierung der gesamten Systemarchitektur aus Hardware, Betriebssystem, Kommunikationsschnittstelle, Middleware und Anwendung ist nötig. Alle Komponenten des Rechnersystems müssen zusammenspielen, um unnötigen Energieverbrauch zu erkennen und vermeiden zu können.

GC 5.4: *Energieoptimierung für PCs und Serversysteme*. Am meisten Energie wird zweifellos durch die weltweit verbreiteten und betriebenen PCs und Serversysteme verbraucht. Hier besteht dringend Forschungsbedarf, aber auch Bedarf an Aufklärung der Nutzer, um unnötigen Energieverbrauch zu verringern, und PCs und Server energieoptimiert zu entwerfen. Beispielhafte Ansätze sind Laptop-Designs für PCs einzusetzen, die Parallelität durch Multi-Core-Prozessoren ei-

ner weiteren Erhöhung der Taktraten vorzuziehen, und große Multiprozessoren und Server-Sites aus stromsparenden, eingebettete Prozessoren aufzubauen, statt hoch getaktete Hochleistungsprozessoren zu verwenden.

GC 5.5: *Energieoptimierung aus Sicht der eingebetteten Systeme.* Künftige Forschungsansätze müssen sich auch mit der Frage auseinandersetzen, wie Taktfrequenz und Versorgungsspannung im Hinblick auf Anwendungsszenarien, z.B. Sensornetze, eingebettete Echtzeitsysteme oder ubiquitäre Systeme, optimiert werden können. Wichtig ist hier insbesondere ein Kontextbewusstsein, aus dem heraus unnötige Berechnungen oder Datenübertragungen vermieden werden. Geeignete Trade-Offs, wie z.B. wie viel Energie kann eingesetzt oder wie viele Zeitschranken können verpasst werden, müssen gefunden werden.

GC 5.6: *Energie Scavenging.* Letztlich sollten Sensorsysteme so gestaltet sein, dass sie ohne Batterieleistung auskommen, d.h. ihre Energie aus der Umwelt beziehen. Dies kann die Nutzung von Sonnenenergie durch Photozellen, die Nutzung von Bewegungsenergie oder Wärme (z.B. der Körperwärme) geschehen. Die Hardware, Übertragungsleistung und -menge und Software solcher Sensorsysteme müssen genau auf die aufnehmbare Energie abgestimmt sein.

GC 5.7: Konstruktion energieeffizienterer technischer Systeme durch den Einsatz von Mitteln der Technischen Informatik.

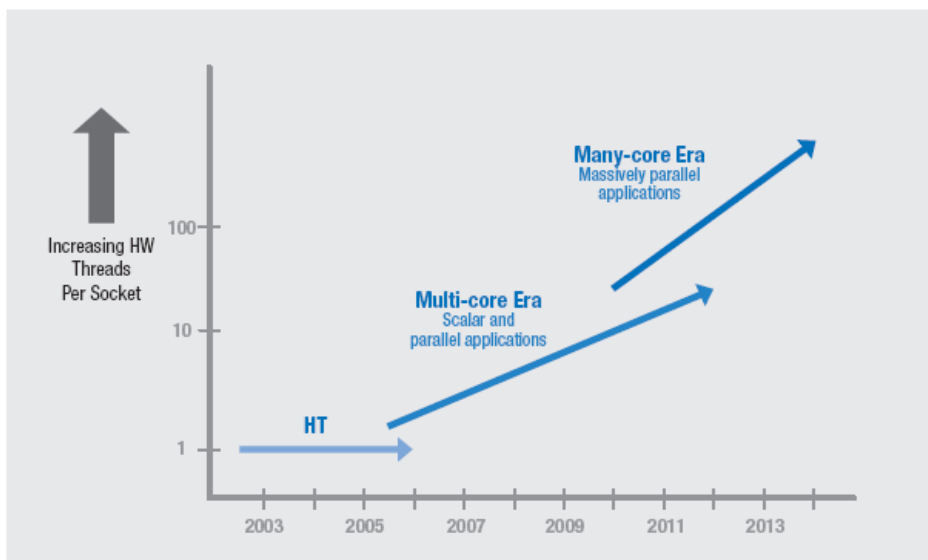
GC 5.8: Reduktion des Energieverbrauchs durch die Nutzung von Systemen der Technischen Informatik im Betrieb.

Die dargelegten Zusammenhänge beschreiben einige der Herausforderungen, welche die Technische Informatik im Lauf der nächsten Jahre im Hinblick auf Energie- und Leistungsbedarf bewältigen muss. Gesamtziel muss die Verringerung des Rohstoffverbrauchs und des CO₂-Ausstoßes sein, die durch Informationstechnologie verursacht werden. Beides wird durch konsequente Energieeinsparung durch den Entwurf und im Betrieb von informationstechnischen Systemen wie auch durch eine Energieeinsparung beim Betrieb von anderen technischen Systemen erreicht.

Grand Challenge 6: HW-, SW-Architekturen und Werkzeuge für Multi-Core- und Many-Core-Prozessoren

Ch. Hochberger, Universität Dresden; W. Karl, Universität Karlsruhe (TH); K. Waldschmidt, Universität Frankfurt; D. Fey, Friedrich-Schiller-Universität Jena; Th. Ungerer, Universität Augsburg; unter Verwendung eines Textes von: A. Herkersdorf, TU München, O. Bringmann, FZI Karlsruhe, W. Rosenstiel, Uni Tübingen

Die Fortschritte in der VLSI-Technologie werden nach Vorhersagen der SIA (Semiconductor Industry Association)¹¹ auch in den nächsten 10 Jahren eine Verdopplung der Anzahl der Transistoren pro Chip alle 18 Monate erreichen. Damit würden im Jahre 2020 Mikroprozessor-Chips mit über einer Billion Transistoren Realität werden. Mit der Verkleinerung der Strukturbreiten sind jedoch verstärkt die Probleme der Leistungsaufnahme und Kühlung zu beachten, weshalb der energieeffiziente Entwurf eine zentrale Rolle spielen wird (siehe GC 5). Eine weitere exponentielle Erhöhung der Taktrate zur Steigerung der Leistungsfähigkeit in dem Maße, wie sie in der letzten Dekade zu beobachten war, ist deswegen nicht mehr sinnvoll. Die Techniken zur Ausnutzung der Parallelität auf Maschinenbefehlsebene (tiefe Pipelines, Superskalartechnik und VLIW) sind weitgehend ausgereizt. In Zukunft wird die Leistungssteigerung vornehmlich durch die Integration mehrerer oder vieler Prozessorkerne (Cores) auf einem Chip erreicht werden. Derzeit (2008) sind bei den Mikroprozessor-Chips höchster Leistungsfähigkeit zwei bis acht Cores mit je einem MB Second-Level-Cache und bis zu 16 MB Third-Level-Cache Stand der Technik. Prognosen sehen in Anwendung des Mooreschen Gesetzes auf Multi-Cores (Verdoppelung alle 18 Monate) für Ende 2008 Mikroprozessor-Chips mit mehr als acht, 2011 mehr als 32, 2014 mehr als 128 und im Jahr 2017 mit über 512 Cores vor. Um diese große Transistorzahl sinnvoll zu nutzen, werden heutige Multi-Core-Prozessoren zu „Many-Core“-Prozessoren mit einigen hundert Cores und diversen Hardware-Beschleunigern weiterentwickelt werden. Das nachfolgende Bild zeigt die Intel-Roadmap.



¹¹ <http://www.sematech.org/>

Multi- und Many-Core-Prozessoren werden sich durch eine um mehrere hundertfach gesteigerte Verarbeitungsleistung gegenüber Single-Core-Prozessoren auszeichnen. Anwender- Tool- und Hardware-Firmen, die sich diesen Aufgaben stellen, werden einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil erringen.^{12 13 14}

Grundsätzlich stellt sich die Frage, nach der Anzahl und der Art der Prozessorkerne, die auf einem Chip integriert werden können. Im Bereich der Server und PCs geht der Trend zu homogenen Multi-Core-Prozessoren, wobei in Abhängigkeit der Anwendungsprofile wenige komplexe oder viele einfache Prozessorkerne sinnvoll sein können. Eine Mischung aus komplexen und einfachen Prozessorkernen auf einem Chip ermöglicht dagegen eine hohe Leistungsfähigkeit für ein breites Anwendungsspektrum. Insbesondere im Bereich der eingebetteten Systeme zeichnet sich ein Trend zu heterogenen Multi-Core-Prozessoren ab. Ein bekanntes Beispiel dieser Chip-Generation ist der CELL-Prozessor von IBM mit einem Power-Prozessor und acht abhängigen Prozessoren. Dieser ursprünglich nur für die Sony Playstation-3 entworfene Chip erfreut sich in verschiedensten Anwendungsgebieten großer Beliebtheit.

Eine weitere Möglichkeit bietet die Integration von Beschleuniger-Bausteinen neben den „General-Purpose“-Cores. Solche speziellen Koprozessoren können für die Ausführung rechenintensiver Teile einer Anwendung genutzt werden und bieten die Möglichkeit einer weiteren Beschleunigung über die Möglichkeiten eines homogenen Multi-Core-Prozessors hinaus. Neben Koprozessoren mit fest vorgegebener Funktionalität, wie beispielsweise Koprozessoren für die digitale Signalverarbeitung, bieten sich Konzepte mit rekonfigurierbarer Logik an. Hiermit lassen sich für eine Anwendung ihre rechenintensiven Teile gezielt auf die dynamisch konfigurierbare Hardware abbilden. Adaptive und rekonfigurierbare MPSoCs („Multi-Processor Systems-on-Chip“) werden für eingebettete Systeme aber auch für Allzweckrechner an Bedeutung gewinnen.

Die Ausführung eines geeignet parallelisierten Programms auf einem Multi-Core-Prozessor führt im Allgemeinen zu einer höheren Verarbeitungsleistung als wenn das nicht parallelisierte Programm auf einen „normalen“ Prozessor mit einem Core ausgeführt würde. Hierdurch können Multi-Core-Prozessoren üblicherweise mit weit niedrigerer Taktrate als Single-Core-Prozessoren betrieben werden, was bei gleicher Verarbeitungsleistung zu einem erheblich geringeren Energieverbrauch gegenüber einem Single-Core-Prozessor führt (siehe GC 5). Multi-Core-Prozessoren bieten in vielen Bereichen der eingebetteten Systeme mit besonderen Robustheitsanforderungen wie beispielsweise im Auto oder Flugzeug, bei denen eine Erhöhung der Taktrate zu elektrischen Problemen führt, die Möglichkeit die Verarbeitungsleistung von Steuergeräten trotzdem zu erhöhen.

Die Möglichkeit, viele Prozessoren auf einem Chip fertigen zu können, erfordert geeignete Konzepte, um diese Prozessoren sinnvoll zu nutzen. Zunächst werden Betriebssystemkonzepte aus dem Bereich der speichergekoppelten Multiprozessoren zum Einsatz kommen. Dabei ordnet der Scheduler des Betriebssystems nicht nur einen, sondern mehrere unabhängige Prozesse den zur Verfügung stehenden Prozessoren zu. Für parallel ausführbare Programme gilt bei heutigen Mul-

¹² Roadmap des EU-Network of Excellence HiPEAC „High Performance Embedded Architectures and Compilers“, Download: <http://www.hipeac.net/roadmap>

¹³ Intel White Paper: „Plattform 2015: Intel Processor and Platform Evolution for the Next Decade“, <http://www.intel.com/technology/magazine/computing/platform-2015-0305.htm>

¹⁴ Intel White Paper: „Plattform 2015 Software: Enabling Innovation in Parallelism for the Next Decade“, <http://www.intel.com/technology/magazine/computing/parallelism-0405.pdf>

tiprozessoren, dass sehr viele Verarbeitungsbefehle wenigen Synchronisations- oder Kommunikationsanforderungen gegenüberstehen müssen, um eine effiziente parallele Ausführung zu erreichen. Gegenüber bisherigen Multiprozessoren wird jedoch die engere Core-Kopplung bei zukünftigen Multi-Core-Prozessoren dieses Verhältnis verschieben, so dass auch wesentlich feinkörnigere Parallelität nutzbar ist.

Grob- und feingranulares Parallelrechnen wird zum zukünftigen Standardprogrammiermodell werden. Die Anwenderprogrammierung wird die Möglichkeit berücksichtigen müssen, die Chip-interne Parallelität für eine Erhöhung der Ausführungsgeschwindigkeit zu nutzen. Es müssen geeignete Programmiersprachen und Programmierwerkzeuge entwickelt werden, die die Nutzung der feinkörnigen Parallelität durch die Multi-Core-Prozessoren ermöglicht. Weiterhin werden Software Engineering-Techniken für die Entwicklung paralleler Programme benötigt, insbesondere auch für die Entwicklung sicherer paralleler Programme.

Ins Hintertreffen geraten wird dagegen die nur sequentiell ablauffähige Software. Da diese nur auf einem von vielen Cores eines Multi-Core-Prozessors ablauffähig ist, kann sie in ihrer Ausführungsgeschwindigkeit nicht wesentlich weiter beschleunigt werden. Der Grossteil der existierenden Software ist nur sequentiell, also nur auf einem Core, ablauffähig. Die Ausführungsgeschwindigkeit sequentieller Software konnte in der Vergangenheit durch die stetige Erhöhung der Taktfrequenz und durch größere Cache-Speicher gesteigert werden. Das wird in Zukunft nur noch unwesentlich der Fall sein. Es ist von großer Bedeutung, Wege aufzuzeigen, wie sequentielle Software für Multi-Cores parallelisiert werden kann. Etablierte Single-Core-Programmiermodelle müssen im Hinblick auf ihre Verwendbarkeit auch für Multi-Core-Architekturen mit Hilfe entsprechender Compilerwerkzeuge untersucht und in Richtung auf neue Multi-Core-Programmiermodelle weiter entwickelt werden.

Eine Virtualisierung auf Systemebene kann zum Verdecken der Parallelisierung, einer Heterogenität der Hardware und der Fehlertoleranzverfahren dienen. Geeignete Techniken müssen noch entwickelt werden. Eine Weiterführung der Virtualisierung wird im transparenten Zusammenschließen von mehreren Multi-Core-Prozessoren zu größeren Parallelrechnern und letztlich durch GRID-Techniken zu weltweiten Rechensystemen geschehen (siehe GC 7).

In der zukünftigen Anwendungsentwicklung für Multi-Core-Prozessoren wird ein wesentlicher Markt für Informatiker gesehen. Dazu gehört die Fortentwicklung heutiger Anwendungen mit dem Ziel diese unter Nutzung der durch Parallelisierung erreichbaren höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit in Zukunft komfortabler zu machen.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Initiativen und Förderungen, die das meist an Universitäten beheimatete Know-how der Parallelisierung für Firmen nutzbar machen, wären dringend notwendig. Es ist zu erwarten, dass schon mittelfristig Firmen, die ihre Software nicht auf Multi-Cores umstellen, gegenüber Konkurrenten mit einer um ein Vielfaches leistungsfähigeren Software ins Hintertreffen geraten werden. Aus diesen Zukunftsprognosen heraus ergeben sich wichtige Forschungsfragestellungen in den drei Bereichen der Multi-Core-Prozessor-Entwicklung, der Programmierwerkzeuge und der Anwendungen.

GC 6.1: *Hardwarestrukturen für Multi- und Many-Cores.* Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf geeignete Hardware-Konfiguration der Cores auf einem Multi- oder Many-Core-Chip. Un-

klar ist bis heute, ob als Cores eher aufwändige Superskalarprozessoren oder ähnlich wie bei MPSoCs einfache RISC- und Signalprozessoren in Verbindung mit Hardware-Beschleunigern eingesetzt werden sollen.

Eine Kopplung der Cores über eine Cache-Speicherhierarchie erscheint für Dual- und Quadcores sinnvoll, jedoch müssen für Prozessoren mit einigen dutzend oder hundert Cores verbindungsnetz-basierte Lösungen gefunden werden. Als neue Verbindungsstruktur für Multi-Core-Prozessoren werden Gitterstrukturen auf dem Chip als Network-on-Chip- (NoC) oder GRID-on-Chip-Strukturen neben die heutigen Cache-gekoppelten Multi-Core-Architekturen treten. Cache-Speicher werden so rekonfigurierbar werden, dass sie je nach Bedarf verschiedenen Cores zugeordnet werden können. Als neues Synchronisationsverfahren kann das Transactional-Memory-Modell heutige Cache-Kohärenzverfahren ablösen. Dabei wird ähnlich wie bei Datenbanktransaktionen ein Datenzugriff als Transaktion implementiert, die entweder vollständig durchgeführt wird oder im Fehlerfall den ursprünglichen Zustand nicht ändert. Dafür wird Hardware-Unterstützung für die Konflikterkennung, für ein Checkpointing und ein Rollback-Verfahren für abgebrochene Transaktionen benötigt.

Ungelöst ist das Problem geeigneter Hochgeschwindigkeits-Ein- und Ausgabe-Kanäle, um viele Cores mit Daten versorgen zu können. Die Bereitstellung einer genügenden Ein-/Ausgabe-Bandbreite für durchsatzorientierte Programme auf einem Multi-Core-Prozessor ist ein ungelöstes Problem.

GC 6.2: *Energiemanagement auf dem Prozessor-Chip*. Das Power Management auf dem Prozessor-Chip ist bereits heute integraler Bestandteil bei der Entwicklung von Mikroprozessoren und wird auch in Zukunft seine Bedeutung behalten. Um die Energieaufnahme zu optimieren, müssen hardware- und software-basierte Energiemanagementtechniken entwickelt werden (siehe auch GC 5).

GC 6.3: *MPSoC-Entwurfsmethoden*. Bei heutigen SoC-Architekturen, egal ob Single-Core-Architekturen oder applikationsspezifische Multi-Core-Architekturen mit dedizierten für spezifische Aufgaben vorgesehene Prozessor-Cores (z.B. DSP-Cores), werden Entwurfsentscheidungen, wie z.B. Bindung von Prozessorressourcen, überwiegend statisch gelöst. Bei steigender Anzahl von Prozessorkernen und physikalischen Kommunikationskanälen ist es notwendig, Entwurfsentscheidungen unter Berücksichtigung applikationsspezifischer Randbedingungen und momentaner Leistungsprofile zunehmend dynamisch durchzuführen. Darunter ist z.B. eine dynamische Zuordnung von Prozessorelementen, Speicherelementen und Verbindungskanälen zu verstehen. Dieser Ansatz wird durch den aktuell zu verzeichnenden Trend zu NoC-Architekturen mit paketvermittelnden Kommunikationsprotokollen unterstützt.

GC 6.4: *Neue Modellierungs- und Analyseansätze für MPSoCs*. Die Auswirkungen einer Verschiebung von Entwurfsentscheidungen in die Betriebsphase müssen insbesondere bei sicherheitskritischen Systemen zur Entwurfszeit evaluiert aber auch exploriert werden können. Hierzu sind neue Modellierungs- und Analyseansätze notwendig, die das dynamische Verhalten des Gesamtsystems zur Entwurfszeit beschreiben. Darüber hinaus erfordern MPSoC-Architekturen viele neuartige statische Entwurfsschritte, die in bestehenden SoC-Ansätzen nicht erforderlich waren. Das betrifft z.B. die Bestimmung einer optimierten Anzahl von Prozessorelementen, Speicherelementen und Verbindungsressourcen, einer optimierten Verbindungstopologie sowie eines optimierten applikationsspezifischen Routingverfahrens für NoC-Architekturen. Alle Entwurfsschritte sind dabei im Spannungsfeld der Entwurfparameter Performanz, Leistungsverbrauch

und Zuverlässigkeit zu bewerten, wobei zu jedem Betriebszeitpunkt eine Balance zwischen diesen Parametern im Hinblick auf gegebene applikationsspezifische Randbedingungen und Umgebungszustände gefunden werden muss.

GC 6.5: *Systemarchitekturen, Tools und Entwicklungsumgebungen für Multi-Cores.* Alle Arten von Anwenderprogrammen, die eine hohe Verarbeitungsleistung benötigen, müssen parallelisiert werden, um die hohe Leistungsfähigkeit von Multi-Core-Prozessoren nutzen zu können. Dafür werden parallelisierende Compiler, Werkzeuge zur Unterstützung einer manuellen Parallelisierung sowie Debugger-, Verifikations- und Testwerkzeuge für die Entwicklung paralleler Programme benötigt. Solche Werkzeuge zielen darauf Migrationspfade von Single-Core- zu Multi-Core- und Many-Core-Prozessoren für bestehende Anwendungsprogramme zu erzeugen.

GC 6.6: *Betriebssysteme und Virtualisierung.* Benötigt wird weiterhin eine Betriebssystemunterstützung für Multi-Cores. Dazu gehören die statische und dynamische Task-Platzierung auf den Cores, das Task-Scheduling insbesondere für eingebettete Systeme, Techniken des Komplexitätsmanagements, des Lastausgleichs, der Fehlertoleranz und der Sicherheit (Reliability, Safety, and Security). Wünschenswert wären eine weitgehende Virtualisierung, die die Art und Anzahl der vorhandenen Cores und Hardware-Beschleuniger vor den höheren Software-Schichten verbirgt, sowie selbstorganisierende Algorithmen, die flexibel auf Laständerungen, Energieanforderungen und Core-Ausfällen reagieren. Es besteht ferner der Bedarf, eine geeignete Middleware für Multi-Core- und MPSoC-Architekturen zu entwerfen und deren Einflüsse auf das Gesamtsystem zu explorieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese Middleware unter Umständen mehrere Betriebssysteme enthalten kann. Die Middleware-Entwicklung geht einher mit der Entwicklung von Techniken zur Komplexitätsbeherrschung verteilter Anwendungen auf Multi-Cores.

GC 6.7: *Techniken zur Erhöhung der Verlässlichkeit und Fehlertoleranz.* Fehlertoleranz- und Dependability-Techniken werden ebenfalls an Bedeutung gewinnen, da mit der Verringerung der Transistorgrößen auch die spontane Fehlerhäufigkeit wächst.

GC 6.8: *Neue parallele Programmiersprachen.* Weiterhin müssen neue Sprachen und Parallelisierungserweiterungen bestehender Sprachen entwickelt werden. Techniken aus den Bereichen der Parallelrechner und der parallelen Programmierung können als Ausgangspunkte betrachtet werden. Jedoch stellen sich durch die gegenüber heutigen Multiprozessoren schnellere Task-Synchronisation und -kommunikation viele Fragen für Multi-Cores neu.

GC 6.9: *Neue Multi-Core-Anwendungen.* Es werden jedoch auch neue, heute wegen der zu hohen Anforderungen an die Verarbeitungsleistung noch nicht realisierbare Anwendungen hinzukommen. Diese sind schwer vorhersehbar, jedoch sollten mögliche neue Anwendungen systematisch erforscht werden. Mögliche Anwendungen werden sich durch hohe Verarbeitungsanforderungen auszeichnen, die durch geeignete Parallelisierung der Programme erfüllbar sein müssen. Solche Anwendungen könnten in den Bereichen der Sprachverarbeitung wie z.B. der Stimm- und Spracherkennung, in der Bildverarbeitung, der Objekterkennung, im Data Mining und Lernverfahren und in der Hardware-Synthese liegen. Solche Anwendungen sind bisher aufgrund der benötigten hohen Rechenleistung nur auf Supercomputern ausführbar oder waren durch ihre feinkörnige Parallelität und hohen kommunikations- und Synchronisationsaufwand nur auf Spezialhardware effizient ausführbar.

Grand Challenge 7: Hardware-, Software-Architekturen und Werkzeuge für massiv parallele Systeme und GRID-Computer

D. Fey, Friedrich-Schiller-Universität Jena; Ch. Hochberger, Universität Dresden; W. Karl, Universität Karlsruhe (TH); J. Krebs, Altair Engineering GmbH; K. Waldschmidt, Universität Frankfurt

Einen Überblick über den Bedarf an Hochleistungsrechentechne zeigt die nachfolgende Tabelle über die Rechenanforderungen für Grand Challenge Anwendungen (GCAs) in Deutschland.¹⁵

Forschungsbereich	2005-2007	2007-2009	2010
Klima- und Erdsystemforschung	20	50-100	>500
Geophysik	1	10-100	>1000
Nanoelektronik und -technologie	1	10-50	>200
Festkörperphysik	1	50-100	>1000
Strömungsmechanik	2.5-10	25-100	>1000
Astrophysik	10	50-100	>500
Elementarteilchen- und Hadronphysik	30	100	>1000
Materialwissenschaft	10	50-100	>500
Theoretische Chemie	3	25-125	>300
Weiche Materie	3	30	>200
Biophysik und Bioinformatik	3-15	15-80	>1000
Plasmaphysik	10	50	>500

GCAs zeichnen sich dadurch aus, dass ihnen i.a. Codes zugrunde liegen, die bereits für die Nutzung auf hochparallelen Systemen (>~ 1000 Prozessoren) entwickelt bzw. optimiert wurden. Der dominierende Parallelisierungsstandard dabei ist das „Message Passing Interface“ (MPI). In der heute vorliegenden Form garantiert MPI zwar keine automatische Portierbarkeit der Codes (die Schnittstelle ist bei unterschiedlichen Herstellerplattformen unterschiedlich implementiert), jedoch ist das Problem der Parallelisierung schon einmal grundsätzlich gelöst worden – und zwar

¹⁵ A.Bode, W. Hillebrandt und Th. Lippert: Studie „Petaflops-Computing mit Standort Deutschland im europäischen Forschungsraum“ für das BMBF (2005) (Die Zahlenangaben sind in Teraflops; Einzelne Länder können hier unterschiedlichen Bedarf haben, beispielsweise spielen in USA die Anforderungen des ASCI Programms für Aufgaben der nationalen Sicherheit eine erhebliche Rolle)

auch in der allgemeinen Form für Systeme mit verteiltem Speicher. Die MPI Schnittstelle ist für Systeme mit gemeinsamem bzw. verteiltem Hauptspeicher gleichermaßen geeignet – d.h. der Programmierer braucht sich über die Architektur des Zielsystems keine Gedanken zu machen. Die optimale Implementierung der MPI Schnittstelle auf einer gegebenen Rechnerarchitektur (z.B. SMP, NUMA, MPP etc.) ist dann die Sache des Herstellers.

Damit ist diese Klasse von Anwendungen prinzipiell auch auf Multi-Core-Systemen lauffähig. Eine andere wichtige Frage ist die der Skalierbarkeit. Die meisten Supercomputing Experten sind sich einig darüber, dass sich viele Anwendungen mit einem entsprechenden Aufwand auch auf mehr als 10000 Prozessoren skalieren lassen. Es gibt keine physikalischen Limitierungen der Skalierbarkeit. GCAs verwenden meistens eine Zerlegung ihres Rechengebietes (beispielsweise der Erdatmosphäre in der Klimaforschung) in einzelne Domänen, wobei die physikalischen Parameter auf diesen Domänen (z.B. die Geschwindigkeitsverteilung des Strömungsfeldes) dann auf einzelnen Prozessoren berechnet werden. Nach einer Iteration tauschen die Prozessoren dann mit ihren Nachbarn (bzw. bei langreichweitigen Wechselwirkungen auch mit entfernten Domänen) Daten aus. Durch eine geeignete Wahl der Domänengröße bzw. der numerischen Gitterauflösung kann die Lastverteilung i.a. so gewählt werden, dass der Kommunikationsaufwand klein ist gegenüber der reinen Rechenzeit und das Programm damit bei einer höheren Anzahl von Prozessoren auch tatsächlich einen Speedup aufweist. Leistungsmessungen an dem massiv-parallelen Rechner Blue Gene/L haben dies in jüngerer Vergangenheit auch sehr eindrücklich demonstriert.

Grand-Challenge-Anwendungen bieten sich auch für die Systeme mit heterogenen Multi-Chip-Core an. Dahinter steckt die Wahrnehmung, dass jede Applikation ihre „Idealarchitektur“ hat, auf der sie am effizientesten läuft. Die Rechenzeit ist bei High-Performance-Computing-Anwendungen typischerweise nicht gleichmäßig über das Programm verteilt, sondern weist sog. „Hot Spots“ in bestimmten Unterprogrammen auf. Daher kann oft durch geringfügige Änderungen am Code ein großer Beschleunigungseffekt erzielt werden. Das hat der anhaltende Erfolg der Vektorarchitekturen gezeigt: Vektorkoprozessoren sind in der Lage, datenparallele Programmkonstrukte effizient abzuarbeiten und solche Konstrukte sind ein maßgeblicher Teil von HPC Programmen, insbesondere die entsprechenden Löser, die Operationen der linearen Algebra verwenden.

Auch Grid-Rechner-Systeme bieten sich für die Bearbeitung von GCA an. In den letzten 10 Jahren fand das Rechnen in Grid-Strukturen, d.h. das verteilte Rechnen oder auch der Zugriff auf wissenschaftliche Geräte über Internet- und speziell im Bereich von Firmen über Intranet-Verbindungen eine große Verbreitung. Kennzeichnend für Grid-Systeme ist das Überwinden administrativer Einheiten, d.h. einer rein lokalen Administration, beim Zusammenschluss der Ressourcen und beim transparenten Zugriff auf diese. In vielen Ländern wurden ehrgeizige Programme zum Aufbau von Grid-Umgebungen für Applikationen gestartet, die sehr rechenintensiv (Computing Grids) oder wie z.B. im Bereich der Teilchenphysik, sehr daten-intensiv sind (Data Grids). So wurden z.B. in Deutschland vor einigen Jahren durch die D-Grid-Initiative die Voraussetzungen für einen vom BMBF geförderten Aufbau einer Grid-Infrastruktur in Deutschland geschaffen.

Den angesprochenen Zugriff sowie das Auffinden passender Ressourcen im Grid übernehmen derzeit Middleware-Systeme wie Globus und Unicore, die für den Zusammenschluss sog. traditioneller Grids verwendet werden. Darunter versteht man einen häufig heterogenen Verbund von Superrechnern, SMP-Rechnern, und überwiegend dedizierten Cluster-Rechnern, d.h. Cluster-Rech-

nern, in denen die Rechnerknoten keinem Nutzer zugeordnet sind, sondern primär für von außen eingehende rechen- oder daten-intensive Anwendungen zur Verfügung stehen. Daneben bildeten sich sog. Desktop Grids heraus, bei denen z.B. mit Hilfe der Middleware Condor – dem De-facto-Standard in diesem Bereich – ungenutzte Rechner eines Pools temporär zum Aufbau von Grid-Verbänden herangezogen werden. Eine extreme Form dieser Desktop-Grids stellen die vielen @home-Projekte dar, die ihren Ursprung in dem bekannten Projekt SETI@home hatten und bei dem die Aufgabenstellung ein sehr einfaches zentrales Scheduling zuließ.

Unabhängig davon, ob man Desktop-Grids oder traditionelle Grid-Verbände betrachtet, sind all diese Ansätze dadurch geprägt, dass das Scheduling in solchen Grid-Verbänden von zentraler Stelle aus über eine Art Meta-Scheduler gesteuert wird. Dahinter steckt die Annahme, dass ausreichend detailliertes und auch aktuelles Wissen über das Grid-System vom Meta-Scheduler ermittelbar ist und auch der Zugriff auf die Netzwerke einigermaßen fair vonstatten geht. Für überschaubare Grid-Systeme ist damit auch eine sehr gute Auslastung der Ressourcen realisierbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in den nächsten 10 Jahren vor allem im Desktop-Bereich das Angebot an Rechenleistung durch die aktuell einsetzende Verbreitung von Multi-Core-Prozessoren extrem zunehmen wird. Dies ist insbesondere für den auch in der mittelständischen Industrie immer wichtiger werdenden Bereich des wissenschaftlichen Rechnens bedeutend. Der für 2010 erwartete Übergang von Multi-Kern- zu Viel-Kern-Architekturen und die bereits für 2008 angekündigten neuen Cell-Prozessoren mit verbesserter doppelter Fließkomma-Arithmetik nach IEEE-Standard 754 werden der Bereitstellung großer Rechenpotentiale im Desktop-Bereich einen weiteren qualitativen Schub geben.

Dies wird jedoch nicht bedeuten, dass Grid-Systeme ausschließlich aus leistungsstarken Desktop-Systemen aufgebaut sein werden. Vielkern-Prozessorarchitekturen werden genauso in Blade-Rechensystemen zu finden sein. Blade- und Desktop-Rechner werden wiederum über Nachrichtenkopplung zu Cluster-Systemen kleinerer und mittlerer Größe zusammen geschlossen, die selbst wiederum die Basis für Multi-Cluster-Systeme bilden. Diese Hierarchiebildung wird sich bis zu Rechner-Verbänden von Supercomputern weiter fortsetzen, die ihrerseits aus Vektorrechnern, Cluster-Rechnern mit sehr großer Knotenanzahl und massiv-parallelen Multiprozessorsystemen bestehen werden. Es ist daher zu erwarten, dass zukünftige Grid-Architekturen noch heterogener aufgebaut sein werden als dies bereits heute schon der Fall ist.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Solche zukünftigen extrem heterogen aufgebauten Grid- und massiv-parallele Rechnerstrukturen bieten ein äußerst attraktives Rechenpotential für den Entwurf neuer Produkte mit Hilfe von Simulationen. Um dieses Potential für die innovative mittelständische Industrie, z.B. aus dem Bereich der Bio- und Nanotechnologie, der Materialforschung oder auch für staatliche Einrichtungen zur Erforschung des Klimawandels, möglichst transparent zu erschließen, sind seitens der Forschung folgende Herausforderungen zu bewältigen.

GC 7.1: Verteilte nach OC-Prinzipien arbeitende Grid-Middleware. Es ist abzusehen, dass die heutigen Middleware-Systeme aufgrund ihrer zentralen Ausrichtung bei der Ablaufplanung bei einem in den nächsten 10 Jahren aus 10.000 bis möglicherweise auch 100.000 Prozessoren bestehendem Grid-Verbund sehr schnell zu einem Flaschenhals werden. Damit es nicht zu einem solchen Engpass kommt, sind Forschungsarbeiten notwendig, in denen z.B. biologisch-inspirierte Modelle für die effiziente Organisation großer Einheiten entwickelt werden, um in Sinne eines

aufzubauenden organischen Grids eine verteilte und autonome Ablaufplanung beim Zugriff auf große und heterogene Rechenverbände zu realisieren. Anstatt zentraler Meta-Scheduler bedarf es einer Middleware, die schnell und transparent und unter Berücksichtigung der insbesondere in Desktop-Grids gegebenen Dynamik geeignete Ressourcen im Grid findet.

GC 7.2: Entwicklung von Metriken zur effizienten Grid-Nutzung: Neben den konzeptionellen Arbeiten an einer solchen organischen Middleware für den Aufbau extrem großer Desktop-Grids bedarf es der Entwicklung geeigneter Metriken zur Leistungsbewertung solcher Grid-Verbände, die nicht nur die reine Rechenleistung, sondern auch deren Zuverlässigkeit und die aktuelle Netzwerkauslastung erfassen. Diese Metriken dienen der organischen Middleware als Basis für die Entscheidungsfindung bei der Suche nach geeigneten Ressourcen.

GC 7.3: Programmierumgebungen für heterogene Grid-Strukturen: Neben der automatischen Verteilung vieler Jobs in heterogenen Grid-Systemen nach OC-Prinzipien durch organische Middleware bedarf es passender Programmierumgebungen für die explizite Nutzung der in heterogenen Grid-Verbänden vorhandenen Potentiale in eigenen parallelen Programmen. Die Erschließung dieser Potentiale darf dabei nicht auf der händischen Anpassung von Parametern bzw. der Auswahl geeigneter Programm-Komponenten durch den Programmierer basieren. Es ist vielmehr erforderlich, geeignete Frameworks zu entwickeln, die vom Programmierer nur geringfügige Abweichungen von seinem bisherigen Verhalten bei der Programmierung paralleler Systeme, wie z.B. mittels MPI, erfordern. Aufgabe des zu entwickelnden Framework ist es, eine Auswahl geeigneter Software-Komponenten für die Abbildung auf speicher- und nachrichtengekoppelten Architekturen bzw. im Grid enthaltenen Mischformen automatisch zu übernehmen. Dies beinhaltet auch die dynamische Anpassung an Veränderungen zur Laufzeit. Für alle genannten Varianten existieren heute noch keine passenden Lösungen. Diese lassen sich am ehesten für Anwendungen finden, die nach dem Prinzip der geometrischen Partitionierung parallelisierbar sind. Insbesondere im Hinblick auf die Nutzung von Vielkern-Architekturen in heterogenen Grid-Strukturen ergeben sich hierbei auch Synergien zu GC6.8 (Neue parallele Programmierumgebungen).

GC7.4: Energie-bewusste Zugriffs-Strategien in Grid-Architekturen: Angesichts des beim Hochleistungsrechnen hohen Energieverbrauchs, des damit verbundenen schädlichen Einfluss auf das Klima und stetig steigender Kosten für Energie sind sowohl für zentral arbeitende Meta-Scheduler als auch für zukünftige nach OC-Prinzipien, auf Multi-Agenten basierende verteilte Middleware (s. GC7.1) energie-bewusste Strategien in Zukunft stärker zu berücksichtigen. Es sind entsprechende Verfahren zu entwickeln, die z.B. Tageszeit der Job-Ausführung, regionale und jahreszeitliche Faktoren beim Standort der Ressourcen, deren eigene Berücksichtigung von energie-effizienten Maßnahmen sowie vorhandene Kühltechniken am Rechnerstandort in die Entscheidung der Ressourcenwahl einbeziehen. Aufgrund der verwandten Thematik stehen die Herausforderungen an energie-bewussten Zugriffs-Strategien in Grid-Architekturen in starker Wechselwirkung mit GC5.3 (Optimierung der Systemarchitektur).

Grand Challenge 8: Unkonventionelles Rechnen

D. Fey, Friedrich-Schiller-Universität Jena

Unkonventionelles Rechnen bezeichnet ein zumeist interdisziplinär ausgerichtetes Forschungsgebiet mit dem Ziel neue und alternative Methoden für die Rechentechnik zu entwickeln, die sich stark von der klassischen von-Neumann-Architektur unterscheiden. Dazu zählt man u.a. Optisches Rechnen, DNA Computing, Quantenrechnen, Rechnen unter Nutzung von Nanostrukturen (nano computing) oder auch die analoge Rechentechnik. Unkonventionelles Rechnen kann, muss aber nicht, wenn man an die Nanoelektronik denkt, notwendigerweise eine Abkehr vom Silizium als Basismedium zur Folge haben. Im Weiteren wird eine Einschätzung bzgl. des Einflusses neuer Technologien auf das Unkonventionelle Rechnen und die großen Herausforderungen der Technischen Informatik gegeben, welche die Diskussion zu diesem Thema in der DPG/ITG/GI-Fachgruppe „Physik, Informatik, Informationstechnik“ widerspiegelt.

Als eine der häufigsten unkonventionellen Rechenverfahren wird häufig das Quantenrechnen genannt. Aus Sicht der Fachgruppe „Physik, Informatik, Informationstechnik“ wird die Forderung nach einem Quanten-Software-Engineering seitens der auf dem Gebiet der Quantenphysik forschenden Gruppen begrüßt und langfristig auch als wünschenswertes Ziel betrachtet. Derzeit wird eine konkrete Beteiligung seitens der Informatik jedoch noch als schwierig beurteilt, da sich eine auf robust arbeitenden Strukturen aufbauende Architektur eines Quantenrechners erst noch schärfer herausbilden muss, bis die Informatik hier sinnvoll aktiv werden kann. Handlungsbedarf innerhalb der nächsten 10-15 Jahre sehen wir auf den im Folgenden beschriebenen Gebieten: den sog. Reaktions-Diffusions-Architekturen und geeigneten Architekturen für zukünftige Nanosysteme, die im kommenden Jahrzehnt stark an Bedeutung gewinnen werden. Beide Systeme lassen sich durch zelluläre Rechnerstrukturen modellieren.

Ein Beispiel für die zunehmende Bedeutung zellulärer Rechnerstrukturen im Bereich des Unkonventionellen Rechnens ist das robuste Rechnen in nicht-linearen Medien auf der Basis von Reaktions-Diffusions-(RD)-Prozessen. Dahinter steckt die direkte Umsetzung partieller Differentialgleichungen zweiter Ordnung in einem z.B. als zwei-dimensionales Gitter angeordneten Verbund von Zellen. In jeder Zelle wird über die Zeit ein neuer Zustand berechnet. Dies geschieht in Abhängigkeit von einer auf den eigenen aktuellen Zustand („Reaktion“) angewandten nicht-linearen Funktion und der Berücksichtigung der Zustände der Nachbarzellen („Diffusion“), die über einen gewichteten Laplace-Operator mit der eigenen Zustandsreaktion additiv verknüpft werden. Bei entsprechender Wahl der Parameter für die Funktionen ergeben sich stabile Zustände, die dem Ergebnis einer gewünschten Berechnung entsprechen. Solche Reaktions-Diffusions-Berechnungen lassen sich direkt in nicht-linearen Medien ausführen, z.B. in chemischen Prozessoren auf der Basis von Belousov-Zhabotinsky Medien.

Hinsichtlich einer leichter machbaren Realisierung naheliegender erscheint jedoch die Abbildung der Funktionsweise von Reaktions-Diffusions-(RD)-Prozessen auf analoge und digitale elektronische Schaltkreise. Reaktions-Diffusions-Architekturen können bereits auf ein festes Fundament zurückgreifen. Bestes Beispiel dafür sind die bereits seit mehr als 10 Jahren stattfindenden Arbeiten an sog. zellularen nicht-linearen Netzwerken (CNNs; „cellular non-linear networks“). Dabei handelt es sich um vereinzelt in Digital- zumeist jedoch in Analogelektronik implementierten fein-granularen Parallelprozessorarchitekturen, die z.B. zur Steuerung der Bewegung von autonomen Robotern oder für intelligente optische Sensoren eingesetzt werden. Letztere werden in der Literatur auch als sehende Mikroprozessoren („visual microprocessors“) bezeichnet. Durch

Ausnutzen von Prinzipien der Selbstorganisation und Emergenz erreicht man in solchen Systemen eine sehr hohe Robustheit, was einen deutlichen Bezug zum GC 4 „Organic Computing“ herstellt. Wir gehen davon aus, dass solche RD-Architekturen ein vielversprechendes Potential für zukünftige, extrem robuste eingebettete Systeme bieten, z.B. für Robotersteuerungen und Kameras, die für maschinellen Sehen eingesetzt werden. Erste kommerzielle Entwicklungen solcher intelligenter optischer Sensoren sind bereits entstanden. Notwendig sind jedoch weitere Forschungsarbeiten, um das Potential von RD-Architekturen noch weiter für Eingebettete Systeme zu verbreiten.

Noch weiter gehend als RD-Prozesse im Hinblick auf die ausschöpfbaren Möglichkeiten und den Grad an „Unkonventionellem Rechnen“ sind die Entwicklungen im Bereich der Nanoelektronik und der Nanotechnologie zu werten. Auch wenn möglicherweise nicht unbedingt alle Visionen aus dem Bereich der Nanotechnik Wirklichkeit werden, wie z.B. von kleinsten Einheiten, den sog. Nanobots, welche in der Lage sind, durch Kooperation untereinander die Nanowelt derart gezielt zu manipulieren, dass auf der Makroebene beliebige gewünschte Artefakte entstehen, so ist dennoch davon auszugehen, dass die Nanotechnik besondere Herausforderungen an die Informatik stellt. Eine sich in den USA unter der Bezeichnung „Converging Technologies“ herausbildende Forschungsrichtung, in der sich Nano-, Bio-, Informationstechnologie und Kognitionswissenschaft vereinen, untermauert diese Aussage.

Herausforderungen für die Technische Informatik:

Viele Produkte der IT-Industrie in zehn Jahren werden durch auf Nanoebene arbeitende Systeme gekennzeichnet sein. Um diese adäquat zu entwerfen, ergeben sich folgende Herausforderungen für die Technische Informatik, die sich auf zwei Teilbereiche der Nanotechnologie konzentrieren. Zum einen betrifft dies aktive, d.h. ihre Umwelt maßgeblich formende und beeinflussende nano-skalierte Bauelemente, und zum Anderen sind bzgl. des Einflusses auf die Umwelt eher passiv wirkende nanotechnische Bauelemente gemeint, die dem seit Jahrzehnten geltenden Trend zur weiteren Minituarisierung vorantreiben.

GC 8.1: Selbstorganisierende rekonfigurierbare Architekturen basierend auf nano-skalierten aktiven Bauelementen. Nano-skalierte aktive Bauelemente werden in Analogie zu organischen Wachstumsprozessen in der Biologie entsprechend als „wachsende“ (growable) Elektronik bezeichnet. Diese liefert die Basis für Schaltungen und Verbindungen, die wachsen und schrumpfen können, und sich auf diese Weise gezielt entsprechend gegebenen funktionalen Vorgaben auf der Nanoebene rekonfigurieren.

Es erscheint unrealistisch, dass solche Modifikationen wie in heutigen rekonfigurierbaren Architekturen, z.B. FPGAs oder CPLDs, durch einen weitgehend von außen erfolgenden Konfigurationsbitstrom zentral gesteuert werden. Notwendig sind vielmehr auf der Nanoebene agierende und geeignet programmierte Hardware-Agenten, d.h. auf den Hardware-Entwurf fokussierte Nanobots, welche die gewünschte Assemblierungs-Aufgabe erfüllen. Dies erfordert auf Informatikseite Forschungsaufgaben, die sich mit dem Entwurf, der Programmierung und der Steuerung geeigneter dynamischer, auf Nanoebene ansetzender komplexer Netzwerke befassen, um Zuverlässigkeit und Beherrschung der Komplexität der neuen Technologien zu gewährleisten.

GC 8.2: *Nutzung passiver nanotechnischer Bauelemente.* Der zweite angesprochene Punkt, die Nutzung passiver nanotechnischer Bauelemente, z.B. von Nanoröhrchen und Nanodrähten, zielt darauf ab, höhere Integrationsdichten, eine geringere Anzahl externer Anschlüsse für die Ein-/Ausgabe, kürzere Verbindungsleitungen, geringere Verlustleistungen und letztendlich höhere Verarbeitungszeiten zu erzielen.

Die effiziente Nutzung dieser Nanoelemente erfordert stärker als bisher Forschungen auf dem Gebiet von verteilten fein-granularen und heterogenen Prozessorarchitekturen. Um eine sinnvolle System-Integration dieser einzelnen nanotechnischen Bauelemente zu erreichen, z.B. um eine zu hohe Dichte bei der Verdrahtung über längere Strecken zu vermeiden, ist die Entwicklung geeigneter Architekturmodelle voranzutreiben, z.B. auf der Basis von modifizierten Zellulären Automaten und 3D-Architekturen.

GC 8.3: *Zelluläre Architekturen und Automaten.* Arbeiten an Modellen geeigneter zellulärer Architekturen und Automaten sowohl abstrakt auf der Ebene des Entwurfs als auch auf der Ebene der Implementierung sind notwendig. Geeignete modifizierte zelluläre Automaten eignen sich auch für die Erforschung und Modellierung des oben angesprochenen Verhaltens der auf Nanoebene operierenden Hardware-Agenten als auch für RD-Architekturen für miniaturisierte Eingebettete Systeme. Ferner ist bei der Durchführung der Forschungsarbeiten eine enge interdisziplinäre Kooperation mit Physikern und gegebenenfalls weiteren Naturwissenschaftlern anzustreben.

GC 8.4: *Theorie komplexer adaptiver Systeme.* Nicht zuletzt benötigt „Unkonventionelles Rechnen“ die Entwicklung bzw. die Weiterentwicklung einer Theorie komplexer adaptiver Systeme, um die Komplexität neuer z.B. im Nanobereich angesiedelter Hardware durch geeignete Architekturen zu beherrschen, da dies durch von-Neumann-Architekturen nicht geleistet werden kann.

GC 8.5: *Interdisziplinäre Projekte für Anwendungen und Entwurf integrierter smarterer Systeme (Smart systems integration).* Die Integration sog. smarterer Systeme, d.h. von Mikro- oder Nanosystemen, die Elektronik, Mechanik, evtl. Optik und Fluidik mit kognitiven Verarbeitungsprozessen und Informationstechnik-Prinzipien vereinen, ist eine komplexe Aufgabe, die interdisziplinäre Kooperation zwischen verschiedenen Gebieten erfordert. Es ist eine Herausforderung diese Interdisziplinarität anzugehen und zu fördern.

Notwendig ist es, in interdisziplinären Projekten, gemeinsam an Anwendungen und Gestaltung solcher smarterer Systeme zu arbeiten. Beispiele für solche Systeme sind sog. nano-elektromechanische Systeme, die ein großes wirtschaftliches Potential aufweisen. Darunter fallen (analog zur VLSI-Elektronik) extrem hochgradig integrierte Felder von Sensoren, Sonden, bzw. allgemein durch mechanisch-elektrische Wechselwirkungen geprägte Systeme. Diese können für folgende zukünftige Produkte eingesetzt werden: Biosensoren, Bioaktoren, Datenspeicher auf Molekülebene, neue Eingebettete Systeme für die Mikro- und Nanofluidik mit integrierter Verarbeitung, sowie in Steuerungsmodulen für miniaturisierte Roboter.