acatech DISKUTIERT

> CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

INNOVATION DURCH SOFTWARE-INTENSIVE EINGEBETTETE SYSTEME

MANFRED BROY (Hrsg.)

Springer

acatech
DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech DISKUTIERT

> CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

INNOVATION DURCH SOFTWARE-INTENSIVE EINGEBETTETE SYSTEME

MANFRED BROY (Hrsg.)

INHALT

> GRUSSWORT 7
Georg Schütte

> EINLEITUNG 13
Manfred Broy

> CYBER-PHYSICAL SYSTEMS – WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ENTWICKLUNG 17
Manfred Broy

> INNOVATION IM MITTELSTAND AM BEISPIEL DER SENKUNG VON MOBILITÄTSKOSTEN DURCH „SCHWARMINTELLIGENZ“ 33
Hieronymus Fischer

> DIE WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG VON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS AUS DER SICHT EINES GLOBAL PLAYERS 59
Klaus Beetz

> NATIONALE ROADMAP EMBEDDED SYSTEMS 67
Werner Damm et al.

> AUTORENVERZEICHNIS 137

> GRUSSWORT

Keynote-Rede des Staatssekretärs im Bundesministerium für Bildung und Forschung anläßlich des acatech-Symposiums Cyber-Physical Systems am 02.02.2010 in München

GEORG SCHÜTTE

Sehr geehrter Herr Akademiepräsident Kagermann,
Sehr geehrte Mitwirkende,
Sehr geehrte Damen und Herren,

wenn man sich die Bedeutung eines Rohstoffes oder einer technischen Schlüsselkomponente vor Augen führen will, kann es hilfreich sein, sich die Welt ohne diesen speziellen Baustein vorzustellen.

Auf meinem Weg zu dieser Veranstaltung heute Morgen habe ich versucht, die Folgen eines solchen Gedankenexperiments am Beispiel von Embedded Systems auszumalen und mir eine Welt ohne Embedded Systems vorzustellen.

Heutige Passagierflugzeuge sind große Netzwerke aus Bordcomputern und den Embedded Systems in vielen einzelnen Aggregaten. Ohne diese Embedded Systems ließen sich nicht einmal die Turbinen starten. Bei der Deutschen Bahn hätte ich auf den ICE verzichten müssen, der nicht fährt ohne Bordrechner und die eingebetteten Kontrollsysteme - etwa an den Bremsen. Als letzte Möglichkeit wäre für die Fahrt nur ein Auto infrage gekommen ohne Airbag, ohne ABS und ohne die anderen elektronischen Standardbausteine. Ich hätte daher wahrscheinlich auf einen Oldtimer zurückgreifen müssen.

Das Ergebnis dieses Gedankenexperiments ist somit eindeutig: Wir haben uns daran gewöhnt, dass die in unseren Alltagsgeräten verborgenen Embedded Systems diese Produkte sicher, sparsam und enorm leistungsfähig machen. Ohne Embedded Systems würde nur noch ein kleiner Teil der Techniksysteme in unserem Alltag funktionieren, ohne Embedded Systems wäre ich jetzt nicht hier bei Ihnen.

I.

Embedded Systems sind die intelligenten Steuerzentralen in vielen der heutigen technischen Produkte und Anlagen. Wie die Beispiele soeben zeigten, sind wir mit unseren Mobilitätsvorstellungen ganz wesentlich auf Embedded Systems angewiesen. Genauso wichtig sind sie für unsere Gesundheit, weil Medizinische Geräte – vom Herzschrittmacher über ein Endoskop bis zum Computer-Tomographen – nicht zu konstruieren und zu betreiben wären ohne die zahlreichen darin eingebauten Embedded Systems. Die Mini-

aturisierung erlaubt es, Telemonitoring-Funktionen in die Lebensumwelt zu integrieren, um ältere oder gehandicapte Mitmenschen bei einem selbstbestimmten Leben in ihrer gewohnten Umgebung zu unterstützen. Energiesysteme und Produkte mit intelligenter Steuer- und Regelungstechnik auf Basis von Embedded Systems schließlich sind der Schlüssel zu einer wesentlich effizienteren Energienutzung, als eine Antwort auf den Klimawandel.

Diese Rolle von Embedded Systems lässt sich auch in wirtschaftlichen Daten ausdrücken. In Deutschland erzielen Embedded Systems zurzeit einen jährlichen Umsatz von 17 Mrd. Euro, der bis 2020 auf geschätzt über 40 Mrd. Euro anwachsen wird. Allein die Anwenderbranchen in Deutschland verarbeiten derzeit Embedded Systems im Wert von rund 4 Mrd. Euro pro Jahr. Ihre eigene Wertschöpfung wird auf etwa 15 Mrd. Euro geschätzt. Der deutsche Markt für Embedded Systems ist der drittgrößte hinter den USA und Japan.

Die Bedeutung für den Arbeitsmarkt ist dementsprechend hoch: Bei den Anbietern von Embedded Systems in Deutschland sind ca. 40.000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter beschäftigt, vorrangig Elektrotechniker und Technische Informatiker. Dazu kommen noch einmal über 250.000 Beschäftigte in Anwenderbranchen, die Embedded Systems in Endprodukte integrieren und individuelle Software für das jeweilige Einsatzszenario entwickeln.

II.

Diese Daten und Fakten beschreiben den Zustand heute. Embedded Systems sind für den Wirtschaftsstandort Deutschland von unverzichtbarer Bedeutung. Die Entwicklung dieser Systeme schreitet ebenfalls rapide voran. Embedded Systems sind komplexer geworden und kommunizieren verstärkt miteinander. Damit wächst zugleich die Komplexität der gesamten Systeme und die Anforderungen an deren Produktion. Das wirft die Frage auf, ob die Produzenten und Anwender von Embedded Systems auf diesen Wandel vorbereitet sind. Die Kernelemente dieses Wandels werden deutlich, wenn wir der Frage nachgehen, wann die ansonsten verborgenen Embedded Systems auffällig werden.

1. Auffällig werden Embedded Systems für Kunden natürlich dann, wenn sie ausfallen - wenn etwa das neue Auto stehen bleibt. Probleme mit Embedded Systems waren im Jahr 2005 einer Studie zufolge für 50% der Garantiekosten bei Neuwagen verantwortlich. Zuverlässigkeit und Sicherheit von Embedded Systems sind daher von allergrößter Wichtigkeit. Vernetzte Embedded Systems, die zu Tausenden in einem komplexen Gesamtsystem arbeiten und kommunizieren, setzen eine ganz neue Qualität von Zuverlässigkeit und Sicherheit voraus. Das gilt für den Haftungsfall für die Zertifizierung und damit letztlich den Beweis von Sicherheit des Gesamtsystems mit allen seinen Einzelteilen. Das gilt ebenso für die Sicherheit vernetzter Embedded Systems gegen Manipulationen von außen.

2. Auffällig werden Embedded Systems für Entwickler und Manager, wenn es um ihre Entwicklungsbedingungen geht: Warum werden Module nicht systematischer wiederverwendet, warum muss so oft neu entwickelt werden? Deutschlands Stärke sind individuelle Lösungen für anwendungsspezifische Anforderungen. Nur vier Prozent aller Anbieter von Embedded Systems in Deutschland bieten ausschließlich Standardprodukte an. Diese Stärke ist aber immer dem Risiko ausgesetzt, dass jeder Konkurrent mit flexiblen Modulen, intelligenten Standards und hoher Wiederverwendung von Lösungen kostengünstiger anbieten kann. Gemeinsame technische Standards und passfähige Architekturen sind die konzeptionellen Grundlagen für niedrigere Entwicklungskosten und bessere Konkurrenzfähigkeit der Anbieter.
3. Auffällig sind Embedded Systems heute für Unternehmensstrategen. Embedded Systems der Zukunft sind keine Einzelsysteme mehr, sondern grundsätzlich miteinander vernetzt. Dies ist auch ein ganz wesentlicher Grund für den neuen Begriff der „Cyber-Physical Systems". Vernetzung erfordert Gemeinsamkeit: gemeinsame Standards und Kommunikationsprotokolle, und die dazu nötigen Architekturen. Vernetzung bedeutet auch die Verbindung zu neuen Anbietern und Kunden, zu neuen Märkten mit anderen Bedingungen. Wer diese Chancen nutzen will, muss qualitativ besser und wirtschaftlich effizienter sein.

Alle diese einzelnen Beobachtungen lassen sich auch reduzieren auf einen einzigen grundlegenden Faktor: Für Produktion und Anwendung von Embedded Systems hat deren Software die zentrale Rolle übernommen. Die Denk- und Arbeitsweise in der Softwareentwicklung, ihre Produktionsbedingungen und ihre Potentiale bestimmen die Zukunft der Embedded Systems-Branche. Nur, wenn wir Entwicklung und Anwendung von Embedded Systems neu denken aus der Perspektive der Softwareentwicklung, können wir der Zukunft gerecht werden.

III.

Dies sind die Gründe für den grundlegenden Wandlungsprozess, in dem sich Produzenten und Anwender von Embedded Systems heute befinden. Viele Produktionsweisen müssen sich ändern, die Verfahren sind neu zu bestimmen, Marktteilnehmer müssen sich auf neue Ziele verständigen. Wenn Deutschland in den nächsten Jahren in seinen wichtigsten Wirtschaftszweigen der Hochtechnologie konkurrenzfähig bleiben will, die allesamt auf Embedded Systems angewiesen sind, dann sind hier große gemeinsame Anstrengungen nötig.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat sich dieser wichtigen Aufgabe im Rahmen seiner Hightech-Strategie angenommen.

Die heutige Leistungsfähigkeit der gesamten Embedded Systems-Branche, auf die ich zu Beginn eingegangen bin, ist eine Stärke, die wir erhalten und ausbauen müssen. Diese Stärken in den Anwendungen müssen wir verbinden mit den Herausforderungen, denen wir bei der Beherrschung des Softwareentwicklungsprozesses für Embedded Systems gegenüberstehen.

- Das BMBF unterstützt dazu das Fördervorhaben SPES 2020. Das Projekt ist ausgerichtet an der Professionalisierung des Entwicklungs- und Produktionsprozesses von Software für Embedded Systems nach industriellen Maßstäben in Luftfahrt, Medizin, Energie, Fahrzeugbau, und Automatisierungstechnik.
- Letzte Woche ging der Spitzencluster „MicroTEC Südwest" in Baden-Württemberg erfolgreich aus der Auswahlsitzung hervor. Für diesen Cluster ist in den nächsten Jahren die Förderung von insgesamt 33 Verbundprojekten durch das BMBF geplant. Dabei werden viele der für Embedded Systems wesentlichen Aspekte untersucht. Auch hier wird es darauf ankommen, Softwareentwicklungsmethoden weiterzuentwickeln (und sich mit anderen Partnern auszutauschen).
- Der Wandel der Produktionsbedingungen von Embedded Systems bedeutet verstärkte Forschungsanstrengungen, die realen Erfordernissen entsprechen müssen. Das BMBF hat daher Fachleute dazu motiviert, diese Forschungsbedarfe zu strukturieren und zu ordnen und so Ende 2009 eine Nationale Roadmap Embedded Systems zu entwickeln
- Zum 4. IT-Gipfel am 8. Dezember 2009 haben nun Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, das heißt das BMBF, eine Strategische Forschungsagenda Embedded Systems vorgelegt, die Sicherheit und Zuverlässigkeit und die wirtschaftliche Produktion nach industriellen Anforderungen in den Mittelpunkt stellt.

IV.

Der 4. IT-Gipfel ist aber nur ein Beispiel für die Arbeit der Bundesregierung, Forschung und Innovation stärker in den Mittelpunkt zu rücken. Zentrales Aktionsfeld dafür ist die Hightech-Strategie. Mit der Hightech-Strategie verfolgt die Bundesregierung ehrgeizige Ziele: mehr Qualität und mehr Effizienz in das Zusammenspiel von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik zu bringen, Leitmärkte zu schaffen und die Rahmenbedingungen für Innovationen in der Wirtschaft zu verbessern.

Diesen Weg werden wir konsequent weiter beschreiten. Deshalb hat sich die Bundesregierung nachdrücklich zur Priorität für Bildung und Forschung bekannt. Wir werden die Ausgaben für diese beiden zentralen Handlungsfelder bis 2013 um 12 Milliarden Euro erhöhen. Bei der Auswahl der Schwerpunkte werden wir uns auf solche Bereiche konzentrieren, die in Breite in unsere Wirtschaft und Gesellschaft hineinwirken.

Der 4. IT-Gipfel in Stuttgart macht deutlich: Informations- und Kommunikationstechnologien spielen dabei eine zentrale Rolle. Dabei werden wir die Innovationspolitik in Zukunft noch stärker auf die Bedarfsfelder Klima/Energie, Gesundheit/Ernährung, Mobilität, Kommunikation und Sicherheit ausrichten. Das bedeutet in besonderem Maße für den IKT-Bereich, die dort entwickelten neuen Lösungen - etwa für mehr Sicherheit im Straßenverkehr, ressourcenschonenden Warentransport, moderne Medizin sowie altersgerechte Assistenzsysteme - zu fördern und besser zu nutzen. Diese Bedarfsfelder sind zugleich die typischen Anwendungsfelder für Embedded Systems. Embedded Systems sind also ein zentraler Baustein in der Hightech-Strategie. Und überall dort, wo wir in die Forschung investieren, müssen wir auch geeignete Rahmenbedingungen schaffen, um neuen Technologien den Weg in die Märkte zu ebnen. Schließlich gilt es außerdem, mehr Nachwuchs und Fachkräfte im MINT-Bereich zu gewinnen, denn sie sind es, die FuE für Innovationen betreiben.

Ein Erfolg wird sich nicht einstellen durch Arbeiten in den jeweils einzelnen Feldern, sondern nur dadurch, Embedded Systems nach gemeinsamen, branchenübergreifenden Standards zu entwickeln und zu produzieren. Wenn Software zur entscheidenden Komponente von Embedded Systems geworden ist, dann setzen zuverlässige, nach wirtschaftlichen Maßstäben produzierte Embedded Systems auch eine Softwareproduktion voraus, die wirtschaftlich ist und auch bei höchster Komplexität zuverlässige Ergebnisse liefert. Das BMBF hat die Absicht, Forschungsarbeiten für die Zukunft der Embedded Systems zu fördern, bei denen diese branchenübergreifende Kooperation umgesetzt wird und die das Ziel haben, gemeinsame Grundlagen für Embedded Systems zu schaffen.

Dieses Symposium ist ein Ort, auf dem wichtige der bisher schon geleisteten Arbeiten vorgestellt werden sollen und über die notwendige Kooperation diskutiert werden soll.

Wenn wir uns die Bedeutung von Embedded Systems entweder anhand meines kleinen Beispiels zu Beginn vor Augen führen oder anhand der wirtschaftlichen Bedeutung für den Industriestandort Deutschland, dann wird deutlich, wie wichtig eine solche Debatte ist. Wichtiger noch sind konkrete Vorschläge und Ideen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Ich möchte Sie daher ermuntern, sich nicht nur heute, sondern auch in der Zukunft zu beteiligen, damit dieses heutige Symposium zu einem dauerhaften Erfolg führt.

> EINLEITUNG

MANFRED BROY

Seit der Erfindung programmierbarer Rechner durch Konrad Zuse vor kaum 70 Jahren haben programmierbare Informationsverarbeitungssysteme einen atemberaubenden Aufschwung genommen. Das Mooresche Gesetz mit seiner exponentiellen Steigerung der Leistungsfähigkeit der Hardware in Hinblick auf Rechen-, Speicher- und Übertragungsleistung liefert dafür die technische Grundlage. Die Flexibilität programmierbarer Software ergänzt sich dazu ideal – schafft sie doch die Möglichkeiten und die Voraussetzungen dafür, dass sich diese Systeme in praktisch allen Anwendungsfeldern einsetzen lassen.

Waren anfänglich die Rechner- und Softwaresysteme vornehmlich darauf ausgerichtet, isoliert in Labors und Rechenzentren, getrennt von den eigentlichen Abläufen der physikalischen Welt Berechnungen durchzuführen oder Informationen zu verwalten, so wurden Rechner bald im verstärkten Maße für Aufgaben der Kontrolle und Steuerung physikalischer Vorgänge eingesetzt. Ein erstes bedeutendes Einsatzgebiet waren Vermittlungsrechner in der Telekommunikation. Aber auch für eingebettete Systeme zur Regelung und Steuerung der unterschiedlichsten technischen Vorgänge konnten sich programmierbare Steuergeräte schnell durchsetzen.

Gleichzeitig entwickelten sich über die ersten Schritte der programmierbaren Rechner in die Kommunikationssysteme die weltweiten Netze zur Übertragung digitaler Daten, heute am augenfälligsten vertreten durch das Internet und das World-Wide-Web. Hier kamen die Möglichkeiten weltweit entstehender Infrastrukturen, die auf Basis von digitalen Netzen und schnellem Austausch von Informationen möglich machten, kombiniert mit Standards, wie vor allem das Internetprotokoll, aber auch standardisierten Möglichkeiten der Darstellung von Informationen und der Übertragungen von Informationen. Damit wurden elektronische Post und das flexible Zurverfügungstellen und Abrufen von Daten über Server und Browser die Grundlage für eine einzigartige weltumspannende Informationsinfrastruktur. Auf dieser Basis konnten ganz neue Industrien entstehen wie weltumspannende Dienste, etwa durch Suchmaschinen, die wiederum völlig neue Geschäftsmodelle möglich machen.

Die über einen längeren Zeitraum weitgehend getrennt laufenden Entwicklungen im Bereich der weltumspannenden Netze und der eingebetteten Systeme auf Basis programmierbarer Steuergeräte wachsen seit einigen Jahren betonend verstärkt zusammen. Stichworte wie das Internet der Dinge oder Cyber-Physical Systems stehen für diese Entwicklung. Damit kombinieren sich die für sich gesehen schon fast unbeschränkten Möglichkeiten weltweit digitaler Netze mit den Potentialen eingebetteter softwarebasierter Systeme für die Überwachung und Steuerung der unterschiedlichsten physikalischen Vorgänge. Die weltweiten Netze gestatten es dann, aus großer Entfernung unmittelbar auf physikalische Vorgänge einzuwirken, über Sensoren Informationen aufzunehmen und diese mit weiteren Vorgängen zu verknüpfen. Dies schafft eine technische Plattform für die unterschiedlichsten Anwendungen und damit ein Innovationsgebiet höchsten Ranges.

Für die Bundesrepublik Deutschland ist das Thema der Cyber-Physical Systems von herausragender Bedeutung. Die Gründe dafür liegen auf der Hand. Die erfolgreichsten Exportindustrien sind stark softwareintensiv und softwarebasiert, auch wenn es sich primär auch um Ergebnisse des Maschinenbaus handelt. Heute sind moderne Erzeugnisse des Maschinenbaus immer stärker durch programmierbare Steuergeräte ergänzt, so dass für die Produkte mittlerweile bis zu einem Drittel ihrer Wertschöpfung unmittelbar in eingebetteten Systemen liegt. In den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten, sei es im Verkehr, etwa im Automobil oder in der Luftfahrt, sei es in der Produktionstechnik, etwa in der Produktionsautomatisierung oder der Robotik oder etwa in der Medizintechnik, ist der Trend, die eingebetteten Systeme untereinander zu vernetzen, aber auch in übergeordnete digitale Netze einzubinden, augenfällig. Dies schafft ein ungeheures Anwendungspotential, wirft aber auch zahlreiche und weitreichende wissenschaftliche und technische Herausforderungen auf.

Einem solchen Potential und diesen Herausforderungen kann sich acatech nicht verschließen. Vor diesem Hintergrund hat das acatech Symposium zum Thema Cyber-Physical Systems Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme im Februar 2010 in München stattgefunden. Ziel des Symposiums war es, die hohen wissenschaftlichen und technischen Potentiale und Herausforderungen dieses sich schnell entwickelnden Gebietes umfassend darzustellen und gewissermaßen einen Startschuss zu geben für intensivere Diskussionen innerhalb von acatech im Hinblick auf dieses Gebiet. Besonders erfreulich ist es in diesem Zusammenhang, dass es gelungen ist, die nationale Roadmap Embedded Systems, die aus einer Initiative der Wissenschaft mit der Industrie im letzten Jahr entstanden ist, einzubinden und vollständig in diesem Band abzudrucken. Damit wird umfassend dargestellt, welche hohe Bedeutung das Gebiet hat und wie wichtig eine nachhaltige Auseinandersetzung mit dieser Thematik für die Zukunft des Technologie-, Wissenschafts- und Wirtschaftsstandorts Deutschlands ist.

Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich ganz herzlich bei den Mitautoren der nationalen Roadmap eingebetteter Systeme, bei den Herren Werner Damm, Reinhold Achatz, Klaus Beetz, Heinrich Daembkes, Klaus Grimm und Peter Liggesmeyer für ihre konstruktive und kompetente Mitwirkung bedanken.

Danken möchte ich auch den Mitarbeitern der acatech, allen voran Herrn Glotzbach, für die nachhaltige Unterstützung des Projektes und allen Mitwirkenden, die zum Erfolg der Tagung Cyber-Physical Systems beigetragen haben.

Manfred Broy

München, im Juli 2010

> CYBER-PHYSICAL SYSTEMS – WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN BEI DER ENTWICKLUNG

MANFRED BROY

ABSTRACT

Cyber-Physical Systems adressieren die enge Verbindung eingebetteter Systeme zur Überwachung und Steuerung physikalischer Vorgänge mittels Sensoren und Aktuatoren über Kommunikationseinrichtungen mit den globalen digitalen Netzen (dem „Cyberspace"). Dieser Typus von Systemen ermöglicht über Wirkketten eine Verbindung zwischen Vorgängen der physischen Realität und den heute verfügbaren digitalen Netzinfrastrukturen. Dies erlaubt vielfältige Applikationen mit hohem wirtschaftlichen Potential, und mit starker Innovationskraft. Die vollständige Ausschöpfung des Potentials erfordert aber gezielte wissenschaftliche Anstrengungen bei der Entwicklung solcher Systeme im Hinblick auf Methodik, Technologie, Kostenbeherrschung und funktionale Angemessenheit.

1 DIE DIGITALE REVOLUTION

Wenig hat unsere technische und gesellschaftliche Welt in den letzten 40 Jahren so tiefgreifend verändert wie Funktionen auf Basis digitaler Hardware und Software. Ausgehend von der Zielvorstellung, umfangreiche Rechenaufgaben nicht länger manuell bearbeiten zu müssen und die Verwaltung großer Mengen von Datenbeständen weitgehend zu automatisieren hat die digitale Informationsverarbeitung beginnend in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts einen atemberaubenden Aufschwung genommen. Kaum jemand hat in den frühen Jahren der Computer vorhergesehen, welche Umwälzung diese Technologie auslöst und wie stark sie unsere Gesellschaft und Wirtschaft verändern würde.

1.1 INNOVATION DURCH EINGEBETTETE SOFTWARE

Softwareintensive Systeme sind Innovationstreiber. Sie ermöglichen neuartige Funktionalitäten in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten.

Die Innovationskraft softwareintensiver Systeme und die durch sie vorangebrachten Innovationen unterliegen häufig dem gleichen Muster. Am Anfang steht oft eine nahe liegende Vorstellung, ein unbefriedigend gelöstes Problem mit der Unterstützung von digitaler Informationsverarbeitung zu lösen und zu automatisieren. Bei der Erarbeitung einer entsprechenden Lösung stellt sich dann nicht selten heraus, dass das Problem zumindest in bestimmten Teilbereichen komplizierter ist als im ersten Moment erwartet

und eine sorgfältigere Analyse der entsprechenden Gesichtspunkte des Anwendungsgebietes unumgänglich ist. Dies führt zu neuen Einsichten in das Anwendungsgebiet, die oftmals deutlich über die spezifische Frage der Lösung der speziellen Problemstellung hinausgehen. Die Umsetzung und Realisierung der Problemstellung wiederum schafft unwillkürlich eine technische Infrastruktur und einen Bestand von Informationen und informationstechnischen Diensten, die weitere Möglichkeiten eröffnen. In der Verknüpfung mit anderen Systemen und Lösungen ergeben sich dann unerwartet und ungeplant ganz neue und andersartige Möglichkeiten.

Ein gutes Beispiel dafür ist das Entstehen der heutigen globalen digitalen Netze, allen voran das Internet. Ausgehend von einer Reihe zunächst isolierter Probleme - wie beispielsweise das Bemühen der amerikanischen Verteidigung, ein Kommunikationsnetz zu schaffen, das auch einen Atomschlag übersteht - der ständigen Erweiterung der auf dieser Basis entstandenen Netze und weiterer Anwendungsaspekte, entstand nahezu als Abfallprodukt die Möglichkeit weltweit flexibel Rechner zusammenzuschalten und damit die Möglichkeit des Austausches von Informationen über standardisierte Protokolle. Die Idee der E-Mail, später aber auch die Vorstellung der Darstellung und des Zugriffs auf Informationen über weltweite Netze war dann auf Basis dieser Infrastruktur ein konsequenter weiterer Schritt. Dass blitzschnelle weltweite Kommunikation, benutzerbezogene Adressierung und gleichzeitig anonymer Zugriff auf Informationen weltweit ein folgerichtiger nächster Schritt auf Basis dieser Infrastruktur war, ist keine Frage. Interessant, attraktiv und entsprechend schnell verbreitet wurde das allerdings nur dadurch, dass durch die Leistungssteigerung und Verbilligung der Rechnertechnologie in vielen Unternehmen, aber zunehmend auch in Privathaushalten günstige PCs (Personal Computer) vorhanden waren, die einen solchen Zugriff in der Breite überhaupt erst ermöglichten. Die Nutzung des Mediums Internet für die unterschiedlichsten wirtschaftlichen und privaten Bedürfnisse kann dann schon nicht mehr erstaunen.

Unabhängig davon entstand über den gleichen Zeitraum das weite Gebiet der Anwendungen eingebetteter Systeme. Diese Systeme bestehen oftmals aus Rechnern, die in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt und über Sensoren und Aktuatoren mit der physikalischen Umwelt verbunden sind. Durch diese Messfühler nehmen die Systeme Informationen aus ihrer Umwelt auf, werten diese aus und steuern über Aktuatoren ihrerseits unmittelbar physikalische Vorgänge. Solche Systeme sind zunächst für kleine Geräte einsetzbar und anwendbar. Die Verbilligung der digitalen Hardware, die Fortschritte im Bereich Sensorik und Aktuatorik machen ihren Einsatz in immer neuen Anwendungsgebieten möglich. Aufwändigere Systeme verfügen über dedizierte bis hin zu sehr allgemeinen Nutzerschnittstellen, in denen der Nutzer gezielt und bewusst Informationen in diese Systeme eingeben, bestimmte Funktionen abrufen, aber auch auf Informationen aus den Systemen zugreifen kann.

Zunehmend sind aus wiederum nahe liegenden Gründen die eingebetteten Systeme über Kommunikationsmechanismen mit Netzen, auch mit globalen Netzen verbunden. Dies eröffnet Möglichkeiten, das schier unbegrenzte Potential globaler Netzanwendungen mit den ihrerseits wieder vielfältigen Möglichkeiten eingebetteter Systeme zu kombinieren und immer weiter greifende Wirkketten aufzubauen.

Für die Nützlichkeit entsprechender Systeme gibt es bereits eine Vielzahl von Beispielen. Cyber-Physical Systems leisten einen wesentlichen Beitrag zur Lösung vieler gesellschaftlicher Herausforderungen. Herausragende Beispiele sind Beiträge zur Sicherheit, zur Kommunikation, zur Industrieautomatisierung und zum Informationsmanagement.

1.2 WAS TREIBT DIE DIGITALE REVOLUTION?

Aufgrund der unglaublichen Geschwindigkeit, mit der sich die digitale Technik weiterentwickelt, in vielen Anwendungsbereichen Schritt fasst und sich weiter ausbreitet und in Anbetracht der schnellen Veränderungen, die dadurch hervorgerufen werden, ist es ohne Zweifel berechtigt, von einer digitalen Revolution zu sprechen. Begründen lässt sich diese Charakterisierung schon aus wirtschaftlicher Sicht, berücksichtigt man etwa, dass Firmen wie Microsoft, SAP oder Google aufgrund der Möglichkeiten digitaler Informationsverarbeitungen in nur wenigen Jahren zu Weltkonzernen aufgestiegen sind.

> 1.2.1 Das Mooresche Gesetz

Zentraler Treiber der digitalen Revolution ist das Mooresche Gesetz. Es beruht auf der Beobachtung, dass über einen langen Zeitraum durch die Fortschritte in der Halbleitertechnik ein schneller Leistungszuwachs bei gleichzeitiger Preisreduktion erreicht wurde. Das Mooresche Gesetz prognostiziert, dass die Leistungssteigerung in der digitalen Hardware exponentiell (Verdoppelung der Leistung etwa alle 1 1/2 Jahre) wächst: Das bedeutet

- in 10 Jahren: Leistungszuwachs um Faktor 100
- in 20 Jahren: Leistungszuwachs um Faktor 10.000

Schon jetzt steht fest, dass dieser Leistungszuwachs noch über einen längeren Zeitraum von 10, 15, vielleicht 20 Jahren in ähnlicher Weise anhalten wird, auch wenn es immer wieder neue Probleme zu lösen gibt, um die Leistungssteigerung sicherzustellen bzw. die erhöhte Leistungsfähigkeit der Systeme tatsächlich abrufen zu können.

Fazit ist, dass durch die Zunahme der Leistung Probleme, deren Lösung bis vor kurzem undenkbar waren, in den Bereich der Lösbarkeit kommen. Beispiele der Vergangenheit sind Navigationssysteme mit ihrem hohen Rechenbedarf, Computerspiele, aber auch das Data Mining der Suchmaschinen im Internet. Gleichzeitig sorgt die Preisre-

duktion und Leistungssteigerung dafür, dass in immer neuen Gebieten der Einsatz solcher Systeme wirtschaftlich vertretbar wird. Mit dem Einsatz der Systeme fallen weitere Daten an und es entsteht eine digitale Infrastruktur, die wieder den Schritt in weitere Innovationen öffnet.

> 1.2.2 Flexibilität durch Software

Allerdings ist die reine Steigerung der Leistungsfähigkeit bei Hardware für sich genommen noch nicht ausreichend, um den Innovationsprozess entsprechend voranzutreiben. Programmierbare Hardware ist anwendungsunspezifisch, für bestimmte Aufgaben zunächst überhaupt nicht einsetzbar. Hinzu kommen die Möglichkeiten der Software. Software erlaubt es, die in Massenproduktion gefertigten Hardwareelemente zielgerichtet auf bestimmte Aufgaben auszurichten und dafür einzusetzen, und dabei diese Lösungen exakt auf die Erfordernisse der entsprechenden Anwendungen zuzuschneiden.

Die Flexibilität durch Software für programmierbare Hardware ist nahezu unbegrenzt: Die gleiche Hardware kann durch entsprechende Programmierung (durch Software) für völlig unterschiedliche Aufgaben eingesetzt werden. Die schier unbegrenzte Bandbreite der Einsatzmöglichkeiten führt dazu, dass sich in nahezu jedem Anwendungsgebiet für Hardware/Softwaresysteme beständig neue technische und fachliche Möglichkeiten eröffnen. Die Erschließung von Anwendungsfeldern durch Software führt wiederum zu neuen Erkenntnissen und Folgeinnovationen.

1.3 DAS BESONDERE AN SOFTWARE

Software schafft ein völlig neues Paradigma. Die Gründe dafür sind vielfältig. Zum einen ist Software immateriell, besteht vereinfacht gesagt im Wesentlichen in der konsequenten Umsetzung eines Lösungsgedankens. Software ist weit weniger als Mechanik technischen Beschränkungen unterworfen. Dies impliziert eine hohe Gestaltungsfreiheit.

Des Weiteren benötigt Software keinen eigentlichen Produktionsprozess, nur einen Entwicklungsprozess. Software kann einfach vervielfältigt werden. Dies führt auf neue, ganz unterschiedliche Kostenmodelle im Vergleich zu traditionellen technischen Produkten.

Außerdem erlaubt es Software, unterschiedliche Aspekte auf das raffinierteste miteinander zu verknüpfen. Das Zusammenspiel von Berechnung, Kommunikation, Datenspeicherung, Auswertung und Visualisierung sowie angepassten Konzepten der Mensch-Maschinen-Interaktion bis hin zu Einbindung in physikalische Vorgänge schafft Gestaltungsmöglichkeiten, die nur durch unsere Phantasie begrenzt sind.

Software kann jede Anwendungsdomäne adressieren. Software kann flexibel auf die Anforderungen zugeschnitten werden. Damit wird die Fähigkeit festzulegen, in welcher Weise informationsverarbeitende Systeme für welche Zwecke sinnvoll eingesetzt werden zur entscheidenden Voraussetzung für den Erfolg dieser Systeme.

Software erlaubt hochgradige logische Verknüpfung von Ereignissen in Vorgängen. Geeignete Methodik bestimmt den Grad der Beherrschung. Längst bleiben die Anwendungen hinter den technischen Möglichkeiten zurück! Eine der Konsequenzen dieser Flexibilität von Software liegt in der geschickten Beschränkung. Requirements Engineering wird erfolgsentscheidend!

Die hohen logischen Abhängigkeiten führen auf ausufernde Verhaltens¬kombinatorik und hohe Komplexität von Softwaresystemen. Komplexitätsbeherrschung ist für Cyber-Physical Systems nur durch angepasstes Systems Engineering erreichbar und als durchgängig architekturzentrierte Entwicklung ein Schlüssel zur Qualität.

2 CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Wie bereits dargestellt zielen Cyber-Physical Systems (CPS) auf die Verbindung eingebetteter Systeme mit den Möglichkeiten weltweiter Netze. Damit entsteht eine direkte Verbindung (und Rückkopplung) zwischen der physikalischen und der digitalen Welt.

2.1 SPEZIFIKA VON CPS

Cyber-Physical Systems ermöglichen völlig neuartige Systemfunktionen. Das Zusammenspiel eingebetteter Systeme auf Basis leistungsfähiger Softwaresysteme, dedizierter Nutzungsschnittstellen mit der Einbindung in digitale Netze, schafft völlig neuartige Systemfunktionalitäten. Besonders auffällig sind Themen wie die Funktionsintegration, die auf die Multifunktionalität der Systeme führt. Ein herausragendes Beispiel sind heutige mobile Telefone, die längst nicht mehr nur dem Telefonieren dienen, sondern ein großes Bündel von Funktionalität anbieten, die gerade durch die Einbindung dieser Systeme in die Netze zusätzliche Dimensionen erhält, aber auch durch die immer ausgefeiltere Sensorik und Aktuatorik der Geräte als solche.

Dabei ist es bemerkenswert, dass diese Systeme alle Charakteristika aufweisen, die Informatiksysteme insgesamt zeigen. Das beginnt bei den weichen und harten Zeitanforderungen, wenn die Reaktion der Systeme innerhalb vorgegebener Zeitschranken erfolgen muss. Charakteristisch ist auch die umfangreiche Interaktion, die diese Systeme entscheidend prägt. Dies betrifft sowohl die Interaktion der Systeme mit ihrer Umgebung über Nutzerschnittstellen, Sensoren und Aktuatoren, wie auch die Interaktion innerhalb der Systeme, aber auch die Interaktion der Systeme in die entsprechenden Netze und über die Netze untereinander. Von hoher Bedeutung ist dabei insbesondere die Verbindung der Systeme mit der physikalischen Welt über Sensoren und Aktuatoren.

Eine große Herausforderung ist die Gestaltung dedizierter Nutzerschnittstellen. Ein klassisches Beispiel dafür ist die Veränderung der Bediensituation in heutigen Automobilen oder bei modernen mobilen Telefonen. In anderen Anwendungsgebieten, beispielsweise in der Luftfahrt, ist die starke Integration der Systeme in die Handlungsabläufe bei der Systembedienung besonders herausfordernd. Dies wird bei der Gestaltung der Cockpits heutiger Flugzeuge deutlich. Gerade wenn Systeme unter schwierigen physi-

kalischen Randbedingungen eingesetzt werden, muss die Mensch-Maschine-Interaktion auf diese Handlungsabläufe gezielt zugeschnitten werden. Eine weitere Herausforderung ist, dass durch die oft schwierigen physikalischen Umgebungen die Anforderungen an die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme höchsten Ansprüchen genügen muss.

Hinzu kommen Fragen des Langzeitbetriebs, aber auch der Anpassung der Systeme an sich ändernde Betriebsumgebungen. Stichworte sind dabei Adaptivität und Autonomie. Da diese Systeme in der Regel auch in hochgradig sicherheitskritischen Anwendungen eingesetzt werden, sind Fragen der funktionalen Sicherheit, in denen überprüft wird, dass von den Systemen und durch den Einsatz der Systeme keine Gefährdungen für Leib und Leben ausgehen, aber auch Fragen der Zugriffsicherheit und des Datenschutzes von höchster Bedeutung, wobei festgelegt wird, dass die Systeme und ihre Daten auch vor Angriffen geschützt werden. Für Sicherheitssysteme in sicherheitskritischen Bereichen ist die Zuverlässigkeit selbstverständlich entscheidend. Ein drastisches Beispiel sind die Sicherheitssysteme in Kernkraftwerken, die in kritischen Situationen eine Notabschaltung durchführen. Hier treffen sich höchste Sicherheitsanforderungen mit zuverlässigem Automatisierungsgrad und der Forderung nach höchster Zuverlässigkeit.

Auch wirtschaftliche Gesichtspunkte dürfen nicht vernachlässigt werden. Die Beherrschung der Kosten bei der Entwicklung und Produktion entsprechender Systeme, aber auch bei deren Betrieb ist erfolgskritisch.

Man muss sich auch hier bewusst sein, dass die Gestaltung und der Einsatz solcher Systeme oftmals zu einer nachhaltigen Veränderung der Infrastruktur in unserer Gesellschaft führen. Heute gestaltete Systeme sind meist 10, 20, 30 oder 40 Jahre im Einsatz, prägen und beschränken durch ihre Auslegung das betreffende Anwendungsgebiet aber auf lange Sicht. Die Ablösung umfangreicher Softwaresysteme ist anspruchsvoll, teuer und wird deswegen häufig vermieden.

Wichtige Charakteristika der CPSs sind im Folgenden aufgelistet:

- Direkte Verbindung zwischen physikalischer Welt und digitaler Welt
- Neuartige Systemfunktionen durch Informations-, Daten- und Funktionsintegration
- Funktionsintegration: Multifunktionalität
- Zugriff über Netze überregional, ortsungebunden
- Weiche bis harte Zeitanforderungen
- Umfangreiche Interaktion
- Netze von Sensoren/Aktuatoren
- Vernetzung innerhalb der Systeme und nach außen
- Dedizierte Nutzerschnittstellen: Starke Integration in Handlungsabläufe
- Einsatz unter oft schwierigen physikalischen Randbedingungen
- Langzeitbetrieb

- Automatisierung, Adaptivität, Autonomie
- Hohe Anforderungen an:
    - Funktionale Sicherheit
    - Zugriffssicherheit und Datenschutz
    - Zuverlässigkeit
    - Hoher Kostendruck

Eine Beispielanwendung für eingebettete Systeme findet sich in Kernkraftwerken. Für das Sicherheitssystem zur Notabschaltung gelten höchste Sicherheitsanforderungen. Die erforderliche höchste Zuverlässigkeit führt zwingend auf einen hohen Automatisierungsgrad.

2.2 AUSPRÄGUNGEN VON SYSTEMEN MIT EINGEBETTETER SOFTWARE

Wie bereits dargestellt gibt es sehr unterschiedliche Ausprägungen von Systemen mit eingebetteter Software – angefangen von einfachen Anbindungen bis hin zu globalen Netzwerken mit vielfältig eingebundenen Systemen. Grob lassen sich die Systeme wie folgt in Kategorien einteilen:

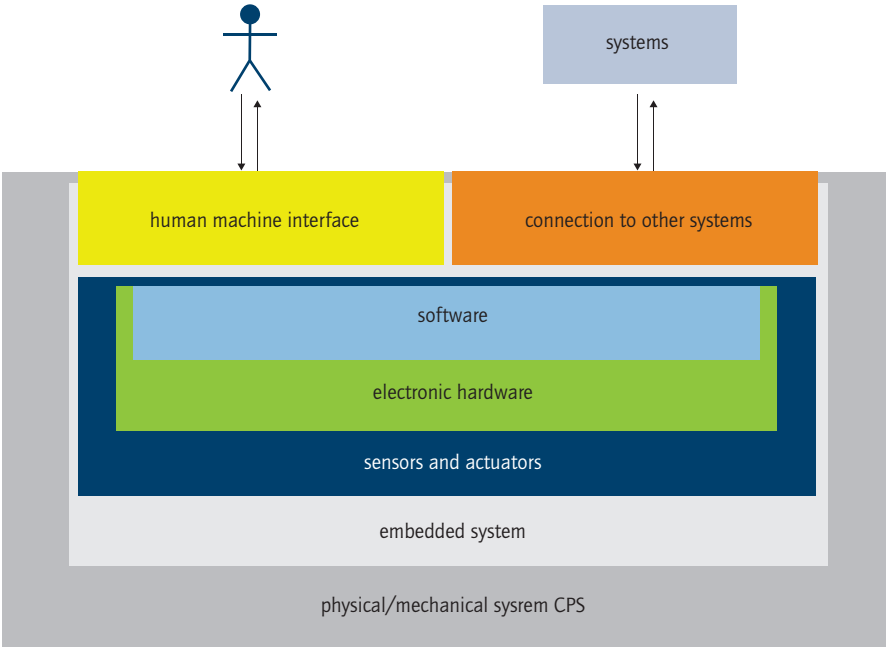
- Lokale, isolierte, auf eine Funktion ausgerichtete Kontroll- und Regelungsaufgaben: Ein Steuergerät, einfache Nutzungsschnittstelle
- Multifunktionale Systeme, unvernetzt: Mehrere Steuergeräte, oft komplexe Nutzungsschnittstellen, funktionale Abhängigkeiten
- Lose vernetzte Systeme: Mehrere Steuergeräte, komplexe Nutzungsschnittstelle, lose Vernetzung nach außen, Vernetzung nur eingeschränkt funktions- bzw. sicherheitskritisch
- Netzwerke von funktional eng gekoppelten Systemen: Mehrere Netzwerke von Steuergeräten mit komplexen Nutzungsschnittstellen, enge Vernetzung untereinander und nach außen, Vernetzung stark funktions- bzw. sicherheitskritisch
- Systeme von Systemen: Global vernetzte Systeme – Beispiel Internet der Dinge, Cyber-Physical Systems

In Rahmen der Cyber-Physical Systems können die unterschiedlichsten Systeme integriert und vernetzt werden.

2.3 ZWIEBELSCHALENARTIGE STRUKTUR VON CPS

Die Struktur von Cyber-Physical Systems kann man am besten mit einem Zwiebelschalenmodell wie in Abb. 1 darstellen. Diese Systeme stellen in vielfältiger Weise sogenannte Systems of Systems dar, das heißt es werden Systeme geschaffen, die immer wieder mit anderen Systemen zu übergeordneten Systemen zusammengefügt werden.

Abbildung 1: Zwiebelschalenstruktur der CPSs



3 WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

Cyber-Physical Systems stellen eine vielfältige wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Herausforderung dar. Sie erfordern das Zusammenführen ganz unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen und Welten.

3.1 ANALOGE UND DIGITALE WELT

Die digitale Informationsverarbeitung hat ihre völlig eigenen Modelle und Vorstellungen geschaffen. Dies umfasst Modelle zur Darstellung digitaler Verarbeitung für die Erfassung von Daten, von Prozessen und Architekturen. Die so entstandenen Modelle sind im Kern digital, bedienen sich also zunächst in keiner Weise der klassischen kontinuierlichen Mathematik der Differenzial- und Integralrechnung, sondern basieren auf diskreter Logik. Die physikalische Welt hingegen ist in weiten Teilen durch eben diese kontinuierliche Mathematik modelliert. Damit erfordern Cyber-Physical Systems die Zusammenführung zweier im Ursprung zunächst sehr unterschiedlicher mathematischer Modelle und Sichten auf Systeme.

Das Zusammenführen der physikalisch-analogen Welt und der informatischen digitalen Welt („Cyberspace") erfordert integrierte Systemsichten und -modelle. Dabei

sind die Wechselwirkungen und Schnittstellen der Teilsysteme mit wissenschaftlicher Präzision zu erfassen und modellieren. Dafür sind geeignete Abstraktionsebenen zu finden, für die Erfassung und Behandlung von Qualität, Daten, Struktur und Verhalten einschließlich Zeit. Benötigt wird ein umfassender Ansatz für Engineering (Stichwort: Systems Engineering).

3.2 DIE VISIONEN

Das Potential der Cyber-Physical Systems äußert sich nicht zuletzt in einer Vielzahl unterschiedlicher, oft visionärer Bilder, die einen Geschmack davon geben, welche vielfältigen Vorstellungen mit Cyber-Physical Systems verbunden werden. Jeder der nachstehend kurz aufgeführten und knapp erläuterten Begriffe zeigt eine spezifische Sichtweise, oft auch nur Ausschnitte von Cyber-Physical Systems, die das Potential dieser Systeme unterstreichen.

- Smart Objects/Smart Devices: Ein Smart Device („intelligenter" Gegenstand) ist ein Gerät, das digital, aktiv, vernetzt sowie für Benutzer konfigurierbar ist und in Teilen autonom funktioniert.
- Ubiquitous Computing: Zielt auf die Rechnerallgegenwart (allgegenwärtiges (ubiquitäres) Rechnen) bezeichnet die Allgegenwärtigkeit (Ubiquität, engl. ubiquity) der rechnergestützten Informationsverarbeitung.
- Pervasive Computing: Pervasive Computing (engl. pervasive – durchdringend, um sich greifend) bezeichnet die alles durchdringende Vernetzung durch den Einsatz „intelligenter" Gegenstände.
- Nomadic Computing: Standortunabhängige Berechnungskonzepte
- Mobile computing: Tragbare Rechner
- Ambient Intelligence: Massive Vernetzung über Sensoren, Funkmodule und Computer.
- Organic Computing ("Biologically-inspired computing with organic properties"): Systeme mit Komponenten, die in der Lage sind, auch in unvorhergesehenen Situationen sinnvoll zu reagieren, sich in ihrem Verhalten aufeinander und mit der Umgebung abzustimmen und sich anzupassen und sich selbst zu organisieren.
- Self-X-Systems: Systeme mit bestimmten Formen der Adaption und Selbstorganisation.
- Real World Awareness: Geräte mit Kontextinformation über ihre Umgebung, die sich in ihrem Verhalten an Besonderheiten der Umgebung anpassen.
- Internet of Things: Elektronische Vernetzung von Gegenständen des Alltags
- Internet of (physical) services; Elektronische Vernetzung von (auch physischen) Diensten des Alltags
- Systems of Systems: Hierarchische Vernetzung und Integration von Systemen zu immer umfassenderen Systemen

– Cyber-Physical Systems: Enge Vernetzung physischer Vorgänge (über Sensoren, Aktuatoren, mobile Geräte) mit digitalen Diensten (über digitale Netzen).

Das Erschließen des Potentials, das in diesen Visionen sichtbar wird, wird allerdings nur möglich sein, wenn eine Reihe von wissenschaftlichen Herausforderungen bewältigt wird.

3.3 WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN FÜR CPS

Die wissenschaftlichen Herausforderungen der Cyber-Physical Systems stellen sich in zweierlei großen Themenkomplexen dar. Der eine ist die Beherrschung der Entwicklung und Gestaltung entsprechender Systeme im Hinblick auf die Vielzahl der geforderten Eigenschaften. Der andere ist die Erschließung der unterschiedlichsten Anwendungsgebiete durch spezielle Eigenschaften von Cyber-Physical Systems und deren Ausprägung. Damit kommt ein drittes hinzu – das Erschließen unterschiedlicher Anwendungsgebiete für Cyber-Physical Systems.

Diese Themen umfassen viele zahlreiche Einzelfragestellungen:

ENGINEERING - BEHERRSCHUNG PROZESS

- Anforderungen und Spezifikation: Vollständigkeit, Konsistenz, Validität der Anforderungen
- Architekturen: Dekomposition: Frühe Bewertung, Validierung und Verifikation: Hardware/Software Codesign
- Codegenerierung
- Integration
- Umfassende Modellierung und Beschreibung der Systeme und ihrer Eigenschaften
- Qualitätssicherung: Testfallerzeugung, Validieren & Verifizieren, Automatisierte Analysen
- Concurrent Engineering
- Distributed Engineering
- Arbeitsteilige Entwicklung
- Interdisziplinäre Entwicklung
- Sicherheit: Daten- und Zugriffssicherheit, Funktionale Sicherheit
- Artefaktmodelle
- Gestaltung Mensch Maschine Interaktion
- Langzeitbetrieb und Evolution
- Wartbarkeit
- Adaptivität und Context-Awareness
- Produktlinien

TECHNIK

- Bussysteme
- Parallelität und Multicore

Diese hohe Vielfalt von Themen ist im Einzelnen zu bewältigen aber auch in ihrem Zusammenspiel.

3.4 DAS ZIEL

Das Ziel all dieser Themen ist die umfassende Beherrschung der Entwicklung und Evolution von Cyber-Physical Systems im Hinblick auf Qualität, Kosten und Time to Market.

3.5 WISSENSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN

Die soweit angesprochenen wissenschaftlichen Herausforderungen liegen vor allem im Grundlagenbereich. Heute sind Cyber-Physical Systems oft stark geprägt und motiviert durch eine Realisierung bestimmten, nahe liegender Anwendungen. Dabei ist alles darauf ausgerichtet, in einem bestimmten Anwendungsgebiet die Probleme zu lösen und eine Umsetzung zu realisieren. Dabei wird oft übersehen, dass für Cyber-Physical Systems ganz grundsätzliche Probleme zu lösen sind, die oft von viel grundlegenderem und grundsätzlicherem Charakter sind als dies im spezifischen Anwendungsgebiet auf den ersten Blick sichtbar ist. Nur wenn es gelingt, diese wissenschaftlichen Herausforderungen klar zu identifizieren und zu bearbeiten, wird schrittweise eine Abkehr von den entsprechenden Adhoc-Techniken, die sich heute vielfältig finden, gelingen. Das Ergebnis ist dann ein umfassendes methodisches und technisches Portfolio, das anwendungsgebiet-übergreifend einsetzbar ist.

FORSCHUNGSTHEMEN: WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN DER SYSTEMMODELLIERUNG

- Verhaltensmodellierung - Modularität
- Modellierungssichten - Abstraktion
- Sichtenintegration
- Modellierung quantitativer und qualitativer Eigenschaften
- Integrierte Modellierung Mechanik/Elektronik/Software
- Zeitmodellierung: Diskrete vs. kontinuierliche Zeit, Synchronisation
- Probabilistische Modellierung
- Nebenläufigkeit
- Verteilung
- Interaktion
- Diskrete Ereignissysteme vs. kontinuierliche Systeme: Hybride Systeme, Diskrete und Kontinuierliche Datenströme, Diskrete Ereignissysteme
- Spezifische Systemeigenschaften: Safety, Security, Interoperabilität, Adaptivität,

Autonomie, Self X, Dynamische Reconfiguration
- Qualität: Zuverlässigkeit, Performanz, Usability, Bewertung
- Mensch Maschine Interaktion
- Assistenzsysteme

Die Aufzählung dieser vielfältigen Punkte zeigt bereits, welcher Umfang von wissenschaftlichen Forschungsherausforderungen zu bewältigen ist.

3.6 ANWENDUNGSDOMÄNEN

Aber nicht nur diese grundlegenden Fragestellungen im Hinblick auf Engineering und Systemmodellierung sind zu lösen. In vielen Anwendungsgebieten ist die Erschließung des Anwendungsgebietes eine wissenschaftliche Herausforderung für sich. Die Gründe liegen auf der Hand. Will man entsprechende Systeme mit ihrem hohen Automatisierungs- und Vernetzungsgrad gewinnbringend einsetzen, so erfordert dies viel tiefere Einsichten in das Anwendungsgebiet und seine Anforderungen.

- Verkehr, Verkehrsmittel: Zug, Kfz, Schiff, Fluggerät, Verkehrssteuerung
- Medizintechnik
- Kommunikation
- Automatisierungs- und Produktionstechnik
- Facility Management
- Consumer Systems / Infotainment
- Banking
- Energie
- Verteidigung
- etc.

Jedes dieser Gebiete stellt für sich eine Forschungsherausforderung dar, die einhergeht mit hohem wirtschaftlichen Potential und Möglichkeiten.

3.7 DAS ZIEL

Aufgrund des hohen Potentials der Cyber-Physical Systems, sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht, als auch in Hinsicht auf einen tiefgreifenden Nutzen für unsere Gesellschaft, ist die Befähigung, solche Systementwicklungen gestalten zu können, unverzichtbar. Dies aber wird nur ermöglicht über die Beherrschung aller Facetten, die angesprochen sind. Die umfassende Bereitstellung aller wissenschaftlichen Grundlagen für das Engineering von Cyber-Physical Systems, einschließlich Modellierung und Analyse, schafft die Basis für deren systematische Entwicklung.

4 CPSs ÄNDERN UNSERE MÖGLICHKEITEN ...

Cyber-Physical Systems ändern unsere Möglichkeiten in entscheidender Hinsicht. Sie erschließen Potentiale, die anderweitig kaum zu erschließen sind, da durch sie eine umfassende Zusammenführung und Interpretation unterschiedlichster Aspekte möglich wird.

4.1 DIE SCHIER UNBEGRENZTE EINSATZBREITE ...

Im Folgenden wird noch einmal eine kurze Übersicht über die wichtigsten Einsatzgebiete gegeben, die heute schon sichtbar sind. Weitere Einsatzgebiete sind bisher kaum im vollen Umfang einzuschätzen. Mit dem Entstehen neuer Lösungen in den aufgeführten Gebieten werden weitere Gebiete erschlossen werden.

- Mobile Telefonie
- Consumers Electronics
- Eingebettete Systeme im Verkehr
- Fly by Wire
- Softwarebasierte Funktionen im Automobil
- Verkehrssteuerung
- Produktion
- Robotik
- Medizintechnik
- Haustechnik
- Energienetze
- Assistenzsysteme
- Cash Systeme
- etc.

Die Zukunft wird zeigen, wie CPSs sich auf immer weitere Anwendungsgebiete ausdehnen werden.

4.2 CPSs BENÖTIGEN ÜBERGREIFENDE LÖSUNGEN

Dominierend für Cyber-Physical Systems ist ihre Vernetzung. Dies erfordert, dass wir in der Lage sein werden, die unterschiedlichsten Teilsysteme umfassend zu vernetzen und die Lösungen so anzulegen, dass diese Vernetzung für sich möglich ist. Entstehen nämlich Lösungen, die einer solchen Vernetzung nicht zugänglich sind, so bedeutet das, dass die Entwicklung der Möglichkeiten der Cyber-Physical Systems für dieses Gebiet für längere Zeit stark eingeschränkt ist.

- Einheitliche Terminologie
- Konzepte
- Modelle
- Werkzeuge
- Übergreifende Standards
- Konzepte für Interoperabilität
- Abgepasste Domänenmodelle: Domänenspezifische Sprachen

Dabei gilt das Prinzip: Übertragbare Lösungen schaffen Synergien.

4.3 SOFTWARE IST ÜBERALL

Cyber-Physical Systems haben schon heute unsere Welt in vielfältiger Weise durchdrungen. Wir sind im Alltag, im Verkehr, im Beruf, in der Medizin in vielfältiger Weise von Cyber-Physical Systems umgeben, die, wenn sie gut gestaltet sind, uns assistieren, begleiten und neue Möglichkeiten eröffnen. Entscheidend für die Funktionsfähigkeit und die Logik dieser Systeme ist die Software – entscheidend für die Zuverlässigkeit in hohem Umfang die technische Infrastruktur.

Im Sinne der Paradigmen der ubiquitären und pervasiven Systeme ist Software überall, durchdringt alles, setzt alles zueinander in Beziehung.

5 DER WEG IN DIE ZUKUNFT

Cyber-Physical Systems werden ein wesentliches Element der Gestaltung der Welt in der Zukunft. Ihre Beherrschung ist nicht nur aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen unverzichtbar. Von gleicher Bedeutung sind diese Systeme für die gesellschaftlichen Möglichkeiten zur Verbesserung unserer Sicherheit, unseres Komforts, unserer Kommunikation. Unnötig zu sagen, dass die verantwortungsbewusste Gestaltung von Cyber-Physical Systems dabei ein wesentlicher Faktor ist.

Die Erschließung der Potentiale von Cyber-Physical Systems erfordert aber vor allem das Überwinden von Grenzen – Grenzen zwischen Disziplinen, Grenzen zwischen Technologien, Grenzen zwischen Anwendungsgebieten und Grenzen zwischen wissenschaftlichen Interessengruppen.

Dies erfordert die Bewältigung umfangreicher, vielschichtiger Problemfelder:

- Interdisziplinarität: Überwindung der Grenzen der Disziplinen - in den wissenschaftlichen Disziplinen, in den Applikationsdomänen
- Ausbildung und Kompetenzaufbau: Beherrschung von Cyber-Physical Systems auf allen Ebenen
- Erarbeitung und Vervollständigung der wissenschaftlichen Grundlagen
- Schaffung eines unfassenden Ansatzes für das Engineering
- Methoden und Modelle
- Prozess

- Werkzeugunterstützung - Automatisierung
    - Besondere Herausforderung
    - Anforderungsbeherrschung
    - Domänenmodellierung
    - Komplexitätsbeherrschung
    - Kostenmanagement

Die Gestaltung von Cyber-Physical Systems ist eine der größten wissenschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit.

LITERATUR

Broy 2006
Broy, M.: The ‚Grand Challenge' in Informatics: Engineering Software-Intensive Systems. In: IEEE Computer 39 (2006), S. 72 – 80.

Lee 2008
Lee, E.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. Technical report. Berkeley: University of California, 2008.

> INNOVATION IM MITTELSTAND AM BEISPIEL DER SENKUNG VON MOBILITÄTSKOSTEN DURCH „SCHWARMINTELLIGENZ“

HIERONYMUS FISCHER

ABSTRACT

Die zunehmende Vernetzung von Einzelsystemen im Fahrzeug wird durch den Einsatz weiterer Kommunikationsverbindungen (CAR2X-Kommunikation) zu einer hierarchischen Struktur führen, die den Austausch von Informationen zwischen einer Vielzahl von verteilten heterogenen Subsystemen auf mobilen und stationären Plattformen ermöglicht. Die primären Ziele einer solchen Vernetzung von Cyber-Physical Systems sind die Bereitstellung neuer Dienste im Fahrzeug, die Erhöhung der Verkehrssicherheit sowie die effektive Steuerung der weiter wachsenden Verkehrsströme.

Im Hinblick auf die Steigerung der Energieeffizienz von zukünftigen Mobilitätskonzepten erwachsen hieraus neue Möglichkeiten: (1) Eine Koordinierungsinstanz im Fahrzeug regelt das intelligente Zusammenspiel der Komponenten, bilanziert und steuert die Energieströme und sorgt auf diesem Wege für eine Optimierung des jeweils fahrzeugeigenen Energieverbrauchs. Diese Optimierung hat insofern zunächst nur lokalen Charakter, als dass die Randbedingungen fahrzeugseitig als unabänderliche und zum großen Teil auch unbekannte Größen vorgegeben sind. (2) Nun steht aber diese Koordinierungsinstanz zugleich in Kontakt mit anderen Fahrzeugen in der Nähe und auf der geplanten Fahrstrecke sowie deren Einzugsbereich. Durch den Austausch geeigneter Informationen zum Verkehrszustand, der Fahrtrichtung, dem Fahrverhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, den Wetterbedingungen etc. zwischen diesen Fahrzeugen können somit im zweiten Schritt zusätzliche, globale Größen in die Optimierung einfließen – und dies nicht nur beim eigenen System, sondern bei allen solchermaßen kommunizierenden Fahrzeugen: Die Bilanzierung der Energieströme wird nun auf der höheren Systemebene der Gesamtheit von Fahrzeugen (dem „Schwarm“) durchgeführt und erlaubt so die Schöpfung höherer Energieeffizienzpotentiale.

Um dieses Konzept zu realisieren, sind softwareintensive eingebettete Systeme unabdingbar. Im Beitrag wird exemplarisch aufgezeigt, welche Möglichkeiten und Grenzen der Ansatz hat, wie die Potentiale einzuschätzen sind und was wir tun müssen, um damit „Schwarmintelligenz“ umzusetzen.

1 MOTIVATION

Das hochkomplexe Verhalten von Tieren in großen Gruppen versetzt den aufmerksamen Beobachter immer wieder in Erstaunen. Im Spätsommer gewahrt der Blick in den Him-

mel Schwärme von Zugvögeln, die, scheinbar wie auf ein Kommando, in rascher Folge die Richtung wechseln und dabei auch schwierige Flugmanöver ganz ohne Kollisionen meistern. Gelegentlich lässt sich ein Schwarm, als hätten alle Vögel gemeinsam genau dieses Ziel lange schon untereinander „abgestimmt", zum Zwischenstopp auf einer elektrischen Überlandleitung nieder, nur, um nach einer geschwätzigen Ruhepause alle zugleich munter zum Flug anzuheben und ebenso gewandt wie verlässlich die ursprüngliche Schwarmformation wieder einzunehmen. Auf äußere Einflüsse, z.B. die Anwesenheit von Fressfeinden, reagiert die Formation als Ganzes, scheinbar als koordinierte Einheit. Gerade so, als gäbe es einen Plan des Schwarms, wie mit derlei Störungen umzugehen sei. Aus Sicht des Beobachters gehen die Einzelindividuen im Schwarm auf und verleihen ihm so quasi wesenhafte Existenz.

Noch eindrucksvoller, ist das Verhalten von Fischschwärmen: Blitzartige Bewegungen von tausenden Fischen auf engstem Raum lassen den Eindruck entstehen, es handele sich um ein einziges riesiges Individuum. Beim Angriff von Räubern zeigen Fischschwärme vielfach sehr komplexes Verhalten. Manche Arten teilen den Schwarm und bieten dem Angreifer so zwei divergierende Ziele, zwischen denen er sich entscheiden muss. Andere strömen plötzlich mit hoher Geschwindigkeit auseinander und lassen den Schwarm quasi explodieren: Der Angreifer stößt ins Leere. Nochmals andere vollziehen augenblicklich rasche Ausweichmanöver und bringen sich, zur Desorientierung des Angreifers, hinter denselben.[1] So verschieden die Strategien auch sein mögen, allen Arten gemein ist ein dem Wohle der Gesamtheit der Individuen (des Schwarms) höchst zweckdienliches Verhalten. Der einzelne Schwarmfisch verhält sich offenbar so, dass nicht nur er selbst, sondern dass die Gemeinschaft aller Individuen möglichst wenig gefährdet wird.

Auch manche Säugetierarten zeigen Schwarmverhalten: Wölfe organisieren sich in Rudeln und steigern so ihre Erfolgschancen bei der Jagd. Ein gleiches beobachtet man bei Löwen, die ebenfalls in der Gruppe jagen. Ihre potenziellen Opfer wiederum, z.B. Antilopen oder Gazellen, leben zusammen in Herden und zeigen beim Angriff ihrer Feinde ein abgestimmtes Fluchtverhalten, das dem Löwenrudel die Trennung eines einzelnen Tiers von der Herde erschwert und damit die Überlebenswahrscheinlichkeit der Einzelindividuen erhöht.

Die bemerkenswertesten Beispiele von Schwarmintelligenz finden sich bei einer Reihe von Insektenarten, z.B. bei Ameisen oder Bienen. Das vielgestaltige Sozialverhalten von Bienenvölkern mit einigen zehntausend Individuen ist ein Musterbeispiel für Schwarmintelligenz. Die Nahrungssuche, die Brutpflege, die Verteidigung des Bienenstocks werden zum Wohle des ganzen Volkes arbeitsteilig organisiert. Es verwundert, dass dies alles ganz ohne eine koordinierende Instanz möglich ist. Mittels ausgefeilter Bewegungsmuster tauschen die Bienen untereinander Informationen aus: So dient der bekannte Schwänzeltanz zum Anzeigen von neuen Futterquellen. Andere Ausdrucks-

[1] Vgl. Pintscher 2008.

möglichkeiten erlauben ihnen die Verständigung hinsichtlich der Erledigung einer Reihe von weiteren für den Stock wichtigen Aufgaben. Die einzelne Biene kann man kaum als intelligent bezeichnen. Und doch entsteht durch das einigen wenigen einfachen Regeln gehorchende geordnete Zusammenwirken ein komplexes Gesamtgebilde hoher Effektivität.

In dieser Hinsicht unübertroffen erscheinen Ameisenstaaten mit bis zu mehreren Millionen Individuen. Sie faszinieren in ihren perfekt durchorganisierten, hochkomplexen Abläufen. Im Ameisenstaat erledigen Gruppen von Individuen unterschiedliche Aufgaben: Die Nahrungssuche, der Transport von Nahrung oder Baumaterial, die Wegesicherung, der Nestbau oder die Brutpflege, und vieles andere mehr. Dabei ist jeweils eine gewisse Anzahl von Arbeiterinnen auf bestimmte Tätigkeiten spezialisiert. Ändern sich die Umgebungsbedingungen, dann passt sich der Staat darauf sehr schnell und zielgerichtet darauf an. Werden aufgrund von zerstörenden äußeren Einwirkungen z.B. mehr Individuen für die Nestpflege (den „Wiederaufbau") benötigt, so stellt ein gewisser Anteil von Ameisen die bisherige Tätigkeit ein und widmet sich den vorrangig wichtigen Reparaturarbeiten am Bau. Auch dies ohne Zutun einer Managementinstanz.

Zusammenfassend betrachtet ist genau dies das hervorstechende Merkmal des Phänomens Schwarmintelligenz: Die Dinge geschehen ohne zentrale Koordination und dennoch zielgerichtet und wirkungsvoll. Das führt uns unmittelbar zur Frage, auf Basis welch anderer Mechanismen die durchaus vielschichtigen Aufgaben mit solch hoher Effizienz bewältigt werden können?

2 WAS IST SCHWARMINTELLIGENZ?

Schwarmindividuen, wie wir sie in der Natur beobachten, sind meist recht einfach, wenig intelligent und alleine nicht in der Lage, komplexe Aufgaben zu bewältigen. Trotzdem gelingt es ihnen, durch das Zusammenwirken im Schwarm, auch schwierige Herausforderungen zu meistern. Wir haben oben einige Beispiele dazu gesehen.

Die Regeln zum Beschreiben von komplexem Schwarmverhalten sind überraschend einfach. Am Beispiel von Fischschwärmen sei dies kurz erläutert. Nach Reynolds[2] sind hier im Wesentlichen nur drei Prinzipien bestimmend:

- Einhaltung eines bestimmten Abstands zum Nachbarn (Separation)
- Bewegung in die durchschnittliche Richtung der Nachbarn (Alignment)
- Anstreben der durchschnittlichen Position der Nachbarn (Cohesion)

Die zugrundeliegenden Regelmechanismen sind nach Struktur und Abhängigkeit für die unterschiedlichen Arten höchst verschieden. Fast immer aber lässt sich zeigen, dass das Gesamtverhalten des Schwarms letztlich auf die individuelle und lediglich lokalen Einflüssen unterliegende Befolgung von wenigen Grundsätzen zurückgeführt werden kann.

2 Vgl. Reynolds 1987.

Ameisen z.B. hinterlassen bei der Suche nach Nahrungsquellen Duftspuren (sogenannte Pheromone). Natürlich verflüchtigen sich diese Spuren im Laufe der Zeit. „Je öfter aber eine oder mehrere Ameisen innerhalb eines kurzen Zeitraums auf demselben Weg gehen, umso intensiver ist diese Markierung. Dies führt dazu, dass immer mehr Ameisen diesen Weg benutzen, dabei erneut Pheromone hinterlassen und weitere Nahrung in den Bau transportieren, bis die Quelle erschöpft ist. Ein kurzer Weg zu einer guten Nahrungsquelle wird also bevorzugt, da die Pheromonspur hier besonders intensiv ist. Für einen großen Ameisenstaat ist das eine sehr effiziente Methode, die ohne Intervention und Management einer einzelnen höheren Instanz auskommt und nur auf lokalen Informationen basiert. Eine einzelne Ameise muss keinen Überblick über alle Vorgänge im Staat haben, um zu entscheiden, an welchem Ort sie nach Nahrung suchen soll. Sie trifft diese Entscheidung allein auf Grundlage der Pheromonspur und dadurch mittels Kommunikation mit anderen Ameisen."[3].

Auch große Menschenmengen zeigen unter bestimmten Bedingungen schwarmähnliches Verhalten. Das kann man z.B. beobachten bei Strömen von Fußgängern. In Paniksituationen verhalten sich Menschen weniger wie Einzelwesen, die individuell aufgrund genauer Situationsanalyse zu rationalen Entscheidungen kommen, als vielmehr wie Teile eines großen Ganzen, ähnlich eines gesamthaft agierenden Schwarms. Gegenwärtig sind viele Fragestellungen hierzu noch Gegenstand der Forschung.

Das, was der Beobachter als komplexes Verhalten des Schwarms wahrnimmt, lässt sich in Summe verstehen als die Einhaltung von einigen grundlegenden, einfachen Prinzipien durch die Einzelwesen. Wobei eines hinzukommt: Der Schwarm als Ganzes zeigt auf der Makroebene Eigenschaften und Strukturen, die es rechtfertigen, ihn als emergentes System aufzufassen. Das aufgrund lokaler Informationen geregelte Verhalten der Gruppenmitglieder ermöglicht es so der Gesamtheit, Aufgaben zu lösen, die das Vermögen der einzelnen Individuen bei weitem übersteigen. Wir können also in aller Kürze resümieren:

Schwarmintelligenz entsteht durch das komplexe und spezifischen Regeln unterliegende Zusammenwirken einer großen Anzahl von Individuen.

Was können wir daraus lernen? Wie können wir uns die zugrundeliegenden Mechanismen in technischen Systemen nutzbar machen, z. B. für die Senkung von Mobilitätskosten?

3 CYBER-PHYSICAL SYSTEMS: WEGBEREITER FÜR „SCHWARMINTELLIGENZ"

Der Terminus Cyber-Physical Systems (CPS) steht für hoch vernetzte eingebettete Systeme einer neuen Generation. Das Neue gegenüber dem, was man schon lange als eingebettete Systeme bezeichnet und das im Kern eine spezialisierte, echtzeitfähige Kombination von Hard- und Software meint, ist die Vernetzung mit anderen eingebetteten Systemen und Zentralrechnern. Eingebettete Systeme im Sinne von CPS verfügen über

3 Zitiert nach Pintscher 2008, S. 2.

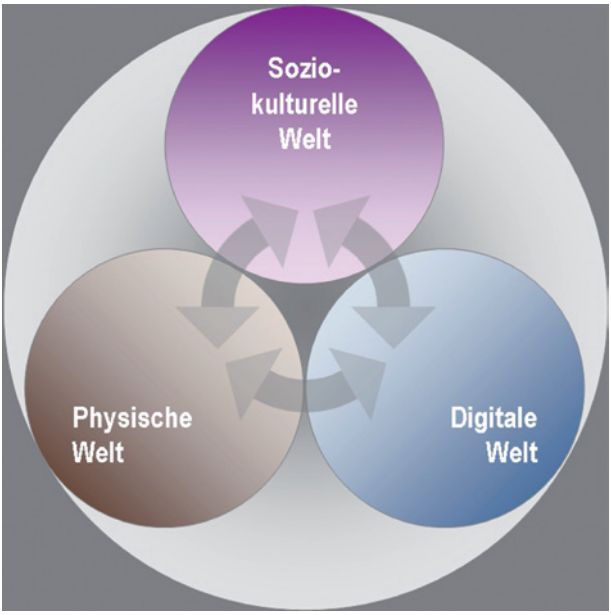
Sensoren (licht- oder schallempfindliche Elemente, Positionsgeber, Temperaturmesser, Druck- und Dehnmesser, Kamerasysteme, Antennen, ...), Aktoren (Scheinwerfer, Lautsprecher, Stellmotoren, Radar- und Lasersubsysteme, ...). Sie sind vernetzt mit anderen Systemen, verfügen über geeignete Komponenten zum Senden und Empfangen von Daten sowie der Rechenkapazität zu deren spezialisierter Verarbeitung in Echtzeit. Sie stehen also gewissermaßen mit der physischen Welt in Kontakt, rezipieren und stimulieren, kommunizieren und prozessieren.

Vor Ort erheben sie Daten, verarbeiten diese in komplexen Algorithmen und leiten sie weiter an andere eingebettete Systeme und große zentrale Rechenanlagen. Und sie empfangen auf dem gleichen Wege auch Daten von Hochleistungsrechnernetzen, von Datenbanken oder von anderen eingebetteten Systemen mit ganz spezifischen Ausstattungen an Sensoren und Aktoren. Das erlaubt es ihnen, die empfangenen Daten mit den selbst erhobenen in Beziehung zu setzen, sie weiter zu verarbeiten und dadurch zu neuen Sichten über die physische Außenwelt zu gelangen. Eingebettete Systeme werden dergestalt Teil des Cyberspace. Als Cyber-Physical Systems sind sie die Schnittstelle des Cyberspace zur physischen Welt. Sie sind aber mehr als nur Schnittstelle, weil sie zugleich das lokal relevante Wissen über die physische Realität repräsentieren sowie über autonome Rechenkapazität zur Analyse und Interpretation des Datenmaterials (domänenspezifische Intelligenz) verfügen.

Zwei Dinge kommen hier also zusammen, fusionieren gleichsam: Die analoge Welt der physischen und die digitale Welt der virtuellen Realität [Broy 2010]. Dies gibt dem Cyberspace ein neues Gepräge: Das Virtuelle wird zum Realen, der digitale Prozess wird zum realen Ablauf, der in Software manifestierte Gedanke wird zur Tat, um dies einmal ganz kühn zu formulieren. Es entsteht damit etwas grundsätzlich Neues mit potentiell unendlich vielen Möglichkeiten, ein emergenter kybernetischer Kosmos der zunehmenden Konvergenz und im Ideal letztlich der „Vereinheitlichung von Modell und Realität". Konnten die Aktoren eines eingebetteten Systems bisher nur aufgrund lokaler Datenerhebung mittels eigener Sensoren und damit buchstäblich nur mit einem sehr begrenzten „Horizont" angesteuert werden, ist dies nun für CPS möglich in Abhängigkeit von nicht-lokalen und hochkomplexen Gesamtbeziehungen. Die Fähigkeiten von ursprünglich nicht vernetzten, ausschließlich vor Ort Daten sammelnden und agierenden Systemen werden damit potenziert.

Die Vernetzung von eingebetteten Systemen und ihre Integration in den Cyberspace hat noch eine weitere, eine gesellschaftliche Dimension: Neben der Verschmelzung der physischen und der digitalen Welt ermöglichen Cyber-Physical Systems als Drittes auch die Einbeziehung der sozio-kulturellen Welt in einer neuen Qualität. Wir erleben das teilweise schon heute, z.B. ist das Lesen oder Schreiben eines Internetblogs via iPhone oder das Twittern mit einem Smartphone nichts anderes, als das – zugegebenermaßen noch sehr rudimentäre – Zusammenbringen dieser drei Sphären.

Abbildung 1: Der kybernetische Kosmos



Worin liegt nun das wirklich radikal Neue? Ist es nur die Vernetzung von (bestehenden) eingebetteten Systemen? Eventuell noch um die eine oder andere Funktion angereichert? Oder ist es die Vernetzung dieser Systeme mit dem Internet? Nein, ganz so einfach ist der Ansatz nicht zu denken. Es geht im eigentlichen Sinne darum, die Struktur der Systeme, nach lokaler Fähigkeit und Vernetzung, auszurichten an der Struktur der umgebenden physischen Welt. Das ist der Grundgedanke: Die strukturelle Verwandtschaft zwischen den physischen Anwendungen und den sie abbildenden digitalen Prozessen.[4] Die physische Realität gibt also gewissermaßen die Architektur für das zu realisierende digitale Gesamtsystem vor.

Im Hinblick auf die Anforderungen an die Softwarearchitektur nennt Wedde als wichtige Strukturelemente von Cyber-Physical Systems u. a. „verteilte Kontrolle, bottom-up Management für geschichtete Kontrollstrukturen, (...) autonome Software Prozesse (... und) verteilte Lernstrategien (...)".[5] Mit diesen Begrifflichkeiten können wir, in wohlverstandener Umdeutung auf biologische Systeme, auch Schwarmverhalten adäquat beschreiben, ohne dies jetzt im Einzelnen zu belegen. Die Analogie zu den eingangs diskutierten Beispielen von Schwarmintelligenz ist an dieser Stelle gar nicht mehr fern.

Schwärme, wie wir sie in der Natur beobachten, sind das Ergebnis evolutionärer

4 Vgl. Wedde 2008.
5 Wedde 2008, S. 2.

Anpassung an gegebene und lange Zeit stabile Umweltbedingungen. Die „Architektur" des Schwarms, also die Regeln, nach denen die Schwarmindividuen miteinander kommunizieren, die Art und Weise, wie sich Umweltstimuli von einzelnen Individuen über Gruppen auf den Schwarm übertragen, die Prinzipien, nach denen der Schwarm als Ganzes quasi zu Entscheidungen kommt, wie er agiert, das alles bildet die obwaltenden Umgebungsbedingungen gleichsam kongruent ab. Im Umkehrschluss können wir uns von dieser Analogie auch leiten lassen im Hinblick auf den Entwurf von Cyber-Physical Systems sowie deren Vernetzung und strukturelle Einbindung in den Cyberspace, in einen emergenten kybernetischen Kosmos. Weiter unten werden wir einige Beispiele hierzu betrachten.

Wir begegnen Cyber-Physical Systems verschiedener Komplexität und unterschiedlichen Ausbaustufen bereits heute in einer Reihe von mehr oder minder ausgeprägten Anwendungen. Einige Beispiele:

> Mobilität

- Assistenzsysteme in Automobilen
- Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation
- Navigationssysteme (mit Auswertung von zentral erfassten Staumeldungen)
- (Weiteres dazu im nachfolgenden Kapitel)

> Telekommunikation

- Smartphones
- Mobiles Internet

> Organic Computing

- Die Übertragung der Prinzipien biologischer Systeme und Prozesse auf IT-Systeme bezeichnet man als Organic Computing. Ein wichtiges Stichwort in diesem Zusammenhang ist „Selbstorganisation". IT-Systeme, die den Prinzipien des Organic Computing folgen sind u. a. selbsterklärend, selbstheilend, selbstkonfigurierend, selbstoptimierend und selbstorganisierend (sogenannte Selbst-x Eigenschaften). Die Berührungspunkte zu den diskutierten „Schwarmsystemen" liegen auf der Hand. Auch eine Klasse von mathematischen Algorithmen kann man darunter subsumieren. Z.B. wird bei Bonabeau ein nach dem Prinzip der „Ant Colony Optimization" auf dem Verhalten von Ameisen beruhender Algorithmus zur Lösung des sogenannten Travelling Salesman Problems beschrieben.[6]

[6] Vgl. Bonabeau 1999.

> Selbstorganisierende kooperative Systeme

– „Swarm-Bots sind ein Ansatz, Schwarmverhalten in der Robotik anzuwenden. Mehrere kleine Roboter, sogenannte s-bots (...) sind ausgerüstet mit verschiedenen Motoren, Sensoren, Kommunikationskanälen und Greifern. Ein s-bot kann also Bewegungen ausführen, Informationen aus der Umwelt wahrnehmen, mit anderen s-bots kommunizieren und Objekte oder andere s-bots greifen und wieder loslassen. Durch die Verteilung der Hardware entsteht ein sehr robustes und ausfallsicheres System. Je nach Aufgaben können sie diese eigenständig lösen oder sich zu einem größeren Swarm-Bot (..) zusammenschließen indem sie sich mit Hilfe ihrer Greifer zu verschiedenen Formationen verbinden. Auf diese Weise können zum Beispiel auch größere Hindernisse wie ein Graben überwunden oder eine Last bewegt werden, die für einen einzelnen s-bot zu schwer wäre. S-bots fahren auf Rädern und Ketten und sind damit besonders beweglich. Kommunizieren können sie mit einer eingebauten Kamera und LEDs sowie Lautsprecher und Mikrofon. Anwendung sollen Swarmbots vor allem in der Rettung finden (...). Sie sind dafür aufgrund ihrer Robustheit, Geländegängigkeit, geringen Größe und Beweglichkeit besonders gut geeignet. Einsatzszenarien beinhalten zum Beispiel das Auskundschaften eines einsturzgefährdeten Gebäudes nach Überlebenden nach einem Erdbeben. Hier könnte ein Swarm-Bot wertvolle Erkundungsarbeit leisten und lebenswichtige Informationen für die Rettungskräfte liefern."[7]

> Smart Grid

– Vernetzung und Integration dezentraler Energiequellen und -speicher Smart Grid (oder Smart Power Grid) wird eingeschätzt als eine Schlüsseltechnologie für die effektive Realisierung von Elektromobilität. Einer der Grundgedanken ist die Nutzung der Batteriekapazitäten von Elektrofahrzeugen als temporäre Speicher für elektrische Energie. In Zeiten schwacher Netzauslastung werden die Batterien der Fahrzeuge geladen. Umgekehrt wird die gespeicherte Energie zu Stoßzeiten teilweise wieder in das Netz eingespeist. Die Erwartung ist, dass sich damit die heute bestehenden starken zeitlichen Diskontinuitäten zwischen Stromangebot und Stromnachfrage weitgehend entzerren lassen. Z.B. können damit Windkraft- und Solaranlagen effektiver genutzt werden. Kraftwerke mit fossilen Energieträgern können stets im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Das aufwändige Hoch- und Herunterfahren großer Anlagen kann weitgehend reduziert werden. Im Ergebnis wird damit der Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugung höher. Manch neues Kraftwerk wird entbehrlich, weil bestehende Kapazitäten optimal genutzt werden können. Erste Ansätze und Feldversuche hierzu gibt es bereits. Um die volle Komplexität des Ansatzes zu realisieren sind indessen noch viele Probleme zu lösen (s. a. Abschnitt 4.6).

---

7 Zitiert nach Pintscher 2008, S. 10.

Die Vernetzung der CPS untereinander und die Integration in den Cyberspace sind noch weit entfernt vom oben skizzierten Idealbild. Die sich bietenden Potentiale sind noch lange nicht ausgereizt. Und doch lässt sich bereits erahnen, was künftig möglich sein wird.

4 ANWENDUNGSBEISPIELE AUS VERKEHR UND INFRASTRUKTUR

Im Folgenden gehen wir auf einige Beispiele von erfolgversprechenden Anwendungsgebieten für Cyber-Physical Systems aus Verkehr und Infrastruktur näher ein.

4.1 INTELLIGENTES KREUZUNGSMANAGEMENT

Der Verkehr an Kreuzungen wird heute durch mehr oder weniger starr geschaltete Ampelanlagen gesteuert. Man kann solche Anlagen aber auch – in Analogie zum Schwarmverhalten – mittels lokal von den Fahrzeugen gesammelten Verkehrsdichteinformationen in den verschiedenen Richtungen regeln. Nachfolgend wird das kurz skizziert:

> Ziel: Verkehrsflussoptimierende Ampelschaltung

- Sammlung von Verkehrsinformationen via Car2X-Kommunikation
- Entscheidung basierend auf der Bilanzierung des Gesamtnutzens für die Rot- und Grünphase
- Kommunikation des Ampelstatus an die Verkehrsteilnehmer z.B. Umschalten auf Grün in xx Sekunden (Information zum Schalten des Motors, z.B. nicht abschalten, wenn bestimmte Dauer der Grünphase unterschritten wird)
- Kommunikation von benachbarten Ampelanlagen im Hinblick auf kooperatives Verhalten (Ampeln tauschen den bestehenden und den in naher Zukunft eingenommenen Status untereinander aus)

> Einflussfaktoren

- Fahrzeugdichte auf allen einfallenden Straßen der Kreuzung
- Fahrtrichtung und Geschwindigkeiten der Fahrzeuge (Fahrzeuge melden die erforderlichen Daten anonym an die in ihrer Fahrtrichtung liegenden Ampeln)
- Datum, Wochentag, Tageszeit (Berufsverkehr)
- Prioritäten der Fahrzeuge (z.B. Feuerwehr, Notarzt, Polizei mit höchster Priorität)

> Nutzen

- Gesteigerter Verkehrsdurchsatz
- Reduzierung des CO2-Ausstoßes durch Senkung der nötigen Beschleunigungszyklen (Stopp & Go)
- Frühe Vermeidung von Stopps durch Prädiktion auf Basis der Fahrtrichtungsinformation von den Fahrzeugen und der Kommunikation von Ampeln untereinander
- Stressreduzierung durch Vermeidung unnötiger Rotlichtphasen (kooperative Ampeln), z.B. leere Kreuzung nachts

4.2 IDENTIFIZIERUNG MÖGLICHER FAHRGEMEINSCHAFTEN

Ein hohes Potential hinsichtlich der Reduzierung des Energieverbrauchs für Mobilität liegt darin, unnötige Fahrten zu vermeiden und Fahrzeuge, die bestimmte Strecken ohnehin befahren, möglichst optimal auszunutzen. Fahrgemeinschaften im Berufspendelverkehr sind nicht wirklich etwas Neues. Ihr Zustandekommen beruht aber oft doch mehr oder weniger auf Zufälligkeiten. Hier ist denkbar, auf Basis von einigen harten Eigenschaften wie Start und Ziel, Zeit, aber auch eher sozialen Faktoren, wie Fahrstil, Musikgeschmack etc., mögliche Partner für Fahrgemeinschaften systematisch zu ermitteln.

> Ziel: Identifizierung möglicher Fahrgemeinschaften

- Übereinstimmungsgrad der Interessen anhand verschiedener Einflussfaktoren bestimmen
- Transparenter Austausch der Einflussfaktoren via Car2X-Kommunikation oder Smartphone
- Empfehlung zum Bilden der Fahrgemeinschaft durch Kommunikation via Car2X oder Smartphone

> Primäre Einflussfaktoren

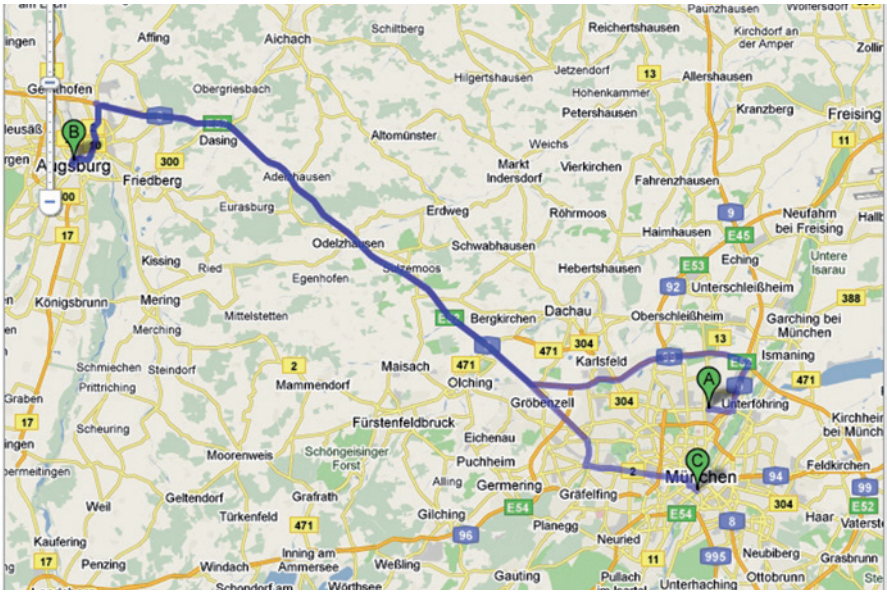
- Start-/Zielkoordinaten der Routen Beispiel: Start: München Nord, Ziel: Augsburg →←Start: München Zentrum, Ziel: Augsburg
- Abfahrtszeitpunkte der Routen Beispiel: ca. 7:30 Uhr →← ca. 7:00 Uhr
- Häufigkeiten der Routen Beispiel: Mo-Do →← Di-Fr

> Sekundäre Einflussfaktoren

- Fahrstil: Offensiv →← Defensiv
- Musikgeschmack: Klassik →← Techno
- Kommunikationsfreudigkeit
- ...

Es ist dies ein Beispiel, in dem offensichtlich alle drei weiter oben zitierten Sphären zusammenkommen: Die physische Welt, die digitale Welt und die sozio-kulturelle Welt.

Abbildung 2: Streckenführung für eine Fahrgemeinschaft



Quelle: Google Maps, ©Google

4.3 PRÄDIKTION UND AKTIVE VERMEIDUNG VON STAUSITUATIONEN

Staus verursachen einen hohen volkswirtschaftlichen Schaden. Um sie zu vermeiden oder doch zumindest ihre Auswirkungen auf den Verkehr möglichst gering zu halten, werden auch heute schon große Anstrengungen unternommen: Per TMC (Traffic Message Channel) werden von zentralen oder regionalen Koordinationsstellen Verkehrsinformationen verschickt und in den Fahrzeugen ausgewertet. Navigationssysteme nutzen diese Informationen zur Berechnung von Ausweichrouten. Das funktioniert nach aller Erfahrung in Summe eher schlecht als recht. Die Gründe hierfür sind vielschichtig: Verkehrsregelung im Sinne einer zentralen Erfassung von Verkehrsdichteinformationen und daraus abgeleiteter Steuerung ist ein typischer Top-Down-Ansatz. Man geht hierin davon aus, dass es gleichsam einen globalen Verkehrszustand gibt, der, wenn nur Einzeldaten in hinreichender Dichte erfasst und ausgewertet werden, durch gezielte Einflussnahme von zentraler Stelle optimal gesteuert werden kann. Es geht also um zentrale Koordination. Das funktioniert in der Praxis u. a. deswegen wenig zufriedenstellend, weil die Fülle der zu verarbeitenden und wieder an die Verkehrsteilnehmer zu übertragenden Informationen in Echtzeit nicht zu bewältigen ist. Zudem ist es aus der zentralen

Managementperspektive heraus kaum möglich, den nicht-deterministischen Regelkreis aus einer unvollkommenen zentralen Steuerungsinformation und der resultierenden partiellen lokalen Lenkungswirkung dauerhaft und global stabil zu halten. Das Ziel sollte darüber hinaus eher die Vermeidung von Stausituationen sein, als ihre Vorhersage.

Die zunehmende Vernetzung von Einzelsystemen im Fahrzeug wird durch den Einsatz weiterer Kommunikationsverbindungen (Car2X-Kommunikation) zu einer hierarchischen Struktur führen, die den Austausch von Informationen zwischen einer Vielzahl von verteilten heterogenen Subsystemen auf mobilen und stationären Plattformen ermöglicht. Die primären Ziele einer solchen Vernetzung von Cyber-Physical Systems sind die Bereitstellung neuer Dienste im Fahrzeug, die Erhöhung der Verkehrssicherheit sowie die effektive Steuerung der weiter wachsenden Verkehrsströme. Es ist lehrreich, in dieser Frage nochmals einen Blick auf natürliches Schwarmverhalten zu richten: Ameisen bewegen sich zum Transport von Baumaterial oder Nahrung vielfach auf „Ameisenstraßen". Man hat untersucht, wie sie auf Störungen, z.B. künstliche Verengungen oder Sperrungen reagieren. Interessanterweise konnte man feststellen, dass Ameisen offenbar in der Lage sind, auf Basis der zwischen den Individuen obwaltenden Regelmechanismen, Staus aktiv zu vermeiden. Auch bei extremen Eingriffen der Wissenschaftler kam es nicht zu Blockaden, wie wir sie aus dem täglichen Verkehrsgeschehen nur allzu gut kennen. Dies ist einmal mehr ein Hinweis darauf, dass Schwarmintelligenz durchaus ein passabler Leitgedanke für die Bewältigung von gewissen komplexen Systemproblemen sein kann.

> Erfahrungen im Alltag

- Stauprognosen sind meist unsicher (vgl. Stauwarnungen zu Beginn der Ferienzeit)
- Über TMC verfügbare Informationen sind teilweise stark zeitversetzt und damit oftmals nicht mehr aktuell
- Dynamische, kontextsensitive Prädiktion von Verkehrsengpässen erscheint notwendig

> Verfügbare Daten und Informationsquellen

- Fahrziel- sowie Routeninformation von Navigationssystemen
- Datum, Wochentag, Tageszeit (Berufsverkehr)
- Baustelleninformation
- Prioritäten der Fahrzeuge (z.B. Feuerwehr, Polizei, Notarzt)
- Bewegungserfassung mittels GSM oder Car2X (Kommunikation vom Fahrzeug zur Infrastruktur)

> Ziel: Vermeidung von Verkehrsengpässen, bevor diese sich zu Staus ausweiten

- Gesteigerter Verkehrsdurchsatz
- Optimierung des Verkehrsflusses und damit einhergehend auch Reduzierung des für Mobilität erforderlichen Energieaufwands
- Minderung des Fahrer-Stresslevels und dadurch Erhöhung der Verkehrssicherheit
- Reduzierung des durch Stau verursachten wirtschaftlichen Schadens

> Lösungsansatz

- Installation eines verteilten Multiagentensystems (im Sinne von Schwarmverhalten)
- Kommunikation zwischen den in lokaler Beziehung stehenden Schwarmmitgliedern
- Fusionierung der Informationen zur dezentralen Verkehrsflussoptimierung

In enger Beziehung zur Frage der Stauvermeidung, darüber aber noch hinausgehend, ist das generelle Problem der Mobilitätskostensenkung durch Reduzierung des Energieverbrauchs zu sehen. Hierfür sind Konzepte auf der Basis von Cyber-Physical Systems denkbar, die grundlegende Ideen aus den obigen Betrachtungen über Schwarmintelligenz aufnehmen.

Steigerung der Energieeffizienz heißt zunächst einmal, den Blick in das Fahrzeug zu richten: Eine Koordinierungsinstanz im Fahrzeug regelt das intelligente Zusammenspiel der Komponenten, bilanziert und steuert die Energieströme und sorgt auf diesem Wege für eine Optimierung des jeweils fahrzeugeigenen Energieverbrauchs. Diese Optimierung hat insofern zunächst nur lokalen Charakter, als dass die Randbedingungen fahrzeugseitig als unabänderliche und zum großen Teil auch unbekannte Größen vorgegeben sind. Der Blick muss nun im zweiten Schritt aus dem Fahrzeug selbst herausgehen: Die lokale Koordinierungsinstanz steht in Kontakt mit anderen Fahrzeugen in der Nähe und auf der geplanten Fahrstrecke sowie deren Einzugsbereich. Durch den Austausch geeigneter Informationen zwischen diesen Fahrzeugen zum Verkehrszustand, der Fahrtrichtung, dem Fahrverhalten der anderen Verkehrsteilnehmer, den Wetterbedingungen etc., können somit im Weiteren, außerhalb des eigenen Fahrzeugs generierte, Größen in die Optimierung einfließen – und dies nicht nur beim eigenen System, sondern bei allen solchermaßen kommunizierenden Fahrzeugen: Die Bilanzierung der Energieströme wird nun auf der höheren Systemebene der Gesamtheit von Fahrzeugen (dem „Schwarm") durchgeführt und erlaubt so die Schöpfung höherer Energieeffizienzpotentiale. Um dieses Konzept zu realisieren sind hochkomplexe, softwareintensive, vernetzte eingebettete Systeme, also Cyber-Physical Systems, unabdingbar.[8]

8 Vgl. u. a. BeeJamA-Projekt TU Dortmund, http://ls3-www.cs.uni-dortmund.de/de/projekte/arbeitsgruppen/bees/beejama/index.html

Abbildung 3: Stausituation auf der Autobahn



Quelle: Google Maps, ©Google

> Ziel: Schöpfung höherer Energieeffizienzpotentiale

> Bilanzierung der Energieströme auf höherer Systemebene

- Fahrzeugschwarm liefert individuelle / lokale Daten über:
  - Verkehrszustand
  - Fahrtrichtung
  - Fahrverhalten
  - Zusätzlich: Einbeziehung globaler Information (z.B. Wetter, Baustellen, Emissionen, etc.)

> Reduzierung des CO2-Ausstoßes durch Reduzierung der benötigten Beschleunigungszyklen

> Realisierung von Potentialen zur Kosten- und Schadstoffreduktion

- Senkung des Spritverbrauchs durch Verminderung von Stopp & Go – Situationen
- Verminderung des Fahrzeugverschleißes durch gleichmäßigere Fahrt
- Bezahlmodelle: Maut abhängig vom Verkehrsaufkommen

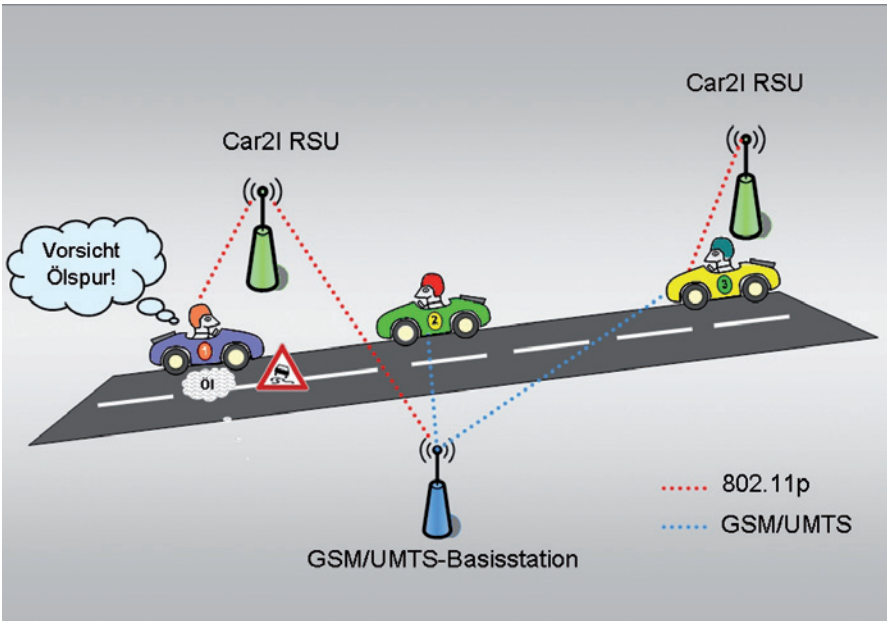
4.4 VERNETZUNG MOBILER ENDGERÄTE UND CAR2X

Die flächendeckende Einführung von Telematiklösungen im Verkehr (Car2Car, Car2X) ist bisher an überzeugenden Geschäftmodellen und unsicherer Finanzierung gescheitert. Ein weiteres Hemmnis ist auch darin zu sehen, dass frühe Käufer von solchen Telematik-Assistenzsystemen, trotz hoher Anschaffungskosten, aufgrund der geringen Durchdringung kaum einen Vorteil aus ihrem Einsatz ziehen können. Nach Abschätzungen aus Schwarmbetrachtungen heraus und Analogieschlüssen ist ein Vorteil für die Nutzer erst ab einer Mindestanzahl von Mitgliedern (ca. 10%) zu erwarten. Aus dieser Überlegung heraus erscheint es sinnvoll, die mögliche Teilnehmeranzahl durch die Einbeziehung von bereits etablierten und weitverbreiteten Kommunikationsnetzen aktiv zu vergrößern. Durch eine Integration von GSM- und Car2X-Netz („hybride" Vernetzung) erreicht man sehr schnell eine entsprechende Durchdringung mit hohem Nutzwert.

> Beispiel: Schlingerndes Fahrzeug

- Assistenzsyteme im Fahrzeug detektieren eine Ölspur auf der Fahrbahn.
- Per Car2X wird die Information „Ölspur auf der Fahrbahn" an die Infrastruktur weitergegeben. Davon profitieren zunächst nur Automobile mit Car2X-Ausstattung.
- Nun erfolgt die Einspeisung der Daten in das GSM-Netz.
- Aus dem GSM-Netz heraus können nun alle Mobilfunkteilnehmer die Information empfangen. Mittels Einbindung des Mobilteils in das Fahrzeug (z.B. via Bluetooth) kann die Information „Ölspur auf der Fahrbahn" unmittelbar in das Fahrzeugbordnetz übertragen werden und der Fahrer kann entsprechend reagieren. Alle Fahrer mit Mobilfunkanschluss können hiervon profitieren.
- Umgekehrt ist es ebenfalls möglich, den Kommunikationsweg umzudrehen und die Informationen aus dem GSM-Netz in das Car2X-Netz zu übertragen.

Abbildung 4: Meldung zu Ölspur auf der Fahrbahn wird via Car2X und GSM-Netz verbreitet.



Quelle: Eigene Darstellung mit Elementen aus Microsoft Viso

Informationen, die im GSM-Netz im Grundsatz anfallen, lassen sich, unter Wahrung der Anonymität der Besitzer, vielfach nutzbringend anwenden, z.B. für die Detektion von Massenbewegungen mittels Cell-Tracking im GSM-Netz und, daraus abgeleitet als Informationsgeber zur Vorhersage von möglichen Verkehrsengpässen. Dies ist eine weitere Möglichkeit zur dezentralen Verkehrsflussoptimierung durch die Integration bereits bestehender Netze in ein heterogenes Gesamtnetz.

> Beispiel: Ende einer Sportveranstaltung

- Bewegung von Menschenmengen durch GSM Cell-Tracking detektiert
- Identifiziertes Ziel (unter Hinzunahme von Kontextwissen) Parkplatz Vorhersage: Erhöhtes Verkehrsaufkommen in naher Zukunft
- Information wird von GSM-Basisstation in das Car2X-Kommunikationsnetz eingespeist

4.5 VERNETZTE FAHRERASSISTENZSYSTEME

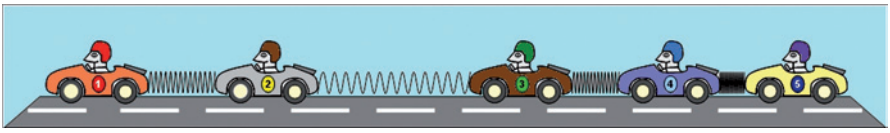
In heutigen Fahrzeugen der Kompakt-, Mittel- und Oberklasse sind fortgeschrittene Fahrerassistenzsysteme vielfach schon Standard: Elektronisches Stabilitätsprogramm,

Tempomat mit automatischer Abstandsregelung, Fahrlichtassistent, Notbremsassistent, Spurwechselassistent, Spurhalteassistent, Spurverlassenswarnung, Parkassistent, u.v.a.m. All diese Systeme funktionieren im Grundsatz autark auf Basis der im Fahrzeug gewonnenen Informationen. Es sind im Wesentlichen klassische eingebettete Systeme, hochkomplex zwar, der Schritt zu fahrzeugübergreifend vernetzten Cyber-Physical Systems ist aber kaum noch getan.

Es steckt ein großes Potential darin, diese Systeme fahrzeugübergreifend kooperativ zu konzipieren. Dies eröffnet weitere Chancen zur Unfallvermeidung und zur Verminderung der Unfallschwere. Ein Beispiel: Das Stabilitätsprogramm sorgt heute dafür, dass ein Automobil möglichst lange fahrdynamisch beherrschbar bleibt, unabhängig davon, ob sich auf der eingeschlagenen Trajektorie Hindernisse, z.B. andere Fahrzeuge, befinden oder sich dahin bewegen. Die Gefahr von Kollisionen mit anderen Fahrzeugen könnte aber reduziert werden, wenn die Assistenzsysteme in den sich auf Kollisionskurs bewegenden Automobilen miteinander kooperieren, d.h., sich durch Datenaustausch in Echtzeit abstimmen und selbsttätig geeignete Kurskorrekturen vornehmen. Die daraus resultierenden möglichen juristischen Fragen seien an dieser Stelle einmal ausgeblendet.

Im Folgenden noch einige weitere Beispiele von kooperativen Anwendungen für Assistenzsysteme:

Abbildung 5: Zieharmonika-Effekt bei nicht-kooperativen Assistenzsystemen



Quelle: Eigenkomposition mit Elementen aus Microsoft Visio

> **Verbesserung der Sicherheit durch fahrzeug-übergreifende Vernetzung von Fahrerassistenz-Systemen (kooperative Assistenzsysteme)**
  - Übermittlung sicherheitskritischer Manöver (z.B. Notbremsung) an andere Fahrzeuge
  - Warnung vor schnell näherkommenden Fahrzeugen bei beabsichtigtem Spurwechsel durch Empfangen der relevanten Parameter
  - Übermittlung der Fahrbahnbeschaffenheit (z.B. Nässe, Schnee, Eis) an nachfolgende Fahrzeuge

> Dynamisches Bilden von „CarTrains"

- Dynamisches Bilden kleiner Kolonnen (Trains) von 2 - 5 Fahrzeugen durch Car-2Car Kommunikation (auf Autobahnen)
  - Übermittlung relevanter Informationen wie Fahrziel, Geschwindigkeit, Bereitschaft die Kolonne zu führen
  - Kolonnenbildungs-Empfehlung abhängig von individuellen Fahrerpräferenzen (z.B. Wunschgeschwindigkeit)
  - Führung der Kolonne durch erstes Fahrzeug, nachfolgende Fahrzeuge fahren weitgehend autonom

> Funktionserweiterung und Verbesserung des Verhaltens von Assistenzsystemen

Beispiel: ACC (Adaptive Cruise Control - Abstandsregeltempomat)

- Das Bilden einer Kolonne hintereinander fahrender Fahrzeuge mit ACC Systemen kann nach dem Prinzip eines Mehrmassenschwingers starkes Aufschwingen der letzten „Glieder" bewirken (Longitudinalwellen, „Ziehharmonika"-Effekt).

- Das bedeutet:

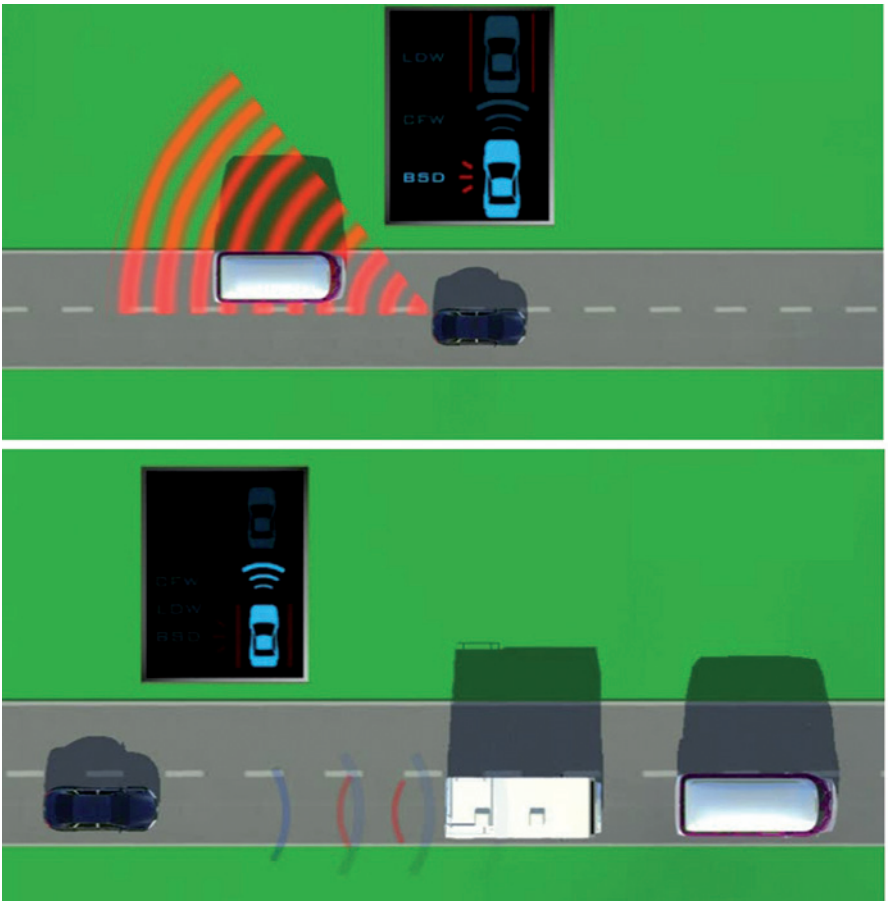
  - Die letzten Fahrzeuge der Kolonne werden zu Brems- und Beschleunigungsmanövern gezwungen die möglicherweise außerhalb ihrer physikalischen Grenzen liegen

- Mögliche Nutzensteigerung von ACC-Systemen durch Interaktion mit vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugen:

  - Reduktion des Aufschwingverhaltens
  - Vorausschauendes und ökonomisches Fahren
  - optimaler Verkehrsfluss

Wie im letzten Beispiel gesehen, helfen kooperative Assistenzsysteme bei der gleichmäßigen Verkehrsflusssteuerung und sorgen damit auch für die Reduzierung des Energieverbrauchs.

Abbildung 6: Beispiele für Assistenzsysteme im Fahrzeug: Blind Spot Detection (oben), Abstandsradar (unten).



Quelle: Quelle: ESG, (c)ESG.

4.6 SMART GRID

Smart Grid steht für das intelligente Energienetz der Zukunft, für das Internet der Energie. Der Grundgedanke ist die einheitliche Sicht auf zentrale und dezentrale Energieerzeuger, Speicher und Verbraucher. Sie alle kommunizieren miteinander, tauschen Informationen über das aktuelle und das zukünftige Energieangebot, den aktuellen und den zukünftigen Verbrauch und die erwarteten Kosten untereinander aus. Ziele sind u.a. die Optimierung des Energieangebots bei gegebener Verbrauchsanforderung und die Reduzierung der Energietransportkosten (Leitungsverluste). Dies setzt voraus, dass Erzeuger und Verbraucher, dass alle Mitspieler miteinander vernetzt und in der Lage sind, die nötigen Informationen zur Aussteuerung des Netzes bereitzustellen. Ein typisches und herausforderndes Anwendungsbeispiel für Cyber-Physical Systems.

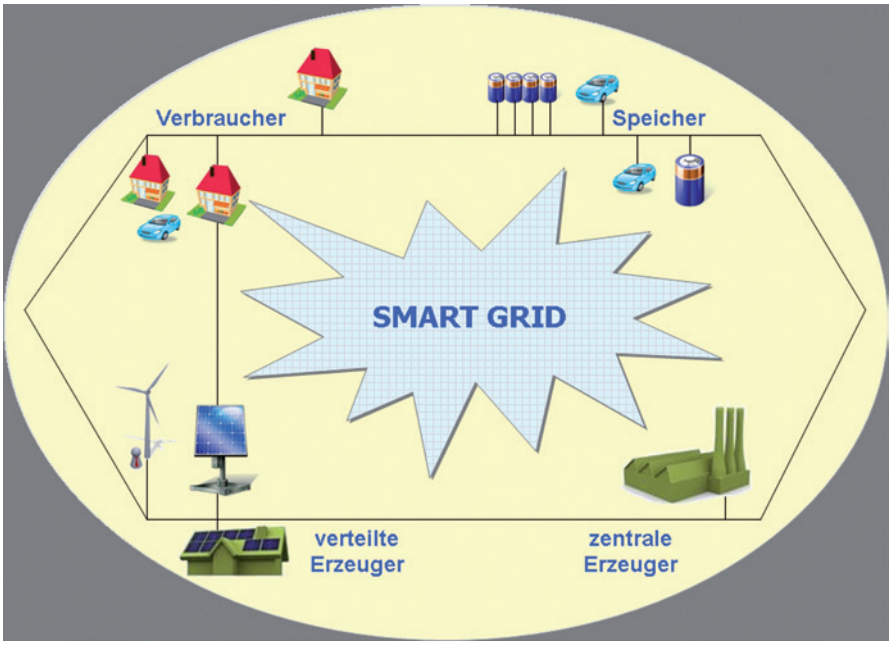
Einer der Grundgedanken ist die Nutzung der Batteriekapazitäten von künftigen Elektrofahrzeugen als temporäre Speicher für elektrische Energie. In Zeiten schwacher Netzauslastung werden die Batterien der Fahrzeuge geladen. Umgekehrt wird die gespeicherte Energie zu Stoßzeiten teilweise wieder in das Netz eingespeist. Damit erreicht man Zweierlei: Teure Transportkosten für Energie werden reduziert, weil nun die Nachfrage in Teilen auch lokal befriedigt werden kann. Zum anderen lassen sich die heute bestehenden starken zeitlichen Diskontunitäten zwischen Stromangebot und Stromnachfrage weitgehend entzerren. Z.B. können damit Windkraft- und Solaranlagen effektiver genutzt werden. Kraftwerke mit fossilen Energieträgern können stets im optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Das aufwändige Hoch- und Herunterfahren großer Anlagen wird seltener. Im Effekt wird damit der Gesamtwirkungsgrad der Energieerzeugung höher. Manch neues Kraftwerk wird entbehrlich, weil bestehende Kapazitäten optimal genutzt werden können. Erste Ansätze und Feldversuche hierzu gibt es bereits. Um die volle Komplexität des Ansatzes zu realisieren sind indessen noch viele Probleme zu lösen.

Im Folgenden die stichpunktartige Aufzählung zum Smart Grid:

> **Vernetzung und Integration dezentraler Energiequellen und Energiespeicher in das Gesamtenergienetz**
  - z.B. Photovoltaik, Windkraft, Biogas, KWK, Elektro-/Hybridfahrzeug (Speicher und Quelle)
  - Alternative Energien sind über Smart Grid auch außerhalb direkter Umgebung der Energiequelle verfügbar

> **Dezentrale Smart Meter**
  - Netzoptimierung durch genaue Verbrauchserfassung und Rückmeldung
  - Neue Abrechnungsmodelle mit angebots- und nachfrageabhängigen Tarifen
  - Mögliche Kostenersparnis durch angebotsabhängige Verbraucherregelung

Abbildung 7: Prinzipdarstellung zum Smart Grid



Quelle: Eigenkomposition mit Elementen aus Microsoft Visio

5 WELCHE POTENTIALE GIBT ES IM HINBLICK AUF DIE SENKUNG VON MOBILITÄTSKOSTEN?

Das Thema des Beitrags ist die Beleuchtung der Frage, inwiefern Mobilitätskosten durch Schwarmintelligenz respektive durch den Einsatz von Cyber-Physical Systems gesenkt werden können. Es würde den Rahmen dieser Darstellung sprengen, über die im vorhergehenden Abschnitt aufgezeigten Fragmente hinaus die hierzu erforderliche technische Lösung im Einzelnen darzulegen. Wir beschränken und daher an dieser Stelle auf die summarische Betrachtung der möglichen Potentiale.[9]

> **Senkung des Kraftstoffverbrauchs um ca. 25% durch effizientes Fahrverhalten und kooperative Systeme im Sinne „Schwarmintelligenz" erscheint möglich**

> **Verteilte Intelligenz dezentraler Lösungen bietet Vorteile gegenüber der zentralen Koordinierung (Robustheit, Anpassungsfähigkeit)**

9 Quelle: DAT – Leitfaden Kraftstoffverbrauch und CO2-Emission – Dies entspricht einer Reduktion um ca. 25 Mio. Tonnen CO2 pro Jahr allein in Deutschland. Gesamtemission in D (2008) 832 Mio. Tonnen, davon 12%, entsprechend etwa 100 Mio. Tonnen, vom PKW-Verkehr. Vgl. DAT.de, Umweltbundesamt.

> **Störungen des Verkehrsflusses können früh prädiziert und in ihrer Auswirkung durch abgestimmte schnelle Reaktionen weitgehend vermieden werden**

> **Der optimierte Verkehrsfluss erlaubt eine bestmögliche Ausnutzung des Verkehrsraums und verringert so die Unfallwahrscheinlichkeit**

> **Die Wahrscheinlichkeit von Unfällen kann reduziert werden durch die spontane Ad-hoc-Kommunikation von Fahrzeugen mit möglichem Kollisionskurs (→ kooperative Assistenzsysteme)**

> **Das Fehlverhalten einzelner Verkehrsteilnehmer kann vom „Schwarm" teilweise kompensiert werden**

6 WAS MÜSSEN WIR TUN, UM CYBER-PHYSICAL SYSTEMS MÖGLICH ZU MACHEN?

In den vorhergehenden Abschnitten haben wir eine Auswahl von möglichen Anwendungsfeldern für Cyber-Physical Systems gesehen. Nachstehend eine Reihe von technischen und nicht-technischen Eckpunkten, die im Zuge der Durchdringung der Thematik beachtet werden müssen. Die Aufstellung erhebt selbstredend keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

> **Standardisierung der technischen Schnittstellen**
  - Z.B. schneller Verbindungsaufbau via Ad-hoc Netzwerken
  - Z.B. Möglichkeit zur reaktionsschnellen Datenübertragung in Echtzeit

> **Kompatible semantische Schnittstellen**
  - Von allen „verstandene" gemeinsame „Sprache" für Basisinformationen
  - Dynamische Erweiterbarkeit (z.B. mittels dienstorientierter Kommunikation)

> **Entwicklung geeigneter Modelle und Algorithmen zur ganzheitlichen Energieeffizienz-Optimierung ohne Komforteinbußen**

> **Kritische Anzahl von Kommunikations-Knoten/Teilnehmer muss verfügbar sein**
  - Ab ca. 10% Durchdringung sind signifikante Effekte zu erwarten

> **Entwicklung und Bereitstellung von kostengünstigen technischen Systemen**
  - Infrastruktur, Komponenten, Softwareapplikationen

Die vorgenannten Punkte stellen im Grundsatz keine unüberwindbaren Hürden dar. Viel herausfordernder sind die folgenden, überwiegend im nicht-technischen Umfeld liegenden Einflussfaktoren. Auch die Frage nach der komplexen softwaretechnischen Gesamtarchitektur ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gelöst. Hier bedarf es noch großer Anstrengungen seitens Forschung und Industrie.[10]

> **Vorgaben für Standards**
  - Normen, nationale und internationale Durchsetzung

> **Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen**

> **Herstellung eines gesellschaftlichen Konsens**
  - Datenaustausch versus Schutz der Privatsphäre

> **Wer organisiert solche Systeme? Wer betreibt sie?**

> **Wer sorgt für die Finanzierung der Infrastruktur?**

> **Herausforderung an Forschung und Industrie: Die Erstellung einer tragfähigen softwaretechnischen Gesamtlösung**

  - Die Einführung der LKW-Maut war i. w. ein Softwarethema
  - Die komplexe Integration von Cyber-Physical Systems ist weitaus anspruchsvoller

7 DER LEISTUNGSBEITRAG DES MITTELSTANDS

Die weiter oben punktuell aufgezeigten Querbeziehungen zwischen Schwarmverhalten und Cyber-Physical Systems vermitteln eine Vorstellung von den sich bietenden Möglichkeiten, aber auch von den großen technologischen und organisatorischen Herausforderungen. Hier sind Politik, Forschung und Industrie gleichermaßen gefordert. Komplexe Gesamtsysteme wie sie beispielhaft insbesondere in Abschnitt 4 skizziert wurden, z.B. das intelligente Energienetz oder das Konzept zur aktiven Vermeidung von Stausituationen können nur in interdisziplinärer Zusammenarbeit realisiert werden. Die Politik muss den rechtlichen Rahmen setzen, Universitäten und Forschungsinstitute müssen die notwendigen wissenschaftlichen Vorarbeiten leisten, Konzepte entwerfen, Detailprobleme lösen. Die Umsetzung der Gesamtlösung erfordert das Engagement und die technologische Kompetenz von großen Industriekonsortien.

[10] Vgl. auch Broy 2010 und Damm 2010.

Welche Rolle aber kann in diesem Konzert der Mittelstand spielen? Braucht man ihn überhaupt? Und wenn, wozu?

Nach aller Erfahrung aus ähnlich gelagerten Problemstellungen in der Vergangenheit benötigt man für die Umsetzung auch die Kompetenzen des Mittelstands. Die hervorstechenden Merkmale des Mittelstands sind: Flexibilität, Schnelligkeit und Anpassungsfähigkeit. Es sind dies genau die Eigenschaften, auf die bei der Entwicklung gänzlich neuer technologischer und organisatorischer Strukturen erfahrungsgemäß nicht verzichtet werden kann. Die intelligente Realisierung der skizzierten hochkomplexen Systeme erfordert zudem Spezialwissen über das nur der Mittelstand verfügt. Deswegen darf man mit Fug und Recht davon ausgehen, dass der Mittelstand auch bei der Entwicklung und Einführung von Cyber-Physical Systems eine wichtige Rolle spielen wird. Einige wenige Beispiele für mögliche Betätigungsfelder sind:

> **Mitgestaltung des Standardisierungsprozesses**

> **Aufbau, Betrieb und Wartung von lokalen Infrastrukturen**

> **Beratung hinsichtlich funktionaler und technischer Lösungen**

> **Softwareerstellung für Dienstapplikationen**
  - Z.B. Nutzerapplikation, „Vernetzter Energieeffizienz-Wettbewerb"

> **Dienstangebot durch Vernetzung bestehender Infrastrukturen**
  - Z.B. LBS – Location Based Sevices... die nächste Energietankstelle mit einem gewünschten Zusatzangebot... energieoptimierte Routenführung für E-Fahrzeuge

Schnelle Umsetzung innovativer Konzepte und Lösungen durch flexible Unternehmensstrukturen im Mittelstand

LITERATUR

Bonabeau 1999
Bonabeau, E./Dorigo, M./Theraulaz, G.: Swarm Intelligence: From Natural to Articial Systems. New York u. a.: Oxford University Press, 1999.

Broy 2010
Broy, M.: Cyber-Physical Systems. Wissenschaftliche Herausforderungen bei der Entwicklung. Vortrag auf dem acatech-Symposium „Cyber-Physical Systems – Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme", München, 2010.

Damm 2010
Damm, Werner: Eckpunkte der nationalen Roadmap „Embedded Systems". Vortrag auf dem acatech-Symposium „Cyber-Physical Systems – Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme", München, 2010.

Dorigo 1996
Dorigo, M./Maniezzo, V./Colorni, A.: The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Cybernetics 26 (1996), S. 29-41.

Frisch 1967
von Frisch, K.: The dance language and orientation of bees. Cambridge: Harvard University Press, 1967.

Kennedy 2001
Kennedy, J./Eberhart, R.C.: Swarm intelligence. San Francisco: Kaufmann, 2001.

Partridge 1981
Partridge, B.L.: Internal dynamics and the interrelations of fish in schools. In: Journal of Comparative Physiology 114 (1981), S. 313-325.

Pintscher 2008
Pintscher, L.: Schwarmintelligenz. Seminararbeit Organic Computing. Universität Karlsruhe, 2008.

Rehtanz 2008
C. Rehtanz, C./Wedde, H. F.: Development of Innovative Strategies for Integrating Distributed Energy Storages like Batteries and Electric Vehicles into Distribution Networks Based on Multi-Agent Technologies. Funded by E.on Research Initiative, 2008-2012, unter http://varma.ece.cmu.edu/Auto-CPS/.

Reynolds 1987
Reynolds, C.W.: Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. ACM. In: Computer Graphics 21 (1987), S. 25-34.

Walter 2007
Walter, I.: Der schlaue Schwarm - spektakulärer Versuch mit 300 Freiwilligen. Quarks & Co, WDR-Fernsehen 2007.

Wedde 2008
Wedde, H. F./Lehnhoff, S./Rehtanz, C./Krause, O.: Von eingebetteten Systemen zu Cyber-Physical Systems. Technische Universität Dortmund, 2008.

Wedde 2007
Wedde, H. F./Lehnhoff, S. et al.: Dezentrale vernetzte Energiebewirtschaftung im Netz der Zukunft. In: Wirtschaftsinformatik 49 (2007), S. 361-369.

Wedde 2007
Wedde, H. F./Lehnhoff, S./Bonn, B. V. et al.: Highly Dynamic and Adaptive Traffic Congestion Avoidance in Real-Time Inspired by Honey Bee Behavior. In: PEARL 2007 - Informatik Aktuell - Mobilität und Echtzeit, Berlin: Springer, 2007.

> DIE WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG VON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS AUS DER SICHT EINES GLOBAL PLAYERS

KLAUS BEETZ

NACHHALTIGKEIT – GRUNDLAGE UNSERES HANDELNS

„Langfristiges und nachhaltiges Denken ist ein wichtiger Teil unserer Tradition. Nachhaltigkeit heißt für uns, in unseren Handlungen die Belange von Ökologie, Ökonomie und sozialer Verantwortung ausgewogen zu berücksichtigen.", sagte Peter Löscher, CEO von Siemens, im Januar 2010.

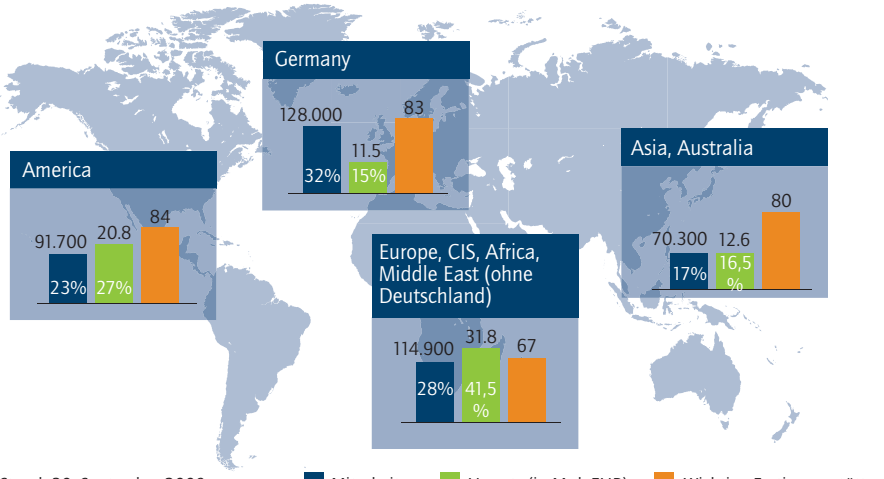
Die Herausforderungen, die Menschheit nachhaltig und sicher mit Energie zu versorgen, umweltverträgliche Mobilität zu ermöglichen, dabei die Ressourcen zu schonen und die Trinkwasserversorgung sicherzustellen, gelten vor allem auch für die Industrie und mit ihr für die Elektronik- und Elektroindustrie. Siemens als führendes, global tätiges Unternehmen ist hier in folgenden Richtungen tätig:

- Umweltverträgliche Produkte und Lösungen
- Umweltverträgliche Gestaltung der Produktion
- Produkte und Lösungen für den Umweltschutz
- Ein zuverlässiges und effektives Umweltmanagement.

DIE BEDEUTUNG VON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS FÜR DIE SIEMENS AG

Siemens ist ein weltweit aufgestelltes Unternehmen - mit einer nach wie vor starken Basis in Deutschland: Obwohl sich das Geschäft im Zuge der Globalisierung stark in andere Regionen verlagert hat, sind ein Drittel unserer Mitarbeiter in Deutschland beheimatet und ein Viertel unserer Fertigungsstätten befindet sich hier.

Abbildung 1: Weltweite Präsenz – Basis für Wettbewerbsfähigkeit



Quelle: Siemens AG.

Cyber-Physical Systems, das ist das Zusammenspiel von lokaler Information, Informationsverarbeitung und großen Systemen, die diese Informationen bewerten und darauf aufbauend effizient, autark und autonom Aufgaben bearbeiten: Steuerung, Regelung, Überwachung, Kommunikation oder Signalverarbeitung. Eine wesentliche Grundlage für Cyber-Physical Systems sind Embedded Systems, d. h. Systeme bei denen Hard- und Softwarekomponenten in ein umfassendes Produkt oder Lösungen integriert sind.

Für das Haus Siemens als weltweiter Anbieter von komplexen, technologischen Lösungen – Automatisierungs- und Verkehrssysteme, Energiesysteme, Haustechnik, Medizintechnik - sind Cyber-Physical Systems, Embedded Systems und Embedded Software wichtige Schlüsseltechnologien.

Weit mehr als die Hälfte des Siemens Geschäfts basiert mittlerweile direkt oder indirekt auf Software. Mit über 20.000 Software-Entwicklern ist Siemens eines der größten Softwarehäuser weltweit. Und der überwiegende Teil der Software bei Siemens ist irgendwo verborgen oder „embedded".

Abbildung 2: Wirtschaftliche Bedeutung von Embedded Systems für die Siemens AG



Quelle: Siemens AG.

CHARAKTERISTIKA VON EMMBEDDED SYSTEMS BEI SIEMENS

Die Siemens Software Initiative hat einige wesentliche Herausforderungen im Hinblick auf „Embedded Systems“ identifiziert:

Funktionalität, die bisher in Mechanik oder Elektro-Mechanik ausgeführt wurde, wird heute in – vorwiegend embedded - Software realisiert. Dabei sind nichtfunktionale Anforderungen entscheidend für unser Geschäft. So sind Anforderungen wie z. B. Benutzerfreundlichkeit, eingeschränkte Hardware-Ressourcen, Sicherheitsanforderungen oder Ausfallsicherheit besonders wichtig. Das, was wir aus der PC Welt kennen, „wenn gar nichts mehr geht, dann fahren wir den PC mal runter und wieder hoch“, ist bei einer Lokomotive, einem Magnetresonanzgerät, einem Kraftwerk oder einer Industrieanlage nicht möglich. Das System muss sich immer in einem definierten Zustand befinden und in der Lage sein, Basisfunktionen auszuführen. Zudem muss in Embedded-Anwendungen oft in harter Echtzeit reagiert werden und hier kann auch kein Rücksetzen erfolgen, wie es in sehr vielen Desktop-Anwendungen möglich ist.

Weitere Prognosen der Siemens Software Initiative lauten: Es wird deutlich mehr „evolutionäre“ Weiterentwicklung als “neue” Entwicklung geben. Software und Systeme werden sich vorwiegend evolutionär zu Cyber-Physical Systems entwickeln.

Bei Software, Elektronik und Mechanik sowie den angrenzenden Disziplinen, wie Hydraulik oder Regelungstechnik, herrschen zudem höchst unterschiedliche Innovations-, Entwicklungs- und Wartungszyklen.

Über den gesamten Lebenszyklus eines technischen Systems oder Produkts hinweg sind deshalb Konzepte notwendig, die einerseits korrekte und konsistente Versionen garantieren, andererseits müssen effiziente Updates im laufenden Betrieb möglich sein. D. h., es muss möglich sein, Software, Elektronik-, oder Mechanikkomponenten zu tauschen und dabei die Gesamtfunktionalität des Systems trotzdem uneingeschränkt zu gewährleisten. Das im PC-Bereich etablierte Nachbessern von Software durch Hot Fixes oder Software Updates ist bei eingebetteten Systemen nur schwer möglich.

DIE BEDEUTUNG VON CYBER-PHYSICAL SYSTEMS FÜR SIEMENS SEKTOREN

In allen drei Sektoren in denen Siemens sein Geschäft gebündelt hat, der Industrie, der Gesundheit und dem Sektor Energie, sind die aktuellen Fragen und Herausforderungen häufig nur mit der Integration von vielen - häufig autonomen – vernetzten Embedded Systems mit physischen Systemen und übergelagerten Prozessen lösbar, d.h. durch den Einsatz von Cyber-Physical Systems.

DER SEKTOR INDUSTRIE

Im Industriesektor werden z. B. Energie, Wasser und Rohstoffe verbraucht, wobei zugleich Abfall und Abwasser anfallen. Hier geht es darum, mehr aus der eingesetzten Primär- oder Sekundärenergie zu machen: Durch effiziente Lösungen bei der Industrieautomatisierung, wo z. B. drehzahlvariable Motoren den Stromverbrauch in Industrieanlagen um bis zu 60% reduzieren, durch intelligente Complete-Mobility-Lösungen, die im Straßenverkehr erhebliche Mengen Öl sparen helfen, oder durch eine deutliche Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden.

Aber ob Industrieautomatisierung, intelligente Verkehrsleitsysteme, Gebäudetechnik oder Sicherheitslösungen, der entscheidende Faktor ist das Zusammenspiel von lokaler Intelligenz, d.h. von Embedded Systems und den darauf aufbauenden Cyber-Physical Systems für effiziente Steuerungs-, Regelungs- und Managementprozesse.

DER SEKTOR GESUNDHEIT

Im Gesundheitssektor ist es notwendig, die Flexibilität von Software mit der Leistungsfähigkeit von Hardware so zu kombinieren, dass - komplett im Verborgenen - jederzeit der einzelne Patient, Ärzte, Therapeuten, Pflegepersonal, etc., individuell angepasst unterstützt werden kann, Wenn z. B. pflegebedürftige Patienten aus der Ferne betreut werden sollen, müssen Sensoren, die Bioparameter erheben und die Ergebnisse in elektronische Arbeitsprozesse einfließen lassen, in die häusliche Umgebung integriert werden. Das Pflegepersonal wird ständig über die Gesundheit des Patienten informiert und kann bei sich ankündigenden Problemen sehr zeitnah vorbeugen. Das Zusammenspiel zwischen den Aktoren und Sensoren im häuslichen Bereich und die Einbindung in elektronische Arbeitsprozesse leisten hier die Cyber-Physical Systems.

Das Thema Sicherheit spielt gerade im medizinischen Umfeld eine eminent wichtige Rolle. Sowohl im Sinne von „Safety" - vom System gehen keine Gefahren für Leib und Leben aus - als auch im Sinne von „Security" - der Schutz der Daten vor Missbrauch und Angriffe von außen, die der imaginären Welt der Cyber-Physical Systems anvertraut sind – ist Sicherheit ein zentrales Thema. Die größte Herausforderung liegt wahrscheinlich darin, Cyber-Physical Systems so zu entwickeln, dass einerseits die Privatsphäre streng respektiert wird und trotzdem sensible Daten gesammelt und ausgewertet werden können, um personalisierte Services und Hilfestellungen zu ermöglichen.

DER SEKTOR ENERGIE

Der fortschreitende Klimawandel sowie der steigende weltweite Energiebedarf werden das Energiesystem verändern: Der Energiebedarf wird künftig verstärkt durch die Nutzung erneuerbarer Energien gedeckt werden. Ein Beispiel: Elektromobilität. Diese Entwicklung beschleunigt den Markt für CO2-freie Stromerzeugung. Für die kommenden zehn Jahre erwarten wir ein jährliches Wachstum bei allen erneuerbaren Energien von 12 Prozent. Allein der Markt für Offshore-Windkraftanlagen wächst in den kommenden fünf Jahren um über 20 Prozent pro Jahr. Hinzu kommen deutliche Steigerungsraten im Bereich Solarenergie.

Auf absehbare Zeit werden alle Primärenergieträger benötigt, um die weltweite Versorgung, vor allem mit elektrischem Strom, nachhaltig sicherzustellen. Entscheidend ist dabei, den Mix der verschiedenen Energieträger stetig zu optimieren.

Dazu gehört ein kontinuierlich wachsender Anteil erneuerbarer Energieträger wie Wind und Sonne ebenso wie die optimierte Stromerzeugung durch fossile Energieträger mit CCS-Technik, d.h. mit Abtrennung und Lagerung von CO2.

Ebenso wichtig ist die Effizienzsteigerung bei der Energieversorgung, zum Beispiel bei erneuerbaren Energien. Mit modernsten Anlagen kann die natürliche Kraft des Windes erheblich besser genutzt werden, wenn etwa 3,6 MW Turbinen statt der derzeit üblichen 1 MW-Turbinen zum Einsatz kommen.

In den Stromnetzen wiederum lassen sich die Verluste an elektrischer Energie beim Transport mittels Leistungselektronikkomponenten so reduzieren, dass signifikant weniger Strom produziert werden muss.

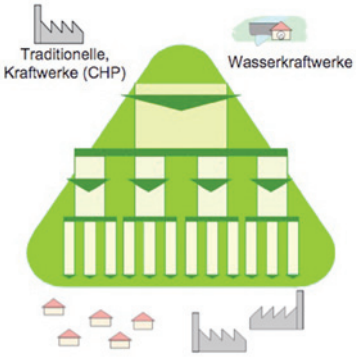
Dies ist nur durch den massiven Einsatz von Embedded Systems und übergelagerten Steuerungs- und Optimierungsalgorithmen möglich, sprich durch Cyber-Physical Systems.

SMART GRID

Ein sehr gutes Beispiel in diesem Zusammenhang ist das sogenannte „Smart Grid". Hier müssen die bestehenden Produkte und Services im Energiesektor evolutionär weiterentwickelt und an neue Herausforderungen angepasst werden. Gleichzeitig gilt es, völlig neue Konzepte wie Dezentralität von Anfang an optimal umzusetzen.

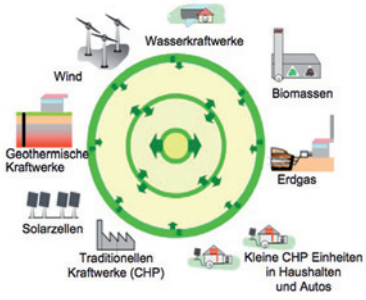
In klassischen Energieverteilungssystemen steht im Zentrum ein Kraftwerk, das Energie produziert und diese wird dann über ein Verteilungssystem an die Verbraucher weitergeleitet. Ein solches System reagiert direkt auf Verbrauchsengpässe oder geringeren Verbrauch, indem z. B. bei einem Wasserkraftwerk die Durchflussmenge an Wasser erhöht und damit auch die Stromproduktion erhöht wird.

Abbildung 3: Traditionelle Energieversorgung



Quelle: Siemens AG.

Abbildung 4: Smart Grid - Das intellgiente Stromnetz der Zukunft



Zentrale Kraftwerke (Fossil, Wasser, etc.) werden durch eine Vielzahl dezentraler Kraftwerke ersetzt

- Bidirektionale Transformation und Verteilung
- Garantierung der Netzstabilität bei dezentraler Einspeisung
- Intelligente Steuerungsalgorithmen und Energiemanagementsysteme
- .....

Herausforderungen, die nur durch Cyber-Physical Systems gemeistert werden können

Quelle: Siemens AG.

Mit dem zunehmenden Einsatz erneuerbarer Energiequellen - Solarzellen, Biomassekraftwerken oder Windenergie - wird die zentrale Energieerzeugungsinstanz durch eine Vielzahl von Erzeugern, die zum Teil gleichzeitig auch Verbraucher sind, ersetzt. Dies führt zu einer vollständig anderen Dynamik und Komplexität im Energiesystem. Um dies zu beherrschen und gleichzeitig die Energieversorgung zu sichern, die Energieeffizienz zu steigern und Kosten zu sparen, ist die Optimierung des gesamten Energiesystems erforderlich.
Einige Beispiele aus der Fülle der dabei auftretenden Aufgaben:

Im Arbeitsgebiet Energie des Projekts SPES 2020 arbeitet Siemens gemeinsam mit den Partnern RWE, den Stadtwerken München und der TUM daran, Kleinerzeugungsanlagen zu virtuellen Kraftwerken zu bündeln.

In Projekten wie Harz.EE-mobility wird untersucht, wie regional erzeugte, regenerative erneuerbare Energie optimal für elektrisch betriebene Fahrzeuge genutzt und kontrolliert in das Smart Grid eingebunden werden kann. Elektrofahrzeuge sind dabei, als mobile Speicher, eine vielversprechende Möglichkeit zur Last-Balancierung im intelligenten Energie-Netz der Zukunft. Informations- und Kommunikationstechnologien bringen dabei Daten aus den unterschiedlichen Bereichen zusammen und ermöglichen so eine übergreifende Koordination.

Mit intelligenten Zählern – Smart Metering –, die sich zum Beispiel innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters eigenständig genau dann einschalten, wenn viel – und damit billiger – Strom im Netz vorhanden ist, kann der Strombedarf und -verbrauch in Haushalten jederzeit kontrolliert und entsprechend kostengünstig angepasst werden. Experten erwarten, dass dies das Verhalten der Menschen sehr positiv im Hinblick auf Energiebewusstsein verändern wird.

Für das effiziente Zusammenspiel aller dieser Themen müssen bestehende Produkte und Services im Energiesektor evolutionär weiterentwickelt und angepasst werden und mit völlig neuen Systemen integriert werden – eine große Herausforderung beim Engineering der zukünftigen Energiesysteme.

ZUSAMMENFASSUNG

Embedded Systems bestimmen heute im Wesentlichen die Funktionalität von Gesamtsystemen bestehend aus Mechanik, Elektronik und Software. Sie ermöglichen und schaffen völlig neue Funktionalitäten für technische Systeme und Geräte. Ihre Vernetzung zu Cyber-Physical Systems ermöglicht eine schier unendliche Vielfalt von Einsatzgebieten.

Für einen weltweiten Anbieter von Infrastrukturlösungen wie Siemens, sind deshalb Cyber-Physical Systems eine wesentliche Grundlage des gesamten zukünftigen Produktportfolios, des Geschäfts und damit natürlich auch die Grundlage für hoch qualifizierte Arbeitsplätze in Deutschland und Europa.

Deutschland und Europa sind für Siemens als Forschungs- und Ausbildungslandschaft sehr wichtig. Gerade für das Gebiet der Cyber-Physical Systems und auch der zugrunde liegenden Embedded Systems existiert hier eine ausgeprägte Forschungslandschaft von hoher Güte. Siemens engagiert sich deshalb auch in entsprechenden Forschungsinitiativen wie z. B. Artemis oder ITEA auf europäischer Ebene oder der Innovationsallianz SPES 2020 auf nationaler Ebene.

Bei aller wissenschaftlicher Exzellenz besteht jedoch aus Sicht der Industrie Handlungsbedarf: In Deutschland gibt es nur wenige Studiengänge, die die volle Bandbreite der für den Bereich Cyber-Physical Systems erforderlichen Wissensdomänen integrieren. Auch Systems Engineering ist in der traditionellen Ausbildung wenig verankert.

Bei Embedded Systems besteht darüber hinaus noch erheblicher Forschungsbedarf, um das gute theoretische Fundament und bereits vorhandene Lösungen aus dem IKT-Bereich, wie Datenbanken, Sicherheits- und Transaktionskonzepte für eingebettete Systeme nutzbar zu machen.

Um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben und seinen hervorragenden Platz auf dem Embedded Systems Markt nicht zu verlieren, sollte die Bundesrepublik Deutschland ihren Willen international eine führende Position bei Cyber-Physical Systems einzunehmen, deutlich zum Ausdruck bringen.

Cyber-Physical Systems müssen in der Öffentlichkeit als strategisches Wachstumsfeld etabliert werden. Dies erfordert eine stärkere Darstellung der Potentiale und eine Schwerpunktsetzung in Forschungsprogrammen. Die „Nationale Roadmap Embedded Systems" ist ein erster Schritt in diese Richtung und die dort aufgeführten Empfehlungen sollten aufgegriffen und umgesetzt werden.

> NATIONALE ROADMAP EMBEDDED SYSTEMS

WERNER DAMM*/ REINHOLD ACHATZ/ KLAUS BEETZ/ MANFRED BROY/
HEINRICH DAEMBKES/KLAUS GRIMM/PETER LIGGESMEYER

DEUTSCHLAND – ZEHN THESEN

„Eingebettete Systeme" sind in ihrem Softwareanteil nicht sichtbar und doch hoch relevant für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Ihre Bedeutung fasst die vorliegende Nationale Roadmap Embedded Systems in den folgenden 10 Thesen zusammen:

> These 1

Die zentralen ökonomischen und gesellschaftlichen Herausforderungen in Deutschland lassen sich ohne die Querschnittstechnologie Embedded Systems nicht lösen[1].

> These2

Arbeitsplätze und Wertschöpfung in für Deutschland wesentlichen Branchen hängen in zunehmendem Maße von Embedded Systems ab[2].

> These3

Embedded Systems sind zunehmend produktprägender Bestandteil mindestens in den drei umsatzstärksten Branchen Deutschlands[3].

> These 4

Der Anteil von Embedded Systems an den Gesamtproduktentwicklungskosten wächst in allen Branchen signifikant an. Dies wird gespiegelt durch einen signifikanten Anteil von 10% bis 20% an den Gesamtkosten für Forschung und Entwicklung in vielen Industriezweigen[4].

> These 5

Deutschland verfügt über eine exzellente Ausgangsposition, die zum Erhalt und zum Ausbau der Wettbewerbsfähigkeit jedoch einer Stärkung bedarf[5].

---

* Sprecher des Steuerkreises Nationale Roadmap Embedded Systems.

1 siehe Kapitel 4.
2 siehe Kapitel 3.
3 siehe Kapitel 3.
4 siehe Kapitel 3.
5 siehe Kapitel 3.

> These 6

Es bedarf einer gemeinsamen, branchenübergreifenden Anstrengung von Industrie und Forschung mit Unterstützung durch geeignete Förderprogramme, um die zukünftigen Herausforderungen zu meistern[6].

> These 7

Die wesentlichen zukünftigen Herausforderungen im Bereich Embedded Systems können mit Hilfe von sechs Forschungsschwerpunkten (FSPs) bewältigt werden. Eine wesentliche Rolle spielen dabei offene branchenübergreifende Interoperabilitätsstandards, geeignete Referenz-Technologie-Plattformen und auf Eingebettete Systeme ausgerichtete Ausbildungsprogramme[7].

> These 8

Der Gesamtbedarf an Forschungsaufwänden in diesen sechs Schwerpunkten wird für die nächsten 10 Jahre auf deutlich über 2,5 Mrd. € geschätzt[8].

> These 9

Die Kombination von nationalen Programmen (z.B. Innovationsallianzen) und europäischen Förderinstrumenten (z.B. ARTEMIS) stellt bei entsprechender finanzieller Ausstattung einen ausgezeichneten Rahmen zur Schaffung von Spitzen-Innovationen in Deutschland und zur Mitgestaltung dafür maßgeblicher internationaler Standards dar[9].

> These 10

Deutschland kann durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Experten der Embedded-Systems-Technologien und der verschiedenen Anwendungsfelder (Gesundheit, Mobilität, Energie,...) eine Spitzenrolle bei der Lösung zentraler gesellschaftlicher und ökonomischer Herausforderungen einnehmen[10].

Mit diesem Dokument liegt ein ausgearbeiteter Vorschlag vor, der eine zeitnahe Umsetzung der aus den Thesen resultierenden Handlungsbedarfe ermöglicht.

---

6 siehe Kapitel 6.
7 siehe Kapitel 6.4.
8 siehe Kapitel 6.2.
9 siehe Kapitel 6.3.
10 siehe Kapitel 6.4.

[1]
FSP Seamless Interaction: Überall genau die richtigen Informationen sicher zur richtigen Zeit zu erhalten, ist genauso relevant für die Überwachung von Patienten wie im Krisenmanagement, in intermodalen Logistikanwendungen, wie in Smart Shops, die quasi magisch Kundenwünsche maßgeschneidert erfüllen. Über bekannte IT-Lösungen hinaus sind dazu „Sprachbarrieren" zwischen unterschiedlichsten technischen Systemen zu überwinden, Instrumente zur sicheren Authentifizierung solcher Systeme zu etablieren, sowie schließlich „vordenkende" selbsterklärende Interaktionsschnittstellen zu gestalten.

[2]
FSP Autonome Systeme: Wenn unter extremen Randbedingungen (Erschließung von Rohstoffen am Meeresboden, Krisen-/ Katastrophenmanagement, im Weltall) kritische Funktionen weitestgehend ohne menschlichen Eingriff gesichert werden müssen, sind Autonome Systeme die Technologie der Wahl. Diese müssen sich selbst so anpassen können, dass sie in kaum vorhersagbaren Umgebungen und unter kaum genau spezifizierbaren Randbedingungen eine spezifizierte Leistung selbständig erbringen.

[3]
FSP Verteilte Echtzeit-Situationserkennung und Lösungsfindung: Koordinierte Lagebewertungen und Lösungsstrategien sind unverzichtbar in so unterschiedlichen Handlungsfeldern wie Krisenmanagement, Patientenüberwachung, oder in der koordinierten Fahrzeugführung zur Reduktion der Umweltbelastung und Erhöhung der Verkehrssicherheit. Dies setzt voraus, dass zwischen den handelnden (semi-autonomen) Teilsystemen ein genügend genaues gemeinsames Lagebild unter Echtzeitbedingungen auf der Basis von integrierter heterogener intelligenter Sensorik und statischem Lagewissen etabliert werden kann, damit durch koordinierte Manöver in Echtzeit Konfliktlösungen realisiert werden können.

[4]
FSP Sichere Systeme: Herstellung und Aufrechterhaltung des Vertrauens in Embedded Systems sind unabdingbare Voraussetzung für die Akzeptanz von komplexen, vernetzten, eingebetteten Systemen, wie sie zur Lösung der gesellschaftlichen und ökonomischen Herausforderungen benötigt werden. Bisherige IT-Sicherheitskonzepte sind hier nützlich, aber nicht ausreichend, da sie oft auf den Aspekt Security[11] fokussieren. Für Embedded Systems sind die Aspekte Safety[12] sowie Auswirkungen von (mangelnder) Security auf Safety zentrale Themen.

[11] Security: Schutz des Systems gegen Missbrauch und Angriffe von außen.
[12] Safety: Vom System gehen keine Gefährdungen aus.

[5]
FSP Architekturprinzipien: Umweltverträgliche Mobilität im Automobil durch Minimierung von Emissionen und Energieverbrauch („Green Mobility") ist nur ein Beispiel für Anwendungen, in denen Lösungen aus verschiedenen Domänen und Branchen zu komplexen Systemen integriert werden müssen. Dazu sind standardisierte, beherrschbare, branchenunabhängige Architekturen zentraler Schlüssel zur Erreichung eines Wettbewerbsvorteils (Qualität, Kosten, Time-to-Market) und zur Erhaltung von Arbeitsplätzen.

[6]
FSP Virtual Engineering: Um die benötigten, auf Embedded Systems basierenden Anwendungen mit den geforderten Qualitäten realisieren zu können, sind verbesserte Entwicklungsprozesse, -methoden und -werkzeuge notwendig, durch die eine erhöhte Effizienz, die frühzeitige Absicherung von Konzepten, Produktivitätsgewinne in Bezug auf Qualität, Kosten, Zeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit, sowie die Beherrschung der Komplexität domänenübergreifender Systeme ermöglicht wird.

2 SCOPE DER ROADMAP

Immer dann, wenn Hardware- und Softwarekomponenten in ein umfassenderes Produkt[13] *integriert sind, um produktspezifische Funktionsmerkmale zu realisieren, bezeichnen wir sie als „Eingebettete Systeme" bzw. „Embedded Systems" (ES)*[14]*. Das Spektrum von Produkten, welche unter Verwendung von Eingebetteten Systemen realisiert werden, überdeckt zahlreiche für den Wirtschaftsstandort Deutschland entscheidende Branchen wie etwa Fahrzeugbau, Automatisierungs- und Produktionstechnik, Luft- und Raumfahrt, Medizintechnik, Umwelt- und Energietechnik, Consumer Electronics, Mobilkommunikation, Bahntechnik und Sicherheitstechnik.*

Die Namensgebung „Eingebettete Systeme" weist darauf hin, dass diese zwar für die Ausprägung von Produktmerkmalen unverzichtbare Bestandteile darstellen, für den Endanwender jedoch entweder unsichtbar sind (insbesondere bei „autonomen Systemen") oder diesem in der Durchführung von Aufgaben assistieren und damit zwar wahr-

13 Der Begriff „Produkt" ist in diesem Zusammenhang weit gefasst und umfasst in diesem Sinne auch auf eingebetteten Systemen aufsetzende Dienstleistungen wie Logistik, Patientenfernüberwachung, Verkehrsführung, ...

14 In diesem Dokument werden die Begriffe „Eingebettete Systeme" und „Embedded Systems" gleichwertig benutzt.

nehmbar, aber nicht beeinflussbar sind und in der Regel nur einen kontrollierten Eingriff über fest definierte Interaktionsschnittstellen erlauben („Assistenzsysteme"). Für die oft durch Eingebettete Systeme realisierten Überwachungs-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben wird die Beobachtbarkeit und Beeinflussbarkeit der Produktumgebung über vielfältige Formen oft räumlich verteilter Sensoren und Aktuatoren realisiert, welche etwa im Bereich der Sensorik von im Körper implantierbaren Biosensoren über in Reifen integrierte Drucksensoren zu Video und Radar reicht.

Dieses, vor allem aber eine hohe Anzahl einzuhaltender technischer Randbedingungen, die für die Produktintegration unverzichtbar sind, unterscheidet Eingebettete Systeme von allgemeinen IT-Systemen. So sind für mobile Endgeräte sowohl Gewicht als auch Packungsgröße und Leistungsaufnahme beschränkt, in verkehrstechnischen Anwendungen sind oft Echtzeitanforderungen und Ausfallsicherheit zu gewährleisten, teilweise gilt es – wie insbesondere in Luft- und Raumfahrt – die verlässliche Arbeitsweise auch unter extremen Umgebungsparametern (Temperatur, Vibration, ...) zu gewährleisten. Schließlich wird die Gesamtfunktionalität in vielen Produkten nur durch ein abgestimmtes Zusammenspiel von Eingebetteten Systemen mit einerseits elektronischen und mechanischen Systemen, andererseits mit auf sie aufsetzenden oft selbst hochgradig komplexen Diensten realisiert, welche „konventionelle" IT-Technologie benutzen. Die Einbeziehung der Schnittstellen zu Elektronik und Mechanik, zu umgebenden IT Systemen, und – z. B. bei Assistenzsystemen – der Schnittstelle zum Menschen, erfordert damit einen Disziplinen übergreifenden Systementwurf, um robuste, wartbare Gesamtarchitekturen zu definieren.

Gegenstand dieser Roadmap ist die Identifikation von Forschungsprioritäten für Eingebettete Systeme zur Lösung gesellschaftlicher und ökonomischer Herausforderungen der Bundesrepublik Deutschland und deren Einordnung in kurz-, mittel-, und langfristig zu erreichende Zielsetzungen. Sie macht damit Vorschläge zur Konkretisierung der Hightech-Strategie der Bundesregierung für die dort unter IKT subsumierte[15] Querschnittstechnologie Eingebettete Systeme, und erweitert im Bereich Eingebettete Systeme die Forschungsstrategie IKT2020, die Embedded Systems als „wahre Stärke der deutschen IuK-Technologien"[16] identifiziert. Sie wurde unter Einbeziehung einschlägiger Studien, Roadmaps[17] und Expertenanhörungen[18] unter Leitung eines Steuerkreises[19] mit

15 Hightech-Strategie, S. 57: Über 90 Prozent aller Prozessoren arbeiten nicht in einem PC, sondern im Verborgenen als so genannte „Embedded Systems", wie etwa in Antiblockiersystemen im Automobil, in Maschinensteuerungen, in Telefonanlagen und medizinischen Geräten. Bei den „Embedded Systems" kann Deutschland auf einer guten technologischen Ausgangslage aufbauen und neue Wachstumsimpulse für starke deutsche Branchen erwarten.

16 IKT2020, S. 11: „Die wahren Stärken der deutschen IuK-Technologie liegen indes im Verborgenen. Und doch sind sie allgegenwärtig. „Embedded Systems" – in Produkte eingebettete Hard- und Softwaretechniken allein bildeten laut BITKOM 2005 einen Weltmarkt von 138 Milliarden €, der auf rund 194 Milliarden € im Jahr 2010 steigen wird."

17 siehe Abschnitt 7.4.

18 siehe Abschnitt 7.2.

19 siehe Abschnitt 7.1.

Vertretern aus Industrie und Forschung erstellt, welche insbesondere die für das Themenfeld relevanten Innovationsallianzen SPES2020 und E|ENOVA repräsentieren oder in federführender Rolle in der Joint Undertaking ARTEMIS beteiligt sind. Die Sicht des Maschinenbaus ist nur partiell für den Bereich Robotik berücksichtigt (siehe hierzu z.B. [VDI 2009b]). Die Roadmap stellt zunächst quantitativ die Relevanz von Eingebetteten Systemen im Abschnitt 3 dar. Qualitativ wird dies durch die beispielhafte Darstellung von Beiträgen Eingebetteter Systeme zur Lösung gesellschaftlicher und ökonomischer Herausforderungen in Abschnitt 4 diskutiert – dieser stellt somit aus „Kundensicht" an Hand von Szenarien dar, wie etwa die Lebensqualität im Alter durch auf Eingebetteten Systemen aufsetzende Produkte verbessert werden kann. Die zur Lösung der Herausforderungen erforderlichen Technologie- und Prozessinnovationen im Bereich der Eingebetteten Systeme werden in Abschnitt 5 dargestellt.

Abschnitt 6.1 schlägt sechs prioritäre Forschungsfelder vor, in denen der zukünftige Forschungsbedarf für eingebettete Systeme umrissen wird und welche insgesamt die geforderten Technologie- und Prozessinnovationen überdecken. Den Brückenschlag zwischen dieser Fachsicht und den Herausforderungen des vierten Abschnitts wird durch die im Rahmen der prioritären Forschungsfelder etablierten „Capabilities"[20] geleistet: Abschnitt 6.1 stellt ebenfalls dar, wie durch Zusammenführung von Technologie- und Prozessinnovationen welche neuen System-Fähigkeiten und Entwicklungs-Kernkompetenzen („Capabilities") mit welchen Forschungsinvestitionen geschaffen werden können. Abschnitt 6.2 ordnet diese zeitlich an und definiert damit im Kern die nationale Roadmap. Zu geeigneten Förderinstrumenten wird in Abschnitt 6.3 Stellung genommen.

Über die Umsetzung der hier vorgeschlagenen Forschungsprioritäten hinaus sind weitere Maßnahmen erforderlich, damit daraus resultierende Innovationen zur Lösung gesellschaftlicher und ökonomischer Herausforderungen führen können. Diese verlangen oft sowohl branchen- wie auch disziplinübergreifende Kooperationen und erfordern damit die Etablierung oder Erweiterung von dafür notwendigen und aufgrund der globalen Verflechtung in der Regel weltweit zu etablierenden Interoperabilitätsstandards. Auf nationaler Seite sind in der Ausbildung verstärkte Anstrengungen zur Bereitstellung von qualifizierten Absolventen mit stark interdisziplinären Fachkenntnissen im Bereich Eingebettete Systeme zu unternehmen.

Zu den Rahmenbedingungen für die Einführung gehören darüber hinaus Nachweise zur Sicherheit (im doppelten Sinne von „Safety" und „Security"), wie sie teilweise bereits

[20] Im nachfolgenden unterscheiden wir unter dem Begriff „Capability" einerseits zwischen Fähigkeiten eingebetteter Systeme, die durch Technologieinnovationen bewirkt werden, und andererseits zur Entwicklung solcher Fähigkeiten benötigten Kernkompetenzen, welche durch Prozessinnovationen geschaffen werden.

durch einschlägige Normen gefordert werden, und Maßnahmen zum Schutz der Privatsphäre. Untersuchungen zur Akzeptanz und Technikfolgenabschätzung vor der Einführung von durch Eingebettete Systeme ermöglichten Innovationen sind insbesondere im Umfeld von Lösungen für die Gesundheitsversorgung und die alternde Gesellschaft geboten. Schließlich setzen viele der für die Sicherung eines Produktivitätsvorsprungs vorgeschlagenen Maßnahmen die Etablierung von neuen Geschäftsmodellen und Referenzplattformen voraus; erste Anregungen hierzu werden in Abschnitt 6.4 adressiert.

3 BEDEUTUNG VON EMBEDDED SYSTEMS FÜR DEUTSCHLAND

Eingebettete Systeme sind für den Wirtschaftsstandort Deutschland von herausragender Bedeutung: Zum einen sind sie wesentlicher Bestandteil wichtiger Industriezweige, in denen Deutschland weltweit eine führende Position einnimmt – wie etwa im Automobilbau, in der Automatisierungstechnik und im Maschinen- und Anlagenbau – bzw. in denen Deutschland eine solche Vorreiterrolle übernehmen kann – wie etwa in der Umwelt- und Energietechnik oder der Medizin- und Gesundheitstechnik. Zum anderen stellt der Bereich hoch entwickelter Eingebetteter Systeme selbst einen für den Hightech-Standort Deutschland starken Wettbewerbsvorteil und Arbeitsmarktfaktor dar. Dies zeigt sich sowohl in den domänenübergreifenden Umsatz- und Beschäftigtenzahlen wie auch an der zunehmenden Nachfrage deutscher Expertise auf diesem Gebiet von Seiten ausländischer Investoren[21].

Der globale Markt für Embedded Systems lässt sich nur schätzen, da er aufgrund der Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Branchen stark fragmentiert ist. Eine Prognose für das Jahr 2009[22] geht von über 71 Mrd. € Weltmarktvolumen aus und veranschlagt ein Wachstum auf über 40 Mrd. eingebettete Anwendungen bis zum Jahr 2020 weltweit, während andere Quellen[23] den globalen Markt auf 60 Mrd. €[24] bis hin zu 138 Mrd. €[25] beziffern. Betrachtet man das weltweite Marktvolumen eingebetteter Software Systeme in einzelnen Branchen, so entfielen laut VDC 2008 in 2007 auf die Automobil- und Transportbranche ca. 5 Mrd. US-$, auf die Automatisierungstechnik ca. 5,2 Mrd. US-$ und auf die Medizintechnik ca. 1,8 Mrd. US-$. In diesen drei Branchen wurden durch die Industrie im Jahr 2007 weltweit mehr als 22.000 FuE-Projekte mit Gesamtentwicklungskosten von über 30 Mrd. US-$[26] initiiert, von denen branchenübergreifend ca. 50% der Kosten auf die Eingebettete Software-Entwicklung entfielen. Für kommerzielle Software-Lösungen (Entwicklungswerkzeuge und -umgebungen, etc.) wurden dabei in diesen drei Branchen ca. 874 Mio. US-$ ausgegeben.

---

21 BITKOM 2008, S. 18.
22 StudyTrends, S. 1.
23 Aufgrund unterschiedlich breiter Interpretationen des Begriffs Eingebettete Systeme sind die aus verschiedenen Quellen resultierenden Zahlen nicht immer vergleichbar.
24 TUM 2009.
25 BITKOM 2005.
26 Quelle: Eigene Schätzungen auf Grundlage von Daten aus VDC 2008.

Der deutsche Markt für Embedded Systems ist der drittgrößte hinter den USA und Japan[27]. Er wird für 2007 auf über 18,7 Mrd. € geschätzt und wird weiter um durchschnittlich 9-10% pro Jahr wachsen[28].

Eingebettete Systeme stellen in vielen für Deutschland wichtigen Branchen eine Schlüsseltechnologie dar, sind Innovationstreiber[29] und durch Diversifizierung von Produkten in Bezug auf Funktionalität und Qualität maßgeblich am Erhalt von Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätzen dieser Branchen beteiligt.

In der Automobilbranche waren in Deutschland im Jahr 2007 ca. 834.000 Arbeitnehmer beschäftigt, mehr als doppelt so viele wie in der zweitgrößten europäischen Arbeitgebernation der Automobilbranche Frankreich mit 258.000 Arbeitsplätzen[30]. Der Umsatz im Jahr 2007, den die deutsche Automobilbranche erwirtschaftete, betrug 293 Mrd. €[31]. Damit befindet sich die Branche in der Spitzengruppe der größten Wirtschaftszweige zusammen mit dem Maschinenbau, der Elektrotechnik, dem Ernährungsgewerbe, und der chemischen Industrie.

Der Wertanteil von elektrischen und elektronischen Komponenten – und damit zum Großteil von Embedded Systems – im Automobil nimmt stark zu. Er lässt sich für das Jahr 2007 auf ca. 25% in einem Personenfahrzeug schätzen[32] und wird bis 2015 auf ca. 35% wachsen[33]. Dabei liegt der Kostenanteil für Embedded Software in Neuentwicklungen bereits heute über 50%[34]. Prognosen gehen allein für den Umsatz mit elektronischen Komponenten im Automobil von 84 Mrd. € für das Jahr 2011 aus[35]. Dementsprechend hoch sind auch die FuE-Aufwendungen im Fahrzeugbau: 20,9 Mrd. € setzte die Branche 2007 dafür ein. Mit fast 40% der FuE-Aufwendungen liegt der Fahrzeugbau damit vor der Elektrotechnik, der chemischen Industrie, dem Maschinenbau, den Unternehmensdienstleistungen und der Metallindustrie[36].

Der Maschinen- und Anlagenbau gehört zu den beschäftigungs- und umsatzstärksten Branchen in Deutschland. Die Anzahl der Beschäftigten[37] lag im Jahr 2008 mit 965.000 an der Spitze der großen deutschen Wirtschaftsgruppen, der Umsatz betrug im gleichen Jahr 205 Mrd. €. Die Produktion von Maschinen ist 2008 im fünften Jahr in Folge gewachsen. In diesem langen Aufschwung konnte insgesamt ein Produktionsanstieg von preisbereinigt rund 38% erreicht werden. Der Anteil von Embedded Systems im Maschinen- und Anlagenbau ist durch die vielfältigen Anwendungen von automati-

27 StudyTrends, S. 45.
28 BITKOM 2008, S. 10.
29 Z.B. werden 90% der Innovationen im Automobil von Eingebetteten Systemen bestimmt, StudyTrends, S. 23.
30 EU EconomicReport, S. 27.
31 VDMA 2009, S. 4.
32 StudyTrends, S. 32.
33 Mercer.
34 VDC 2008.
35 CATRENEPartB, S. 38.
36 Stifterverband.
37 Diese und die folgenden Zahlen aus VDMA 2009.

sierten Maschinen und Anlagen schwer abzuschätzen. Laut einer Tendenzumfrage des VDMA in 2008[38] liegt der Anteil von IT und Automatisierungstechnik und damit von Embedded Systemen bei 25%, Jeder vierte Mitarbeiter in der Entwicklung und Konstruktion im Maschinenbau ist heute ein Softwareentwickler oder Automatisierungstechniker. Der VDMA nennt explizit die Innovationskraft als Schlüssel für zukünftigen Erfolg der Branche: „Ein unverzichtbarer Schlüssel zum weiteren Erfolg sind forcierte Produkt- und Prozessinnovationen."[39] Dementsprechend sind auch die F&E-Ausgaben im Maschinenbau seit 2005 gestiegen und betrugen im Jahr 2008 5,6 Mrd. €[40].

Im Bereich der Elektronikentwicklung kann Deutschland auf ausgeprägtes Know-how und einen bereits erschlossenen Markt verweisen. Die Anzahl der Beschäftigten in der Elektrotechnik- und Elektronikindustrie lag im Jahr 2007 bei 830.000 Personen, der Umsatz betrug im gleichen Jahr 182 Mrd. €[41]. Deutschland ist führender Produktionsstandort in Europa und steht weltweit an fünfter Stelle. Die deutsche Elektroindustrie investierte 11 Mrd. € in FuE-Projekte, was über 6% des Umsatzes und ca. einem Fünftel der FuE-Aufwendungen der gesamten Industrie entspricht. Die erhebliche Schnittmenge mit der Fahrzeugelektronik ist hier nicht mit erfasst. Die Innovationskraft der deutschen Elektrounternehmen ist besonders groß: Über 40% des Umsatzes erzielen die Unternehmen mit Produkten, die höchstens drei Jahre alt sind.

Das Marktvolumen der Medizintechnik in den Industriestaaten wird auf 193 Mrd. € geschätzt. Davon werden 24 Mrd. € von Eingebetteten Systemen beigesteuert[42]. Hochrechnungen weisen darauf hin, dass in diesem Marktbereich das Potenzial noch längst nicht ausgeschöpft ist: Der Umsatz, der mit elektronischen Komponenten im Jahr 2011 erwirtschaftet werden kann, wird mit 61,59 Mrd. € angegeben[43]. Deutschland ist in der Medizintechnik weltweit die Nummer zwei hinter den USA. Der Umsatz der Branche betrug im Jahr 2007 17,3 Mrd. € und die Branche zählte 170.000 Beschäftigte[44]. Für Neuentwicklungen liegt der Anteil der Kosten für Entwicklung von Embedded Software bei 47,6 %[45]. Die FuE-Aufwendungen betragen 1,5 Mrd. €, was ca. 9% des Umsatzes entspricht[46].

38 VDMA 2008.
39 VDMA 2007, S. 3.
40 Stifterverband.
41 Die folgenden Zahlen zur Charakterisierung der Elektroindustrie stammen aus DeutscheBankResearch.
42 StudyTrends, S. 46.
43 CATRENE PartB, S. 46.
44 BVMed_AnnualReport08/09, S. 5.
45 VDC 2008.
46 SPECTARIS_Branchenbericht 2009, S. 21.

Im Bereich der Energietechnik wurden im Jahr 2007 rund 13 Mrd. € umgesetzt und ca. 65.400 Menschen beschäftigt[47]. Obwohl Embedded Systems hier aktuell eine weniger ausgeprägte Rolle spielen als beispielsweise die Mikro- und Nanotechnik[48], wird sich ihre Bedeutung und ihr Anteil an den Innovationen und der Wertschöpfung in dieser Branche in naher Zukunft stark erhöhen. Grund hierfür sind vor allem innovative Techniken zur Energieverbrauchsmessung (Smart Metering), dem Energie- und Lastmanagement, sowie des Intelligenten Netzes („Smart Grid"). Prognosen gehen beispielsweise davon aus, dass allein durch eine beschleunigte bundesweite Einführung intelligenter Haushaltszähler bis zu 10 Mrd. € Investitionen in den 6 Jahren ab 2010 möglich sind[49].

Die Luft- und Raumfahrt ist ein Bereich, der seit jeher auf neuester Technik basiert. In 2008 waren in dieser Branche ca. 93.000 Menschen direkt beschäftigt; der Umsatz betrug ca. 22 Mrd. €[50]. Der Wertanteil von Embedded Systems an einem Flugzeug liegt bei ca. 12%[51]. Die Luft- und Raumfahrt verbindet fast alle derzeitigen Hochtechnologien im Bereich Embedded Systems, wie beispielsweise die Elektronik, Robotik, Mess-, Steuer- und Regeltechnik. Dadurch ist die Branche nicht nur ein Innovationstreiber für die eigenen Anwendungen, sondern beeinflusst auch viele andere Industriezweige. Der Anteil der FuE-Ausgaben in der Luft- und Raumfahrt gemessen am Gesamtumsatz gehört mit 16%[52] zu den höchsten im Vergleich zu den anderen Industriezweigen.

In all diesen Branchen spielen Embedded Systems somit eine herausragende Rolle. Sie sind eine Querschnittstechnologie, deren Wichtigkeit nicht überschätzt werden kann. Eine große Mehrheit der in einer Studie[53] befragten Experten sind der Ansicht, dass Embedded Systems die Produkt-, Dienstleistungs- und Prozesswelt zumindest teilweise revolutionieren und notwendige Voraussetzung zur Lösung vieler ökonomischer und gesellschaftlicher Probleme in Deutschland sind. Die Rolle von Embedded Systems als Innovationstreiber zeigt sich u.a. auch an einem signifikanten Anteil von 10% bis 20% an den Gesamt-FuE-Kosten in vielen Industriezweigen[54].

Neben den in Kapitel 4 aufgeführten Handlungsfeldern gibt es noch weitere Bereiche, in denen Embedded Systems von eminenter Bedeutung sind, die aber zumindest aktuell für den Wirtschaftstandort Deutschland eher von nachrangiger Bedeutung sind und deshalb in der Roadmap nicht näher betrachtet werden, z.B. Freizeit („embedded systems" im Sport), Unterhaltung (mobile Rollenspiele, elektronische Musik-Player, etc.) oder auch Wehrtechnik (aktive Schutzsysteme).

Die folgende Tabelle auf Seite 77/79 gibt einen Überblick über Stärken, Schwächen,

47 Energietechnik.
48 VDE Trendreport.
49 Energietechnik.
50 BMWi Bericht.
51 Airbus 2007.
52 BMWi Bericht
53 Zukunft.
54 Eigene Berechnungen auf Grundlage einer Befragung von industriellen Teilnehmern der Expertenworkshops.

Chancen und Gefahren für den wirtschaftlich so bedeutenden Bereich Eingebettete Systeme in Deutschland (SWOT-Analyse):

STÄRKEN (STRENGTHS)	SCHWÄCHEN (WEAKNESS)
Industrie	
• Eingebettete Systeme treiben wesentliche Marktsegmente im Industriestandort Deutschland. • Deutschland ist weltweiter Marktführer in relevanten Bereichen (Automatisierungstechnik, Mechatronik, Automotive, Energietechnik). • Eingebettete Systeme sind ein wesentlicher Differentiator für das Exportgeschäft: German Engineering ist ein Markenzeichen für Qualität und Zuverlässigkeit. • In Deutschland sind starke Abnehmerbranchen mit hohem Innovationsbedarf vorhanden (z.B. Automotive, Maschinen- und Anlagenbau, Luft- und Raumfahrt, Energie, Logistik). • In Deutschland wird die Wertschöpfungskette im Bereich Eingebettete Systeme vollständig abgedeckt. • In Deutschland sind viele Hersteller von Einzelkomponenten sowie eine große Anzahl innovativer KMU im Bereich Eingebettete Systeme vorhanden.	• Eingebettete Produkte für den Unterhaltungs- und Verbraucher-Bereich kommen vorwiegend aus dem Ausland (USA, Fernost). • Die Rolle von Eingebetteten Systemen als Querschnittstechnologie und Innovationstreiber wird kaum wahrgenommen. • Fehlende Standardisierung, fehlende Interoperabilitäts- und Prozess-Standards verursachen Heterogenität und Insellösungen. • Die Umsetzung von Inventionen in Innovationen, also Markterfolge, gelingt noch ungenügend.
Forschung	
• In Deutschland existiert eine ausgeprägte Forschungslandschaft hoher Güte in den an Eingebetteten Systemen beteiligten Einzeldisziplinen. • Es gibt eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie im Umfeld Eingebettete Systeme. • Alle für das Thema Eingebettete Systeme erforderlichen Kompetenzfelder sind vorhanden.	• Die Forschung auf dem Gebiet der Embedded Systems ist immer noch zu stark fragmentiert und jeweils auf einzelne Branchen beschränkt. • Nationale und europäische Forschungsstrategien sind wenig kohärent
Ausbildung	
• Universitäten und Studierende sind auf die Entwicklung anwendungsorientierter Technologien und Lösungen fokussiert. • Eine gute Ausbildung sowohl für Ingenieure als auch für qualifizierte Facharbeiter ist vorhanden.	• Es gibt nur wenige Studiengänge, die die Bandbreite der für den Bereich Eingebettete Systeme notwendigen Wissensdomänen integrieren. • In der klassischen Ausbildung ist der Bereich Systems-Engineering zu wenig verankert.

CHANCEN (OPPORTUNITIES)	GEFAHREN (THREATS)
Standardisierung	
• Die Entwicklung relevanter branchenübergreifender Standards (Architekturen, Modellierungssprachen) ermöglicht neue Innovationen. • Offene Standards schaffen neue Marktmöglichkeiten.	• Branchenübergreifende Standardisierungen fehlen.
	Industrie
	• Hersteller einzelner Komponenten sind mangelhaft vernetzt / zersplittert. • Heterogenität und Insellösungen herrschen vor. Dadurch existiert oft eine Abhängigkeit von einzelnen Toolanbietern mit daraus resultierenden kommerziellen Problemen.
Forschung & Entwicklung	
• Die deutsche Führungsrolle in der Entwicklung von disziplinenübergreifenden Lösungen für gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen ermöglicht eine frühe Markteinführung solcher Lösungen. • Eingebettete Systeme sind ein Technologiefeld, in dem alle Aspekte (Forschung, Entwicklung, Produktion, Integration) in Deutschland erbracht werden und somit Markt- und Technologieführerschaft erreicht werden kann. • Das F&E-Feld Eingebettete Systeme bietet die Chance der Etablierung eines Innovationstreibers als Grundlage für (andere) deutsche Industrien. • Deutschland kann in hohem Maße an den signifikanten F&E-Förderungen der EU partizipieren.	• Die Fragmentierung der Forschung birgt die Gefahr, dass zwar viel Geld ausgegeben, aber in den vielen Forschungsfeldern und -projekten kein Durchbruch erzielt und eine Standardisierung eher behindert wird.
Regulierung/Umfeld	
• Die hohen Datenschutzanforderungen in Deutschland erfordern innovative Lösungen.	• Unklare Regulierungen verunsichern innovative Firmen. • Die Bevölkerung ist bei der Einführung neuer Technologien zurückhaltend.
	Ausbildung
	• Es herrscht ein mangelnder Nachwuchs an qualifizierten Ingenieuren (VDI 2009).

4 BEITRÄGE ZUR LÖSUNG GESELLSCHAFTLICHER UND ÖKONOMISCHER HERAUSFORDERUNGEN

Embedded Systems sind eine Querschnittstechnologie, die zentrale Beiträge zur Lösung gesellschaftlicher und ökonomischer Herausforderungen leistet (siehe z.B. auch VDI 2009b). Dieses Kapitel stellt beispielhaft anhand von Szenarien solche Beiträge dar.

4.1 ALTERNDE GESELLSCHAFT UND GESUNDHEIT

Eingebettete Systeme stellen eine Schlüsseltechnologie dar, um angesichts einer sich verändernden Altersstruktur neue Lösungen zur Sicherung der Lebensqualität im Alter sowie der Gesundheitsvorsorge anzubieten. Die steigende Lebenserwartung jedes Einzelnen, verbunden mit einem Sinken der Geburtenrate führt zu einer Umkehrung der Alterspyramide und damit zum Verlust der Tragfähigkeit des Generationenvertrags. In der Konsequenz müssen neue Lösungen gefunden werden, um die alltägliche pflegerische und medizinische Versorgung älterer Menschen sicherzustellen. Ein vorrangiges Ziel, das nicht nur der Kostensenkung dient, sondern gleichzeitig auch den persönlichen Wünschen der überwiegenden Mehrheit der Menschen entgegenkommt, ist das möglichst lange Verbleiben in der eigenen Wohnumgebung. Hierzu können Eingebettete Systeme einen wesentlichen Beitrag leisten: Sogenannte Ambient Assisted Living- (AAL-) Technologien können bis zu einem gewissen Maße für Komfort und Unterstützung im Alltag sorgen, Sicherheit auch in potentiell kritischen Situationen schaffen, Notfallsituationen erkennen und Alarme auslösen, durch telemedizinische Ansätze sowohl präventiv wie auch rehabilitativ das Gesundbleiben und -werden unterstützen und nachlassende körperliche und geistige Fähigkeiten ausgleichen. Wir veranschaulichen dies an Hand von vier Szenarien, in denen zunächst die Perspektive des Lebens im Alter, dann die Sicherung der Gesundheitsvorsorge, das Leben mit Chronischen Krankheiten, sowie schließlich die soziale Vernetzung im Mittelpunkt stehen.

> 4.1.1 Szenario 1: Selbstständiges und eigenverantwortetes Leben im Alter

Traditionelle Brüche der Lebensbiographie mit dem Eintritt ins Rentenalter werden ersetzt werden durch vielfältige Formen der Integration der „älteren Generation" in soziale und produktive Vernetzungsstrukturen, um so dem doppelten Ziel des Ausgleichs des drastisch sinkenden Arbeitsmarktes in klassischen Beschäftigungsstrukturen wie der Gestaltung eines selbständigen und eigenverantworteten Lebens im Alter gerecht zu werden. Eingebettete Systeme können diesem Ziel in vielfältiger Weise dienen: Sie können älteren Menschen in ihrer vertrauten Wohnumgebung kreatives und partizipatives Arbeiten ermöglichen, in Arbeitsprozessen eingesetzte Geräte können so gestaltet werden, dass sich auch für Ältere ihre Bedienung intuitiv erschließt, Eingebettete Systeme können aber auch in der Wahrnehmung und Durchführung der Aufgaben des täglichen Lebens assistieren[55]. Beispiele hierfür relevanter Technologieinnovationen sind selbst lernende, kognitive, adaptive Systeme, sich selbst erschließende intuitive, multimodale (insb. Gestik), intelligente Interaktionsschnittstellen und virtuelle Telepräsenz. Diese stellen Bausteine in der Schaffung eines „intelligenten Lebensumfeldes" dar, in dem der Ältere in einem durch ihn kontrollierten Spektrum an Tätigkeiten unterstützt wird. Eine besondere Herausforderung für die technische Realisierung stellt hier und in nachfolgenden Szenarien die Sicherstellung der Privatsphäre trotz automatisierter Auswertung des Lebensumfeldes dar.

> 4.1.2 Szenario 2: Flächendeckende gesundheitliche Betreuung

Wie können wir trotz einer zu erwartenden relativen Verknappung an Pflegepersonal und Ärzten flächendeckend eine hochwertige medizinische Versorgung sicherstellen und dabei eine Kostenexplosion vermeiden? Eingebettete Systeme erlauben neuartige Lösungsansätze, die anhand dieses und des folgenden Szenarios verdeutlicht werden. Ihnen gemein ist die durch Eingebettete Systeme realisierbare scheinbar vollständige Virtualisierung des Ortes von Arzt und Patient: Behandlungskompetenz kann scheinbar unmittelbar vor Ort für jeden Patienten verfügbar sein, umgekehrt können viele zur Diagnosefindung erforderliche Patientendaten im Prinzip jederzeit jedem Arzt zur Verfügung gestellt werden. Zahlreiche Innovationen sind hierfür erforderlich.

So erfordert etwa die Fernüberwachung des Patientenzustands nicht-invasive, im Körper, am Körper und in der Umgebung des Patienten integrierte Sensorik, welche untereinander und mit intelligenten Auswertestationen sicher und ausfallsfrei vernetzt ist. Auswertestationen bewerten unter Hinzuziehung der digitalen Krankenakte laufend aktuelle Messdaten und lösen rechtzeitig Alarmhinweise an Pflegepersonal oder Ärzte aus. Bei Bedarf kann durch Telepräsenz der Arzt Kontakt mit dem Patienten aufnehmen.

---

55 HighTechStrategie, S.32: Medizintechnik kann in einer alternden Gesellschaft Patientinnen und Patienten mit Behinderungen helfen, ein selbständiges Leben in Aktivität und mit Teilhabe an der Gesellschaft zu führen. Um diese Entwicklungen schnell nutzen zu können, muss die frühzeitige Verbindung zwischen Technik und Medizin und die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Kostenträgern und Wirtschaft weiter vorangetrieben werden.

Gekoppelt mit ansteuerbaren im Körper oder am Körper getragenen medizinischen Geräten können Behandlungsparameter neu eingestellt werden. Variationen dieses Szenarios können für Präventivmedizin (Schwerpunkt auf automatisierter Beratung des Patienten in der Durchführung von gesundheitsfördernden Maßnahmen auf der Basis von individuell überwachten Trainingsprofilen), zur Reduktion der stationären Liegezeiten im post-operativem Bereich oder zur Reduktion der Anzahl Medizinischer Versorgungszentren in gering bevölkerten Regionen verwendet werden. Schlagzeilen haben bereits ferngesteuerte Operationen gemacht – sie verdeutlichen die Möglichkeit, im Bedarfsfall interdisziplinäre Behandlungsteams virtuell am Bett des Patienten zusammenführen zu können.

Solche Lösungsansätze erfordern zahlreiche technologische Innovationen (neben den bereits in Szenario 4.1.1 genannten: zuverlässige, sichere Netzwerkverbindungen zwischen ärztlichem Personal, Patient, und Sensoren sowie Aktuatoren einschließlich sicherer bidirektionaler Authentifizierung, Sensoren und Aktuatoren mit minimalem Energiebedarf, sichere Funkverbindungen zwischen implantier- und injektierbaren Sensoren/Aktuatoren und Stationen außerhalb des Körpers, multimodale Echtzeitauswertung von heterogenen Datenquellen wie z.B. CT, Ultraschall, MRI, Radar oder online Messdaten auf der Basis physiologischer Organmodelle) und setzen umfangreiche Begleitmaßnahmen im Bereich der Standardisierung, der Zulassung, dem Schutz der Privatsphäre sowie der Führung von Sicherheitsnachweisen voraus.

> 4.1.3 Szenario 3: Leben mit chronischen Krankheiten

Ältere Menschen leiden heute weniger an akuten, sondern vielmehr an chronischen Krankheiten. Bei über 60-jährigen Patienten in Arztpraxen wurden bei mehr als 65% Hypertonie und bei mehr als 25% Diabetes Mellitus diagnostiziert[56]. Dabei ist zu bedenken, dass sie i.d.R. mehrere chronische, behandlungsbedürftige Krankheiten gleichzeitig haben, die sich oft untereinander noch negativ beeinflussen (chronische Krankheiten machen 3/4 der Gesundheitskosten aus[57]; 40% der Bevölkerung haben eine chronische Krankheit; 16% zwei oder mehr Diagnosen[58]; Hypertonie und Diabetes Mellitus wurden zusammen bei mehr als 16% der über 60-jährigen Patienten festgestellt[59]). Zu dieser Zunahme der Morbidität kommen altersbedingte Funktionsverluste hinzu. Hierzu gehören u.a. die Verminderung der Mobilität, schlechtere Hör- und Sehfähigkeiten und Einbußen bei der Kognition. Diese Funktionseinbußen sind keine Krankheiten, aber sie beeinflussen die Krankheiten und deren Verlauf[60].

Erhöhte Morbidität und Funktionseinbußen führen zu höherer Hilfsbedürftigkeit. Besonders der Bedarf am kontinuierlichen Monitoring der relevanten Parameter wird

56 JournalHypertonie, S. 7-11.
57 BerichtSachverständigenrates, S. 443.
58 Alter und Gesellschaft.
59 JournalHypertonie, S. 7-11.
60 BASE.

heute schon teilweise durch persönliche medizinische Überwachungssysteme (Herzschrittmacher, Blutdruck- und Blutzuckermessgeräte, Körperanalysewaagen, etc.) zur Unterstützung der Prävention und Notfallerkennung gedeckt. Zur Kompensation von Hörverlusten sind insbesondere Hörgeräte zu nennen; zu Mobilitätseinschränkungen siehe folgendes Kapitel. Für eine flächendeckende Versorgung und optimales Management der chronischen Krankheiten sind jedoch, zusätzlich zu den unter 4.1.1 und 4.1.2 genannten Technologieinnovationen im Bereich Eingebettete Systeme, eine weitere Miniaturisierung der Geräte und Verbesserungen der Analysemöglichkeiten zu leisten und darauf aufsetzend die Vernetzung dieser Geräte mit elektronischen Krankenakten in Praxen und Krankenhäusern[61] notwendig.

> 4.1.4 Szenario 4: Soziale Vernetzung

Eingebettete Systeme sind ein wesentlicher Baustein, um sozial eng verbundenen, aber räumlich verteilten Personen und Personengruppen hochwertige Interaktion zu ermöglichen. Die zunehmende persönliche Mobilität, bedingt durch wirtschaftliche Notwendigkeiten oder persönliche Präferenzen, führt dazu, dass man zunehmend auch von nahestehenden Personen getrennt ist. Gleichzeitig bietet das Internet die Möglichkeit, Kontakte z.B. nach gemeinsamen Interessen zu knüpfen und zu pflegen, ohne sich notwendigerweise jemals persönlich zu begegnen. Für diese zunehmend alltäglicher werdenden Situationen gilt es, geeignete Kommunikationsmöglichkeiten zu entwickeln, mit denen man räumliche Distanz kompensieren kann. Dabei sind insbesondere solche Ansätze interessant, die Informationen über andere Personen vermitteln, ohne dass beide Kommunikationspartner dem ihre volle Aufmerksamkeit widmen (wie es bei Telefonaten, Chat oder Email-Austausch erforderlich ist).

Embedded Systems können helfen, Informationen über den Ort, das Verhalten, die körperliche Verfassung und die Umgebung von Personen aufzunehmen und daraus Informationen z.B. über die Befindlichkeit des Gegenübers abzuleiten. Dazu müssen neuartige Geräte und Schnittstellen und für „Privatheit", „Vertrautheit", „Anwesenheit", etc. neue Beschreibungskonzepte entwickelt werden. Anders als bei der „Alternden Gesellschaft" ist die Herausforderung in diesem Szenario, eine möglichst gut individuell konfigurierbare Gewinnung und Übertragung von Informationen zu ermöglichen und Interaktionsformen zu finden, die weniger Überwachung (im Sinne von Aufmerksamkeit des Kommunikationspartners) benötigen, als das bei medizinischer Überwachung von Patienten der Fall ist, und die sich besser in das Alltagsleben der Nutzer einfügen.

61 Vgl. Dt. Netzwerk Versorgungsforschung.

4.2 MOBILITÄT

Eine große Herausforderung in den nächsten Jahren stellt die Sicherstellung einer nachhaltigen Mobilität der Gesellschaft bei weiterhin zunehmendem Verkehr dar. Dabei sind insbesondere folgende Aspekte von großer Bedeutung:

- Die Mobilität muss umweltverträglich und effizient sein.
- Die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer muss gewährleistet sein.
- In einer alternden Gesellschaft müssen zunehmend ältere Menschen adäquat unterstützt werden.

Anhand dreier Szenarien können beispielhaft die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Forschung und Entwicklung im Bereich der Eingebetteten Systeme veranschaulicht werden.

> 4.2.1 Szenario 1: Green Mobility

Ein wichtiger Stellhebel auf dem Weg zu umweltverträglicher Mobilität ist die Minimierung von Emissionen und Energieverbrauch im Automobil. Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist der konsequente Ausbau alternativer Antriebskonzepte im Fahrzeug. Sowohl Hybrid-Lösungen als auch die Realisierung von Zero-Emission-Fahrzeugen wie des reinen Elektrofahrzeugs sind nur über Software und Eingebettete Systeme erreichbar. Beispiele für intelligente Funktionen, die durch Eingebettete Systeme realisiert werden, sind ein Batteriemanagementsystem zur Gewährleistung eines optimalen, effizienten Energiemanagements in einem Hybrid- oder Brennstoffzellen-Fahrzeug und eine Stopp/Start-Funktion zur Reduktion von Verbrauch und Emission durch Abschalten des Antriebs im Stand. Ein verbessertes Energiemanagement ist im Automobil besonders wichtig, da fast 20% des primären Energiekonsums im Transportbereich verbraucht werden und dies hohe Emissionen mit sich bringt. Um das EU-Ziel der Reduktion des Emissionsausstoßes auf 120g CO2 pro Kilometer erreichen zu können[62], sind insbesondere verbesserte Elektroniksysteme zur Überwachung und Steuerung des Energieverbrauchs und der Emissionen, wie beispielsweise durch intelligente Sensoren und Aktuatoren, notwendig. Nach Schätzungen können dadurch 26% Energieeinsparungen erreicht werden.[63]

Darüber hinaus können intelligente Systeme beispielsweise im Verkehrsmanagement zu einer signifikanten Reduktion von Verbrauch und Emission beitragen. Durch intelligentes, von entsprechenden Steuergeräten bestimmtes vorausschauendes Fahren können nach aktuellen Schätzungen mehr als 5% Treibstoff im Automobil gespart werden. Mit Hilfe von elektronischen Geräten im Fahrzeug kann die Staugefahr um ca. 50% bis 2017 verringert werden. In Geldmitteln ausgedrückt bedeutet dies für Deutsch-

62 Hightech-Strategie, S. 60.
63 CATRENE PartA, S. 46.

land ein Einsparungspotenzial von 50 Mrd. € pro Jahr.[64]

Darüber hinaus können durch Integration von Daten aus verschiedenen Verkehrsleitsystemen eine optimale Wahl und eine möglichst unkomplizierte Nutzung der Verkehrsmittel unterstützt werden („Seamless Mobility"). Umwelt- und nachfrageorientierte Mautsysteme können zur Steuerung des Verkehrsaufkommens und zur Verringerung der Umweltbelastung beitragen.

Ein weiterer wichtiger Stellhebel zur Reduktion von Verbrauch und Emission ist das Gewicht des Transportmittels. Hier können beispielsweise gewichtsoptimierte Elektrik/Elektronik-Architekturen einen Beitrag leisten. Auch dadurch, dass auf Eingebetteten Systemen basierende aktive Sicherheitssysteme den Einsatz schwerer passiver Systeme vermindern können, können mittelbar Emissionen und Verbrauch reduziert werden. Abgesehen vom Einsatz Eingebetteter Systeme spielen bei der Gewichtsreduktion im Fahrzeug natürlich Leichtbau-Konzepte und neuartige Materialien eine entscheidende Rolle.

> 4.2.2 Szenario 2: Die Vision vom unfallfreien Fahren

Auch auf dem Weg zum unfallfreien Fahren im Straßenverkehr spielen Software und Eingebettete Systeme eine entscheidende Rolle. Zahlreiche Fahrerassistenz- und aktive Sicherheitssysteme, die das Fahrzeug sicherer machen oder den Fahrer bei der Unfallvermeidung unterstützen, werden mittels Software durch einen Verbund miteinander vernetzter Steuergeräte realisiert. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist ein Fußgängererkennungssystem, das über verschiedene Sensoren Objekte erkennen kann und dann mittels intelligenter Elektronik Warnungen, Bremseingriffe oder Lenkeingriffe vornimmt. Auch die Nutzung mobiler Geräte, über die beispielsweise neuartige Warnfunktionen realisiert werden können („Car2Pedestrian-Kommunikation"), können den Schutz von Verkehrsteilnehmern erhöhen.

Nach Schätzungen ist bis zum Jahr 2017 eine Reduzierung der Unfälle auf 20% des Niveaus von tödlichen Verkehrsunfällen in Deutschland im Jahr 2005 (5361 Todesfälle[65]) möglich. Dies bedeutet, dass mehr als 4.000 Personen pro Jahr allein auf deutschen Straßen nicht sterben müssten[66]. Die bisher erzielte Verringerung von Unfällen im Jahr 2008 auf 4477 tödlich verunglückte Personen[67] ist unter anderem auf den verstärkten Einsatz von elektronischen Systemen zurückzuführen. Wichtige Herausforderungen liegen hier unter anderem in der korrekten und effizienten Modellierung und Absicherung dieser Systeme. Dabei ist die interdisziplinäre Betrachtung der Systeme von zunehmender Bedeutung, um das komplexe Zusammenspiel von Software, Elektrik/Elektronik, Kommunikationstechnik und Mechanik zu beherrschen.

64 CATRENE PartB, S. 15.
65 Statistisches BA.
66 CATRENE PartB, S. 16.
67 Statistisches BA.

> 4.2.3 Szenario 3: Unterstützung von älteren Menschen

Das Phänomen der alternden Gesellschaft bringt zunehmend höhere Anforderungen an die Sicherheit und den Komfort von Transportmitteln mit sich. Neben neuen Mobilitätskonzepten sind neue leistungsfähige Assistenzsysteme zu entwickeln, die beispielsweise den Fahrer eines Automobils entlasten bzw. unterstützen, ohne ihn vom Verkehr abzulenken.

Assistenzsysteme für ältere Menschen müssen die im Alter gehäuft zu beobachtenden psychophysischen Limitierungen des Leistungsvermögens kompensieren wie die Verschlechterung des Sehvermögens und der Gehörleistung, Einschränkungen der motorischen Beweglichkeit und vermindertes Reaktionstempo. Auch wenn ältere Fahrer ihre Defizite durch Übung sowie eine ausgefeilte Planung und Strategie in Teilen kompensieren können, so dass fahrleistungsbezogen kein höheres Risiko besteht, zeigt der Vergleich des Todesrisikos aller Altersgruppen relativ zu den gefahrenen Kilometern, dass ältere Fahrer schlechter als die jüngeren Fahrer abschneiden. Das Verletzungsrisiko bzw. die Mortalität älterer Menschen ist deutlich höher, wenn sie in einen Unfall involviert sind. Markante Fahrfehler älterer Fahrer sind zum Beispiel das Nichtbeachten der Vorfahrt (etwa 17%), Fehler beim Wenden/Rückwärtsfahren (ca. 12%) und Fehler beim Abbiegen (ca. 9%). Charakteristisch für diese Situationen sind Einfädel- und Spurwechselmanöver, Wende- und Abbiegemanöver sowie Kreuzungssituationen, die Bewältigung von Verkehrskonfliktsituationen und Interaktionen mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Assistenz- und Automationssysteme, die gerade die genannten Fahrsituationen unterstützen, sind ein wichtiger Schritt in Richtung einer adäquaten Unterstützung älterer Fahrer. Auch hier spielen Eingebettete Systeme, die beispielsweise eine umfassende sensorbasierte Umgebungserfassung des Fahrzeugs ermöglichen, eine entscheidende Rolle. Geeignete Bedien- und Anzeigekonzepte stellen hierbei eine zusätzliche Herausforderung dar.

4.3 SICHERHEIT

Die hohe Relevanz des Themas Sicherheit wird in der Hightech-Strategie der Bundesregierung[68] hervorgehoben. Sicherheit ist im deutschen Sprachgebrauch doppelt belegt: Security, im Sinne von Schutz – das System ist gegen Missbrauch Angriffe von außen geschützt, und Safety im Sinne von sicherem Betrieb kritischer Systeme – vom System gehen keine Gefahren aus. In beiden Fällen wird direkter Einfluss auf Leben und Gesundheit der Menschen genommen, in beiden Ausprägungen sind Eingebettete Systeme von zentraler Bedeutung.

68 Hightech-Strategie, S. 36.

> 4.3.1 Safety: Funktionale Sicherheit kritischer Systeme

Eingebettete Systeme unterliegen oftmals strikten sicherheitskritischen Anforderungen, deren Verletzung verheerende Auswirkungen auf Mensch und Technik mit sich bringen kann. Viele Systeme – z. B. in der Avionik oder der Medizintechnik – benötigen daher eine explizite Zulassung, die den Nachweis eines hinreichenden Sicherheitsniveaus erfordert. Für den Nachweis der Sicherheit eines Systems ist Korrektheit weder notwendige noch hinreichende Bedingung. Vielmehr folgt der Sicherheitsnachweis eigenen spezifischen Verfahren, die z. B. die Bestimmung und Bewertung von Risiken (Risikoakzeptanz) erfordern. In diesem Zusammenhang spielen Verfahren zur Qualitätssicherung (Test, Analysetechniken, formale Beweisverfahren) eine wichtige Rolle. Sie liefern einen Beitrag zur Zulassung, ersetzen sie jedoch nicht.

In technischen Anwendungsbereichen geht von Softwarefehlern einerseits potentiell eine Gefährdung aus, andererseits ermöglicht Software aber auch die Unterstützung von Sicherheit, indem sie z. B. fortlaufend Diagnosen des Systemzustands durchführt. Daher ist es unerlässlich, Software in die Sicherheitsanalyse und die Zertifizierung von Eingebetteten Systemen einzubeziehen.[69]

Eingebettete Systeme als bedeutende Innovationstreiber mit hoher querschnittlicher Wirkung bilden das Nervensystem moderner Steuer- und Informationssysteme. In ihnen ist inhärent die funktionale Sicherheit der jeweilig realisierten Produkte sicherzustellen. Dies gilt insbesondere in so wichtigen Gebieten wie Energietechnik, Medizin- und Gesundheitstechnik, Verkehrs- und Transportwesen (mit Automobil-, Schienen-, Luft- und Raumfahrttechnik), Industrieautomatisierung/Robotik, sowie der Informations- und Kommunikationstechnik mit ihren diversen Ausprägungen.

> 4.3.1.1 Transportsysteme

In allen Fällen sind elektronische Systeme zu entwickeln, die im Zusammenspiel von Hardware (meist Prozessoren) und Software (meistens in „eingebetteter Form") die Sicherheit beim Betrieb der gewünschten Funktion sicherstellen müssen. Im Negativfall können hohe negative Folgen für Leben und Gesundheit von Menschen auftreten.

Neben den Steuer- und Regelfunktionen mit Sicherheitsaspekten wird vermehrt ein „Sicherheitscomputer" zur Überprüfung der Richtigkeit des menschlichen Verhaltens oder zur Beschränkung möglicher „Handlungsenvelopen" eingesetzt. Er begrenzt oder korrigiert damit die Handlungsmöglichkeiten des Fahrers/Piloten (Beispiel ASR, ESP, Envelopenbegrenzer). Dies kann aber nur akzeptiert werden, wenn bei der Auslegung des Systems in allen Phasen eine genügend hohe Sicherheit nachgewiesen werden kann.

Es sind Realzeitsysteme zu realisieren, die in Milli- oder gar Mikrosekunden die jeweils richtige Reaktion bewirken müssen. Parallel laufende, in separaten „Partitions" ablaufende Prozesse z. B. dürfen sich dabei nicht gegenseitig behindern oder gar blockieren.

---

[69] SPES 2020, Projektantrag, ZP-AP4.

Durch systematisch abgesicherte formale Entwicklungsverfahren muss die Korrektheit und die Sicherheit des Eingebetteten Systems sichergestellt werden. Formale Analysemethoden müssen entwickelt werden, die das Sicherheitsrisiko situations- und umweltbezogen analysieren und als Requirement dem Designprozess vorgeben. Hier liegt die Herausforderung darin, mittels weiterer Forschung und Entwicklung neue Prozesse, Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die den wirtschaftlichen Schwung nicht begrenzen, sondern eine Verbesserung der Wettbewerbssituation erlauben.

> 4.3.1.2 Automatisierung

In modernen Systemen werden einfache „Ablaufsteuerungen" durch selbstlernende und selbststeuernde Prozesse ersetzt. Häufig werden dabei Funktionen ausgeführt, die im Falle einer Fehlfunktion nicht nur erheblichen materiellen und damit wirtschaftlichen Schaden bewirken, sondern auch die Gesundheit und das Leben von Menschen in unmittelbarer oder auch in weiterer Umgebung gefährden können. Als Beispiel seien hier die Robotik in Produktionsstraßen, die Steuerung chemischer oder biologischer Prozesse oder der Transport kritischer Güter in bevölkerter Umgebung wie auf Baustellen, in der Produktion oder im Verkehr (Kräne) genannt.

Hier gelten die gleichen Anforderungen wie für Transportsysteme. Durch methodisch abgesicherte Entwurfsverfahren muss sichergestellt werden, dass die in den Embedded Systems realisierten Sensor- und Steuerfunktionen unbedingt funktional sicher sind und keine Hardware oder System bedingte Konflikte auftreten. Selbst bei Beeinträchtigungen durch widrige Umweltbedingungen wie Störeinstrahlung, fehlerhafte Informationsübertragung, Daten- und Timingkonflikte, muss das komplexe System ohne Gefährdung von Menschen und Umwelt in eine sichere Position gelangen.

> 4.3.1.3 Medizin

Die Bedeutung von Software als integraler Bestandteil der medizinischen Versorgung nimmt immer mehr zu. Softwaregestützte Systeme steuern, regeln und verwalten medizinische Prozesse. Vom Notarzt bis zur Rehabilitation - ohne Software wären viele Systeme heute nicht mehr funktionsfähig. Dieser Trend setzt sich durch die anhaltende Computerisierung nahezu aller Bereiche des Gesundheitswesens fort. Software wird in Zukunft eine zentrale Rolle bei der medizinischen Produktinnovation spielen, verbunden mit den Herausforderungen immer kürzerer Produktlebenszyklen und komplexer medizinischer Zulassungsverfahren.

In dem Positionspapier „Strategische Bedeutung des Software Engineering für die Medizin"[70] stellen die Autoren fest, dass Geräte der Medizintechnik, ob Großgeräte in den Kliniken oder transportable Diagnostik für den Massenmarkt, einen zunehmenden Teil ihrer Funktionalität über Software realisieren. Als typische Beispiele werden angeführt

[70] StraBeSEfM.

- Steuerungen für medizinische Geräte (Herzschrittmacher, Teleoperationssaal)
- digitale Signalaufbereitung (für Bildgebung, Diagnostik und Monitoring)
- Visualisierung und neuartige Mensch-Maschine-Interaktionsformen
- Integration und Vernetzung der Geräte und Informationssysteme
- (OP-Integration, „body area network")

"[...] Zentrale Anforderung an die Geräte sind die Sicherheit (Safety) für den Patienten. Patienten dürfen auch durch eine Fehlfunktion (speziell der Software) oder Fehlbedienung eines Gerätes nicht zu Schaden kommen."[71]

Parallele Anforderungen „sind nur selten im vollen Umfang gleichzeitig zu erfüllen. So behindern z.B. Anpassbarkeitsmechanismen meist Performanz und Zuverlässigkeit. Die Ausfallsicherheit durch redundante Auslegung des Systems ist bei knappen Ressourcen nicht möglich, wenn z.B. nur wenig Speicherplatz zur Verfügung steht oder der Energieverbrauch beschränkt ist."[72]

Der funktionale Sicherheitsaspekt muss, wie in den früheren Beispielen auch, durch eine umfassende Analyse der funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen zum Beginn der Entwicklungsarbeit bereitgestellt werden und über zwingende Prozesse in das Design der Embedded Systems einfließen. Die Verteilung sicherheitskritischer Funktionen in parallel arbeitenden neuartigen Multicore-Prozessorsystemen ermöglicht eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit bei geringerem Energieverbrauch. Die deterministische Auslegung bedarf jedoch noch grundlegender Forschungsarbeiten, bevor eine industrielle Nutzung abgesichert werden kann.

Durch überwachende „Sicherheitscomputer" – interessanterweise wie im Fall der Luftfahrt – ist eine Absicherung gegen Fehlfunktionen und Fehlbedienungen möglich und sinnvoll. Sie muss jedoch in ihrer systemischen Gesamtwirkung unter den Sicherheitsaspekten genauer erforscht werden.

> 4.3.2 Sicherheit zum Schutz der Bevölkerung: Security

Aus der Hightech-Strategie der Bundesregierung[73]: „Internationaler Terrorismus, organisierte Kriminalität, politische und wirtschaftliche Konflikte: Die Herausforderungen für die Sicherheit eines modernen, komplexen Industriestaates sind vielfältig. Gerade Deutschland als Gesellschaft mit praktizierter Freizügigkeit im Informations-, Personen- und Warenverkehr und als exportorientierte Wirtschaftsnation ist ihnen in besonderem Maße ausgesetzt. Hier sind vor allem die Infrastrukturen verwundbar, zu denen längst auch Internet und Telekommunikation gehören. Ziel der Sicherheitsforschung ist deshalb, die Freiheit der Bürger und der Gesellschaft auch durch geeignete Hochtechnologien und damit verbundene Handlungsstrategien vor Terrorismus, Sabotage,

71 SPES 2020, Kapitel 7.
72 SPES 2020, Kapitel 7.
73 Hightech-Strategie, S. 36.

organisierter Kriminalität, den Folgen von Naturkatastrophen oder Unfällen besonderen Ausmaßes zu schützen. Dabei kommen neben der Prävention innovative Technologien vor allem für eine rasche und umfassende Krisenreaktion in Frage, um die Folgen von Anschlägen und IT-Vorfällen, aber auch Naturkatastrophen erheblich zu mindern. Hier können neue Sicherheitslösungen für Kommunikationsnetze, Industrieanlagen, Bauwerke, Versorgungs- und Logistiksysteme die Bundesrepublik robuster gegen Katastrophen und unattraktiver für Angreifer machen."

Im Gegensatz zu passiven Schutzsystemen (z.B. Sicherheitsglas) und reaktiven Schutzsystemen (z.B. plötzliche Veränderung der Geometrie bei Schädigung) gibt es weiterhin die Möglichkeit der aktiven Schutzsysteme. Sie verfolgen im Fall hochdynamischer physikalischer Bedrohungen, z.B. bei Anschlägen, ein proaktives Konzept. Die Bedrohung wird im Fern-, Mittel- oder Nahbereich detektiert und mit geeigneten Aktuatoren physikalisch minimiert. Aktive Schutzsysteme sind für den Schutz von Fahrzeugen, Flugzeugen, Gebäuden, bis hin zu urbanen Infrastruktur-Arealen denkbar. Aktive Schutzsysteme können nur durch die Kombination zahlreicher, in hohem Maße selbst sicherheitskritischer Eingebetter Systeme realisiert werden. Dabei sind die Anforderungen nach harter Echtzeit besonders herausfordernd, vor allem für die Minimierung der physikalischen Bedrohung. Andererseits könnten durch aktive Schutzsysteme Freiraum und Sicherheit zurückgewonnen werden. „Eine Gesellschaft, die den Bereich der zivilen Sicherheitstechnik nicht abdeckt, vergibt auch eine große Chance auf Zukunftsmärkte."[74] In einer gemeinsamen Initiative der Europäischen Kommission und der EU-Mitgliedsstaaten wird dazu für die transnationale Ebene eine entsprechende „Joint European Security Research and Innovation Agenda (ESRIA)" erarbeitet[75]. An Hand dreier Szenarien veranschaulichen wir die Relevanz von Eingebetteten Systemen zur Schaffung neuer Sicherheitslösungen.

> 4.3.2.1 Szenario 1: Privacy of Data

Informations- und Kommunikationstechnologien sind das Rückgrat der modernen Industriegesellschaft. Sie sind kritische Infrastruktur für sich selbst, aber wesentlich auch für zentrale Funktionen und Dienstleistungen in nahezu allen Sektoren der Gesellschaft. Der Einfluss auf den Privatbereich des Bürgers ist weitreichend und in seinen Auswirkungen derzeit nur in ersten Ansätzen absehbar. Er reicht im negativen Fall von der unbefugten Nutzung von Informationen über die wirtschaftliche Situation, über Gesundheit, Einkaufs- und Surfverhalten im Internet, bis hin zu intimsten persönlichen Details und wird im Zweifelsfall als Belästigung zunehmend häufiger aber auch als Schädigung des Individuums wahrgenommen. Unbefugten Nutzern ist der Zugang zu derartigen Informationen heute relativ leicht möglich, bis hin zur gewollten Verfälschung der Daten. Durch unbefugten Zugriff im Sinne von Wirtschaftsspionage entsteht der deutschen

74 Hightech-Strategie, S. 36.
75 ESRIF.

Wirtschaft nach Schätzungen ein jährlicher Schaden von mindestens 20 Mrd. €[76]. Gefälschte Daten bewirken aber auch unerwartete und fehlerhafte Reaktionen. Hier hat der unerlaubte externe Zugriff Auswirkungen nicht nur auf Security, sondern auch auf die Sicherheit des Systems im Sinne der funktionalen Sicherheit (siehe 4.3.1).

Der Schutz gegen unerlaubten Zugriff muss durch komplexe Sicherheitsmechanismen signifikant verbessert werden. Embedded Systems werden bei der Identifizierung und Validierung des Zugreifenden, bei der Sicherung von Transaktionen und bei der Nachverfolgung eine zentrale Rolle spielen. Entsprechende Voraussetzungen bedürfen jedoch noch erheblichen Forschungs- und Entwicklungsaufwand.

Aus dem Bedürfnis nach erhöhter Sicherheit (im Sinne von Security) resultiert eine zunehmende Video-Überwachung in weiten Bereichen des täglichen Lebens. Diese Bildinformationen werden zunehmend automatisiert ausgewertet und dienen sowohl zur Erhöhung des Safety- als auch des Securitybedarfs. Durch automatisierte Auswerteverfahren mittels schneller anonymisierender Verfahren kann hier durch Einsatz von Eingebetteten Systemen die Einschränkung der persönlichen Freiräume auf ein Minimum begrenzt oder sogar eine Ausdehnung des persönlichen Freiraumes bewirkt werden.

> 4.3.2.2 Szenario 2: Crisis Management

Gemeinwesen brauchen geeignete Informationen über potentielle Notfallsituationen, die innerhalb ihres Zuständigkeitsbereiches oder von außen auf ihren Bereich einwirken können. Das Krisen- bzw. Emergency Management gehört dabei zu den Kernfähigkeiten der modernen Gesellschaft. Mittels moderner Kommunikationssysteme muss im Notfall schnell ein gemeinsames, dienstübergreifendes Lagebild erstellt und fortlaufend aktualisiert werden. Dieses bildet die Basis für zu treffende Entscheidungen, für die Koordination der Einsatzpläne der beteiligten Kräfte, sowie für die Information der betroffenen Bevölkerung. Die Einsatzkräfte benötigen unbedingt ein gemeinsames Verständnis der Situation sowie eine gemeinsam implementierte Command- und Control-Struktur, um schnellstmöglich effiziente Maßnahmen ergreifen und durchführen zu können. Schnelle operative Unterstützung ist für die Notfalleinsatzkräfte von entscheidender Bedeutung, insbesondere in Bezug auf medizinische, psychosoziale und umweltstabilisierende Aspekte.

Hierzu bedarf es geeigneter Kommunikations- und Informationssysteme, die auch unter widrigen externen Bedingungen wie dem Ausfall der regulären Infrastrukturen (Energie, Kommunikation, Wasser etc.) sowie bei heterogener Informationslage eine schnelle und effiziente Arbeit ermöglichen. Mobile und kompakte Sensorik, intelligente Kommunikationsinterfaces mit entsprechenden Autorisierungsmechanismen und automatisierten Adaptoren, sowie mobile Simulatoren auf der Basis mobiler und energiesparender Embedded Systems, die auch den Aspekt der Datensicherheit gewährleisten, sind für diese Aufgaben zu entwickeln.

[76] BAfVS.

> 4.3.2.3 Szenario 3: Der Flughafen der Zukunft

Der Transport von Personen und Gütern bleibt in absehbarer Zukunft von zentraler Bedeutung für das wirtschaftliche Funktionieren der Gesellschaften. Deutschland als hoch vernetzte Industrienation hängt in hohem Maße vom regionalen und globalen Transport ab. Der Luftverkehr spielt bei der Überwindung mittlerer und langer Distanzen eine wichtige Rolle. Der Flughafen als kritische Anbindung des Lufttransportes ist Gegenstand besonderer Gefährdung durch sicherheitsbedrohende Eingriffe. Sowohl Gütertransport als auch Personentransport bedürfen als kritische Eintrittswege dabei besonderer Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen. Über die Betriebs- und Servicefunktionen kommt es zu weiteren Eintrittsmöglichkeiten für direkte Gefährdungen. Damit sind alle Bereiche des Flughafens durch Securitymaßnahmen direkt betroffen. Die Einführung detaillierter Analysen, wie die Untersuchung der Passagiere und ihres Handgepäcks, sind derzeit nur in Teilbereichen und in unterschiedlicher Tiefe implementiert, bewirken jedoch starke Beeinträchtigungen des normalen Verkehrsflusses.

Eingebettete hoch integrierte Zugangssysteme sowie bessere Vernetzung mit Informationen aus dem Transitverkehr (ohne Neukontrollen) könnten beträchtliche Steigerungen des Transportdurchsatzes bei erhöhter Sicherheit erreichen. Hierzu bedarf es neben den vernetzten Informationssystemen insbesondere der Entwicklung neuartiger Sensor- sowie Erkennungs- und Identifikationssysteme. Damit können weiteres Wachstum und eine zunehmende Nutzung der spezifischen Vorteile des Luftverkehrs sichergestellt werden.

Die durch technisches Versagen, durch Verlust von Informationen oder durch fehlerhafte Daten für den Betrieb des Luftverkehrs entstehenden Sicherheitsrisiken, (ohne Betrachtung der terroristischen Bedrohungen) wurden im Kapitel 4.3.1 behandelt.

4.4 UMWELT UND ENERGIE

Durch moderne Produktions- und Verkehrssysteme, durch künstlich geschaffene Lebenswelten, die weitgehende Unabhängigkeit von klimatischen Bedingungen erlauben und durch Lebensstile, die enorm energieintensiv sind, hat die Umweltbelastung in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Da die Infrastruktursysteme immer größer und komplexer werden, vergrößert sich auch das Gefahrenpotenzial von Naturkatastrophen. Gleichzeitig werden die Energieressourcen der Erde immer effizienter und drastischer ausgebeutet. Vor diesem Hintergrund sind der Schutz der Umwelt generell, der Schutz des Menschen vor Naturkatastrophen und die konsequente Schonung natürlicher Ressourcen von fundamentaler Bedeutung.

Technische Lösungen, oft basierend auf Embedded Systems, sind ein wirkungsvoller Ansatz, um diesen Herausforderungen zu begegnen. So werden verteilte intelligente Embedded Systems entscheidende Beiträge liefern, um die zeitgenaue Bereitstellung von Energie entsprechend der jeweiligen Nachfrage in den Griff zu bekommen und

gleichzeitig einen effizienten Umgang mit den Ressourcen zu ermöglichen. Zum Beispiel, indem intelligente Embedded Systems in entsprechenden Stromzählern, sogenannten Smart Meters, den aktuellen Energiebedarf der Verbraucher dezentral erfassen und darauf aufbauende Optimierungsstrategien für die Energieumwandlung und -verteilung umgesetzt werden.

Ein weiteres sehr wichtiges Beispiel ist das große Gebiet der Steuerung von Energieverteilungssystemen: Ohne vernetzte Eingebettete Systeme werden stark dezentrale Systeme zur Energieumwandlung und -verteilung (vor allem auf Basis erneuerbarer Energiequellen) nicht effizient regelbar sein.

> 4.4.1 Szenario 1: Naturkatastrophen vorhersagen

Umweltmonitoring führt zunächst zu einem besseren Verstehen von Entwicklungen und Zusammenhängen klimatischer, aber auch geotektonischer Veränderungen. Ob die globale Erwärmung oder die Gefahr von Vulkanausbrüchen untersucht wird - ausgedehnte Sensornetze liefern die wesentlichen Daten. Auch die schnelle Warnung der Bevölkerung im Katastrophenfall – etwa bei einem Tsunami – basiert auf der Zugänglichkeit entsprechender Daten in Echtzeit.

Typische Anforderungen für Sensoren in solchen Netzen sind Zuverlässigkeit der Daten, Robustheit („harsh environment"), Langlebigkeit (am besten energieautark) und oftmals starke Miniaturisierung. Für die Beherrschung dieser Anforderungen sind geeignete Embedded Systems eine notwendige Voraussetzung, da sie optimale Miniaturisierung und Störunanfälligkeit bieten. Bei großen Stückzahlen kommen zudem Kostenvorteile zum Tragen.

> 4.4.2 Szenario 2: Schutz und Minimierung des Verbrauchs von natürlichen Ressourcen

Um den Energieverbrauch zu reduzieren, ist zunächst eine gute Transparenz der aktuellen Energienutzung erforderlich. Um zu verstehen, wie hoch der Energieverbrauch der einzelnen Geräte und Systeme in Produktionsanlagen, Verkehrsmitteln und Wohnungen wirklich ist, sind intelligente Messgeräte (Smart Meters) notwendig. Wenn diese Systeme zusätzlich eine aktive Komponente erhalten, mit der sie die Leistungsaufnahme in bestimmten Grenzen steuern können, wird ein großer Beitrag zur effizienten Energienutzung geleistet. Für solche Embedded Systems, die typischerweise in alle Energieverbraucher zu integrieren sind, sind geeignete Systemarchitekturen von entscheidender Bedeutung, da große Stückzahlen und robuste Algorithmen in Hardware gefordert werden.

Energieeinsparung kann auch dadurch realisiert werden, dass Systeme die für Ihre Funktion notwendige Energie aus der Umwelt beziehen, z. B. aus Vibrationen, Temperaturdifferenzen oder energetischen Feldern. Typischerweise ist die individuelle Energieeinsparung im Betrieb nicht sehr hoch, da diese Systeme auf minimalen Energieverbrauch ausgerichtet sind. Allerdings sind indirekte Energieeinsparungen (keine

Leitungsverlegung, keine Batterie, kaum Service) signifikant höher, sodass bei großen Stückzahlen erhebliche Einsparungen erzielt werden. Auch für solche Lösungen sind Embedded Systems die Architektur der Wahl, weil hier Minimierung des Stromverbrauchs, Robustheit und Langlebigkeit am besten erreicht werden können.

Diese Beispiele zeigen, dass Embedded Systems für unterschiedlichste Lösungen in Umwelt- und Energie-Monitoring sowie für Energy Harvesting effiziente Lösungen bieten und als Technologiekonzept Vorteile besitzen, die andere Technologien nicht erreichen.

4.5 WISSENSGESELLSCHAFT

Die Möglichkeit, einfach und schnell auf Informationen, Wissen und Wissensträger zuzugreifen, hat die Gesellschaft in den vergangenen Jahren verändert. Sprach man zunächst von einer Informationsgesellschaft, so ist heute erkannt, dass Informationen erst durch den Kontext ihren wahren Wert erhalten und somit zu „Wissen" werden können. In einer idealen Wissensgesellschaft wird das Wissen zu einem handelbaren Gut, welches für alle Menschen leicht und schnell zugänglich ist. Die allgegenwärtige Zugriffsmöglichkeit auf Wissen soll dabei helfen, Arbeiten zu erleichtern, Ressourcen zu schonen und die Schaffung neuen Wissens zu beschleunigen.

Produkt- oder domänenspezifisches Wissen hilft dabei, Lösungen in einem spezifischen Fachkontext anzubieten. Eingebettete Systeme können Zugriff auf dieses Wissen bieten, Wissen nutzen, um ihre Funktion zu erfüllen, und schließlich dazu beitragen neues Wissen zu erzeugen. In der Wissensgesellschaft dienen Eingebettete Systeme als Zugangspunkt für Informationen und Erfahrungslieferant gleichermaßen. Eingebettete Systeme erfassen Daten mit Hilfe intelligenter Sensoren, verknüpfen diese Daten räumlich und zeitlich und liefern in Form der sich einstellenden Schlussfolgerungen neues Wissen. Dabei nutzen sie Dienste und Ressourcen größerer Informationssysteme sowie die Interaktionsmöglichkeiten mit ihrer Umgebung. Entscheidend ist, dass derartig erzeugtes neues Wissen eine hohe Qualität besitzt. So muss es z.B. verlässlich sein. Es muss zum richtigen Zeitpunkt vorliegen und darf nicht zur Verletzung vertraulicher Daten führen. Die Einhaltung derartiger Forderungen müssen Eingebettete Systeme, die an der Erzeugung des Wissens beteiligt sind, selbstständig leisten.

> 4.5.1 Szenario 1: Ferngestützte Diagnose

Eingebettete Systeme werden vielfach in Investitionsgütern eingesetzt, bei denen es auf hohe Produktivität und Verlässlichkeit ankommt. Zwar sind Eingebettete Softwaresysteme dieser Produkte mit einer Vielzahl von Sensoren und Aktuatoren verbunden und können umfangreiche Informationen zum Gesamtzustand des Systems liefern – allerdings sind der lokale Speicherplatz und die Rechenkapazität begrenzt. Außerdem werden viele Erfahrungen im Umgang mit dem Produkt erst während des Betriebs sowie weltweit verteilt gemacht. Bei der ferngestützten Diagnose können im Falle eines Feh-

lers über entsprechende Informationsdienste Diagnoseinformationen aus dem Wissenspool des Herstellers abgerufen werden und der Betreiber schnell über Reparaturzeit und -kosten informiert werden. Der Servicetechniker umgekehrt erhält Informationen über die vermutlich defekte Komponente und bekommt Hinweise zur schnellen Reparatur mit Hilfe von einschlägigen Unterstützungssystemen (Experience Management Systeme). So hilft die Infrastruktur der Wissensgesellschaft unter Einbeziehung Eingebetteter Systeme, die Produktqualität zu verbessern und die Arbeitsabläufe zu optimieren. Der Schutz des geistigen Eigentums und die Qualitätssicherung der Daten stellen zwei der großen Herausforderungen in diesem Kontext dar.

4.6 GLOBALISIERUNG

Schnelle vielfältige Kommunikationswege und ständig verbesserte Reise- und Transportbedingungen führen zu einer zunehmend weltweiten Verflechtung aller Bereiche der Wirtschaft, Politik, Kultur, Umwelt und Kommunikation. Diese Verflechtung hat nachhaltige Auswirkungen auf Menschen, Unternehmen, Organisationen und Staaten. Ein weiterer Treiber ist die Liberalisierung des Welthandels. Eingebettete Systeme leisten in ihrer Funktion in vielen Geräten der Kommunikation und für den Transport und der Logistik indirekt ihren Beitrag zur Globalisierung.

> 4.6.1 Szenario 1: Verbesserung der Lebensqualität in Entwicklungs- und Schwellenländern

Eine der kritischen Folgen der Globalisierung ist die starke Auswirkung unterschiedlicher Zugangsmöglichkeiten zu digitalen Medien und Diensten in den verschiedenen Staaten. Langfristig wird es für noch nicht entwickelte Länder von größter Bedeutung sein, durch preisgünstige, aber leistungsfähige Geräte den Anschluss an die digitalen Medien zu bekommen. Dazu gehören preisgünstige Zugangsmöglichkeiten. Schon heute sind mobile Telefone weit verbreitet. Eine stärkere Integration der mobilen Telefone in weltweite Netze erlaubt auch unterentwickelten Ländern und ihren Menschen einen schnellen Zugang zu den digitalen Medien.

> 4.6.2 Szenario 2: Delivery on Demand im Zeitalter der Globalisierung

Schon heute existiert eine ganze Reihe von Unternehmen, die sich darauf spezialisiert haben, besondere Produkte gezielt und auf Anfrage zeitgenau aus allen Winkeln dieser Welt an Verbraucher und Kunden zu liefern. Entscheidend sind dabei die zielgerichtete Anforderung und deren schnelle Beantwortung sowie die Verfolgung der Logistikwege. Erforderlich ist hierbei auch, dass alle Beteiligten eine genaue Information über die Situation der Logistik bekommen und daraus ableiten können, zu welchem Zeitpunkt sie zuverlässig mit der Lieferung der gewünschten Ware rechnen können.
Vor diesem Hintergrund können Eingebettete Systeme über zusätzliche einfache Augmented Reality Techniken in Waren die Logistikwege langfristig verfolgen, bei Stö-

rungen in den Logistikketten schnell Entscheidungen über Änderungen treffen und eigenständig sowohl Lieferanten als auch Kunden über den Stand der Warenlieferungen in Kenntnis halten.

> 4.6.3 Szenario 3: Fabrik der Zukunft

Die Fabrik der Zukunft ist ausgerichtet auf nachhaltiges Wirtschaften und organisiert sich um die Prinzipien der Dienstleistungs- und Nutzenorientierung unter Einsatz erneuerbarer Ressourcen nach dem Effizienzprinzip und dem Prinzip der Recycelbarkeit. Dies erfordert Anpassung, Flexibilität, Adaptions- und Lernfähigkeit sowie Fehlertoleranz und Risikovorsorge.

In der Fabrik der Zukunft kann von einem hohen Automatisierungsgrad ausgegangen werden, in dem flexible Produktionssysteme, die aus einer Unzahl von Eingebetteten Systemen bestehen, miteinander vernetzt sind und auf diese Art und Weise umfangreiche Produktionsprozesse weitgehend automatisch steuern. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass auch in den Produkten selbst schon während der Produktionsprozesse Eingebettete Systeme vorgesehen werden, die in Interaktion mit den Eingebetteten Systemen der Produktionssysteme treten und auf diese Art und Weise in nachhaltiger Weise gezielte Produkte zu produzieren erlauben – mit einem hohen Grad von Personalisierung, Individualisierung und mit hoher Effizienz und Effektivität. Dies erlaubt noch bis kurz vor der Produktion Anpassung an Kundenwünsche und direkte zielgenaue Lieferung.

4.7 URBANISIERUNG

Auch im 21. Jahrhundert bleiben die Städte die prägende Kraft in der gesellschaftlichen Entwicklung der Welt. Ein wichtiger Treiber dafür wird die IT-Technologie bleiben, und zwar im Zusammenspiel von lokaler Information und Informationsverarbeitung, die typischerweise durch Embedded Systems geleistet wird, mit großen IT-Systemen, die diese Informationen bewerten, damit eine Gesamttransparenz erzeugen und darauf aufbauend effiziente Steuerungs-, Regelungs- und generell Managementprozesse ermöglichen. Intelligente Embedded Systems werden somit auch in der wichtigen Anwendungsdomäne der Stadt- und Wohnraumentwicklung einen signifikanten Beitrag leisten, sodass auch in Zukunft eine hohe Wohnqualität sichergestellt ist, bei einem gleichzeitig effizienten Umgang mit den verfügbaren Umweltressourcen.

Neben dem unten ausführlich dargestellten Szenario Smart City sind Embedded Systems natürlich auch in der Automation einzelner Gebäude von Bedeutung. Embedded Systems tragen in großem Umfang zur Ressourceneffizienz in den Bereichen Energie, Wasser und Material sowie zur Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von Gebäuden bei und sind damit ein entscheidender Faktor in der optimalen und effizienten Gebäudenutzung.

> 4.7.1 Szenario: Smart City

In einer „intelligenten Stadt" werden Embedded Systems helfen, Alltagsprozesse einfach, sicher und zeitsparend zu gestalten. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die enge Verzahnung von Embedded Systems und deren Software mit den betrieblichen Prozessen bei der Entwicklung und Nutzung solcher Systeme.

> 4.7.1.1 Bürgernahe Anwendungen

Für den einzelnen Bürger eröffnen sich dadurch viele neue Möglichkeiten: Optimierung seiner Wege und Zeiten unter Berücksichtigung eigener und öffentlicher Verkehrsmittel und aktueller Verkehrsinformationen, die problemlose Abrechnung von Gebühren und Kosten auf Basis von Mikro-Payment und Pay-per-Use Konzepten, damit verbunden neue Dienstleistungen z.B. für Routineaufgaben wie Entscheidungshilfen beim Einkauf, Zuordnung von Berechtigungen und Identifikation von optimaler Beratung. Voraussetzung für solche Lösungen sind einerseits die eindeutige Identifikation, Befähigung (Empowerment) und Begleitung des Individuums in den entsprechenden Systemen.

Dies erfordert prinzipiell große netzorientierte Strukturen, die aber eine individuelle Zuordnung zur einzelnen Person haben. Diese individuelle Zuordnung erfolgt nach heutigem Kenntnisstand am effizientesten durch intelligente mobile Endgeräte mit einer eindeutigen und sicheren Zuordnung zu ihrem Träger – Lösungen auf Basis von Embedded Systems. Hierzu ist die Entwicklung einer neuen Generation von mobilen Endgeräten basierend auf Embedded-Technologien erforderlich, die zum Beispiel in einer alternden Gesellschaft durch disruptive Innovationen bei der Mensch-Geräte-Schnittstelle die hohen Anforderungen an Bedienung und Komfort erfüllen können.

> 4.7.1.2 Logistische Anwendungen

Städte sind immer ein riesiger Umschlagplatz von Gütern. Diese logistische Herausforderung wird durch den Trend zur Individualisierung von Produkten immer komplizierter. Der Logistikprozess ist oft auch mit Änderungen in der Eigentümerschaft verbunden. In diesem Umfeld wird immer wieder kriminelle Energie freigesetzt, um Eigentumsverhältnisse zu manipulieren. Für solche Probleme bieten Embedded Systems, oft basierend auf RFID-Technologie, völlig neue Lösungen, indem sie z.B. Objekte eindeutig positionieren, durch Tracking und Tracing in Echtzeit ihre Bewegungen registrieren und eine ständig aktualisierte Planung ermöglichen. Der Einsatz von Embedded Systems erlaubt auch eine eindeutige Zuordnung von Objekten zu Personen. Dadurch ist es z.B. möglich, Eigentumsübergänge zu dokumentieren und jederzeit das aktuelle Besitzverhältnis aufzuzeigen. Auch diese Prozesse erfolgen im Zusammenspiel eines umfassenden IT-Netzes mit lokalen und oft sehr stark miniaturisierten Endgeräten mit Embedded-Technologie.

Zur Realisierung dieser Szenarien besteht allerdings noch Forschungsbedarf. So ist z.B. das im PC-Bereich etablierte Konzept des Nachbesserns in Form von Batches oder Hot Fixes in solchen Einsatzszenarien nicht akzeptabel. Insbesondere bei Sicherheits-

schwachstellen muss bei der Auslieferung verifizierbar ausgeschlossen werden, dass die persönlichen Daten missbräuchlich verwendet werden. Für die Verwaltung der Funktionalität von Eingebetteten Systemen müssen „Digital Rights Management" (DRM) Dienste bereitgestellt werden. Zentrale Lösungen führen hier zu Skalierbarkeitsproblemen.

> 4.7.1.3 City-Management

Durch die zunehmende Vielfalt an Vorgängen und Strukturen in den Städten wird das City Management immer komplexer. Wechselwirkungen und gegenseitige Abhängigkeiten z.B. zwischen Verkehrsfluss, Luftqualität, Wetterbedingungen und geplanten oder ungeplanten Ereignissen (Baustellen, Unfälle) sind so vielschichtig und kompliziert, dass modernste Simulationen und Modellierungen benötigt werden. Diese erfordern aber eine sehr gute und stets aktuelle Datenbasis.

Eine solche Datenbasis, die z.B. Umweltbelastungen, Zugangsregelungen, Sicherheitsklassifizierungen, Verkehrsdynamik und Einsatzsituationen von Polizei und Rettungsdiensten in Echtzeit abbildet, ermöglicht eine Transparenz der aktuellen Lage, die mit entsprechenden IT-Systemen Entscheidungsvorbereitung und Reaktionsvorschläge in akuten Situationen ermöglicht, aber in längerfristigen Planungen auch Szenarien und Alternativen bewertbar macht. Die für die Datenbasis notwendigen Sensornetze werden typischerweise durch Aktuatornetze (für die Umsetzung von Entscheidungen z.B. in Verkehrssteuerungen) ergänzt. Die Sensoren und Aktuatoren – ob in drahtgebundenen oder drahtlosen Systemen – sind typischerweise Embedded Systems, die robust gegen mechanische und klimatische Bedingungen ausgelegt sein müssen.

Die drei oben dargestellten Themen zeigen, dass Embedded Systems eine Schlüsselrolle zukommt, wenn die Herausforderungen in unseren Städten gelöst werden sollen. Die Beispiele „Bürger", „Logistik" und „City Management" adressieren die Stadt von Morgen aus unterschiedlichen Perspektiven und zeigen bei aller Unterschiedlichkeit die Schlüsselrolle von Embedded Systems, insbesondere im Zusammenspiel mit übergeordneten IT-Strukturen, auf.

5 FORSCHUNGSPRIORITÄTEN

Für die Umsetzung der in Abschnitt 4 aufgezeigten Szenarien sind die in Abschnitt 5.1 dargestellten Technologieinnovationen für Eingebettete Systeme erforderlich. Die Entwicklung darauf aufsetzender Lösungen setzt zur Erreichung der zahlreichen nicht-funktionalen Anforderungen (siehe 5.2.1) auch Innovationen in Entwicklungsprozessen für Eingebettete Systeme voraus, die in Abschnitt 5.2 dargestellt werden. Damit kann die deutsche Führungsposition in der Entwicklung von Eingebetteten Systemen weiter ausgebaut und ein wichtiger Beitrag zur Sicherung von Deutschland als Hightech-Standort geleistet werden.

5.1 TECHNOLOGIEINNOVATIONEN

Die nachfolgende Reihung der Technologieinnovationen folgt grob der Anordnung entlang eines Schichtenmodells.

> 5.1.1 Computing devices der Zukunft

Prozessoren Eingebetteter Systeme unterscheiden sich nicht grundsätzlich von solchen in PCs. Ihre Leistungsfähigkeit ist jedoch weiter gespreizt und die maximale Leistung liegt abhängig von der jeweiligen Anwendung in der Regel unter der neuester PC-Prozessoren. Es ist somit absehbar, dass sich die Architekturen eingebetteter Prozessoren ähnlich fortentwickeln werden, wie die universeller Prozessoren. Diese weisen in der Regel bereits heute mehrere Kerne auf.

Für das Jahr 2022 werden über 400 Processing Elements je System für stationäre Systeme und sogar weit über 1000 Processing Elements für mobile Systeme prognostiziert[77]. Hierdurch wird dem steigenden Bedarf an Rechenleistung Rechnung getragen ohne die bereits erreichte Grenze abführbarer Wärme zu überschreiten. Somit ist kurzfristig auch für Eingebettete Systeme zu erwarten, dass die heute verwendeten Prozessoren von hochparallelen Architekturen abgelöst werden. Speziell für Eingebettete Systeme ergeben sich hieraus kurzfristig wissenschaftliche Fragestellungen zur Parallelisierung und Verteilung sicherheitskritischer echtzeitfähiger Anwendungen auf heterogen verteilten Architekturen. Dabei ist auch zu prüfen, inwieweit durch HW Unterstützung in Multicore-Architekturen für funktionale Sicherheit zentrale Eigenschaften wie Interferenzfreiheit von Applikationen unterstützt werden kann.

Neben dem Problem der Wärmeabfuhr wird die weitere Skalierung der Halbleitertechnologie neue wissenschaftliche Herausforderungen an den Entwurf Eingebetteter Systeme stellen: die Beherrschung von Alterungseffekten, der Degradation der Leistungsfähigkeit und Funktionssicherheit der Prozessoren in Technologien ab und unter 32 nm. Ein Verzicht auf die Forderung nach uneingeschränkter funktionaler Korrektheit aller Schaltelemente und Verbindungen wird sich sehr positiv auf die Herstellungskosten auswirken, bedarf aber neuer Architekturen, die entsprechende Fehlerdetektionsmonitore und Redundanzen sowie alterungshemmende Schaltungs-, Kommunikations- und Systemkonzepte beinhalten. Diese werden durch ein dynamisches Lastmanagement unterstützt werden, das neben der Einhaltung von Echtzeitbedingungen und der korrekten Funktion auch ein ausgewogenes Altern der Hardware ermöglicht. Die wissenschaftliche Herausforderung liegt in der integrierten Betrachtung der Hardware-Aspekte, des Laufzeitsystems sowie der nicht-funktionalen und der funktionalen Randbedingungen in hochparallelen Systemen.

[77] ITRS 2008.

> 5.1.2 Ressourcenoptimierende Technologien

Ressourcenoptimierende Technologien zeichnen sich insbesondere durch einen effizienten Umgang mit der Ressource Energie aus. Sie werden in Eingebetteten Systemen dann eingesetzt werden, wenn nur beschränkt Energie zur Verfügung steht, also z.B. in Sensor-Funknetzwerken, die sich selbst aus der Umgebung mit Energie versorgen müssen, oder trotz beschränkter Batteriekapazität möglichst lange arbeitsfähig sein sollen. Ein anderer Grund liegt vor, wenn nur beschränkt Wärme abgeführt werden kann. Solche Technologien können aufgrund ihrer physikalischen und architektonischen Eigenschaften selber inhärent ressourcenschonend sein, andererseits bedürfen sie geeigneter ressourcenoptimierender Entwurfstechnologien, um ressourcenoptimal zu arbeiten.

Solche Entwurfstechnologien sind heute im Entwurf von Hardwarekomponenten standardmäßig im Einsatz. Eine Ressourcenoptimierung auf höheren Abstraktionsebenen findet nicht in strukturierter Form und werkzeugunterstützt statt, obwohl sich gerade hier enorme Optimierungspotenziale erschließen lassen. Forschungsbedarf für strukturierte Entwurfsmethoden und -werkzeuge ergibt sich somit kurzfristig auf unterschiedlichen Ebenen:

Auf Anwendungsebene beispielsweise ist zu entscheiden, welche Qualitätsanforderungen zeitlicher Art und bezüglich der Datenqualität erforderlich sind. Dies wird auch eine dynamische Anpassung der Quality of Service an sich verändernde Parameter, wie z.B. verfügbare Energie oder Kosten der Datenübertragung einschließen. Ebenfalls auf der Anwendungsebene werden Optimierungen der Energieeffizienz der Anwendung unter Berücksichtigung der konkreten Zielarchitektur eine Rolle spielen.

Auf der Ebene des Laufzeitsystems werden eine dynamische Allokation und ein dynamisches Binden von Ressourcen an Applikationen erfolgen, welche die Energieeffizienz des Gesamtsystems unter Berücksichtigung von Echtzeitanforderungen optimieren. Dies schließt ggfs. auch den Transfer von Applikationen auf entfernte Ressourcen unter Berücksichtigung der Transferkosten ein.

Auf der Ebene einzelner Prozessorkerne wird ein dynamisches Energiemanagement Anwendung finden, das Korrelationen zwischen Anwendungen und innerhalb von Anwendungen berücksichtigt. Auch die einzelnen Komponenten eines Prozessorkerns und seine Koprozessoren werden durch ein geeignetes dynamisches Energiemanagement und statische strukturelle Verfahren optimiert. Es ergeben sich eine Reihe von Fragen zur Realisierung dieser Ebenen übergreifenden Optimierungen, z.B.: Auf welcher Modellbasis können die Entscheidungen auf Anwendungs- und Laufzeitebene getroffen werden? Wie können die Optimierungen auf Ebene der Prozessorkerne und deren Komponenten die Eigenschaften des zu erwartenden Anwendungsmixes berücksichtigen?

> 5.1.3 Referenzarchitekturen für Eingebettete Systeme

Fast alle Szenarien setzen eine in vielen Fällen drahtlose Vernetzung von Sensoren, Aktuatoren und Computing Devices voraus. Solche Vernetzungsarchitekturen müssen eine Vielzahl nicht funktionaler Anforderungen (z.B. Robustheit, Sicherheit, Quality-of-Service-Zusicherungen wie Mindestverfügbarkeiten und Durchsatz, Echtzeitanforderungen, Fehlererkennung und -eingrenzung, automatische Rekonfiguration zur Sicherstellung von Funktionssicherheit und Last-Adaptivität, dynamische Erweiterbarkeit einschließlich Authentifizierungsprotokollen) erfüllen, welche heute nur partiell und meist in domänenspezifischen ad-hoc-Lösungen realisiert werden.

Ziel der Forschung in diesem Gebiet ist die Entwicklung von Referenzarchitekturen, die einerseits Garantien für diese Vielfalt von Qualitätsmerkmalen von Diensten geben, andererseits eine Virtualisierung von konkreten Zielarchitekturen unterstützen und damit Lösungen für die folgenden Forschungsfragen schaffen: Wie können emergente Systemcharakteristika von Zielarchitekturen wie Leistungsverbrauch, Kommunikationsbandbreiten, Verfügbarkeit, Latenzzeiten etc. so abstrahiert werden, dass Qualitätsgarantien von Diensten der Referenzarchitektur abgeleitet werden können? Wie können automatisch bei Ausfall von Teilsystemen Dienste so rekonfiguriert werden, dass Qualitätsgarantien erhalten bleiben? Wie können Trade-offs zwischen Maximierung der Wiederverwendbarkeit und Qualität der Instanzen von Referenzarchitekturen gestaltet werden? Wie können Skalierbarkeit und Modularität sichergestellt werden? Angesichts umfangreicher bestehender Lösungen ist dabei zum einen die Integration von Legacy-Systemen sicherzustellen, andererseits zu prüfen, ob der zunehmenden Proliferation von Endgeräten durch Standardisierung von gemeinsamen Teilfunktionen entgegengewirkt werden kann.

> 5.1.4 Sichere und geschützte Eingebettete Systeme

Die zunehmende Vernetzung Eingebetteter Systeme macht sie potenziell angreifbar für kriminelle informationstechnische Aktivitäten, welche im Hinblick auf das Einsatzspektrum der Systeme auch direkte Auswirkungen auf die Umwelt oder die funktionale Sicherheit haben können. Darüber hinaus können verlässliche Eingebettete Systeme selbst mit der Überwachung von Sicherheitsfunktionen betraut werden, um Kosten zu reduzieren und die Sicherheit insgesamt zu erhöhen. Deshalb ist die Absicherung solcher Systeme im Hinblick auf Angriffssicherheit (Security) wichtig. Der räumlich stark verteilte Einsatz, sowie das bislang mangelnde Bewusstsein für Security führen bei Eingebetteten Systemen zu entsprechenden Risiken.

Deshalb ist eine verlässliche Absicherung Eingebetteter Systeme gegen gegenwärtige und zukünftige informationstechnische Angriffe mit Schadensfolge wichtig. Eine zentrale Forschungsherausforderung hierzu ist die Bereitstellung von im Kontext von Eingebetteten Systemen verwendbaren Protokollen[78] zur Absicherung der Authentizität

[78] Wie etwa Leistungsaufnahme, Echtzeitanforderungen, Bandbreite, ...

des Kommunikationspartners und der Sicherheit der Informationsübertragung, die zwar für allgemeine IT basierte Security-Anwendungen bekannt sind, jedoch aufgrund der zusätzlichen nicht-funktionalen Anforderungen für Eingebettete Systeme im allgemeinen nicht übertragbar sind.

Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Integration von Informationssystemen und Eingebetteten Systemen dar. Probleme im Bereich der Security können Gefährdungen im Sinne von Safety verursachen. Werden Daten bei der Übertragung über Netze intendiert oder unabsichtlich verfälscht, so kann das in einem darauf reagierenden Eingebetteten System zu gefährlichen Auswirkungen führen. Wie dieser Aspekt der Security auf Safety wirkt, ist weitgehend unerforscht. Daher sind zur seriösen Analyse von Safety in verteilten Systemen Forschungsergebnisse im Security-Bereich eine wichtige Voraussetzung. Dies betrifft insbesondere belastbare, quantifizierte Aussagen zur Security.

In industriellen Produkten könnten die eingebetteten Systeme auch im Kampf gegen Produktpiraterie genutzt werden, da sie die Realisierung eines produktinhärenten Kopier-Schutzes ermöglichen. Dies setzt allerdings voraus, dass die in Embedded Systems wirkende Software und die im Einsatz gesammelten Daten und Informationen selbst mit neuester Technologie vor Produktpiraten geschützt werden müssen. Technologien und Verfahren für „Embedded-know-how-Protection" werden entscheidend sein für die Sicherstellung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit exportintensiver Branchen.

> 5.1.5 Vernetzte Regelungen

Vernetzte Regelungssysteme, in denen Sensorik, Aktorik und verschiedene Regler räumlich verteilt und über eventuell dynamisch rekonfigurierbare digitale Kommunikationsnetze miteinander verbunden sind, bieten einerseits gegenüber den traditionellen, weitgehend aus lokalen, einschleifigen Regelkreisen aufgebauten Strukturen eine Vielzahl erst in Ansätzen genutzter Vorteile vor allem hinsichtlich Funktion, Zuverlässigkeit, Sicherheit, Architekturentwurf und Kosten. Auf der anderen Seite bringen sie neue Herausforderungen für den regelungs- und softwaretechnischen Entwurf mit sich.

Funktionsseitig gestatten vernetzte Regelungssysteme die Beherrschung komplexerer verteilter und interagierender Systeme, als dies alleine mit lokalen Reglern möglich wäre. Unerwünschte dynamische Effekte durch die gegenseitige Beeinflussung nicht kooperierender Regler über physikalische Verkopplungen (zum Beispiel Schwingungen) können vermieden und eine bessere Qualität des Gesamtsystemverhaltens erreicht werden. Ansatzweise wird dies z.B. im Automobil durch die Integration von einzelnen Regelungssystemen wie ESP oder aktiver Federung zu einem „Integrated Vehicle Dynamics Management" erreicht. In Zukunft wird eine solche Vernetzung auch über die Grenzen von Systemen aus einzelnen Domänen hinaus möglich sein und neue Funktionen ermöglichen, z.B. in der Verkehrsleittechnik oder Automatisierungstechnik.

Möglich werden dann auch dynamisch struktur- und topologieveränderliche Ensembles vernetzter Regelkreise, was zum Beispiel den Auf- und Abbau von ad-hoc-Regelkreisen in kooperativen Verkehrsszenarien beinhaltet.

Im Hinblick auf Zuverlässigkeit und Sicherheit eröffnen vernetzte Regelungssysteme neue Möglichkeiten der Überwachung und Fehlertoleranz, unter anderem durch multiples gegenseitiges Funktionsmonitoring von verteilten Reglern und durch Rerouting und Migration von Reglerfunktionalität bei Einzelausfällen. Der Aufwand beim Architekturentwurf und die Systemkosten können durch die Komposition skalierbarer vernetzter Regelungsstrukturen aus Standardkomponenten erheblich reduziert werden.

Die Herausforderungen beim Umgang mit vernetzten Regelungssystemen entstehen vor allem aus den unvermeidbaren Unzulänglichkeiten des digitalen Kommunikationsnetzes. Ausfälle von Verbindungen, Paketverluste oder (möglicherweise variierende) Latenzen, können erhebliche Auswirkungen auf das Regelkreisverhalten haben. Deshalb werden Modellierungs-, Entwurfs- und Analysetechniken benötigt, welche die Funktionsfähigkeit der Regelung unter Einbeziehung dieser Varianzen sowie der dynamischen Veränderung der Regelkreisstruktur sicherstellen. Dies schließt die Bereitstellung von gegen diese Effekte robusten, skalierbaren, hierarchisch organisierten und selbstrekonfigurierenden Regelungskonzepten ein, welche eine flexible Anpassung an statische wie dynamisch veränderliche Ressourcenbeschränkungen erlauben, beispielsweise an die verfügbaren Kommunikationsbandbreiten sowie an temporäre oder permanente Ausfälle in großen Sensornetzwerken. Im Hinblick auf regelungstechnische Eigenschaften wie Stabilität werden solche Fragestellungen zum ersten Mal in dem DFG-Schwerpunktprogramm „Regelungstheorie digital vernetzter Systeme" untersucht. Die Herausforderungen sind aber weitreichender und umfassen zum Beispiel die Frage, wie solche Konzepte softwaretechnisch effizient unterstützt werden können.

> 5.1.6 Funktionale Sicherheit Eingebetteter Systeme

Eingebettete Systeme müssen funktional sicher (engl. safe) sein, das heißt, sie dürfen ihre Umwelt nicht gefährden. Eingebettete Software ermöglicht dabei, dass Systeme auf technische Fehler der Hardware in komplexer Weise reagieren und weitere Gefährdungen vermeiden, z.B. durch Teilabschaltung fehlerhafter Funktionen. Zudem werden vielfältige, meist sicherheitsrelevante Funktionen durch Software realisiert. Somit wird die Software selbst zu einem sicherheitsrelevanten Teil des Gesamtsystems und muss mit entsprechenden Qualitätsgarantien entwickelt werden.

Während grundsätzlich Prinzipien zum Aufbau fehlertoleranter Systeme bekannt sind und industriell eingesetzt werden, entstehen durch den Kostendruck einerseits und den daraus resultierenden Trend zur starken Wiederverwendung auch sicherheitsrelevanter Komponenten neue Forschungsfragen, welche nicht zuletzt auch zur Beherrschung der Gesamtkomplexität im Sicherheitsnachweis beitragen: So stellt sich im

Entwurf von Komponentenarchitekturen die besondere Herausforderung, für noch unbekannte Zielarchitekturen Eigenschaften wie Selbstüberwachung, Selbstheilung oder zumindest kontrollierte Degradierung sicherzustellen. Zusätzliche Fragestellungen entstehen aus automatischer Upgradefunktionalität und selbstständiger Rekonfiguration auch sicherheitsrelevanter Systeme.

Weitere Herausforderungen ergeben sich aus der aus Kostengründen zunehmend erfolgenden Koallokation von sicherheitsrelevanten und von unkritischen Teilfunktionen. Die zunehmende Vernetzung von Systemen untereinander und die umfassendere Interaktion mit der Umgebung führen dabei zu einem exponentiellen Wachstum bei Softwareumfängen und der Kommunikation zwischen Komponenten. In diesem Zusammenhang wichtig ist das kosteneffiziente Beherrschen der Komplexität in Bezug auf die Spezifikation und den Sicherheits-Qualitätsnachweis. Letzterer erfordert ein genaues Verständnis des Gesamtsystems im Verhalten mit seiner Umwelt.

Technologische Innovationen sind erforderlich, um das Systemverhalten gegenüber seiner Umwelt so zu spezifizieren, dass Sicherheitsnachweise kosteneffizient vollständig erbracht werden können. Problematisch sind der Umfang und die Komplexität sicherheitskritischer Systeme sowie deren disziplinübergreifender Charakter. Dies führt dazu, dass manuelle Sicherheitsanalysen kaum noch durchführbar sind. Wie Sicherheitsanalysen stärker proaktiv in die Entwicklung integriert werden können und wie sie in einem höheren Maße automatisiert werden können, ist zu erforschen. Im Zuge der Integration von Teilsystemen in ein Gesamtsystem und im Hinblick auf Variantenbildung müssen zudem Techniken, Methoden und Werkzeuge bereitgestellt werden, um Sicherheitsanalysen modular handhaben zu können.

> 5.1.7 Kognitive Eingebettete Systeme

Die Fähigkeit, kognitive Systeme zu entwickeln, stellt eine zentrale Voraussetzung für die Realisierung einer Vielzahl von Szenarien dar: Sicheres Fahren wird dadurch ermöglicht, dass Fahrzeuge ein hinreichendes Situationsbewusstsein der Verkehrssituation haben, um Unfallpotentiale rechtzeitig zu identifizieren und zu reduzieren; Patienten-Überwachungssysteme in medizinischen Versorgungszentren treffen auf der Basis der fernerfassten Patientendaten Entscheidungen über eventuell notwendige Interventionen von Pflegepersonal, etc.

Die Entwicklung von kognitiven Eingebetteten Systemen verlangt somit eine sichere Situationserfassung in Form von mentalen Karten in der Regel auf Basis der Fusion von heterogenen Sensorquellen sowie Algorithmen zur Objektidentifikation in applikationsspezifischen Objektwelten – eine in der Regel multikriterielle Situationsbewertung – Strategien zu darauf aufsetzenden Entscheidungsfindungen sowie deren Umsetzung, sei es in Form von Benutzerinteraktionen oder in autonomen regelnden Eingriffen.

Während für vergleichsweise träge und einfach strukturierte Umgebungen die Verwendung von kognitiven Architekturen gut beherrscht wird, stellt die aus Applikationssicht oft gewünschte Übertragung dieses Architekturprinzips in hochdynamische und komplex strukturierte Umwelten eine besondere Forschungsherausforderung dar. In sicherheitsrelevanten Applikationen müssen darüber hinaus Architekturkonzepte zur Absicherung der Vertrauenswürdigkeit und Fehlerfreiheit der Entscheidungsprozessen zu Grunde liegenden mentalen Karten sowie der darauf aufsetzenden Entscheidungsalgorithmen gefunden werden. Darüber hinaus müssen in teilautonomen, assistierenden Anwendungen durch das Eingebettete System getroffene Entscheidungen für den Nutzer plausibel sein. Weitere Herausforderungen stellen in vielen Applikationen die Einhaltung von Echtzeitanforderungen sowie die Realisierung von adaptiven Strategien dar.

> 5.1.8 Innovative Interaktionsschnittstellen

Angesichts der hohen Komplexität von durch kognitive Eingebettete Systeme realisierten Assistenz- und Entscheidungsfunktionen und der in vielen Szenarien geforderten Bedienbarkeit durch Personen mit fehlenden technischen Kenntnissen stellt die Gestaltung der Interaktionsschnittstelle zwischen Menschen und Systemen die entscheidende Voraussetzung zur Nutzbarmachung von Technologieinnovationen dar.

In dem Maße, in dem der Nutzer selbst regelnd in das System eingreifen muss oder sogar als Rückfallebene in einer durch das technische System allein nicht mehr beherrschbaren Situation eingesetzt wird, muss dem Benutzer eine ausreichende Einsicht in Situationserfassung und -bewertung in einer sich intuitiv erschließenden Form angeboten werden, die situationsangemessene Eingriffe seitens des Benutzers auch unter Echtzeitbedingungen ermöglicht.

Zwar liegen hierzu im Bereich der Luftfahrt umfangreiche Erfahrungen vor, diese sind jedoch im Allgemeinen in Applikationen mit ungeschulten Benutzern nicht übertragbar. Entscheidende Herausforderung ist die Schaffung von intuitiv erfassbaren multimodalen Metaphern zur Vermittlung mehrdimensionaler Entscheidungsräume in Benutzer-adäquater Form. Dazu werden „klassische" Formen der Eingabe durch Erkennung von Gesten oder Verwendung neuer Sensortechnologien (z.B. Bio-Sensoren, Brain-Computer-Interaction) ergänzt werden. Adaptive Interaktionsschnittstellen werden automatisch Qualifikationsprofile von Nutzern erkennen und Interaktionsstrukturen an diese anpassen.

> 5.1.9 Kooperative Eingebettete Systeme

Immer dann, wenn übergeordnete Zielsetzungen wie die Reduktion des Energieverbrauchs (wie etwa im Szenario 4.2.1), die Identifikation von Bedrohungen (Szenario 4.3.2.2), oder die Durchsatzsteigerung in Produktionsprozessen (Szenario 4.6.3) nur durch koordinierte Aktionen von durch kognitive Eingebettete Systeme gesteuerten Sy-

stemen (wie Fahrzeuge, autonome Flugkörper, Produktionsroboter) erreichbar sind, stellt sich die Herausforderung der Etablierung von abgestimmtem Gruppenverhalten.

Auch hier ist die Technologie in eingeschränkten und genügend trägen und statischen Umgebungen (etwa im Anwendungsgebiet der Fertigungsautomatisierung) weitgehend beherrscht. Herausforderungen für die Forschung ergeben sich in der Behandlung von sich dynamisch verändernden Einsatzkontexten. Schon allein das Zulassen von Menschen in Produktionsanlagen mit autonomen Fahrzeugen mit aus Sicht der Durchsatzoptimierung notwendigen Mindestgeschwindigkeiten führt zu neuen Forschungsfragen, die mit zunehmender Dynamik und zunehmender Anzahl der zu koordinierenden Teilsysteme neuartige Lösungen fordern.

Dabei stellen sich Herausforderungen wie die Etablierung von konsistenten Situationseinschätzungen und verteilte Entscheidungsfindungen im Kontext von „feindlichen" Fremdsystemen unter Echtzeitbedingungen, der Einbeziehung des menschlichen Verhaltens (etwa Arbeiter in einer Produktionshalle, Autofahrer) sowie die Vermeidung von unerwünschtem Schwingungsverhalten.

5.2 PROZESSINNOVATIONEN

> 5.2.1 Requirements Engineering

Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die effiziente Entwicklung qualitativ hochwertiger und sicherer Eingebetteter Systeme ist die Qualität der Anforderungsspezifikation. Dies gilt umso mehr, wenn Aufgabenstellung und Umsetzung durch unterschiedliche Partner (z.B. OEM und Zulieferer) erfolgen. Im Bereich der Eingebetteten Systeme gelten hier deutlich höhere Anforderungen als in der IT, die beispielsweise die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Systeme sowie Eigenschaften wie die Verfolgbarkeit von Anforderungen betreffen und in Normen wie z.B. der ISO 26262 verankert sind. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei Eingebetteten Systemen ist die Berücksichtigung der verschiedenen Betrachtungsebenen, beispielsweise die konsistente und durchgängige Spezifikation der Anforderungen auf der System- und der Software-Ebene, unter Einbeziehung der entsprechenden funktionalen und nicht-funktionalen Umgebungsanforderungen und -bedingungen.

Wichtige Schwerpunkte zukünftiger Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Requirements Engineering für Eingebettete Systeme müssen sein:

- **Qualität von Requirements**
  Wichtige Qualitätskriterien sind insbesondere Vollständigkeit, Konsistenz, Korrektheit, Verifizierbarkeit und Verständlichkeit. Ein wesentlicher Forschungsbedarf besteht hier in einer geeigneten, praxisnahen Formalisierung von Anforderungsspezifikationen, wie sie beispielsweise durch den Ansatz des modellba-

sierten Requirements Engineerings verfolgt wird. Formalisierte Spezifikationen stellen darüber hinaus eine sehr gute Ausgangsbasis für eine automatisierte Qualitätssicherung, beispielsweise in Form von Konsistenz- und Korrektheitsprüfungen dar. Dabei muss die Formalisierung einerseits die Automatisierung von Prüfungen, andererseits die nutzergerechte effiziente Handhabung in der industriellen Praxis erlauben. Für die Qualitätsprüfung sind darüber hinaus geeignete, aussagekräftige und praxisrelevante Qualitätskriterien zu definieren.

- **Nicht-funktionale Requirements**
  Neben den funktionalen Anforderungen müssen auch die nicht-funktionalen Anforderungen an das zu realisierende System beschrieben werden. Hierzu zählen neben Aspekten wie Performance auch die Sicherheitsanforderungen, die an das System zu stellen sind, um mögliche vom System ausgehende Gefahren für Leib und Leben auszuschließen. Dabei müssen geltende Standards wie ISO 26262 berücksichtigt und umgesetzt werden. Derartige nicht-funktionale Anforderungen sowie das gewünschte Verhalten des Systems bei bestimmten unerwünschten Umgebungsbedingungen wie Fehlfunktionen von Sensoren werden heute nicht ausreichend berücksichtigt und müssen ein fester Bestandteil des modellbasierten Requirements Engineering werden. Weitere nicht-funktionale Anforderungen resultieren aus wirtschaftlichen und juristischen Interessen, wie etwa Installations- und Nutzungskosten einerseits und Ausschluss von wechselseitigen Interferenzen zwischen Teilsystemen, die durch unterschiedliche Zulieferer erstellt werden.

- **Requirements Management**
  Leistungsfähige Methoden und Werkzeuge sind unverzichtbar für die Organisation und Verwaltung von Anforderungen. Die größten Herausforderungen stellen hierbei die Verfolgbarkeit (Traceability) von Anforderungen über den gesamten Entwicklungsprozess und das Änderungsmanagement (Change Management) dar. Darüber hinaus muss eine über mehrere Partner verteilte Entwicklung über die gesamte Zulieferkette unterstützt werden. Auch hier ist ein hoher Formalisierungsgrad bei der Spezifikation der Anforderungen eine wichtige Voraussetzung, der insbesondere auch ein „verteiltes" Requirements Management unterstützt.

> 5.2.2 Architektur – Entwurf und Bewertung

Architekturen gewinnen mit der Zunahme des Trends der Multifunktionalität zum einen und der Integration sowie Interoperabilität von Systemen zum anderen zunehmend an Bedeutung. Große umfangreiche Eingebettete Systeme sind typischerweise einmal in technische Architekturen strukturiert, die aus den Steuergeräten, Kommunikationsver-

bindungen, Aktuatoren, Sensoren und Nutzerschnittstellen bestehen. Im Gegensatz zu Softwaresystemen, die nicht eingebettet und typischerweise auf Standardbetriebsumgebungen laufen, sind harte Echtzeitanforderungen und das autonome Reagieren auf Ereignisse in Echtzeit typisch. Die Einbettung in technische und physische Systeme mit oft dedizierten Schnittstellen für die Mensch-Maschine-Interaktion erfordern besondere Entwicklungsmethodiken.

Je größer diese technischen Systeme werden, desto wichtiger ist es sie so zu gliedern, dass sie ein hohes Maß an Modularität aufweisen, um Qualitätsmerkmale wie Zuverlässigkeit, Performanz und Wartbarkeit abdecken zu können, sowie Techniken zur Bewertung von Architekturen gegenüber Qualitätsmerkmalen zu entwickeln. Zunehmend bedeutsam wird aber neben dem technischen Architekturverständnis auch die Architektur der auf diesen informationstechnischen Systemen ablaufenden Softwarestrukturen im Sinne von Softwarearchitekturen. Dies betrifft zum einen die Betriebssystemstrukturen wie Middleware, Plattformen und Kommunikationseinrichtungen, die stark nach Architekturprinzipien zu strukturieren sind.

Darüber hinaus nimmt auch die Frage der Applikationsarchitekturen eine zunehmende Bedeutung ein, in denen die Logik der Interaktion der verschiedenen Teilsysteme und ihrer Teilaufgaben nach architekturellen Prinzipien geordnet und dargestellt werden. Die Beherrschung des Entwurfs dieser Architekturen in Hinblick auf die immer weiter reichenden Anforderungen an Funktionalität und Qualität sowie eine langfristige Verwendung und Wiederverwendung ist eine der großen Herausforderungen im Umgang mit Systemen mit hohem Grad an eingebetteter Software. Dies hat besondere Bedeutung, wenn Teilsysteme, die für sich eingebettete Software enthalten, in Systeme integriert werden, in denen dann die Softwareteilsysteme zusammenspielen müssen. Solchen Herausforderungen an die Systemintegration kann nur durch die Beherrschung des Architekturentwurfs begegnet werden.

> 5.2.3 Systemanalyse

Zum Erlangen von Vertrauen in die Einhaltung definierter Eigenschaften Eingebetteter Systeme ist es erforderlich, die Systeme frühzeitig und möglichst unabhängig von der Implementierung im Hinblick auf Qualitätseigenschaften analysieren zu können. Dabei sind der gesamte relevante technische Rahmen eines Systems und die Gesamtheit der relevanten Wechselwirkungen mit Nutzern oder anderen technischen Systemen adäquat zu berücksichtigen – z.B. durch den Einsatz von Modellen.

Wesentliche Aufgabe der Systemanalyse ist die Entwicklung einer Systemarchitektur, welche eine Balance zwischen Nutzererwartungen, Anforderungen aus funktionaler, technischer oder administrativer Sicht sowie unter Beachtung existierender (Sicherheits-) Standards und weiterer Randbedingungen (Ökologie, Ökonomie etc.) gewährleistet.

Vor dem Hintergrund stetig wachsender Systemumfänge kommt einer automatisierten oder teilautomatisierten Analyse dabei eine besondere Bedeutung zu. Für eine belastbare Aussage ist neben der Definition der Qualitätsziele zudem eine Quantifizierung der Analyse, die im Idealfall eindeutige Ergebnisse liefern sollte, erforderlich. Beim gegenwärtigen Stand der Praxis sind hierfür noch einige Herausforderungen zu bewältigen:

Beispielsweise sind Systemanalysen im Zuge der Einbindung/Wiederverwendung von Alt-Systemen mit unvollständiger oder fehlerhafter Spezifikation bisher kaum möglich. Während bei klassischen IT-Systemen Reengineering-Ansätze existieren, sind diese bei Eingebetteten Systemen aufgrund der im Regelfall starken Abhängigkeiten zwischen Software, Elektronik und Mechanik sowie der Systemumgebung nicht verfügbar.

Des Weiteren sind Systemanalysen während der Entwicklung im Hinblick auf unvorhergesehene Eingaben oder Einsatzbedingungen sowie über Systemgrenzen hinweg (z.B. für Robustheit, Sicherheit) wichtig, aber schwierig – typischerweise lässt sich das Einsatzspektrum eines Eingebetteten Systems im Betrieb nicht vollständig vorhersagen. Schließlich erfordert der Trend hin zu dynamisch erweiterbaren, adaptiven oder autonomen Systemen Analysen zur Laufzeit (inkl. Diagnose) vor dem Hintergrund sich wandelnder Umweltbedingungen.

Die Entwicklung von Techniken, Methoden und Werkzeugen zur Quantifizierung nichtfunktionaler Systemeigenschaften, wie Sicherheit (Security, Safety), Robustheit oder Wartbarkeit stellen deshalb wichtige Bausteine zur Weiterentwicklung der System-Analytik dar. Dabei muss das Eingebettete System ganzheitlich mit seinen Software- und Hardware-Bestandteilen betrachtet werden.

Langfristig gesehen wird die Erforschung und Entwicklung neuer Entwicklungsparadigmen weg von der Funktionsentwicklung hin zur Verhaltensentwicklung von Systemen der System-Analytik zuarbeiten. Dazu gehört auch die Erforschung und Entwicklung von selbstheilenden/selbstdiagnostizierenden Systemen im Zuge einer in zukünftige Eingebettete Systeme integrierten System-Analyse.

> 5.2.4 Modellgetriebene Entwicklung

Um Lösungen für technische Systeme frühzeitig absichern und die Effizienz der Entwicklung weiter steigern zu können, wird zunehmend auf die modellbasierte bzw. modellgetriebene Entwicklung gesetzt. Dabei wird in der Regel auf standardisierte Vorgehensmodelle für die Entwicklungsprozesse von Hardware und Software (z.B. V-Modell XT) aufgesetzt. Je nach Anwendungsdomäne (im Automobil zum Beispiel Antriebsstrang, Fahrwerk, Innenraum-Komfort, Infotainment) kommen mehr regelungstechnische, mehr steuerungstechnische oder mehr software-orientierte Modelle zum Einsatz, mit rechnergestützten Werkzeugen, die vielfach Quasi-Standards darstellen (z.B. Matlab/Simulink/Stateflow oder UML-Werkzeuge).

Allerdings gibt es heute keine standardisierten Schnittstellen zwischen den Werkzeugen und nur punktuell eine Durchgängigkeit in der Werkzeugkette, sodass noch immer zeitaufwändige und fehleranfällige manuelle Entwicklungsschritte notwendig sind. Aufgrund des resultierenden hohen Aufwands und der zunehmenden Erfordernisse, Hardware und Software parallel und in optimierender Abstimmung zu entwickeln, ergibt sich die Notwendigkeit nach durchgängiger Virtualisierung der Entwicklung mit der Konsequenz, dass eine Vielzahl von Werkzeugen gekoppelt werden muss (von Unterstützung der Anforderungsspezifikation, über die Systemanalyse, den Systementwurf und dessen Optimierung, die Implementierung in Hardware- und Software-Modulen und deren Verifikation, der hierarchischen Integration und dem Test auf Subsystemebene bis zur Systemebene).

Um die durchgängige Virtualisierung realisieren zu können, sind geeignete Werkzeuge zu entwickeln, die über physikalische Modelle das System selbst und eine möglichst exakte Abbildung der späteren realen Arbeitsumgebung des Eingebetteten Systems ermöglichen. Um eine durchgängige virtuelle Entwicklung zu ermöglichen, sind verschiedene Werkzeuge zu koppeln. Dabei sollen die einzelnen Simulatorsysteme selbst so zusammenzuschalten sein, dass ein kompletter Test unter Echtzeitbedingungen möglich wird, und zwar durchgängig vom Hardware-in-the-loop-Test auf Modul- und Steuergeräteintegrationsebene bis hin zum Test des Gesamtsystems im Rahmen einer Fahr- oder Flugerprobung.

In der modellgetriebenen Entwicklung existieren bisher nur wenige Ansätze in Bezug auf nicht-funktionale Eigenschaften (z.B. funktionale Sicherheit, Betriebsschutz, Zuverlässigkeit, Energieeffizienz, Kosten, Auslegung des Kabelsatzes) und die korrekte Umsetzung des spezifizierten zeitlichen Verhaltens. Im Automobilbereich fehlen beispielsweise leistungsfähige Ansätze zur automatisierten Synthese und Analyse von Elektrik/Elektronik-Architekturen, zum automatischen Mapping von Funktionen auf Steuergeräte, zur automatischen Konfiguration der Kommunikations- und der Schedulingparameter, um die Integration der verschiedenen Steuergeräte in heterogenen Netzen zu vereinfachen und zu optimieren. Der modellgetriebene Ansatz muss über die Funktionalität hinaus die Beschreibung vielfältiger Aspekte von Hardware- und Software-Komponenten wie Fehlermodelle und zeitliches Verhalten erlauben, bzw. die Ableitung dieser Eigenschaften durch Kopplung mit geeigneten Werkzeugen unterstützen.

Ein mit zunehmendem Automatisierungsgrad verstärkt auftretendes Problem stellt die daraus resultierende Intransparenz der durch Entwurfswerkzeuge vorgenommenen Schritte dar. Wie können Entwurfswerkzeuge so gestaltet werden, dass dem Entwickler jederzeit die Plausibilität automatisierter Entwurfsschritte dargelegt werden kann? Wie kann diese Nachvollziehbarkeit gegenüber weitergehenden Anforderungen einschlägiger Sicherheitsstandards gewährleistet werden? Für den erfolgreichen Einsatz modellbasierter Entwicklung ist die Berücksichtigung solcher Anforderungen im Sinne eines Designer-zentrierten Tool Engineerings unverzichtbar.

> 5.2.5 Systematische Wiederverwendung

Die Industrie entwickelt heute nicht mehr nur für lokale Märkte sondern für den Weltmarkt. Aber der Weltmarkt besteht aus vielen lokalen Märkten und einzelnen Kunden, die alle ihre spezifischen Anforderungen haben. Deshalb ist das Beherrschen von Produktvielfalt und Variabilität ein entscheidender Wettbewerbsvorteil, wobei Variabilität in Embedded Systems in der Regel gleich zu setzen ist mit Variabilität in der Embedded-Software. Dies gilt ebenso für Halbfabrikate wie Plattformen, Produktlinien, etc.

Während es im Server- und PC-Bereich gelungen ist, mit wenigen Hardware- und Software-Standards eine weitgehende Standardisierung zu erreichen, sind solche Konzepte im Bereich Eingebetteter Systeme noch deutlich weniger verbreitet und stärker fragmentiert. Um das zweifellos auch im Embedded-Bereich vorhandene große Potential zur Effizienz- und Qualitätssteigerung durch systematische Wiederverwendung von Embedded-Bausteinen zu heben, sind jedoch neue innovative methodische und technologische Konzepte erforderlich.

Als Beispiele für Forschungsbedarf sind hier unter anderem zu nennen:

- Durchgängige Entwurfsverfahren, die Wiederverwendung bereits bei den Anforderungen mit berücksichtigen. Insbesondere eine systematische Methodik der Software-Erstellung, von der Anforderungsspezifikation bis zu Realisierung und Test, die auch die angrenzenden Domänen Elektronik, Mechanik etc. mit einschließt. Methoden und Tools aus dem Bereich der nicht eingebetteten Software sind nicht unmittelbar geeignet.
- Die Etablierung von Referenzarchitekturen und industriespezifischen und domänenübergreifenden Plattformen, wie AUTOSAR in der Automobiltechnik und IMA im Flugzeugbau.
- Methoden und Konzepte für die Integration von Eingebetteten Systemen in Bezug auf die zunehmende Verwendung von Open-Source-Software oder insgesamt von Dritten gelieferten externen Komponenten. Die derzeit vorhandenen Konzepte und Methoden für eine effiziente und auch effektive Integration sind nicht ausreichend, insbesondere bei sicherheitskritischen Embedded-Bausteinen.
- Semantische Beschreibung der Schnittstellen von Embedded-Bausteinen, um den Aufwand für die Integration und Vernetzung dieser Bausteine zu reduzieren.
- Selbstlernende und adaptive Systeme, die in der Lage sind, ihre Funktionalität und Services dynamisch an sich veränderte Umgebungen anzupassen.

> 5.2.6 Menschen-zentrierter Entwurf

Angesichts der zentralen Rolle von Interaktionsschnittstellen für die Nutzbarkeit der Technologieinnovationen in Assistenzapplikationen stellt die frühe Einbeziehung des Nutzers in den Entwurfsprozess eine fundamentale Voraussetzung für die Akzeptanz neuer Produkte dar. Dies setzt interdisziplinäre Forschung zur Bewertung von Ausgestaltungsvarianten von Interaktionsschnittstellen voraus, welche je nach Applikation weit über rein ergonomische Aspekte hinausgehen und etwa die Einbeziehung von Aspekten wie Stress, Müdigkeit und nachlassende Fähigkeiten zur Situationseinschätzung im Alter einbeziehen müssen.

Auch hier kann prinzipiell auf die Erfahrungen im menschenzentrierten Entwurf im Luftfahrtbereich zurückgegriffen werden, allerdings setzen die in dem in Abschnitt 4 anklingenden Szenarien voraus, das die Nutzermodellierung für ungeschulte Nutzer und etwa wie in Szenario 4.1.1 oder 4.2.3 für Menschen mit eingeschränkten Wahrnehmungs- und Beurteilungsfähigkeiten erfolgen muss. Je nach Applikation (insbesondere 4.2.3) ist dabei das Risiko und die Auswirkung von Fehlbedienungen des Gesamtsystems Nutzer-Assistenzsystem-Systemumgebung unter Anwendung einschlägiger Sicherheitsstandards einzuschätzen und zu bewerten.

Neben Forschungsarbeiten, welche unmittelbar auf Nutzerinteraktionen zielen, sind für viele Handlungsfelder (Mobilität, Gesundheit, Krisenmanagement) Verhaltensmodelle von Menschen für den Systementwurf von Systems-of-Systems erforderlich – so etwa für die Vision des unfallfreien Fahrens, in der das Verhalten von Verkehrsteilnehmern wie Radfahrern oder Fußgängern durch Sicherheitssysteme eingeschätzt werden muss, um Ausweichmanöver zur Unfallvermeidung vorzuschlagen.

> 5.2.7 Life Cycle Management

Die Wertschöpfung eines Embedded Systems wird bestimmt durch den Lebenszyklus des übergeordneten technischen Systems oder Produkts. Deshalb ist das Life-Cycle-Management für Eingebettete Systeme eminent wichtig und darf nicht auf den Design- und Entwicklungsprozess reduziert werden.

Im Zuge einer zunehmenden Kundenorientierung müssen Embedded Systems immer besser auf die jeweiligen Kundenbedürfnisse zugeschnitten werden und damit über den gesamten Lebenszyklus veränderbar sein. Über den gesamten Lebenszyklus eines technischen Systems oder Produkts hinweg muss es möglich sein, einzelne Software-, Elektronik-, oder Mechanikkomponenten auszutauschen und dabei die Gesamtfunktionalität des Systems zu gewährleisten. Insbesondere bei sicherheitskritischen Anforderungen sollte dies mit möglichst geringem zusätzlichem Zertifizierungsaufwand erfolgen. Längerfristige Entwicklungszyklen, z.B. in der Mechanik, müssen mit relativen kurzen und iterativen Entwicklungszyklen, z.B. bei der Software, in Einklang gebracht werden.

Eine systematische, methodische Beherrschung der unterschiedlichen Innovations- und Wartungszyklen der verschiedenen Disziplinen Software, Elektronik und Mechanik, aber auch angrenzender Disziplinen wie Hydraulik oder Regelungstechnik ist deshalb von entscheidender Bedeutung und wird einen Schub neuer Innovationen ermöglichen. Das Problem des Auseinanderdriftens von Lebenszyklen in komplexen Technologiestacks muss behandelt werden, z.B. die unterschiedlichen Lebenszeiten von einzelnen Komponenten in Industrieanlagen und Fahrzeugen oder Prozessoren und Plattformen, die in Steuergeräten eingesetzt werden, sowie der Trend zum Softwareupdate im bestehenden laufenden Betrieb.

Erforderlich hierzu ist die Entwicklung von Konzepten und Anwendungen für das Produkt-Lebenszyklus-Management und das Entitlement-Management von Eingebetteten Systemen, sowie zum Management der Kompatibilität eingebetteter Software-Komponenten, z.B. Methoden und Tools für Versionsverwaltung, Änderungsmanagement und Release-Management. Weiter ist das Thema Nachhaltigkeit von sehr großer ökonomischer Bedeutung.

> 5.2.8 Prozessautomatisierung

Im Rahmen der stärkeren Automatisierung der Gesellschaft und der immer noch stärker zunehmenden Dienstleistungsstrukturen kommt zugeschnittenen Prozessen, die schnell und zielsicher ablaufen, eine immer höhere Bedeutung zu. Nur wenn es gelingt, diese Prozesse effizient und effektiv so zu organisieren, dass die menschliche Interaktion auf ein Minimum beschränkt bleibt und diese Prozesse in den unterschiedlichsten Situationen zuverlässig und störungsfrei agieren und zwar selbst bei starken Veränderungen der Rahmenbedingungen, wird es möglich sein, die heute komplexen Prozesse der Logistik, der Informationsversorgung, der Mobilität und Kommunikation sicherzustellen. Dabei kommt eingebetteten Softwaresystemen, die in den Systemen, in denen die Prozesse ablaufen, über Sensoren Informationen aufnehmen, diese abgleichen und über Aktuatoren Abläufe steuern, wachsende Bedeutung zu.

Die große Herausforderung ist es, die Logik solcher Systeme, die aus einer Vielzahl vernetzter Eingebetteter Systeme bestehen, im Sinne der Anwendungsanforderungen festzulegen und zuverlässig zu realisieren. Dies erfordert insbesondere eine verstärkte Aufmerksamkeit in Hinblick auf Mensch-Maschine-Konzepte, in denen die Interaktion von Menschen mit weitgehend automatisierten Prozessen stattfindet. Methodisch beherrscht werden muss die Frage des Entwurfs der Prozesse, der Zusammenstellung der entsprechenden Anforderungen und der Abbildung der Prozesse in weitgehend automatisierten Prozessketten, die stark durch eingebettete Softwaresysteme geprägt sind.

> 5.2.9 Prozessorganisation

Embedded Systems zeichnen sich häufig durch das Zusammenspiel verschiedener Disziplinen (Mechanik, Optik, Elektronik, Software, etc.), durch begrenzte Ressourcen und durch besondere Anforderungen an z.B. Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit oder Sicherheit aus. Diese Eigenschaften stellen besondere Anforderungen an die Vorgehensmodelle zur effektiven und effizienten Entwicklung von Embedded Systems, die von etablierten Entwicklungsprozessen nur teilweise bewältigt werden. Die Diskrepanz zwischen klassischer Softwareentwicklung und mustergetriebener Hardwareentwicklung und eine immer engere Vernetzung von Prozessen mit Entwicklungswerkzeugketten, sowie die Einbindung von "open source software" schaffen weitere Herausforderungen.

Zu untersuchen ist beispielweise, inwieweit Entwicklungsmethoden und -prozesse, die sich im nicht-Embedded-Bereich zurzeit etablieren (z.B. agile Software-Entwicklung oder Test-Driven-Development) dazu beitragen können, diese Diskrepanz zu beheben.

Großes Potenzial zu Steigerung der Kosteneffizienz liegt in der Zertifizierung von Embedded Systems insbesondere hybrider oder multitechnischer Systeme. Hier sind geeignete Zertifizierungsprozesse zu entwickeln, die eine kostengünstige Zertifizierung und auch Re-Zertifizierung von wieder verwendbaren Embedded Systems erlauben.

Ein weiterer wichtiger Forschungsbedarf betrifft neue Vorgehensmodelle, die die Vernetzung der Entwicklungsdisziplinen sowie die Synchronisation von Teilprojekten mit unterschiedlichen Lebenszyklen beherrschen und gleichzeitig besondere Prozess-Anforderungen (z.B. wegen Zuverlässigkeits- oder Sicherheitsanforderungen) einfach ein- oder ausblenden können.

Auch die Automatisierung von Prozessschritten, sei es automatische Code-, Testfall- oder Dokumentengenerierung, bedarf noch weiterer Forschungsaktivitäten. Dabei muss auch die zunehmende Integration der Entwicklungswerkzeuge untereinander, aber auch mit den Prozessen berücksichtigt werden.

Neben den Vorgehensfragen auf technologischer Ebene müssen wirtschaftliche und juristische Interessen berücksichtigt werden. Auch hier besteht großer Forschungsbedarf. Auf wirtschaftlicher Ebene muss z.B. geklärt werden, wie anfallende Installations- und Nutzungskosten auf die verschiedenen Beteiligten umgelegt werden, ob diese bereit sind, durch die Nutzung von Embedded Systems entstehende Risiken zu tragen, bzw. in welchem Umfang und ob und wie sie dafür kompensiert werden. Vorgehen zur Erstellung von Embedded System Business Cases müssen daher erstellt werden. Auf juristischer Ebene müssen ebenfalls Antworten zu Risiken, Haftung sowie Regelungen zur Nutzung anfallender Daten gefunden werden.

6 EMPFEHLUNGEN

Im Spannungsfeld zwischen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen einerseits, und den dafür benötigten Technologie- und Prozessinnovationen andererseits, schlagen wir vor, die Forschung im Bereich Eingebettete Systeme auf sechs Forschungsschwerpunkte zu fokussieren, die in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben werden.

Für jedes der Forschungsfelder wird in Abschnitt 6.1 skizziert, welche Kompetenzen bzw. Fähigkeiten („Capabilities") durch synergetische Verbindung von jeweils aufgeführten Technologie- bzw. Prozessinnovationen erreicht werden sollen, und wie diese zur Lösung der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen beitragen.

Abschnitt 6.2 ordnet das in eine Roadmap ein, stellt also für jedes Forschungsfeld dar, in welchem Zeithorizont welches Leistungsmerkmal erreicht werden soll und gibt indikative Abschätzungen über die hierzu seitens der Industrie geplanten FuE-Aufwendungen. Weitere Empfehlungen zu Förderinstrumenten, zur Absicherung der Nachhaltigkeit der FuE-Ergebnisse sowie zu Standardisierungsaktivitäten werden in den Abschnitten 6.3 und 6.4 gegeben.

6.1 PRIORITÄRE STRATEGIELINIEN

Die wesentlichen zukünftigen Herausforderungen im Bereich Embedded Systems können mit Hilfe von sechs Forschungsschwerpunkten (FSPs) bewältigt werden.

[1]
FSP Seamless Interaction: Überall genau die richtigen Informationen sicher zur richtigen Zeit zu erhalten, ist genauso relevant für die Überwachung von Patienten wie im Krisenmanagement, in intermodalen Logistikanwendungen, wie in Smart Shops, die quasi magisch Kundenwünsche maßgeschneidert erfüllen. Über bekannte IT-Lösungen hinaus sind dazu „Sprachbarrieren" zwischen unterschiedlichsten technischen Systemen zu überwinden, Instrumente zur sicheren Authentifizierung solcher Systeme zu etablieren sowie schließlich „vordenkende" selbsterklärende Interaktionsschnittstellen zu gestalten.

[2]
FSP Autonome Systeme: Wenn unter extremen Randbedingungen (Erschließung von Rohstoffen am Meeresboden, Krisen-/Katastrophenmanagement, im Weltall) kritische Funktionen weitestgehend ohne menschlichen Eingriff gesichert werden müssen, sind Autonome Systeme die Technologie der Wahl. Diese müssen sich selbst so anpassen können, dass sie in kaum vorhersagbaren Umgebungen und unter kaum genau spezifizierbaren Randbedingungen eine spezifizierte Leistung selbständig erbringen

[3]
FSP Verteilte Echtzeit-Situationserkennung und Lösungsfindung: Koordinierte Lagebewertungen und Lösungsstrategien sind unverzichtbar in so unterschiedlichen Handlungsfeldern wie Krisenmanagement, Patientenüberwachung, oder in der koordinierten Fahrzeugführung zur Reduktion der Umweltbelastung und Erhöhung der Verkehrssicherheit. Dies setzt voraus, dass zwischen den handelnden (semi-autonomen) Teilsystemen ein genügend genaues gemeinsames Lagebild unter Echtzeitbedingungen auf der Basis von integrierter heterogener intelligenter Sensorik und statischem Lagewissen etabliert werden kann, damit durch koordinierte Manöver in Echtzeit Konfliktlösungen realisiert werden können.

[4]
FSP Sichere Systeme: Herstellung und Aufrechterhaltung des Vertrauens in Embedded Systems sind unabdingbare Voraussetzung für die Akzeptanz von komplexen, vernetzten, eingebetteten Systemen, wie sie zur Lösung der gesellschaftlichen und ökonomischen Herausforderungen benötigt werden. Bisherige IT-Sicherheitskonzepte sind hier nützlich, aber nicht ausreichend, da sie oft auf den Aspekt Security fokussieren. Für Embedded Systems sind die Aspekte Safety sowie Auswirkungen von (mangelnder) Security auf Safety zentrale Themen.

[5]
FSP Architekturprinzipien: Umweltverträgliche Mobilität im Automobil durch Minimierung von Emissionen und Energieverbrauch („Green Mobility") ist nur ein Beispiel für Anwendungen, in denen Lösungen aus verschiedenen Domänen und Branchen zu komplexen Systemen integriert werden müssen. Dazu sind standardisierte, beherrschbare, branchenunabhängige Architekturen zentraler Schlüssel zur Erreichung eines Wettbewerbsvorteils (Qualität, Kosten, Time-to-Market) und zur Erhaltung von Arbeitsplätzen.

[6]
FSP Virtual Engineering: Um die benötigten, auf Embedded Systems basierenden Anwendungen mit den geforderten Qualitäten realisieren zu können, sind verbesserte Entwicklungsprozesse, -methoden und -werkzeuge notwendig, durch die eine erhöhte Effizienz, die frühzeitige Absicherung von Konzepten, Produktivitätsgewinne in Bezug auf Qualität, Kosten, Zeit, Sicherheit und Zuverlässigkeit sowie die Beherrschung der Komplexität domänenübergreifender Systeme ermöglicht wird.

> 6.1.1 Seamless Interaction

Derzeit werden signifikante Fortschritte erzielt auf dem Weg hin zu einer allgegenwärtigen Fähigkeit, sich immer und überall informieren und kommunizieren zu können. Diese Fähigkeit ist teilweise in beeindruckender Form bereits auf dem Markt verfügbar. Als Beispiele seien hier Geräte wie das iPhone mit seinen diversen Applikationen oder ähnliche Produkte (u.a. Blackberry) genannt. Mit Hilfe der drahtlosen Kommunikationstechnik permanent angebunden an zentrale Server, zusammen mit der Georeferenzierung über ein globales Positionsbestimmungssystem (GPS, Galileo), werden umfassende Informationen über Ereignisse oder Gegenstände in der unmittelbaren Umgebung verfügbar gemacht.

Alternativ kann ein Objekt über eine eingebaute Kamera erfasst und mittels schneller Bildverarbeitung analysiert und identifiziert werden, um dann die zugeordneten Informationen und Kontexte nahezu zeitgleich einzuspielen oder dem Nutzer akustisch verfügbar zu machen. Alle diese Kontextinformationen basieren auf der permanenten Anbindung an zentrale Server sowie der Verfügbarkeit der gesuchten Informationen in diesem Server als Dienstleistung.

Seamless Interaction beschreibt und fordert eine weitergehende Fähigkeit: Der Nutzer kann über drahtlose Kommunikation mit lokalen Informationsanbietern, Dienstleistern oder Geräten aller Art interagieren, ohne auf einen zentralen Dienstleister zugreifen zu müssen. Damit wird die Datenallmacht der zentralen Informationsbroker unterlaufen und eine lokale Hoheit, mindestens als Ergänzung oder Alternative, wieder hergestellt. Ferner sind technische Defizite eines zentralen Dienstes behebbar, z.B. die Abschattung in Gebäuden, Fahrzeugen o.ä.. Als Vision ist eine nahtlose Interaktion über ein einziges Kommunikationsgerät möglich, welches sowohl für Unterhaltungszwecke, aber auch zur Diagnose, Steuerung und Information dienen soll.

Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes sollen dazu insbesondere folgende Fähigkeiten entwickelt werden:

1. **Seamless Data Acquisition:** Echtzeitzugriff auf Informationen und echtzeitige Integration von Daten aus unterschiedlichen heterogenen Quellen, und aktive adaptive drahtlose Kommunikation unter Verwendung von vereinheitlichten Interaktionsprotokollen, offenen Interoperabilitätsstandards und energieeffizienter „ultra low-power" Signalerzeugung und Verarbeitung.
2. **Seamless User Interaction:** Intuitive Mensch–Maschine-Schnittstellen, welche Nutzer unterschiedlichster Qualifikationsprofile mit selbsterklärenden situations- und rollenangepassten Interaktionsformen unterstützen.
3. **Seamless Authentification:** Sichere Authentifizierung der interagierenden Systeme sowohl innerhalb eines dynamisch evolvierenden einheitlichen Systems, insbesondere aber über proprietäre Systemgrenzen hinweg in heterogenen Umgebungen bei gleichzeitiger Sicherstellung der Unversehrtheit der persönlichen Daten und der Privatsphäre.

Solche Fähigkeiten sind insbesondere für Szenarien 1, 2 und 4 des Handlungsfeldes Alternde Gesellschaft und Gesundheit, für Szenarien 2 und 3 im Handlungsfeld Mobilität, Szenario 2 und 3 im Handlungsfeld Sicherheit, in Szenario 1 des Handlungsfeldes Wissensgesellschaft, und im Szenario Smart City des Handlungsfeldes Urbanisierung notwendig.

Hierfür sind Prozess- und Technologieinnovationen im Bereich der Sicherheit (zeitnahe autonome Authentifizierung in heterogenen Eingebetteten Systemen), im modellbasierten nutzerzentrierten und automatisierten Systementwurf, basierend auf Requirements in vereinheitlichten Modellbeschreibungen, innovative Interaktionsschnittstellen (mit intuitiv erfassbaren multimodalen Metaphern zur Vermittlung mehrdimensionaler Entscheidungsräume), neue Sensortechnologien (z.B. Bio-Sensoren, Brain-Computer-Interaction), adaptive Interaktionsschnittstellen und Computing Devices (Höchstintegration von analogen und digitalen Schaltungsteilen, kognitive, intelligente adaptive HF- und Opto-Kommunikationsschnittstellen) erforderlich.

> 6.1.2 Autonome Systeme

Systeme heißen autonom, wenn ihre Funktionalität vollständig oder teilweise darauf ausgerichtet ist, in kaum vorhersagbaren Umgebungen und unter kaum genau spezifizierbaren Bedingungen eine spezifizierte Leistung weitgehend ohne menschliche Intervention zu erbringen. Typische Beispiele für die Eigenschaften solcher Systeme sind Mechanismen zur Selbstadministration, Möglichkeiten zur Selbstdiagnose, in der Systeme aufgetretene Fehler und Mängel innerhalb oder außerhalb des Systems erkennen, und die Fähigkeit zur Selbstheilung durch Maßnahmen, die die Systemfunktionalität trotz Beeinträchtigungen noch weitgehend zu erbringen erlauben.

Charakteristische Anwendungen sind autonome Systeme, die weitgehend ohne explizite Nutzereingriffe über einen längeren Zeitraum vorgegebene Ziele verfolgen, eine spezifizierte Funktionalität erbringen und sich dabei an sich ändernde Rahmenbedingungen anpassen. Dies erfordert eine umfassende Modellierung der Einsatzumgebung und eine Festlegung der Reaktion der Systeme in spezifischen Kontexten. Dazu sind Techniken der Adaptivität und der Kontext-Awareness zu erforschen.

Zentrale Techniken zur Erbringung von Autonomie sind Kontextadaptivität und autonome Lernverfahren. Bei Kontextadaptivität werden die Rahmenbedingungen, in denen die Systeme ihre Leistung zu erbringen haben, durch so genannte Kontextmodelle erfasst, in denen Informationen über die Systemumgebung gespeichert werden. Zusätzlich werden Sensoren und weitere Informationsquellen eingesetzt, um den Kontext ständig zu aktualisieren. Im Idealfall reagieren dann die Systeme funktions- und nutzergerecht, ohne dass der Nutzer explizit eingreifen muss. Dies erfordert besondere Techniken des Entwurfs der Mensch-Maschine-Interaktion.

Besondere Bedeutung kommt der Vernetzung zu, wenn mehrere autonome Systeme

in Kooperation autonom komplexe Funktionalität erbringen. Langfristige Ziele dabei sind stabil funktionierende Netzwerke autonomer Systeme, die sich flexibel an sich ändernde Rahmenbedingungen anpassen und Beeinträchtigungen durch Fehler über Adaptivität auspendeln. Dies führt auf Konzepte wie Schwarmintelligenz, bei der sich autonome Systeme adaptiv koordinieren und kooperieren und daher auf Fähigkeiten des Forschungsfeldes Verteilte Echtzeit-Situationserfassung und Lösungsfindung aufsetzen. Dies erfordert auch Lernkomponenten, die Systemverhalten generieren, das über die ursprünglich in der Programmierung explizit vorgesehenen Verhaltensmuster hinausgeht.

Im Rahmen des Forschungsfeldes Autonome Systemen sollen die folgenden Fähigkeiten etabliert werden

1. Adaptivität:
   Die Fähigkeit eines Systems, sich im Betrieb (in gewissem Rahmen) eigenständig an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. Diese aus biologischen Systemen inspirierte Fähigkeit wird in verschiedensten Handlungsfeldern benötigt, wie z.B. im Bereich Sicherheit (ad-hoc-Vernetzung von Teilsystemen im Krisenfall) oder Urbanisierung (situative Vernetzung von Teilsystemen z.B. bei Großereignissen oder Einsätzen von Rettungsdiensten/Polizei).

   Sie subsumiert die Fähigkeit zur Selbst-Organisation, also zur dynamischen situationsbedingten Rekonfiguration (einschließlich der Verwendung an den aktuellen Systemzustand angepasster Protokolle). Sie erfordert Technologieinnovation in den Bereichen Verteilte Regelungen (Steuerung von Teilaspekten des Gesamtverhaltens an verschiedenen Stellen), Kooperative Eingebettete Systeme (Steuerung des Verhaltens von zusammengesetzten Systemen), Referenzarchitekturen (Standards für das Abfragen von hinzukommenden Systemteilen, Klassifizierung von Verhaltensalternativen), Innovative Nutzerschnittstellen (Interaktionsmöglichkeiten für Nicht-Experten, falls menschlicher Eingriff nötig).

2. Selbst-Heilung:
   Die (ebenfalls von biologischen Systemen inspirierte) Fähigkeit eines Systems, sich selbst zu „heilen", d.h. Störungen oder Ausfall von Systemteilen zu erkennen und auch im Mangelfall noch (ggf. eingeschränkt) zu funktionieren. Sie baut auf der Fähigkeit zur Selbstdiagnose, also der automatischen Überwachung der Verfügbarkeit aller zur Aufrechterhaltung der eigenen Funktionsfähigkeit notwendigen Systemparameter auf. Diese Fähigkeiten werden in den verschiedensten Bereichen benötigt, wie etwa Urbanisierung/Smart City (fortgesetzter Betrieb bei schwer zu erreichbarer Infrastruktur), Mobilität (fortgesetzter Betrieb von Transportsystemen oder zumindest ungefährliches Beenden des Betriebs) sowie Alternde Gesellschaft und Gesundheit (fortgesetzter Betrieb oder sicheres Abschalten von medizinischem Gerät).

Dazu werden Technologieinnovationen in den Feldern Kognitive Eingebettete Systeme (Erkennen fehlerhafter Zustände, Erstellen von Handlungsoptionen), Verteilte Regelungen (Möglichkeit der Verlagerung von Steuerungsaufgaben an andere Stellen), sowie Referenzarchitekturen (Annotation von alternativen, möglichen Systemkonfigurationen) benötigt.

> 6.1.3 Verteilte Echtzeit-Situationserfassung und Lösungsfindung

In fast allen Handlungsfeldern bereiten Eingebettete Systeme Entscheidungen vor oder treffen diese autonom, um übergeordnete Dienste zu unterstützen. So werden im Szenario „flächendeckende gesundheitliche Betreuung" Biodaten und Bewegungsdaten von Patienten erfasst und ausgewertet, um bei Bedarf Interventionen von Ärzten oder Pflegepersonal zu veranlassen. Die „Vision vom unfallfreien Fahren" baut darauf, dass Fahrzeuge nicht nur aufgrund der eigenen Sensorik, sondern durch Austausch von Information mit anderen Verkehrsteilnehmern (Fußgänger, Radfahrer, Fahrzeuge) oder Verkehrsinfrastruktur (Verkehrsschilder, Ampeln) entweder assistierend oder im Notfall automatisch und gegebenenfalls sogar koordinierend geführt werden. „Crisis Management" setzt voraus, dass dem Einsatzpersonal eine aktuelle Situationserfassung etwa auf der Basis von in Gebäuden integrierten Sensornetzwerken ergänzt um Personenbeobachtungen vorliegt, usw.

Gemeinsam ist diesen Szenarien, dass sie auf folgenden, in der Regel unter harten Echtzeitanforderungen zu realisierenden Fähigkeiten aufsetzen, die zu erreichen zentrale Herausforderungen dieses Forschungsschwerpunktes bilden:

1. **Echtzeit-Lageerfassung und -Bewertung in dynamischen verteilten Systemen:**
   Wie können räumlich verteilte, unsichere Informationen so aggregiert werden, dass zwischen den beteiligten Systemen ein gemeinsames genügend genaues Bild der zu überwachenden Wirklichkeit erstellt wird, welches vorgegebenen bzw. durch rechtliche und normative Rahmenbedingungen geforderten Qualitätsmerkmalen genügt, um damit als Basis für Situationsbewertungen zu dienen?

   Die Etablierung dieser Fähigkeit erfordert insbesondere Innovationen in den Bereichen Computing Devices der Zukunft, Ressourcen optimierende Technologien, Sicherheit eingebetteter Systeme, innovativer Interaktionsschnittstellen sowie kognitiver Eingebetteter Systeme.

2. **Koordinierte Lösungsstrategien:**
   Wie können hierauf aufsetzend insbesondere durch koordinierte Handlungsweisen der Teilsysteme Lösungen zur Umsetzung der übergeordneten Zielsetzungen (etwa Sicherheit von Verkehrsteilnehmern) unter Berücksichtigung der aus der Dynamik und Teilautonomie resultierenden Planungsunsicherheit gefunden werden?

Dies erfordert insbesondere Innovationen im Bereich der kooperativen Eingebetteten Systeme und verteilter Regelungsstrategien, etwa zur Etablierung von koordiniertem Schwarmverhalten.

3. **Embedded Services:**
   Wie können die unter 1. gewonnen Informationen mit Web- oder Datenbank-basierten Applikationen unter Berücksichtigung normativer und regulativer Informationen angereichert und in übergeordnete Services zur Entscheidungsfindung bzw. -vorbereitung unter Berücksichtigung vorgegebener oder durch rechtliche und normative Rahmenbedingungen geforderter Qualitätsmerkmale integriert werden (Bsp. Integration mit Patientendaten)?

   Dies erfordert insbesondere Innovationen im Bereich der Referenzarchitekturen sowie zur Sicherheit (im Sinne von Security) der Systeme. Die Komplexität der hierfür benötigten „Systems-of-Systems" kann nur beherrscht werden, wenn signifikante Prozessinnovationen in den Bereichen Requirements Management, Systemanalyse, Architekturentwurf- und Bewertung, sowie Life Cycle Management erzielt werden.

> 6.1.4 Sichere Systeme

Eingebettete Systeme sind häufig lokal und auch weiträumig vernetzt. Daher ist es erforderlich, dass Security und Safety in offenen Systemen garantiert werden kann. Dies betrifft einerseits Security – z.B. die sichere Authentifizierung, den Zugriffsschutz und die Integrität von Daten – als auch die Wirkung von Security-Lücken auf Safety. Durch Security-Probleme dürfen keine unangemessen hohen Restrisiken im Sinne von Gefährdungen entstehen. Diese Fähigkeit ist relevant in allen Bereichen, in denen sicherheitskritische Eingebettete Systeme Informationen nutzen, die aus anderen Informationsquellen über Netze bezogen werden.

Sie muss darüber hinaus erweitert werden in Bezug auf die Integration und Segregation multikriterieller Anwendungen. Anwendungen, die aus stark unterschiedlichen Bereichen stammen, z.B. sicherheitskritische Steuerungen einerseits und Informationssysteme andererseits, werden zunehmend miteinander verbunden. Dies erfordert sowohl eine aus Sicht der Anwendung nahtlose Integration unter Garantie von Eigenschaften, als auch eine hinreichende Segregation, um zu verhindern, dass sich unerwünschte Einflüsse über Teilsystemgrenzen hinweg ausbreiten können. Die Integration und Segregation multi-kriterieller Anwendungen ist wichtig für alle Anwendungsbereiche, in denen Teilsysteme zusammenwirken, die nach unterschiedlichen Kriterien für unterschiedliche Einsatzzwecke entwickelt wurden und daher erst oft im Nachhinein integriert werden. Ein typischer Anwendungsfall ist die Integration von Internetschnittstellen in Automobile.

Darauf aufbauend ist die Fähigkeit zur modularen Zertifizierbarkeit von Security und Safety erforderlich. Ziel ist die Erreichung der Kompositionalität der Eigenschaften Security und Safety jeweils für sich sowie in ihrer Wechselwirkung. Dabei bezieht sich die Komponierbarkeit auf unterschiedliche Modulumfänge (Bauteil, Baugruppe, Modul, System). Es müssen Sicherheitsgarantien auf übergeordneten Ebenen aufgrund der Sicherheitseigenschaften ihrer Komponenten hergeleitet werden können.

Dies bildet die Basis für die Fähigkeit zur aktiven Herstellung von Safety und Security durch Rekonfiguration. Zusätzlich zur Fähigkeit der modularen Zertifizierbarkeit erfordert dies einen Vollautomatismus sowie ein valides Selbstbild des eingebetteten System, die Fähigkeit zur Vorausbestimmung der Eigenschaften der rekonfigurierten Architektur und eine stabile Strategie zur Rekonfiguration.

Während die Fähigkeit, mit Hilfe von Rekonfiguration Sicherheit im gewünschten Bereich zu halten, Aktivitäten eines Eingebetteten Systems erfordert und daher weitgehend steuerbar ist, erfordern unkontrollierte Veränderungen zusätzliche Methoden. Die Sicherstellung von Security und Safety in dynamisch veränderlichen Systemen erfordert die Fähigkeit zur aktiven Herstellung von Safety- und Security durch Rekonfiguration allerdings auch in jenen Fällen, in denen auf Veränderungen von außen reagiert werden muss. Dies kann im Regelfall nicht durch das Eingebettete System beeinflusst werden und stellt daher eine zusätzliche Schwierigkeit dar.

Die im Forschungsschwerpunkt entwickelten Fähigkeiten sind relevant für die Handlungsfelder Alternde Gesellschaft und Gesundheit (alle Szenarien), Mobilität (Vision vom unfallfreien Fahren), Sicherheit (Safety in Transport, Automation, Medical, Security: Privacy of Data, Crisis Management) und Wissensgesellschaft (ferngestützte Diagnose).

Die genannten Fähigkeiten erfordern Technologieinnovationen in den Bereichen Referenzarchitekturen, Sicherheitsanalysen und Autonomie/Kooperation. Prozessinnovationen sind in den Bereichen Requirements Engineering, Architektur, Systemanalyse und systematische Wiederverwendung erforderlich.

> 6.1.5 Architekturprinzipien

Essentielle Fähigkeiten zukünftiger Architekturen für Eingebettete Systeme sind die Wiederverwendbarkeit in Teilen oder im Ganzen sowie die Erweiterbarkeit. Dies setzt voraus, dass eine solche Architektur sich aus einzelnen Bausteinen mit standardisierten Schnittstellen zusammensetzen lässt. Über die Standardisierung hinaus ist es zur Beherrschung der Komplexität erforderlich, dass sowohl funktionale wie auch nichtfunktionale Eigenschaften von Architekturen systematisch aus den Eigenschaften von Teilsystemen gewonnen werden können. Diese Fähigkeit wird im Englischen als Composability beziehungsweise Predictability bezeichnet. Dazu sollte das Verhalten dieser Blöcke abgeschlossen und exakt beschreibbar sein. Diese Beschreibung muss dabei auch nicht-funktionale Komponenten wie Kosten, Qualität und Wartbarkeit enthalten.

Da verschiedene Varianten der Zielsysteme unter Umständen eine große Spanne von Funktionen beinhalten, ist zudem die Skalierbarkeit eine wichtige Fähigkeit, um je nach Anforderung und Randbedingung effizient eine jeweils optimal angepasste und dimensionierte Lösung zu entwickeln.

Eingebettete Systeme zeigen in zunehmendem Maße eine hohe Heterogenität sowohl auf Komponentenebene (z.B. Sensoren, Aktuatoren, Steuergeräte) als auch bezüglich der einbezogenen Bereiche (Automotive, Infotainment). Um derartige Systeme effizient entwickeln und „zusammenbauen" zu können, werden branchenübergreifende Referenzarchitekturen und Interoperabilitätsstandards benötigt. Diese Fähigkeiten sind wiederum notwendige Bedingungen, um aus einzelnen Systemen wiederum übergeordnete Systeme (Systems of Systems) entwickeln, zusammensetzen oder idealerweise generieren zu können.

Die genannten Fähigkeiten im Bereich der Architektur sind insbesondere zur Bewältigung der Herausforderungen in den Bereichen Mobilität und Sicherheit von entscheidender Bedeutung. Beispielsweise müssen zukünftige Systeme für Unfallvermeidung sowohl in High-End-Fahrzeugen als auch in Volumenbaureihen verfügbar sein (Skalierbarkeit) und dabei zum Beispiel Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen (Fahrzeugsensorik, Kameras, Verkehrsinfrastruktur) verarbeiten. Im Bereich Sicherheit (sowohl im Sinne von Safety als auch im Sinne von Security) sind geeignete Architekturen eine notwendige Voraussetzung zur Erzielung der gewünschten Systemeigenschaften.

Die genannten Fähigkeiten erfordern die Entwicklung von entsprechenden Referenzarchitekturen. Für die Entwicklung sicherer, verteilter und kooperativer Eingebetteter Systeme sind sie wiederum eine notwendige Voraussetzung. Die wichtigsten Prozessinnovationen sind die Systematische Wiederverwendung, Architekturentwurf und -bewertung, das Life Cycle Management sowie Hardware-Virtualisierung.

> 6.1.6 Virtual Engineering

Die Abschnitte 3 und 4 der Roadmap haben dargelegt, dass alle Lebensbereiche in naher Zukunft von Embedded Systems durchdrungen werden. Damit werden diejenigen Bereiche, die mit der Erzeugung, dem Betrieb sowie mit der Diagnose und Wartung der vernetzten und interagierenden Embedded Systems befasst sind, von entscheidender Bedeutung. Insbesondere diese Bereiche werden nicht ohne eine umfangreiche Unterstützung durch „embedded intelligence" auskommen.

Noch immer sind die wichtigsten Daten bei der Systementwicklung allgemeine Dokumente mit allen Problemen einer dokumenten-zentrierten Arbeitsweise, z.B. Arbeitsweise, Aktualität, Konsistenz der Dokumente, sowie Unzulänglichkeit der sprachlichen Ausdrucksmittel. Für die Beherrschung der rapide wachsenden Komplexität in der sowohl geographischen als auch organisatorisch verteilten Entwicklung von Embedded Sy-

stems stößt diese dokumenten-zentrierte Arbeitsweise zunehmend an ihre Grenzen. Eine durchgängige modellzentrierte Systemumgebung wird nötig sein, um die zukünftigen Herausforderungen bei der Entwicklung von dynamisch vernetzten Embedded Systems zu meistern.

Die Lösung der geschilderten Probleme liegt in einer virtuellen Entwicklungsmethodik für Embedded Systems mit vollständiger standardisierter Datenintegration. Hierdurch könnten gleichzeitig auch noch die Entwicklungszeit und -kosten deutlich reduziert und die Qualität und Zuverlässigkeit von Embedded Systems erhöht werden.

Um dieser Lösung näher zu kommen sind unter anderem die Entwicklung durchgängiger digitaler Werkzeugketten für die virtuelle Entwicklung und Erprobung von Embedded Systems notwendig. Sie basieren auf einer einheitlichen Modellierung oder zumindest der Interoperabilität der Modelle beim Multidomain Engineering. Im Automobilbau sind dies z.B. die Verbindung verschiedener Domänen (Fahrwerk, Bordnetz, Klima, etc.) in einer durchgängigen Werkzeugkette auf Basis eines Modellierungs- und Simulationskerns sowie die Entwicklung von Analyse-, Simulations- und Optimierungssystemen entlang der virtuellen Entwicklung, Erprobung und Inbetriebnahme, aber auch Instrumente zur Bewertung der Lebenszykluskosten.

Voraussetzung hierfür sind nicht nur systemtechnische Schnittstellen zwischen verschiedenen Domänen und Prozessschritten, sondern auch organisatorische Schnittstellen. Entlang der Produktentstehung müssen Großunternehmen, KMUs, kurz: alle Beteiligten der Wertschöpfungskette, in abgestimmten Vorgehensweisen organisatorisch, methodisch und technisch in der Lage sein, ihre eigenen Aufgaben optimal zu lösen, wie auch im Verbund miteinander effiziente Kooperationsformen zu verwirklichen.

Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes sollen insbesondere die folgenden Kernkompetenzen entwickelt werden.

1. **Virtuelle Konzeptfindung:**
   Methoden und Werkzeuge zur Erfassung funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen, welche sowohl den Ansprüchen leichter Kommunizierbarkeit, einer nutzergerechten effizienten Handhabung in der industriellen Praxis wie auch systematischer Sicherstellung von Konsistenz und Vollständigkeit genügen, etwa auf der Basis formalisierter visueller Anforderungssprachen und Domänenmodellierungssprachen.

2. **Virtuelle Systemintegration:**
   Methoden und Werkzeuge für die modellbasierte virtuelle Produktintegration aus heterogenen Quellen, insbesondere mechatronischer Systeme einschließlich Metamodellierung und Fähigkeiten zur Ko-Simulationsbasierten Validierung.

3. **Modellbasierte Analyse:**
   Methoden und Werkzeuge für die formale Analyse funktionaler und nicht-funktionaler Anforderungen einschließlich modellbasierter Test- und Verifikationsverfahren sowie zur Entscheidungsunterstützung bei Design- und Fertigungsalternativen.

4. **Prozessautomatisierung:**
   Methoden und Werkzeuge zur Produktivitätssteigerung in modellbasierten Entwicklungsprozessen, insbesondere automatische Konfiguration und Synthesewerkzeuge, Methoden zur Maximierung der Wiederverwendung (Produktlinien-Entwurf, komponenten-basierte Entwurfstechniken), vor allem unter Berücksichtigung nichtfunktionaler Anforderungen. Dabei ist besonderes Gewicht auf die Plausibilisierung und Nachvollziehbarkeit von automatisierten Entwurfsschritten, wie sie durch einschlägige Standards erforderlich sind, zu legen.

5. **Prozessintegration über die Zulieferketten:**
   Transparente Integration von Prozessketten über Unternehmensgrenzen, insbesondere auch das geographisch verteilte Arbeiten mit konsistenten Modellen, dies betrifft vor allem das Anforderungsmanagement, Konfigurations- und Änderungsmanagement unter Abstützung auf modellbasierte Entwurfsprozesse, unter besonderer Berücksichtigung der in den Innovationsfeldern Life-Cycle Management und Prozessorganisation dargelegten Forschungsfragen.

6. **Reference Technology Plattform (RTP):**
   Methoden und Werkzeuge zur Sicherung der semantikgestützten Interoperabilität von heterogenen Entwurfswerkzeugen auf der Basis offener Integrationsstandards, welche insbesondere eine semantische Integration industriell genutzter Entwurfswerkzeuge für Entwurf und Entwicklung Eingebetteter Systeme erlaubt (siehe auch Abschnitt 6.4).

Diese Kernkompetenzen werden für alle Anwendungen benötigt, in denen Eingebettete Systeme in vernetzten Umgebungen miteinander interagieren. Dies ist vor allem der Fall in den Bereichen Urbanisierung, Umwelt und Energie sowie Mobilität und Gesundheit.

Die genannten Fähigkeiten erfordern Technologieinnovationen im Bereich modellbasierte Entwicklung z. B. von Referenzarchitekturen oder eine Reference Technology Plattform zur Entwicklung und Erprobung von Embedded Systems sowie in den Bereichen Autonomie/Kooperation und Kognition.

Prozessinnovationen sind hierfür vor allem in den Bereichen Requirements Engineering, Systematische Wiederverwendung, Lifecycle Management, Systemanalyse, modellbasierte Entwicklung und Prozessorganisation erforderlich.

6.2 ROADMAP

Die folgende Grafik gibt für jeden der sechs Forschungsschwerpunkte eine zeitliche Einordnung der kurz- (bis 2015), mittel- (bis 2020) und langfristig (bis 2025) zu erreichenden Qualitäten sowohl der zu entwickelnden Embedded Systems (Eigenschaften) als auch der Prozesse und Methoden (Kernkompetenzen) wieder. Diese Abbildung definiert damit den Kern der Roadmap Embedded Systems.

Insgesamt wird die deutsche Industrie in den kommenden 10 Jahren Forschungsmittel von mindestens 2,5 Mrd. € in die Erreichung dieser Ziele investieren[79]. Hiervon entfallen jeweils mehr als 500 Mio. € auf die Forschungsschwerpunkte Autonome System, Architekturprinzipien, Virtual Engineering und Verteilte Echtzeit-Situationserfassung und Lösungsfindung, und jeweils über 200 Mio. € auf die Forschungsschwerpunkte Seamless Interaction und Sichere Systeme.

6.3 FORSCHUNGSFÖRDERINSTRUMENTE

Die in Abbildung 2 dargestellten wichtigsten Forschungsförderinstrumente im Bereich Embedded Systems bilden eine ausgezeichnete Grundlage sowohl für Upstream[80]- als auch für Downstream[81]-Forschungsprojekte auf nationaler und auf europäischer Ebene. Die unterschiedlichen Schwerpunktsetzungen der einzelnen Programme erlauben dabei eine exakte Positionierung der jeweiligen Forschungsaktivitäten in Abhängigkeit von den jeweils spezifischen Zielsetzungen. Kriterien für eine Platzierung in europäischen Programmen sind dabei oft das Vorantreiben von Standardisierung, ein Knowledge Sharing und die Beschleunigung von Innovationszyklen, während Projekte zur Steigerung der lokalen Wettbewerbsfähigkeit oft eher in den nationalen Programmen platziert werden.

Die Kombination der nationalen und europäischen Förderinstrumente ermöglicht damit die Schaffung von Spitzen-Innovationen in Deutschland und die Beeinflussung dafür maßgeblicher internationaler Standards. Voraussetzung hierzu ist jedoch eine entsprechende finanzielle Ausstattung all dieser Instrumente, von der Grundlagenforschung bis hin zur produktnahen Anwendungsforschung.

6.4 WEITERE EMPFEHLUNGEN

Zur Stärkung der deutschen Führungsposition in der Beherrschung von Embedded Systems als zentraler Querschnittstechnologie stellen sich folgende Herausforderungen.

1. Innovationsblockierend, insbesondere in Bezug auf die zunehmende Konvergenz von Endgeräten, aber auch zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen etwa in den Feldern Gesundheit, Mobilität, Smart City und Sicherheit wirkt sich

79 Eigene Berechnungen auf Grundlage einer Befragung der industriellen Mitglieder der Expertenworkshops.
80 Upstream: Aus Ideen werden Erkenntnisse.
81 Downstream: Aus Erkenntnissen werden prototypische Anwendungen.

das Fehlen von offenen, branchenübergreifenden Interoperabilitätstandards aus. Nur durch Schaffung geeigneter regulatorischer Rahmen auf europäischer Ebene – in Abstimmung mit den nationalen Regelungen – können die branchenübergreifenden Innovationspotenziale der Strategielinien erschlossen werden. Solche Standards würden darüber hinaus den Markt der Anbieter von Werkzeugen und Lösungen zur Entwicklung eingebetteter Systeme, welche heute oft nur einzelne Branchen bedienen, durch signifikante Erweiterung des potentiell adressierbaren Marktes stärken. In diesem Kontext bietet sich an, entsprechende Initiativen europaweit unter dem Dach der Joint Undertaking ARTEMIS zu harmonisieren.

2. Zur Sicherung der Nachhaltigkeit der FuE-Ergebnisse wird der Aufbau weniger sogenannter Referenz-Technologie-Plattformen vorgeschlagen, die in FuE-Vorhaben geschaffene Technologie- und Prozessinnovationen von hoher branchenübergreifender Relevanz über die Laufzeit einzelner Vorhaben hinaus auf der Basis branchenübergreifender Interoperabilitätsstandards bündeln und für weiterführende FuE-Vorhaben bereitstellen.

   Sie stellen darüber hinaus ein wertvolles Instrument dar, um einer Fragmentierung des Marktes von Anbietern von Lösungen und Entwurfswerkzeugen zur Entwicklung von Eingebetteten Systemen, sowie einer Monopolstellung einzelner Anbieter entgegenzuwirken. Auch hier bietet sich von Fall zu Fall an, entsprechende Aktivitäten mit Initiativen der Joint Undertaking ARTEMIS zu koordinieren.

3. Eine weitere Herausforderung stellt die Sicherung eines ausreichenden Angebotes qualifizierter Fachkräfte dar. Es gibt nur wenige Studiengänge, die die Bandbreite der für den Bereich Eingebettete Systeme notwendigen Wissensdomänen integrieren. Darüber hinaus ist der Bereich Systems-Engineering in der klassischen Ausbildung zu wenig verankert. Hier sind verstärkt koordinierte Anstrengungen zur Sicherstellung entsprechender Ausbildungsangebote auf allen Ausbildungsebenen einschließlich der beruflichen Weiterbildung erforderlich.

4. Die im Kontext der Erstellung der Roadmap identifizierten Potentiale zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen sollten durch eine enge Zusammenarbeit zwischen Experten der Embedded Systems-Technologien und der verschiedenen Handlungsfelder (Gesundheit, Mobilität, Energie,...) zu einer auf diese Herausforderungen fokussierten, abgestimmten übergreifenden Strategie weiter verfeinert werden. Dabei sind ebenfalls Fragestellungen der Wirkungsforschung mit einzubeziehen.

7 ANHANG

7.1 MITGLIEDER DES STEUERKREISES

Dr. Reinhold Achatz/Klaus Beetz
Siemens AG
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Prof. Dr. Dr. h.c. Manfred Broy
TU München
Boltzmannstraße 3
85743 Garching

Prof. Dr. Heinrich Daembkes
EADS DE OPES
Wörthstraße 85
89077 Ulm

Prof. Dr. Werner Damm
OFFIS e.V.
Escherweg 2
26121 Oldenburg

Dr. Klaus Grimm
Daimler AG
HPC G025-BB
71059 Sindelfingen

Prof. Dr. Peter Liggesmeyer
Fraunhofer IESE
Fraunhofer Platz 1
67633 Kaiserslautern

7.2 MITGLIEDER DES EXPERTENKREISES

- Dr. Christian Allmann, Audi AG
- Ottmar Bender, EADS Deutschland GmbH
- Norbert Binzer, Astrium Gmbh
- Dr. Anselm Blocher, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI GmbH

- Prof. Dr. Jens Braband, Siemens AG
- Dr. Götz-Philip Brasche, European Microsoft Innovation Center EMIC GmbH
- Dr. Udo Bub, European Center for Information and Communication Technologies EICT GmbH
- Dr. Christian Buckl, Fortiss GmbH
- Henning Butz, Airbus Deutschland GmbH
- Volker Debus, Astrium Gmbh
- Knut Degen, BITKOM e.V.
- Dr. Bernhard Diegner, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.
- Prof. Dr. Rolf Ernst, TU Braunschweig
- Prof. Dr. Ursula Goltz, TU Braunschweig
- Dr. Thorsten Graf, Volkswagen AG
- Stephan Gurke, ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-und Elektronikindustrie e.V.
- Adrian Hanussek, Robert Bosch GmbH
- Dr. Yvo Häring, Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik
- Dr. Oliver Heid, Siemens AG
- Dr. Hans-Jürgen Herpel, Astrium Gmbh
- Prof. Dr. Gerhard Hirzinger, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR e.V.
- Knut Hufeld, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr. Stefan Jähnichen, TU Berlin
- Prof. Dr. Alois Knoll, TU München
- Dr. Ralf Köppe, KUKA Roboter GmbH
- Horst Kornemann, Continental Teves AG & Co. OHG
- Prof. Dr. Stefan Kowalewski, RWTH Aachen
- Dr. Alexander Kröner, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz DFKI GmbH
- Dr. Vera Lauer, Daimler AG
- Prof. Dr. Karsten Lemmer, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR e.V.
- Prof. Dr. Jürgen Leohold, Volkswagen AG
- Christopher Martin, Robert Bosch GmbH
- Werner Mohr, Nokia Siemens Networks
- Prof. Dr. Klaus Müller-Glaser, Universität Karlsruhe
- Heinrich Munz, KUKA Roboter GmbH
- Prof. Dr. Barbara Paech, Universität Heidelberg
- Gerd Piel, IBM Deutschland Research & Development GmbH
- Herbert Rödig, Infineon Technologies AG
- Dr. Gerd-Ulrich Spohr, Siemens AG
- Prof. Dr. Klaus Thoma, Fraunhofer Institut für Kurzzeitdynamik

- Thomas Walz, IBM Deutschland Research & Development GmbH
- Dieter Westerkamp, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- Prof. Dr. Ingo Wolff, VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

7.3 WEITERE MITWIRKENDE

- Franziska Böde, SafeTRANS e.V.
- Katja Bonhagen, SafeTRANS e.V.
- Prof. Dr. Wolfgang Nebel, OFFIS e.V.
- Jürgen Niehaus, SafeTRANS e.V.
- Reiner Schönrock, Siemens AG
- Dr. Heinrich Stuckenschneider, Siemens AG

7.4 QUELLEN

Airbus 2007
Thierry Pardessus. EICOSE – Enabling Safe Transportation through Embedded Systems. Vortrag in der niedersächsischen Landesvertretung in Brüssel anlässlich der Veranstaltung „Safety in Transportation through Embedded Systems" zur deutschen Ratspräsidentschaft, 21.06.2007.

Alter&Gesellschaft
Prof. Dr. Nehen, H. G.: Alter und Gesellschaft. Essen, 2009.

ARTEMIS MASP
ARTEMIS Multi Anual Stratigic Plan and Research Agenda 2009.

ARTEMIS RDA
ARTEMIS Strategic Research Agenda. Reference Designs and Architectures. Priority and Analysis. 2006.

ARTEMIS SCM
ARTEMIS Strategic Research Agenda. Seamless Connectivity and Middleware. Priority and Analysis. 2006.

ARTEMIS SDMT
ARTEMIS Strategic Research Agenda. System Design Methods and Tools. Priority and Analysis. 2006.

BerichtSachverständigenrates
Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen. Koordination und Integration – Gesundheitsversorgung in einer Gesellschaft des längeren Lebens – Sondergutachten 2009. Bonn, 2009.

BITKOM 2008
Studie zur Bedeutung des Sektors Embedded Systems für Deutschland. BITKOM, 2008.

BITKOM 2005
Zukunft der digitalen Wirtschaft. BITKOM, 2005.

BAfVS
Bundesamt für Verfassungsschutz/Arbeitsgemeinschaft für Sicherheit in der Wirtschaft (mündliche Berichte, 10/2009).

BASE
Mayer, K.U./Baltes P.B. (Hrsg): Die Berliner Altersstudie. Berlin: Akademie Verlag, 1996.

BMWi Bericht
BMWi (Hrsg.): Bericht des Koordinators für die Deutsche Luft- und Raumfahrt. Berlin, August 2009.

BVMed_AnnualReport08/09
Annual Report 2008/2009. BVMed. Berlin, 2009.

CATRENE PartA
Cluster for Application and Technology Research in Europe on Nanoelectrnics (CATRENE). White Book Part A: Rationale and Organisation. MEDEA Office. Paris, 2007.

CATRENE PartB
Cluster for Application and Technology Research in Europe on Nanoelectrnics (CATRENE). White Book Part B: Applications and Technologies. MEDEA Office. Paris, 2007.

Dt. Netzwerk Versorgungsforschung
Ständige Kongresskommission des Deutschen Netzwerks für Versorgungsforschung, Memorandum II zur Versorgungsforschung in Deutschland: „Konzeptionelle, methodische und strukturelle Voraussetzungen der Versorgungsforschung", 2005.

Energietechnik
Energietechnik im ZVEI: Präsentation zur Pressekonferenz Hannover Messe 2009, 21.04.2009, https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Energietechnik/Energietechnik-PK_HM_21-4-2009-Final_Druck-Folien.pdf (Zugriffsdatum 10.08.2009).

ESRIF
European Security Research & Innovation Forum. Final Report Part 1 (Draft). 2009, http://www.esrif.eu/documents/esrif_final_report_part_i.pdf (Zugriffsdatum 16.11.2009).

ESWachstum
Schreier, J.: Embedded Systems mit hervorragender Wachstumsperspektive. 2008. http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanaele/automatisierung/fertigungsautomatisierung/articles/118845/ (Zugriffsdatum: 10.08.2009).

EUROP SRA
European Robotics Technology Platform (EUROP). Robotics Vision to 2020 and beyond. The Strategic Research Agenda for Robotics in Europe. Brüssel, 2007.

EUEconomicReport
EU Economic Report. European Automobile Manufactures' Association (ACEA). 2009.

EXPERTON
Experton Group. Industry Report Handel. 2008.

Feldafinger Kreis
Feldafinger Kreis: Software-intensive eingebettete Systeme und ihre Vernetzung: Potentiale, Herausforderungen, Handlungsbedarf. 2009.

Hightech-Strategie
Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Die Hightech-Strategie für Deutschland. Berlin, 2006.

IKT2020
Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): IKT 2020. Forschung für Innovationen. Bonn, 2007.

ITEARoadmap3
ITEA Roadmap for Software-Intensive Systems and Services, 3rd edition. ITEA Office Association. Eindhoven, 2009.

ITRS2008
International Technology Roadmap Semiconductor. http://www.itrs.net (Zugriffsdatum: 10.08.2009).

JournalHypertonie
Pittrow D. et al. In: Journal für Hypertonie 7 (2003).

Mercer
Dannenberg, J./Kleinhans, C.: The Coming Age of Collaboration in the Automotive Industry. In: Mercer Management Journal 17.

SPECTARIS_Branchenbericht2009
Branchenbericht 2009 – Hightech, Innovation und Wachstum – Die optische, medizinische und mechatronische Industrie in Deutschland. SPECTARIS. Berlin, 2009.

SPES2020
Projektantrag für SPES 2020.

Statistisches BA
Statistisches Bundesamt. Unfälle und Verunglückte im Straßenverkehr. http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Statistiken/Verkehr/Verkehrsunfaelle/Tabellen/Content75/UnfaelleVerungluecke, templateId=renderPrint.psml, (Zugriffsdatum: 11.08.2009).

Statistisches BA
Statistisches Bundesamt. Bevölkerungsvorausberechnung. https://wwwec.destatis.de/csp/shop/sfg/bpm.html.cms.cBroker.cls?cmspath=struktur,n0000.csp&treeid=12400, (Zugriffsdatum: 11.08.2009).

Stifterverband
Stifterverband für die deutsche Wissenschaft. FuE Datenreport. Essen, 2009.

StraBeSEfM
Glesner, Broy, Rumpe, Paech, Wetter, Winter, Jähnichen. Strategische Bedeutung des Software Engineering für die Medizin. Fassung vom 31.12.2006.

StudyTrends
Study of Worldwide Trends and R&D Programmes in Embedded Systems in View of Maximising the Impact of a Technology Platform in the Area. FAST GmbH. TU München, 2005.

TUM 2009
Pressemitteilung der TU München. http://portal.mytum.de/pressestelle/pressemitteilungen/news_article.2009-04-22.5726756518 (Zugriffsdatum 22.10.2009).

VDE Trendreport
VDE-Trendreports. Innovationen, Märkte, Nachwuchs, 2008.

VDI 2009
VDI. Ingenieurarbeitsmarkt 2008/09 – Fachkräftelücke, Demografie und Ingenieure 50Plus, Köln, 2009.

VDI 2009b
VDI. Automation 2020 – Bedeutung und Entwicklung der Automation bis zum Jahr 2020. Düsseldorf, Juni 2009.

VDC 2008
VDC Research, 2008 Embedded Software Market Intelligence Program, Track 3: Embedded Systems Market Statistics, Volume 1: Automotive/Transportation; Volume 3: Industrial Automation; and Volume 4: Medical Devices.

VDMA 2009
VDMA. Maschinenbau in Zahl und Bild 2009. Frankfurt am Main, 2009.

VDMA 2008
VDMA Tendenzbefragung. Bedeutung der IT und Automatisierungstechnik im Maschinenbau. 2008.

VDMA 2007
VDMA. Maschinenbau in Zahl und Bild 2007. Frankfurt am Main, 2007.

Zukunft
Münchener Kreis e.V., Deutsche Telekom AG, TNS Infratest GmbH, EICT GmbH. Zukunft und Zukunftsfähigkeit der deutschen Informations- und Kommunikationstechnologie: Abschlussbericht der ersten Projektphase, Dezember 2008.

7.5 GLOSSAR

Aktoren / Aktuatoren	Aktoren (wegen des englischen Begriffs „actuator" oft auch Aktuatoren genannt) im hier verwendeten Sinne sind technische Komponenten als Bestandteil eines Eingebetteten Systems, mit denen dieses seine Umwelt beeinflussen kann. Beispiele sind elektronisch ansteuerbare Motoren, Ventile, etc.
Augmented Reality	Unter Augmented Reality (Erweiterter Realität) versteht man die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung. Diese Information kann alle menschlichen Sinnesmodalitäten ansprechen, häufig wird jedoch unter erweiterter Realität nur die visuelle Darstellung von Informationen verstanden.
CATRENE	Cluster for Application and Technology Research in Europe on NanoElectronics (www.medeaplus.org), (aktuelles Programm unter EUREKA)
CT	Computer-Tomographie
Direct Digital Control	Eine Direct Digital Control, kurz DDC, ist eine einem Computer ähnliche elektronische Baugruppe, die für Steuerungs- und Regelungsaufgaben eingesetzt wird.
E|ENOVA	Durch das BMBF im Rahmen der Hightech-Strategie geförderte Innovationsallianz Automobilelektronik (www.eenova.de)
Energy Harvesting	Als Energy Harvesting (wörtlich übersetzt Energie-Ernten) bezeichnet man die Erzeugung von Strom aus Quellen wie Umgebungstemperatur, Vibrationen oder Luftströmungen. (WIKIPEDIA)
IT	Information Technologies
ITEA 2	EUREKA-Cluster-Programm im Bereich Software-intensive Services und Systeme

IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IKT 2020	Förderprogramm für IKT des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (www.bmbf.de)
Joint Technology Initiative ARTEMIS	Die JTI ARTEMIS ist ein europäisches Public-Private-Partnership Programm zur JTI Förderung der Forschung im Bereich Eingebetteter Systeme
Joint Undertaking ARTEMIS	Das JU ARTEMIS ist die exekutive Institution zur Koordinierung und Strukturierung der Interessen der europäischen Akteure in der JTI ARTEMIS
Micro-Payment	Der Begriff Micropayment, Kleinbetrag bzw. eingedeutscht Mikrozahlung bezeichnet ein Zahlungsverfahren geringer Summen, die z.B. beim Kauf eines Brötchens oder dem Erwerb eines digitalen Musikstückes oder Zeitungsartikels anfallen würden. Nach herrschender Meinung fallen hierunter Beträge zwischen 0,01 und 5,00 €.
MRI	Magnetic Resonance Imaging, ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung der Gewebestrukturen im Körperinneren. (WIKIPEDIA)
Multimodal	Mehrere Modalitäten (z.B. visuelle Wahrnehmung, akustische Wahrnehmung, Tasten, Gestik,...) nutzend.
Open Source Software	Open Source (engl.) bzw. quelloffen ist eine Palette von Lizenzen für Software, deren Quelltext öffentlich zugänglich ist und durch die Lizenz Weiterentwicklungen fördert
RFID	Der englische Begriff Radio Frequency Identification (RFID) bedeutet im Deutschen Identifizierung mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen. RFID ermöglicht die automatische Identifizierung und Lokalisierung von Gegenständen und Lebewesen und erleichtert damit erheblich die Erfassung und Speicherung von Daten.

Robotics SRA	Strategische Forschungsagenda im Bereich Robotics
Sensoren	Sensoren im hier verwendeten Sinne sind technische Komponenten als Bestandteil eines Eingebetteten Systems, mit denen dieses seine Umwelt detektieren kann. Beispiele sind Temperatur-, Beschleunigungs- und Lichtsensoren.
SPES 2020	Durch das BMBF im Rahmen der Hightech-Strategie geförderte Innovationsallianz Software Plattform Embedded Systems

> AUTORENVERZEICHNIS

Klaus Beetz hat Mathematik, Philosophie und Informatik an der LMU in München studiert und war als Assistent am Lehrstuhl für Technische Mechanik und Konstruktionslehre beschäftigt. Danach erfolgte der Einstieg in die Industrie als Softwareexperte bei der Nemetschek AG, einem Bauplanungsunternehmen. Hier war Klaus Beetz u.a. als verantwortlicher Geschäftsführer der Technologiezentren in Bratislava, Slowakei und Sofia, Bulgarien, tätig. Seit 2002 verantwortet Klaus Beetz in der Zentraleinheit „Corporate Research and Technologies" der Siemens AG die weltweit verteilten Forschungs- und Transferaktivitäten zum Thema "System- und Software-Entwicklungsmethodik".

Prof. Dr. Dr. h.c. **Manfred Hans Bertold Broy** ist ordentlicher Professor für Informatik am Institut für Informatik der Technischen Universität München. Das Leitthema seiner Forschungsarbeiten ist die Beherrschung der Beschreibung und Entwicklung komplexer Softwaresysteme auf wissenschaftlicher Grundlage durch den Einsatz wohldurchdachter Prozesse, langlebiger flexibler Softwarearchitekturen und moderner Werkzeuge auf Basis mathematischer und logischer Methoden. Zielsetzung ist eine Fundierung und Weiterentwicklung der Methoden der Softwaretechnik mit Schwerpunkten auf Qualitätssicherung und objektorientierter Entwicklung. Im Jahr 1994 ist Professor Broy mit dem Leibniz Preis, dem höchsten Wissenschaftspreis der Bundesrepublik Deutschland, ausgezeichnet worden. Im Frühjahr 1996 wurde ihm das Bundesverdienstkreuz verliehen. 2003 erhielt Professor Broy den Doktor honoris causa durch die Fakultät für Mathematik und Informatik der Universität Passau. 2007 erhielt er die Konrad-Zuse-Medaille für besondere Verdienste um die Informatik.

Prof. Dr. **Werner Damm** ist Leiter der Abteilung Sicherheitskritische Eingebettete Systeme an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg. Den Forschungs- und Entwicklungsbereich Verkehr etablierte er am An-Institut OFFIS – Institut für Informatik – wo er ebenfalls Vorstandsmitglied ist. Des Weiteren ist er Vorstandsvorsitzender des Kompetenz-Clusters SafeTRANS – Safety in Transportation Systems - sowie Sprecher des Sonderforschungsbereichs/Transregio 14 AVACS und Direktor des Forschungszentrums Sicherheitskritische Systeme. Er ist sowohl Mitglied des Steering Boards von EICOSE (European Institute for Complex Safety Critical Systems Engineering), des Artemis Innovation Clusters on Transportation, sowie Sprecher des Steuerkreises der Nationalen Roadmap für eingebettete

Systeme. Seine aktuellen Forschungstätigkeiten in der Grundlagenforschung reichen von „mathematischen Modellen eingebetteter Systeme" über „Spezifikationssprachen und Hybride Systeme" bis hin zu „Methoden formaler Verifikation" sowie „Echtzeit- und Sicherheitsanalysen". In angewandten Forschungsprojekten liegt der Schwerpunkt auf der Optimierung von Prozessen zur Entwicklung sicherheitsrelevanter eingebetteter Systeme.

Dr. **Hieronymus Fischer** ist Leiter des "Center of Competence Systemkonzepte Automotive" der ESG Elektroniksystem- und Logistik-GmbH. Er studierte Mathematik, Elektrotechnik und Informatik und promovierte zum Dr. rer. nat. in Mathematik. Nach dem Studium war er zunächst bei der Schering AG und später bei der Dornier GmbH in den Bereichen Systemanalyse und Softwareentwicklung tätig. Weitere Tätigkeitsschwerpunkte waren Modellbildung und Systemsimulation sowie Komplexitätsmanagement. Über verschiedene Stationen in der Leitung von Softwareprojekten kam er 1998 zur ESG. Derzeit leitet er u.a. Vorentwicklungsprojekte zu eingebetteten Systemen mit den Schwerpunkten Integration und Koordination von Fahrerassistenzsystemen, Energiemanagement sowie Telematik. Ferner ist er befasst mit Fragen der multivariaten Optimierung von Systemen und Systemverbünden.

Staatssekretär Dr. **Georg Schütte**, 1962 geboren in Rheine, Studium der Journalistik an der Universität Dortmund und der City University of New York (1984-1989), Stipendiat der Deutsch-Amerikanischen Fulbright-Kommission, Master of Arts, Television and Radio, City University of New York/Diplom-Journalist (USA). Zwischen 1989 und 1994, Forschungstätigkeit im DFG-Sonderforschungsbereich 240 "Bildschirmmedien" der Universität Siegen, Visiting Fellow, Harvard University Cambridge MA/USA, Graduate School of Arts and Sciences und Joan Shorenstein Barone Center on the Press, Politics and Public Policy, Stipendiat der Studienstiftung des Deutschen Volkes, Promotion an der Universität Dortmund. Von 1993-1994 wissenschaftlicher Referent und persönlicher Referent des Generalsekretärs der Alexander von Humboldt-Stiftung, Bonn. 1995-1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Siegen; Lehraufträge an den Universitäten Siegen, Lüneburg, Mannheim und Dortmund.1998-2001 Leiter der Grundsatzabteilung der Alexander von Humboldt-Stiftung, Bonn und 2001-2003 geschäftsführender Direktor der Deutsch-Amerikanischen Fulbright-Kommission, Berlin, Mitglied der Expertengruppe "Benchmarking Human Resources", EU-Kommission, Generaldirektion Forschung, Brüssel (bis 2002). 2004-2009 Generalsekretär der Alexander von Humboldt-Stiftung, Bonn. Seit Dezember 2009 Staatssekretär im Bundesministerium für Bildung und Forschung.

> acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech vertritt die Interessen der deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu erleichtern und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um die Akzeptanz des technischen Fortschritts in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft deutlich zu machen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten aus Industrie, Wissenschaft und Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland; das Präsidium, das von den Akademiemitgliedern und vom Senat bestimmt wird, lenkt die Arbeit. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de

> acatech DISKUTIERT

Die Reihe „acatech diskutiert" dient der Dokumentation von Symposien, Workshops und weiteren Veranstaltungen der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften. Darüber hinaus werden in der Reihe auch Ergebnisse aus Projektarbeiten bei acatech veröffentlicht. Die Bände dieser Reihe liegen generell in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

BISHER SIND IN DER REIHE „acatech DISKUTIERT" FOLGENDE BÄNDE ERSCHIENEN:

Martina Ziefle/Eva-Maria Jakobs (Hrsg.): *Wege zur Technikfaszination* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009

Petra Winzer/Eckehard Schnieder/Friedrich-Wilhelm Bach (Hrsg.): *Sicherheitsforschung – Chancen und Perspektiven* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009

Thomas Schmitz-Rode (Hrsg.): *Runder Tisch Medizintechnik. Wege zur beschleunigten Zulassung und Erstattung innovativer Medizinprodukte* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Otthein Herzog/Thomas Schildhauer (Hrsg.): *Intelligente Objekte. Technische Gestaltung – Wirtschaftliche Verwertung – Gesellschaftliche Wirkung* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Thomas Bley (Hrsg.): *Biotechnologische Energieumwandlung. Gegenwärtige Situation, Chancen und Künftiger Forschungsbedarf* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Joachim Milberg (Hrsg.): *Förderung des Nachwuchses in Technik und Naturwissenschaft. Beiträge zu den zentralen Handlungsfeldern* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2009.

Norbert Gronau/Walter Eversheim (Hrsg.): *Umgang mit Wissen im interkulturellen Vergleich. Beiträge aus Forschung und Unternehmenspraxis* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Martin Grötschel/Klaus Lucas/Volker Mehrmann (Hrsg.): *Produktionsfaktor Mathematik. Wie Mathematik Technik und Wirtschaft bewegt* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2008.

Thomas Schmitz-Rode (Hrsg.): *Hot Topics der Medizintechnik. acatech Empfehlungen in der Diskussion* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Hartwig Höcker (Hrsg.): *Werkstoffe als Motor für Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Friedemann Mattern (Hrsg.): *Wie arbeiten die Suchmaschinen von morgen? Informationstechnische, politische und ökonomische Perspektiven* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2008.

Klaus Kornwachs (Hrsg.): *Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Hans Kurt Tönshoff/Jürgen Gausemeier (Hrsg.): *Migration von Wertschöpfung. Zur Zukunft von Produktion und Entwicklung in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Andreas Pfingsten/Franz Rammig (Hrsg.): *Informatik bewegt! Informationstechnik in Verkehr und Logistik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2007.

Bernd Hillemeier (Hrsg.): *Die Zukunft der Energieversorgung in Deutschland. Herausforderungen und Perspektiven für eine neue deutsche Energiepolitik* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Wachstum durch technologische Innovationen. Beiträge aus Wissenschaft und Wirtschaft* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2006.

Günter Spur (Hrsg.): *Auf dem Weg in die Gesundheitsgesellschaft. Ansätze für innovative Gesundheitstechnologien* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

Günter Pritschow (Hrsg.): *Projektarbeiten in der Ingenieurausbildung. Sammlung beispielgebender Projektarbeiten an Technischen Universitäten in Deutschland* (acatech diskutiert), Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2005.

Cyber-Physical Systems adressieren das Zusammenwachsen softwareintensiver eingebetteter Systeme mit den globalen digitalen Netzen. Sie ermöglichen neuartige industrielle Anwendungen mit hohem wirtschaftlichen Potenzial. Beispiele sind etwa selbststeuernde Logistiksysteme, integrierte Systeme zur Verkehrssteuerung oder intelligente Stromnetze (Smart Grids). Im Milliardenmarkt der eingebetteten Systeme hat Deutschland bislang eine starke Position. Das hohe Innovationspotenzial der Cyber-Physical Systems bringt große wirtschaftliche, technische und wissenschaftliche Herausforderungen. Der wachsende Umfang eingebetteter Software und ihre zunehmende Vernetzung erfordert jedoch zwingend einen Paradigmenwechsel im Entwicklungsprozess, der in der nächsten Generation der Cyber-Physical Systems zum Verlust der guten Position Deutschlands führen könnte. Aus diesem Grund zeigt acatech, die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, gemeinsam mit Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik Möglichkeiten und Strategien auf, wie Deutschland den Generationswechsel von eingebetteten Systemen zu Cyber-Physical Systems meistern kann.

ISBN 978-3-642-14498-1

9 783642 144981

springer.de