

# CYBER PHYSICAL SYSTEMS POTENZIAL UND KOMPETENZEN IN NRW

## NORDRHEIN-WESTFALEN AUF DEM WEG ZUM DIGITALEN INDUSTRIELAND

# IKT.NRW

## SCHRIFTENREIHE

Die Studie "**Cyber Physical Systems – Potenzial und Kompetenzen in NRW**" erörtert die technisch-wissenschaftlichen Hintergründe von Cyber Physical Systems (CPS) insbesondere aus der Perspektive der Software und zeigt die Chancen der CPS-Entwicklung für Nordrhein-Westfalen auf.

### **Autoren**

Matthias Book

Volker Gruhn

Markus Kleffmann

paluno – The Ruhr Institute for Software Technology

University of Duisburg-Essen

Gerlingstraße 16, 45127 Essen, Germany

<http://paluno.uni-due.de>

### **Hintergrund**

Diese Studie ist Teil der IKT.NRW Schriftenreihe "NRW auf dem Weg zum digitalen Industrieland". Die Beiträge der Schriftenreihe ergänzen die unter dem gleichnamigen Titel erschienene IKT.NRW Roadmap 2020 – entweder aus der Perspektive einer IKT-Basistechnologie oder einer der NRW-Schlüsselbranchen.

### **Herausgeber**

Clustermanagement IKT.NRW

V. i. S. d. P. Monika Gatzke

c/o SiKoM – Institut für Systemforschung der Informations-,  
Kommunikations- und Medientechnologie

Bergische Universität Wuppertal

Rainer-Gruenter-Str. 21

42119 Wuppertal

Wuppertal, November 2013

# INHALT

01	Begriffsbildung: <b>Cyber Physical Systems</b>	4
	Entwicklungsgeschichte	6
	Heutiger Standard	8
02	Technologie: <b>CPS als software-intensive Systeme</b>	9
	Verwandte Konzepte	10
	Systemcharakteristika	12
	Entwicklungsprozesse	18
03	Branchentrends: <b>Potenzial von CPS</b>	20
	Gesundheitswesen	21
	Energieversorgung	24
	Produktion	26
	Logistik und Verkehr	28
04	Portraits: <b>CPS-Leuchttürme in NRW</b>	30
	RWTH Aachen	32
	Universität Duisburg-Essen	36
	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund	40
	Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn	44
05	Forschungslandschaft: <b>Projekte mit CPS-Bezug in NRW</b>	48
	Gesundheitswesen	49
	Energieversorgung	52
	Produktion	55
	Logistik und Verkehr	57
06	Fazit und Ausblick	59
	Software und CPS	
	<b>Innovationspotenzial für NRW</b>	62
	Literaturverzeichnis	65

# 01

## BEGRIFFSBILDUNG: CYBER PHYSICAL SYSTEMS

Cyber Physical Systems (CPS) – die enge Verknüpfung digitaler Systeme und Modelle mit Gegenständen und Abläufen der realen Welt über geeignete Sensoren, Aktoren, Prozessoren und Software-Komponenten – haben das Potenzial, die Art und Weise, wie wir technische Systeme konstruieren, und wie wir in vielen Domänen mit der Umwelt interagieren, tiefgreifend zu verändern [1].

Auf dem Weg dorthin ist jedoch vielfältige, interdisziplinäre und innovative Forschung erforderlich, die Informations- und Kommunikationstechnik mit verschiedensten Technologie- und Anwendungsdomänen verbindet. In dieser Studie zeigen wir auf,

welche insb. informationstechnischen Konzepte CPS zugrunde liegen, welche Möglichkeiten diese für verschiedene Branchen bieten, und welche Aktivitäten auf diesen Gebieten in Nordrhein-Westfalen bereits laufen, um eine Bestandsaufnahme für den künftigen koordinierten Ausbau und die effektive Vernetzung und Förderung des CPS-Innovationspotenzials in NRW zu liefern.

# ENTWICKLUNGSGESCHICHTE

Die Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) ist seit ihren Anfängen geprägt von drei übergreifenden Trends, ohne die viele der Innovationen, die im Laufe der Zeit entstanden sind, undenkbar gewesen wären. Dies sind die immer stärkere Dezentralisierung von Hardware, die immer breitere Verfügbarkeit von Kommunikationsnetzen, und die immer tiefere Domänendurchdringung der Software.

Auf Seiten der **Hardware** entwickelten sich aus einzelnen Großrechner-Anlagen immer leistungsfähigere dezentral nutzbare Geräte – zunächst in Form von „Dumb Terminals“, die noch kaum eigene Logik verarbeiteten, bis hin zu vollwertigen Desktop-Rechnern, auf denen beliebige Anwendungen installiert werden konnten. Mit dem Aufkommen von Laptops war erstmals *Mobile Computing* [2, 3, 4, 5] möglich – zunächst i.W. noch als „digitale Aktenmappe“, auf die i.d.R. offline zugegriffen wurde. Der parallele Ausbau der mobilen Kommunikationstechnologien ermöglichte sodann auch ein mobiles Online-Arbeiten. Spätestens mit dem Aufkommen von Smartphones, Tablets etc. wurde dieser Schritt vom Mobile zum *Ubiquitous Computing* [6, 7, 8, 9, 10] – zum überall und jederzeit verfügbaren Zugriff auf alle Anwendungen der Wahl – für breite Anwendergruppen Realität. Neben diesen vor allem im Anwender-Bereich sichtbaren Technologie-Innovationen führten die Skaleneffekte in der Hardware-Produktion für den Back-End-Bereich zu einer zuvor nahezu undenkbaren Kommoditisierung: Rechenkapazität steht dank *Cloud Computing* [11, 12, 13, 14, 15] heute in praktisch beliebig skalierbarer Menge für jede Anwendung zur Verfügung.

Parallel vollzog sich eine ähnliche Entwicklung hin zur Ubiquität im Bereich der eingebetteten Systeme [16, 17, 18]: Kontinuierliche Fortschritte in der Miniaturisierung bei gleichzeitiger Effizienzsteigerung machten den Bau immer kleinerer Speicher- und Steuerkomponenten möglich, die nach und nach in Geräte aller Art Einzug hielten. Nach heutigem Technologiestand kann praktisch jeder physische Gegenstand mit einem Speicher- oder gar Prozessorchip versehen werden. Noch ist die Mehrzahl dieser Systeme weitgehend geschlossen und verrichtet fest vorgegebene Aufgaben in vorgegebenen Kontexten, aber es ist offensichtlich,

dass eine Öffnung und Vernetzung ganz neuartige Interaktionen und Einsatzfunktionen erschließen wird.

Die Öffnung und Verknüpfung dieser Hardware-Komponenten wurde ermöglicht durch einen intensiven Ausbau der **Kommunikationsnetze**: Ausgehend von den leitungsvermittelten Verbindungen der Vergangenheit sind die wesentlichen Innovationen hier die Entwicklung der drahtlosen Kommunikationsnetze, dank derer heute praktisch jeder Ort der Zivilisation erreichbar ist, sowie die paketvermittelte Kommunikation, die eine effiziente Übertragung verschiedenster Medien (Informationen, Sprache, Bewegtbilder – heute alles in digitalisierter Form) in einem beliebig komplexen, dezentral organisierten und weiterhin rasant wachsenden globalen Netz überhaupt erst ermöglicht.

Die Entwicklung auf Seiten der **Software** stützt sich auf die vorgenannten Innovationen: Die Dezentralisierung und Kommoditisierung von Rechenkapazität führte zum Schwenk von branchenspezifischen Mainframe-Anwendungen hin zu All-Purpose-Geschäftsanwendungen auf Desktops, zu hochspezialisierten, i.W. im Unsichtbaren arbeitenden Steuerfunktionen in eingebetteten Systemen, und jüngst zu einem ganzen Universum von jeweils nur auf wenige Features fokussierten Apps für Mobilgeräte wie Smartphones und Tablets.

# HEUTIGER STANDARD

Die genannten Entwicklungen führen dazu, dass IKT längst nicht mehr nur ein versatiles Problemlösungswerkzeug ist, sondern im Sinne des *Pervasive Computing* [19, 20, 21, 22] untrennbar mit nahezu allen Bereichen des geschäftlichen, gesellschaftlichen und privaten Lebens verwoben ist. Jede der Leitinnovationen in Hardware, Netzen und Software ermöglicht mehr Automation, weiter reichende Kommunikation und umfassendere Informationszugänglichkeit und –verarbeitbarkeit. Dies zieht umfassende Umstrukturierungen von Geschäftsprozessen und –bereichen nach sich, ermöglicht neue Geschäftsmodelle und macht alte obsolet. Produktion und Konsum von Gütern, Dienstleistungen und Medien aller Art sind heute ohne digitale Dienste kaum noch denkbar.

In **Cyber Physical Systems (CPS)** [44] setzt sich diese Entwicklung konsequent fort: Die Möglichkeit, nahezu beliebige physische Güter und Geräte mit einer digitalen Identität, einer digitalen Sensorik oder gar einer digitalen Steuerungseinheit zu versehen, und sie mit digitalen Diensten und Informationssystemen zu vernetzen, stellt einen Paradigmenwechsel dar. Bislang besteht in vielen Anwendungsdomänen ein Bruch zwischen den Abläufen in der Realwelt und ihrer digitalen Repräsentation in Informationssystemen, der durch aufwändige und fehleranfällige Mensch-Maschine-Schnittstellen überbrückt werden muss. CPS schließen diese Lücke, indem sie physische Gegenstände und Abläufe unmittelbar in digitale Prozesse integrieren. Dies steigert nicht nur die Effizienz existierender Prozesse sowie die Korrektheit und Aktualität der darin verarbeiteten Daten, sondern eröffnet ganz neue Möglichkeiten, die physische Welt mit digitalen Mechanismen zu erschließen – z. B. zur Erkennung von Mustern (wie Optimierungspotenzialen oder Fehlersituationen) in für menschliche Beobachter zu komplexen Abläufen; zur Dezentralisierung von Steuerungsaufgaben und dem Zulassen emergenter, selbstorganisierender Abläufe (vergleichbar z. B. mit dem Datenrouting im Internet); zur flexiblen digitalen Kopplung von physischen Prozessen, zwischen denen vorher keine gemeinsame Schnittstelle existierte (z. B. der autonomen Auswahl des am besten geeigneten Dienstleisters für die Verarbeitung eines physischen Gutes); etc.

## 02 TECHNOLOGIE: CPS ALS SOFTWARE-INTENSIVE SYSTEME

Cyber Physical Systems sind keine grundlegend neue Technologiekategorie, sondern ein Oberbegriff für Anwendungen, die mit einem Mix aus einer Reihe von Technologien eine engere Kopplung von physischer und digitaler Welt erreichen. Diese Technologien entstammen sowohl der jeweiligen Anwendungsdomäne (z. B. entsprechende Sensoren und Aktoren) als auch der IKT (z. B. Software-Komponenten und Kommunikationsprotokolle). Wir konzentrieren uns hier v.a. auf die Software-Seite; einen Eindruck von den branchenspezifischen Aspekten gibt Abschnitt 3.

# VERWANDTE KONZEPTE

Zu den prominentesten Konzepten, die mit dem CPS-Begriff verwandt sind, zählt die Vision des **Future Internet** [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29] – einem v. a. in der europäischen Forschungspolitik geläufigen Oberbegriff für das Internet der Dienste, das Internet der Dinge und das Internet der Daten, der ebenfalls die Vision einer pervasiven Vernetzung von digitalen und realen Artefakten beschreibt, dessen Fokus jedoch eher auf den erforderlichen digitalen Infrastrukturen liegt, während CPS-Projekte typischerweise auf sehr konkrete Branchen und Anwendungsszenarien bezogen sind.

## INTERNET DER DIENSTE

Das **Internet der Dienste** (Internet of Services, IoS) [30, 31, 32, 33] umschreibt dabei die Vision eines globalen Ökosystems von digitalen Diensten (Services), d.h. Software-Komponenten, die auf klar abgegrenzte Funktionen spezialisiert sind. Diese Services sollen flexibel kombinierbar sein (bzw. sich in fortgeschrittenen Ansätzen selbständig geeignet kombinieren), um komplexere Funktionen zu realisieren. Sie helfen damit v.a., schwerfällige, monolithische Systeme aufzubrechen und in flexibler handhabbare Einheiten zu unterteilen, deren Implementierung nach technischen, fachlichen oder wirtschaftlichen Kriterien ausgetauscht (sog. Service-Orchestrierung) oder rearrangiert (sog. Service-Choreographie) werden kann. Eine solche dienstbasierte Systemlandschaft ist bei der Realisierung von CPS v.a. hilfreich, wenn die Teilkomponenten des CPS einen hohen Grad von Autonomie besitzen sollen, oder wenn eine Integration mit Diensten bzw. Prozessen Dritter gewünscht ist.

## INTERNET DER DINGE

Als **Internet der Dinge** (Internet of Things, IoT) [34, 35, 36, 37, 38] werden hingegen Infrastrukturen bezeichnet, die mit CPS den Anspruch der Integration digitaler und physischer Welt teilen. Sie umfassen per Chip eindeutig identifizierbare physische Artefakte, sowie in Haushaltsgeräten, Industrieanlagen und der Umgebung verbaute ubiquitäre Sensoren, Prozessoren und Aktoren, die ihre Werte per IoS-Dienst liefern bzw. ihre Funktion per IoS-Dienst zur Verfügung stellen. Die Vision des Internet der Dinge als global vernetztem System ist differenzierter zu betrachten als beim

3Internet der Dienste, da ein Dienst per Definition einen Angebotscharakter hat, während Gegenstände oder Anlagenteile i.d.R. eng an die Zwecke eines bestimmten Eigentümers gebunden sind. Beiden Ansätzen ist gemein, dass die Interoperabilität in einem solchen Ökosystem geeignete Mechanismen zur Beschreibung und Identifikation der Semantik von Diensten und Dingen (d.h. ihrer Natur, Eigenschaften und Funktionen) erfordert, wobei der Umfänglichkeit der beschreibbaren Konzepte und der Kompatibilität zwischen den Beschreibungssprachen für verschiedene Domänen jedoch in der Praxis Grenzen gesetzt sind.

## INTERNET DER DATEN

Eng verbunden mit IoS und IoT ist die Vision des **Internet der Daten** (Internet of Content, IoC) [39, 40], das die Zugänglichkeit und Verknüpfbarkeit verschiedenster Datenquellen über Service-Infrastrukturen beschreibt. Typischerweise wird dabei insb. von Daten ausgegangen, die sich aufgrund ihrer schier Masse oder ihrer fehlenden Struktur klassischen Abfragemechanismen entziehen und neue Verarbeitungstechniken erfordern, die auch unter dem Stichwort **Big Data** diskutiert werden. Beispiele sind Sensor-Datenströme, aber auch im Geschäftsverkehr anfallende unstrukturierte Daten (Korrespondenz, Berichte, Regulatorien etc.) sowie Multimedia-Daten und nutzergenerierte Inhalte (User-Generated Content), wie sie v.a. in sozialen Netzen anfallen. Auch hier ist eine semantische Klassifizierbarkeit der Daten bzw. der sie bereitstellenden und verarbeitenden Dienste der Schlüssel zu einem offenen Ökosystem.

Allen drei Begriffen – IoS, IoT und IoC – ist gemein, dass sie im Gegensatz zum klassischen Internet (E-Mail, Web, VoIP etc.) keine konkret existente Infrastruktur, ja nicht einmal einen konkret definierten Technologie-Stack beschreiben, sondern vielmehr als (nicht trennscharfe) Sammelbegriffe für die beschriebenen Anwendungsvisionen zu verstehen sind. Insofern ist „Cyber Physical Systems“ der treffendere, insb. IoS und IoT subsumierende Begriff für die Klasse der Systeme, die eine Brücke zwischen digitaler und physischer Welt schlagen.

# SYSTEMCHARAKTERISTIKA

Neben ihrer Brückenfunktion zwischen digitaler und physischer Welt sind CPS aus IKT-Sicht geprägt von einer Reihe von Charakteristika, die ihre Entwicklung zu einer besonderen Herausforderung machen. Einzelne dieser Charakteristika finden sich z. T. auch in anderen Arten von Systemen, kommen in CPS jedoch verschärfend zusammen:

## MOBILITÄT

**Mobilität** ist einer der softwaretechnischen Megatrends – Anwendungen und Systemkomponenten werden nicht länger nur an vordefinierten Orten eingesetzt, an denen eine bekannte Netzinfrastruktur zur Verfügung steht, sondern werden stark zunehmend auf mobilen Geräten ausgeführt. Auf den ersten Blick sollte Software (insb. auf Anwendungsebene) i.d.R. davon abstrahieren können, ob sie auf einem fixierten oder einem mobilen Gerät ausgeführt wird, und ob das Gerät gerade stationär oder in Bewegung ist, denn für viele Abläufe in Informationssystemen sind Bewegung und Position der Ausführungsplattform nicht relevant. Softwaretechnisch interessant wird Bewegung jedoch dann, wenn (1) die Bewegungs- bzw. Positionsinformation fachlich relevant ist, z. B. zu Ortungs- und/oder Navigationszwecken, und/oder (2) wenn die Bewegung relativ zu den Knotenpunkten eines Funknetzes erfolgt und somit Einfluss auf die Verbindungsqualität bzw. –verfügbarkeit haben kann.

Auch wenn die Handovers zwischen Funkzellen und zwischen Netzen (z. B. GPRS, 3G, LTE, WLAN) i.W. von den technischen Software-Schichten gekapselt werden sollten, können dort entstehende Qualitätssprünge für die Anwendungsschicht relevant werden, um z. B. eine „Graceful Degradation“, d.h. ein robustes, kontrolliertes Zurückfahren der Anwendungsfunktionalität im Falle reduzierter oder fehlender Netzwerkverbindung, zu erreichen. Eine solide Graceful Degradation erschöpft sich dabei nicht nur in der Anzeige einer Fehlermeldung, sondern z. B. in der Zwischenspeicherung noch nicht übertragener Daten und ihrer späteren Synchronisierung mit server-seitigen Systemen, wenn wieder eine ausreichende Verbindung hergestellt ist.

Mobilität hat somit nicht nur aus fachlicher Sicht einen Einfluss auf Geschäftsprozesse, wenn sie z. B. dem Außendienst die

Abwicklung von Geschäftsvorfällen vor Ort ermöglicht, statt auf den entfernten Innendienst zurückgreifen zu müssen. Auch die technischen Eigenschaften von Mobilität haben unter Robustheitsaspekten wesentliche Auswirkungen auf die Definition und Adaption mobilisierter Geschäftsprozesse.

Eine weitere signifikante Auswirkung hat Mobilität auf die Benutzerinteraktion mit Systemen: Mobile Endgeräte stellen aufgrund ihrer Größe und innovativen Eingabemodalitäten wie Multi-Touch-Displays und (noch rudimentärer) Spracherkennung völlig andere Usability-Anforderungen an Benutzerschnittstellen, als es klassische Desktop-Geräte tun. Zu beachten ist ferner, dass mobile Geräte i.d.R. nicht in den kontrollierten, optimierten Umgebungsverhältnissen eines Schreibtischarbeitsplatzes genutzt werden, sondern meist in ohnehin reizüberfluteten, schwer vorhersehbaren Umgebungen, und dass sie häufiger beiläufig im Rahmen anderer Aktivitäten oder in Leerlaufzeiten genutzt werden als ein dediziert als Werkzeug im Fokus stehender Desktop-PC. Entsprechend intuitiv und effektiv müssen mobile Benutzerschnittstellen gestaltet sein, um den Anwender zum einen möglichst effizient bei seiner mobilen Arbeit zu unterstützen, und ihn andererseits in seiner Bewegung nicht so sehr abzulenken, dass er und andere in körperliche Gefahr geraten.

Nahezu alle CPS haben mobile Teilkomponenten, für die diese Anforderungen in besonderem Maße gelten – seien es bewegliche Transportsysteme in der Logistik oder mobile Apps zur Steuerung des häuslichen Energieverbrauchs im Smart Grid. Die Realwelt-Durchdringung der CPS stellt höchste Anforderungen an Effektivität, Sicherheit und Verlässlichkeit der Komponenten selbst unter widrigen Umgebungsbedingungen, da Fehler nicht auf digitale Systeme beschränkt bleiben, wo sie womöglich noch reversibel wären, sondern direkt auf die physische Welt durchschlagen, in der ein „Undo“ u. U. nicht mehr möglich ist.

## **FLEXIBILITÄT**

Ein weiteres Charakteristikum von CPS ist ihre erwartete **Flexibilität**, d.h. die Fähigkeit, in wandelbaren Prozessen zu agieren und mit austauschbaren Komponenten und Drittdiensten interagieren zu können:

In klassischen, geschlossenen Software-Systemen sind Komponenten typischerweise miteinander bekannt und „fest verdrahtet“, da die Systemlandschaft, in die sie eingebettet sind, und die Prozesslandschaft, die sie unterstützen sollen, bekannt und vergleichsweise statisch sind. Änderungen und Anpassungen sind

in solchen Architekturen i.d.R. nur durch manuelle Eingriffe der Entwickler in die Implementierung selbst möglich.

Angesichts der hohen Veränderungsgeschwindigkeit von Prozesskonstellationen und –teilnehmern in der Geschäftswelt stellen sich solche Architekturen heute aber zunehmend als zu starr heraus. Die notwendige Flexibilität bieten demgegenüber offene Architekturen, in denen die Systemfunktionalität aus dem Zusammenspiel möglichst unabhängiger Komponenten bzw. Dienste mit klar definierten, spezialisierten Schnittstellen und Aufgabenbereichen erwächst. Service-basierte Architekturen bieten eine solche Flexibilität, die sowohl eine fließende Skalierung von teilnehmenden Komponenten (z. B. Fahrzeugen in einer Flotte) als auch eine Veränderung von Abläufen (z. B. bei Auslagerung eines Prozessabschnitts an einen Dienstleister) oder einen Austausch von Komponenten (z. B. bei Wechsel eines Dienstleisters) erlaubt.

Für CPS, die per Definition viel enger mit der Realwelt synchronisiert sind als klassische Software-Systeme, ist diese Flexibilität essenziell, um Veränderungen in den Abläufen der physischen Welt ohne langwierigen und teuren Anpassungsaufwand abbilden zu können.

## AUTONOMITÄT

Verwandt mit dem Aspekt der Flexibilität, aber noch über ihn hinausgehend, ist das Charakteristikum der **(Teil-)autonomität**. Auch ein flexibel adaptierbares System benötigt i. d. R. noch Eingriffe von außen, um an neue Bedingungen angepasst zu werden (z. B. durch Hinzufügung, Austausch oder Umorganisation von Komponenten). Sein Effizienzvorteil ggü. einem monolithischen System liegt darin, dass diese Flexibilitätsanforderung bereits von Grund auf in der Architektur und den Schnittstellen des Systems berücksichtigt ist, sodass spätere Änderungsnotwendigkeiten von den Entwicklern über dafür vorgesehene Mechanismen bedient werden können, ohne die Integrität des Gesamtsystems durch tiefgreifende Umbauten gefährden zu müssen.

Teilautonome Systeme heben diese Flexibilität auf eine höhere Stufe, indem sie automatische Anpassungsmechanismen nutzen, die keine manuellen Entwicklerentscheidungen und –eingriffe mehr erfordern. Ihr Anspruch ist es, die Notwendigkeit von Veränderungen des Systems (z. B. Einbindung oder Ausschluss von Komponenten, Wechsel verfügbarer Drittdiensten etc.) automatisch zu erkennen, und diese Veränderungen automatisch umzusetzen, ohne dass Anwender oder Betreiber eingreifen

müssen – Stichworte dafür sind z. B. Self-Healing und Self-Adapting Systems [41, 42, 43].

Für CPS ist eine solche Autonomie insofern besonders wichtig, als sich Gegebenheiten der physischen Welt u. U. schneller ändern können und somit eine schnellere Reaktion erfordern, als menschliche Betreiber komplexer Systeme erfassen und umsetzen können.

Die automatische Erkennung von Adaptionenotwendigkeiten, die Entwicklung von dafür passenden Adaptionstrategien, und die möglichst transparente, minimal-disruptive Ausführung dieser Adaptionen erfordert, dass ein teilautonomes System ein umfassendes „Verständnis“ seiner selbst und seiner Umgebung (d. h. seines Kontextes) haben muss, um diese sonst von Entwicklern übernommenen Aufgaben auszuführen.

## KONTEXTSENSITIVITÄT

Dies macht die **Kontextsensitivität** zu einem weiteren wichtigen Charakteristikum von CPS. Die Herausforderung ist dabei zum einen, den gegebenen Systemkontext zu erfassen, und zum anderen, ihn so zu interpretieren, dass daraus Entscheidungen abgeleitet werden können.

Die Erfassung des Systemkontextes mag auf den ersten Blick ein rein technisches, durch geeignete Sensorik lösbares Problem zu sein: Für praktisch alle physischen Kennwerte, die für eine Komponente bzw. einen Prozessschritt relevant sein könnten, existieren heute geeignete Sensoren, die Parameter von der Temperatur über die Position bis hin zu Vitaldaten, Atmosphärenzusammensetzung oder Strahlenexposition messen und digital bereitstellen können. Je nach Einsatzgebiet kann es sinnvoll sein, auf die Messwerte einzelner Sensoren zu reagieren, oder die Messungen einer großen Zahl von Sensoren über sog. Sensornetze zu sammeln, zu akkumulieren, und daraus abstraktere Kennzahlen abzuleiten (z. B. zur Messung von Verkehrsdichte und –fluss auf Basis der Bewegungsdaten einer Vielzahl von Fahrzeugen).

In vielen Fällen reichen physische Messwerte jedoch nicht aus, um den Systemkontext zu beschreiben – stattdessen bestimmen fachliche Parameter (z. B. der Preis einer Ware oder eines Dienstes, die Zahl von Anfragen an ein System, die Bearbeitungs-geschwindigkeit eines Prozesses, die Wichtigkeit eines Kunden, regulatorische Bedingungen etc.) den Kontext, in dem ein System als Ganzes agiert bzw. eine bestimmte Transaktion ausführt. Die Erfassung solcher Parameter erfordert z.T. „virtuelle Sensoren“, d. h. Monitoring-Algorithmen, die als Querschnittsaspekte in viele Fachkomponenten integriert werden müssen, z. T. aber auch die

Interpretation und Abstraktion von Beobachtungen aus einer Reihe von Einzelquellen.

Die Daten-Interpretation, und insb. die darauf aufbauende automatische Entscheidung über Adaptionstrategien, erfordert ein präzises semantisches „Wissen“ (bzw. tatsächlich: ein entsprechend feingranulares Regelwerk), um die Kontextinformationen einzuordnen und mit passenden Adaptionsansätzen zu verknüpfen (z. B. die Zuschaltung von Kapazitäten bei steigender Antwortzeit, die Auswahl des günstigsten Dienstes für eine Aufgabe, das Umschalten von Echtzeit- auf gepufferte Datenverarbeitung beim Ausfall einer Netzverbindung, etc.). Die entsprechenden Regeln müssen sorgfältig formuliert, kalibriert und getestet werden, um sicherzustellen, dass sich das System auch bei eigenständiger Anpassung immer zielführend und innerhalb erlaubter Grenzen verhält, keine unerwünschten Zustände annimmt und sich nicht in sog. Deadlocks selbst blockiert.

Gerade bei teilautonomen, kontextsensitiven CPS, deren Entscheidungen unmittelbare Auswirkungen auf physische Abläufe haben, ist zu beachten, dass der Nichtdeterminismus der Umwelt zu einer deutlich schwierigeren Vorhersagbarkeit der an sich deterministisch formulierten Systemreaktionen führt, sodass ihre Handhabbarkeit und Risiken gegen die gewonnene Effizienz abzuwägen sind.

## SOFTWARE-LEITSTÄNDE

In CPS, die zwar flexibel an wandelbare Kontextsituationen anpassbar sein sollen, für die eine autonome Lösung jedoch nicht gewünscht ist (sei es, weil die zu berücksichtigenden Abhängigkeiten zu komplex sind, weil der Kontrollverlust nicht verantwortbar ist, oder weil nicht quantifizierbare oder nicht algorithmisierbare Aspekte entscheidungsbestimmend sind), kann es hilfreich sein, sog. **Software-Leitstände** zu realisieren, über die das Zusammenspiel der System- und Drittdienste überwacht und gesteuert werden kann.

Insbesondere in der Steuerung komplexer Anlagen, wo Leitstände ohnehin existieren, bietet sich die Übertragung des Konzepts auf den Bereich der digitalen Dienste an, aber auch in stark prozess- und wissens-orientierten Domänen, wie z. B. in der Logistik, wo technische, wirtschaftliche und erfahrungsbestimmte Parameter (z. B. das Wissen um das Staurisiko auf bestimmten Strecken in bestimmten Zeiträumen, oder die Priorisierung von Fahrten nach Ladungskritikalität oder Kunden-Status) zwar schnelle Umsteuerungen von Systemkomponenten erfordern, die jedoch keiner Automatik überlassen werden können.

Ein Leitstand kann hier dabei helfen, den aktuellen Zustand eines komplexen CPS zu visualisieren, Problempunkte hervorzuheben oder auf Basis gelernter Muster sogar zu einem gewissen Grad vorherzusagen, Handlungsnotwendigkeiten aufzuzeigen und ggf. Handlungsvorschläge zu machen, über deren endgültige Auswahl letztlich jedoch erfahrene Prozesssteuerer unter Zuhilfenahme sowohl der Systemhilfen als auch ihres Erfahrungsschatzes entscheiden.

# ENTWICKLUNGSPROZESSE

Wie die vorangegangenen Abschnitte zeigen, sind CPS software-intensive Systeme, deren Architektur und Funktionalität deutlich komplexer und stärker mit den Anwendungsdomänen verwoben ist als die klassischer Software-Systeme. Dies spiegelt sich auch in ihren Entwicklungsprozessen wieder:

Das Verständnis der Anwendungsdomäne, das schon bei klassischen Informationssystemen kritisch für den Projekterfolg und die Systemqualität ist, ist für CPS noch einmal von zentralerer Bedeutung. Im Gegensatz zur klassischen Softwareentwicklung, in der die Fachseite häufig nur die Rolle des Auftraggebers für die IT-Seite einnimmt, und daher oft nur sporadisch in Entwicklungs- und Entscheidungsprozesse eingebunden wird, erfordert die Entwicklung von CPS eine kontinuierliche Zusammenarbeit mit den Fach- und Technologieexperten der Anwendungsdomäne, die nicht nur als Auftraggeber, sondern als Ingenieure für die physischen Komponenten im Entwicklungsteam gleiche Verantwortung tragen. Diese Interdisziplinarität, in der die Anwendungsdomäne nicht nur bestimmend für die Anforderungen, sondern auch für die Realisierungstechnologien ist, ist charakteristisch für CPS.

Auch bezüglich des verfolgten Software-Entwicklungsparadigmas empfiehlt sich für CPS eine leicht verschobene Schwerpunktsetzung gegenüber klassischen Software-Systemen: In letzteren ist ein hoher Grad von Abstimmungsnotwendigkeit zwischen Fach- und Technologieseite ein starkes Kriterium für die Wahl eines agilen Prozessmodells, das die intensive Kommunikation zwischen beiden Seiten sichert und zu frühen Prototypen führt, detaillierte Modelle und Spezifikationen jedoch in den Hintergrund stellt.

In der Entwicklung von CPS-Systemen ist eine intensive Abstimmung und die frühe Verfügbarkeit von Prototypen zum Test des Zusammenspiels aller Komponenten, zur Prüfung ihres Verhaltens unter außergewöhnlichen Bedingungen, und insb. zur Kalibrierung von Automatismen in teilautonomen Systemen ebenfalls von großer Bedeutung. Wie im Bereich der eingebetteten Systeme üblich, spielt jedoch auch die präzise Modellierung des Verhaltens einzelner Komponenten (gerade derjenigen, die die Schnittstelle zwischen physischer und digitaler Welt darstellen), sowie der Rahmenbedingungen und Entscheidungsmechanismen

(insb. z. B. in den Regelwerken teilautonomer Systeme) eine wichtige Rolle. Für diese Aspekte empfiehlt sich weiterhin eine detaillierte, u.U. sogar formal verifizierbare Spezifikation, um die Sicherheit und Verlässlichkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

Die Herausforderung ist hier die Verknüpfung beider Entwicklungsansätze, und die Herstellung sowohl des Gesamt- als auch des Detailverständnisses der Eigenschaften des Systems, das in seiner Struktur und seinem Verhalten deutlich offener und flexibler konzipiert ist als klassische Software-Systeme. Nur mit einem solchen Verständnis sind Software- und Domänenexperten in der Lage, effiziente und sichere CPS in einem wirtschaftlichen Projektrahmen realisieren.

---

## 03 BRANCHENTRENDS: **POTENZIAL VON CPS**

Nach der vorangegangenen Diskussion der softwaretechnischen Charakteristika von CPS beschreiben wir im Folgenden branchenspezifische Herausforderungen, zu deren Adressierung sich CPS anbieten. In den nachfolgenden Kapiteln geben wir sodann einen Überblick über Initiativen, die in NRW in diesen Themenfeldern bereits laufen.

# GESUNDHEITSWESEN

Im Gesundheitswesen können CPS dazu beitragen, zu einer effizienteren Verarbeitung der Vielzahl von Vital- und Diagnosedaten beizutragen, die im Rahmen von Gesundheitsvorsorge und Therapie sowohl im klinischen als auch im häuslichen Umfeld anfallen. Viele dieser Daten werden bereits durch technische Sensoren erfasst (z. B. Blutdruck, Insulinspiegel, Herzrhythmus etc.), bei der Protokollierung, Übermittlung und Weiterverarbeitung kommt es jedoch oft zu Medienbrüchen und somit zu Verzögerungen und Fehlerquellen – insbesondere, wenn die Erfassung durch mehrere Personen (verschiedene Ärzte, Pflegekräfte, Angehörige oder den Patienten selbst) räumlich und zeitlich verteilt erfolgt, jedoch gebündelt ausgewertet werden muss.

Je nach Art der zu messenden Werte kann die Datenerfassung noch einen manuellen Bedienschnitt erfordern (z. B. Blutzuckermessung) oder durch tragbare bzw. implantierbare Sensoren (z. B. EKG) jederzeit möglich sein. Die automatische digitale Erfassung der Daten ermöglicht hier eine effektivere Überwachung kritischer Parameter, sowohl hinsichtlich der erreichbaren Datenqualität als auch hinsichtlich der möglichen Reaktionsgeschwindigkeit: Erinnerungsfunktionen im Sensorgerät können z. B. dafür sorgen, dass manuelle Messungen nicht vergessen werden oder zu unregelmäßigen Zeiten erfolgen; autonome Sensoren können zudem z. B. die Messfrequenz erhöhen, wenn ungewöhnliche Muster entdeckt werden, oder bei besonders kritischen Werten unmittelbar Versorgungskräfte benachrichtigen. CPS versprechen so sowohl die Diagnose- und Therapiequalität als auch den Patientenkomfort zu steigern.

Zur einer Steigerung des Patientenkomforts können insb. CPS beitragen, die es erlauben, einen Teil üblicherweise ambulant erfolgender Beobachtung und Versorgung von der Arztpraxis in das häusliche Umfeld zu verlegen, den Patienten in seiner Wohnung bei Tätigkeiten zu unterstützen, die für ihn selbst zu beschwerlich wären, oder den Eintritt von Notfallsituationen zu überwachen, während der Patient ein weitgehend unabhängiges Leben führt. In diesen Einsatzbereichen ist die Grenze zwischen medizinischer Versorgung und Heimautomation oft fließend: Unter dem Begriff Ambient Assisted Living (AAL) werden viele CPS-basierte Lösungen vereint, die gerade älteren oder behinderten Menschen einen

höheren Grad an persönlicher Freiheit erlauben, als ihre körperlichen oder geistigen Einschränkungen sonst zulassen würden.

Hierzu gehören Dienstleistungen, Systeme und Prozesse, die sich möglichst nahtlos in das tägliche Leben insbesondere älterer und körperlich benachteiligter Menschen integrieren und diese unterstützen (umgebungsunterstütztes Leben). Dieser Oberbegriff umfasst sowohl Systeme zur Verbesserung der Lebensqualität (Lifestyle-Produkte) als auch Techniken, um Senioren ein selbstständigeres Leben im eigenen Zuhause zu ermöglichen. Eng damit verbunden ist häufig der Begriff e-Health, welcher jedoch insbesondere auf die technikgestützte medizinische Versorgung abzielt.

Die dabei eingesetzten Technologien können sowohl passiven als auch aktiven Charakter haben: Bewegungsmelder werden z. B. bereits passiv eingesetzt, um Einbrüche zu erkennen oder Lichtquellen bedarfsgerecht zu schalten, sie können aber bei geeigneter Vernetzung mit IT-Systemen aber auch Bewegungsmuster von Patienten erstellen und bei Abweichungen Angehörige oder Pflegekräfte benachrichtigen, denen sie direkt die erforderlichen Daten zur Beurteilung der Situation übermitteln. Denkbar sind ebenso Systeme, die Patienten an regelmäßige Medikationen erinnern, den Bestand an Medikamenten und Verbrauchsmitteln überwachen und rechtzeitig automatische Nachbestellungen anstoßen.

Neben dem klinischen und häuslichen Einsatz eröffnen CPS auch vielfältige Möglichkeiten der mobilen und insb. Fern-Versorgung von Patienten. Denkbar sind z. B. Alarmierungssysteme, die Notfallsituationen erkennen (sei es aufgrund gemessener Vitalzustände wie Hypothermie oder physikalischer Effekte wie für Stürze charakteristischen Beschleunigungen) und Rettungskräfte benachrichtigen sowie zum Unglücksort leiten können. Ebenso sind Assistenzsysteme denkbar, die dem Patienten oder anwesenden Laien im Notfall Anweisungen zur Behandlung akuter Beschwerden geben können, wobei sie nicht nur grundsätzliche Handgriffe erläutern (z. B. Herzmassage), sondern auch die individuelle Vorgeschichte des Patienten (z. B. Medikation mit Gerinnungshemmern) und aktuelle Vitalmesswerte (z. B. Herzrhythmus) in die Instruktionen einbeziehen können. Diese Daten können auch genutzt werden, um in telemedizinischen CPS einem Arzt die Möglichkeit zu geben, aus der Ferne die Situation eines Patienten zu analysieren, anwesenden Laien Anweisungen zu geben oder über das CPS-System direkt notwendige

Therapiemaßnahmen anzustoßen (z. B. Medikation, Stimulation etc.).

Die Erfassung und Verarbeitung von Gesundheitsdaten in CPS und erst recht die Fernsteuerung von medizinischen Komponenten muss offensichtlich unter Berücksichtigung strikter Datenschutz- und Datensicherheitsvorgaben erfolgen. Gleichzeitig können CPS aber auch das Risiko von Datenschutzverletzungen reduzieren, da die erfassten Daten nicht mehr in physischer Form durch viele Hände gehen müssen, sondern geschützt erfasst und übertragen werden und nur durch autorisierte Stellen zugreifbar und verarbeitbar sind. Dies ist insb. wichtig, wo sich Verantwortungsbereiche mit verschiedenen Datenfreigaben unterscheiden: Mit CPS ausgestattete technische Hilfsmittel wie Rollstühle, Schrittmacher oder Reha-Geräte können z. B. sowohl Daten protokollieren, die für die medizinische Therapie erforderlich sind, als auch solche, die für die Wartung des Geräts benötigt werden. Bei digitaler Datenerfassung und -verarbeitung kann so sichergestellt werden, dass der Wartungstechniker z. B. nur auf die verschleißrelevanten Nutzungsdaten Zugriff hat, nicht aber auf therapierelevante Details.

# ENERGIEVERSORGUNG

Unsere Energie-Infrastruktur ist derzeit einem grundlegenden Wandel unterworfen. Nachdem sie über Jahrzehnte geprägt war durch große Kraftwerke, die elektrische Energie für eine Vielzahl privater und industrieller Verbraucher zur Verfügung stellten, vollzieht sich im Zuge der Energiewende eine Verschiebung hin zu einer Vielzahl kleiner Stromerzeuger, die von großen Windfarmen über einzelne Windräder bis auf die Ebene privat betriebener Photovoltaikanlagen und Blockheizkraftwerke reichen. Ebenso zeichnet sich ab, dass sich im Zuge der fortschreitenden Entwicklung der Elektromobilität das bislang bekannte Verbrauchsprofil durch viele Tausende Elektrofahrzeuge signifikant verschieben wird – nicht nur aufgrund ihres zusätzlichen Energieverbrauchs, sondern auch, weil sie mit ihren Batterien eine ganz neue Klasse von Energiespeichern in die Versorgungsnetze einführen.

An der Vernetzung all dieser Energiequellen, Energieverbraucher und Energiespeicher mit CPS führt betriebswirtschaftlich wie auch physikalisch kein Weg vorbei: Da im Versorgungsnetz selbst kein Strom speicherbar ist, muss zur Sicherung der Netzstabilität jederzeit gewährleistet sein, dass eingespeiste und verbrauchte Energie sich genau die Waage halten. Dies erfordert komplexe Mechanismen zum Management der einzelnen Energiequellen, sowie koordinierte Strategien zur Speicherung überschüssiger Energie und ihrem späteren bedarfsgerechten Wiederabruf. Durch die informationstechnische Vernetzung dieser physikalischen Komponenten entsteht so mit dem sog. Smart Grid ein komplexes CPS, das die enge Verzahnung digitaler und realer Welt und die resultierenden hohen Verlässlichkeitsanforderungen an diese Systeme beispielhaft illustriert.

Die digitale Vernetzung von Energieerzeugern, -speichern und -verbrauchern ermöglicht ferner feingranulare Abrechnungsmodelle für den Energiemarkt der Zukunft, in dem einhergehend mit der Dezentralisierung der Infrastruktur die Rollen von Versorgern und Verbrauchern zunehmend verwischen werden. In einem Elektrizitätsnetz, in dem Haushalte wie Unternehmen überschüssige Energie einspeichern können, Verbünde mehrerer Kleinerzeuger zu virtuellen Kraftwerken gekoppelt werden, oder gar die landesweite Flotte von perspektivisch Millionen

Elektrofahrzeugen als dezentraler Energiespeicher nutzbar gemacht wird, dürfte sich ein agiler Markt für Energie entwickeln, der es für Verbraucher interessant macht, ihren Energiekonsum nicht nur bewusster zu kontrollieren, sondern auch zu steuern. Erste entsprechende Geräte erscheinen derzeit auf dem Markt und dürften in Zukunft breiten Einsatz und – mit entsprechendem Netzausbau – noch vielfältigere Anwendungsmöglichkeiten finden.

# PRODUKTION

Auf den ersten Blick scheinen industrielle Fertigungsanlagen keine primär geeignete Anwendungsdomäne für CPS zu sein – die in Abschnitt 2.2 genannten Charakteristika wie Flexibilität, Kontextsensitivität und Autonomie scheinen dem tayloristischen Prinzip zu widersprechen, den optimalen Fertigungsprozess für ein Produkt zu identifizieren und diesen sodann für eine präzise Wiederholbarkeit möglichst weitgehend zu automatisieren.

Für viele Produkte werden die Kern-Fertigungsabläufe tatsächlich vergleichsweise „fest verdrahtet“ sein. In einer zunehmend globalisierten Fertigungskette kontrollieren jedoch die wenigsten Unternehmen ihre Produktion von den Rohstoffen bis zur Kundenauslieferung selbst. Stattdessen sind sie angewiesen auf ein Netzwerk von Lieferanten für Halbzeuge, Bauteile, Funktionsmodule etc., die möglichst unmittelbar die zur Produktion benötigten Komponenten liefern. Handelt es sich beim hergestellten Produkt seinerseits ebenfalls um eine Komponente, die nicht für den Endkundenmarkt, sondern für die Integration in andere Produkte bestimmt ist, so ist der Hersteller selbst Teil einer größeren Lieferkette (Supply Chain). Auch wenn die Koordination solcher Ketten vorrangig als betriebswirtschaftlich/logistische und weniger als technische Aufgabe erscheint, so ist gerade in komplexen Just-In-Time-Produktionsabläufen die Unterstützung des Supply Chain Management durch Informationen hilfreich, die unmittelbar in den Produktionsschritten gewonnen werden (Echtzeit-Inventarisierung von gelagerten und verbauten Komponenten, Ausschuss etc.).

Für Erzeugnisse, die in Produktlinien mit großer Variantenvielfalt produziert werden (z. B. Automobile, IT-Systeme, Einbaumöbel etc.), ist eine deutlich größere Flexibilität bereits im Fertigungsprozess inhärent. Je nach gewünschter Ausführung des Produkts sind Fertigungsschritte anzupassen, auszulassen, einzuschieben etc. Die Nutzung von CPS im Fertigungsprozess verspricht, den in der IT-Welt verfolgten Ansatz der flexiblen Choreographie und Instrumentierung von Diensten (d.h. die Anordnung von Prozessschritten und die Vergabe der Ausführungsverantwortung für die Schritte) auf die physische Ebene zu übertragen, indem die Fertigungsschritte in

Anlagenmodulen gekapselt werden, die sich je nach Auftragseingang flexibel rekombinieren und parametrisieren lassen.

Einsatzgebiete für CPS eröffnen sich auch im Markt für industriell gefertigte Einzelstücke (in Unternehmen wie z. B. Foto-Druckdiensten, die vom Endkunden bereitgestellte Bilder auf nahezu beliebige Gegenstände wie Poster, T-Shirts, Tassen etc. bringen) – hier finden wir eine Mischung aus im Unternehmen vorhandenen Produktionsanlagen, die sich für die individuellen Einzelstücke konfigurieren lassen, und einer Auslagerung bestimmter Aufträgen an Spezialanbieter, die zusätzliche Produkttypen abdecken. CPS können hier helfen, den gesamten Prozess vom digitalen Auftragseingang über die maschinelle Fertigung des Einzelstücks bis zum Versand trotz der Individualität des Produkts möglichst aufwands- und ressourcensparend zu realisieren.

Für Unternehmen bieten CPS in der Produktion somit ein Flexibilisierungspotenzial, das ihnen durch gesteigerte Individualisierbarkeit und Kooperationsfähigkeit neue Märkte eröffnet, die anderenfalls nur mit deutlich höherem Investitionsaufwand und Ressourcenverbrauch erschließbar wären. Für den Kunden entstehen so attraktivere Produkte, deren Fertigungsfortschritt er u.U. sogar in Echtzeit verfolgen kann.

# LOGISTIK UND VERKEHR

Neben den im vorangegangenen Abschnitt genannten logistischen Anwendungsbereichen im Supply Chain Management bieten CPS auch vielfältiges Potenzial für die Optimierung des Gütertransports sowie des Verkehrs im Allgemeinen.

Im Transportverkehr können CPS nicht nur helfen, Güter zu identifizieren und zu verfolgen (Tracking), wie heute bereits über Barcodes und/oder RFID-Chips praktiziert. Die Ausstattung von Gütern mit aktiven Sensoren ermöglicht zudem, Umgebungsparameter, denen die Waren unterwegs ausgesetzt sind, zu erfassen, um z. B. Rahmenbedingungen wie die Einhaltung der Kühlkette beim Lebensmitteltransport zu überwachen. Dabei ist sowohl denkbar, die Messwerte nach Abschluss des Transports als Protokoll bereitzustellen, als auch im Falle von Abweichungen in Echtzeit den Disponenten und/oder Kunden zu benachrichtigen, um geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Die CPS-basierte Verknüpfung von physischen Messdaten über Güter-Position und Zustand mit digitalen Plandaten über Fahrzeugdisposition und Streckenführung kann dann genutzt werden, um z. B. in Ausnahme- oder Havariesituationen schnelle Abhilfe zu schaffen, indem ersatzweise freie Transportressourcen aus der Nähe angefordert werden.

Darüber hinaus können CPS zu einer effizienteren, sichereren und umweltschonenderen Abwicklung von Güter- und Transportverkehr über die Verkehrsmittel hinweg beitragen. Denkbare Anwendungen finden sich dabei sowohl im Großen (Navigation) wie im Kleinen (Fahrassistenz):

Auf der Abstraktionsebene grundsätzlicher Mobilitätsanforderungen (Transport von A über B nach C) können CPS dabei helfen, ein multimodales Verkehrsnetz für den einzelnen Teilnehmer optimal zu erschließen und für den Betreiber optimal auszulasten. Durch Sensoren in der Infrastruktur sowie in den einzelnen Fahrzeugen entsteht in Echtzeit ein komplexes, dynamisches Bild der Verkehrssituation, das genutzt werden kann, um Verkehrsflüsse zu steuern, -entwicklungen zu prognostizieren und -anomalien zu beheben. Individuelle Verkehrsteilnehmer können diese Informationen nutzen, um unter Einbeziehung einer Vielzahl von Modalitätsalternativen (z. B. Auto, Bus, Bahn) Routen errechnen zu lassen, die vordefinierte zeitliche, wirtschaftliche und

ökologische Kriterien möglichst ideal erfüllen, sich aber flexibel an veränderliche Verkehrssituationen (z. B. Staus, Verspätungen) anpassen. Umgekehrt lassen sich die eingehenden Anfragedaten durch Verkehrsleitsysteme nutzen, um Vorhersagen über künftig besonders ausgelastete Strecken und Verkehrsmittel zu treffen und dort rechtzeitig die Bereitstellung höherer Kapazitäten (z. B. zusätzliche Waggon) anzustoßen.

Auf der Abstraktionsebene des individuellen, insb. in den fließenden Straßenverkehr eingebetteten Fahrzeugs, bieten CPS jenseits der Navigation vielfältige Assistenzmöglichkeiten für ein sichereres und komfortableres Fahren. Dazu zählt z. B. der kontinuierliche Austausch mit den Sensoren der umgebenden Fahrzeuge, um z. B. plötzliche Bremsungen im Vorausverkehr frühestmöglich zu erkennen, als auch der Austausch mit aktiven und passiven Komponenten in der Infrastruktur, um z. B. über Geschwindigkeitsbegrenzungen, Spursperrungen etc. rechtzeitig informiert zu sein. Diese Informationen lassen sich zum einen nutzen, um den Fahrer zu unterstützen und ihn auf Gefahren aufmerksam zu machen, zum anderen aber auch, um das Fahrzeug praktisch völlig autonom zu steuern. Im Idealfall erfolgt diese autonome Steuerung nicht nur auf das individuelle Fahrzeug beschränkt, sondern im automatischen Zusammenschluss mehrere Fahrzeuge zu Konvois, die die Straßenkapazität deutlich effizienter nutzen und durch koordiniertes, automatisch vorausschauendes Fahren ihren Energiebedarf optimieren können.

## 04 PORTRAITS: CPS-LEUCHTTÜRME IN NRW

Nach der allgemeinen Betrachtung CPS-affiner Branchen stellen wir in diesem Abschnitt Forschungsstandorte vor, die bereits stark auf Themenfeldern mit CPS-Bezug engagiert sind – sei es in Projekten, die CPS direkt zum Thema haben; in Anwendungsfeldern, die künftig wesentlich durch CPS geprägt sein werden; oder in Technologiefeldern, die die Realisierung künftiger CPS überhaupt erst ermöglichen.

Die von Vertretern der jeweiligen Forschungseinrichtungen portraitierten Standorte Aachen, Duisburg, Dortmund und Paderborn bilden einen räumlichen und thematischen Querschnitt

durch NRW und zeigen an konkreten Beispielen, dass sowohl die für CPS notwendige Technologiekompetenz als auch das für effektive Lösungen essenzielle Anwendungswissen in NRW bereits auf breiter Basis und vor allem eng verwoben vorhanden sind.

## VON STEFAN KOWALEWSKI UND BERNHARD RUMPE

CPS stellen aus Sicht der RWTH Aachen eine der großen Herausforderungen unserer Zeit dar. Obwohl die Begriffsbildung noch keineswegs abgeschlossen ist und – aufgrund der Frische der Thematik – auch nicht sein kann, kristallisieren sich einige wesentliche Charakteristika heraus:

- CPS integrieren physische Komponenten, die typischerweise durch traditionelle Ingenieure (Maschinenbau, Bauingenieure und Elektrotechnik) erstellt werden, mit komplexer, durch Software organisierte Steuerung und Vernetzung.
- CPS bilden zumeist eine informatorische, gegebenenfalls auch synchron gesteuerte Vernetzung einzelner Systeme in ein hochkomplexes, heterogenes, immer autonomer agierendes, gegebenenfalls weltumspannendes Ganzes, das nicht als Einheit entwickelt werden kann, aber als Einheit agieren muss.

CPS haben daher zwei grundsätzliche Herausforderungen zu meistern:

- Die integrierte Behandlung von physikalischen und Software-Teilkomponenten erfordert eine Integration der bisher einzeln stehenden Theorien der Differenzial-/Integralrechnung (u.a. Regelungstechnik) und der Digitalen Theorie, die auf Varianten von Automaten basiert. Diese Integration ist essentiell, aber schwierig und bisher nur in Ansätzen sichtbar.
- Die Beherrschung der Komplexität von CPS der kommenden Generationen: Gerade die Beherrschung der nachhaltigen Entwicklung, Absicherung und Evolution solcher Systeme bedarf völlig neuer Entwicklungsmethoden und -techniken, die derzeit noch nicht ansatzweise vorhanden sind. Die Komplexität entsteht im Wesentlichen aus vier Gründen:
  - Komplexität der Vernetzung
  - immens ansteigende Verfügbarkeit von Sensordaten
  - steigende Autonomie und Adaptivität der Komponenten im heterogenen Umfeld

- Sicherheitsanforderungen (Security wie Safety)

Diese Herausforderungen sind in vielen der Anwendungsbereiche von CPS wieder zu finden, aber es ist abzusehen, dass aufgrund jeweils unterschiedlicher Ausprägung der Herausforderungen sowie unterschiedlicher Zustände derzeitiger Systemlandschaften die Lösungen domänenspezifisch auszuprägen sind und nur begrenzt übergreifende, generische Lösungen möglich sein werden.

An der RWTH Aachen mit ihren ausgeprägten Schwerpunkten in Softwaretechnik, Kommunikationstechnik, Mobilität, Fahrzeugtechnik, Produktionstechnik und Medizintechnik sind CPS ein zentrales Forschungsthema, das sich auch im Rahmen der in der Exzellenzinitiative gegründeten Profildomänen wiederfindet. Alle technologischen Teilaspekte und relevanten Anwendungsdomänen sind an der RWTH vertreten und haben intensiv begonnen, in interdisziplinären, auch durch die Exzellenzinitiative geförderten Strukturen die Integration ihres Wissens zur Entwicklung von CPS zusammen zu bringen. Dies geschieht sowohl in anwendungsorientierten als auch grundlegenden Forschungsprojekten. Die folgende Liste kann nur einen kleinen Ausschnitt aller Aktivitäten präsentieren.

- In die aktuelle Initiative „Industrie 4.0“ der Forschungsunion bringt die RWTH ihre Expertise im Bereich Produktionstechnik und Wirtschaftsinformatik ein (Klocke, Brecher, WZL; Jarke, Informatik und Fraunhofer FIT). Eine wesentliche Plattform für die Forschung auf dem Gebiet der IT-vernetzten Produktion ist der Exzellenzcluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“.
- Vernetzte Mobilität, ein wesentlicher Bestandteil von CPS, wird an der RWTH in zahlreichen Projekten untersucht. Neben den Aktivitäten im Bereich e-Mobility sind hier vor allem die deutschlandweit einzigartigen Testanlagen automotiveGATE in Aldenhoven und railGATE in Wildenrath zu nennen, die neben den Galileo-Anwendungen auch die Erprobung von komplexen Verkehrssituationen mit vernetzten Fahrzeugen ermöglichen. Eine interdisziplinäre Arbeitsgruppe entwickelt derzeit und produziert demnächst ein Elektrofahrzeug in mehreren Varianten im unteren Preissegment, das unter anderem über Zugang zu modernen Internet-Services verfügen wird.
- Optimierung in der Erzeugung, Übertragung und Nutzung von Energie ist in Projekten wie Wattalyst, SmartWatts und Energy Navigator der Forschungsfokus. Hier wird das intelligente Management und Monitoring von einzelnen Gebäuden und ganzen Stadtteilen zur Steigerung der Energieeffizienz ebenso

behandelt, wie die gesteuerte Anbindung an das Smart Grid (DeDonker, Monti, Müller, Rumpe).

- Die Automatisierungstechnik wird ein wesentlicher Methodenlieferant und Anwender von bzw. für CPS sein. Entsprechende Aktivitäten werden in Aachen in einem Zusammenschluss von Lehrstühlen aus vier Fakultäten vorangetrieben und durch den interdisziplinären Studiengang „Automatisierungstechnik“ unterstützt (Abel, Epple, Kowalewski, Leonhardt). Diese Aktivitäten sind eng mit dem VDI/VDE und seiner Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik vernetzt, in der Prof. Kowalewski einen Fachausschuss zum Thema CPS in der Automatisierungstechnik leitet.
- Medizintechnik ist für CPS ein relevantes Feld z. B. in Form von Assistenzsystemen im Bereich „Personal Health Care“ oder als Unterstützungssysteme auf der Intensivstation oder im OP-Saal. Entsprechende eHealth-Ansätze im Sinne von CPS werden an der RWTH im Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik beforscht (Leonhardt, Radermacher).
- Kommunikations- und informatische Grundlagenforschung für CPS wird in Aachen im Exzellenzcluster „Ultra High Speed Mobile Information and Communication“ (UMIC) durchgeführt. In enger Zusammenarbeit von Informatik und Elektrotechnik/Informationstechnik sind neue Technologien, Architekturen und Softwareansätze entstanden, die die schnelle und flexible Kommunikation und Anwendungsausführung in vernetzten, mobilen und adaptiven Systemen unterstützen (Ascheid, Heinen, Kobbelt, Kowalewski, Leupers, Mähönen, Mathar, Vary, Wehrle).
- Zu den essentiellen Grundlagen von CPS gehören Hybride Automaten und verteilte, echtzeitfähige Architekturmodelle als theoretische Fundierung, die in der Fachgruppe Informatik intensiv beforscht werden (DFG-Graduiertenschule AlgoSyn; Abraham, Katoen, Kowalewski, Rumpe, Thomas).

In allen genannten Bereichen stellt die Frage der softwaretechnischen Unterstützung von Adaptivität, Flexibilität, Integrität und Robustheit der entstehenden Systeme eine besondere Herausforderung dar. Sie erfordert eine über einzelne Anwendungsgebiete hinaus reichende, interdisziplinäre Betrachtung und muss von den methodisch orientierten, anwendungsneutralen Disziplinen wie Informatik und Automatisierungstechnik federführend geleistet werden. Die in diesem Sinne integrierende Weiterentwicklung der CPS-Idee, unter Einbezug der relevanten Anwendungsdomänen und Industrien,

stellt den natürlichen nächsten Schritt in der CPS-Forschung an der RWTH dar und bedarf der gezielten Förderung in Verbundprojekten.

Wichtig dabei ist, dass diese Gelder über die Kernbereiche der CPS-Forschung und nicht über die Anwendungsfelder definiert werden, weil sich so mehr Synergieeffekte bis hin zur Standardisierung zwischen den Domänen erreichen lassen. Die (angewandten Teile der) Informatik und die Regelungstechnik sind von je her interdisziplinär aufgestellt und kooperationsfreundlich, also hervorragend geeignet für die Weiterentwicklung von CPS-Theorie, -Methodik und -Werkzeugen.

## VON PEDRO JOSÉ MARRÓN

An der Universität Duisburg-Essen beschäftigt sich die Networked Embedded Systems Group seit über sechs Jahren mit der Frage der effizienten Vernetzung, der Adaption von Systemsoftware sowie skalierbaren Kommunikationsstrukturen für Sensornetze, eingebettete Systeme und CPS sowie das Internet der Dinge. Die rund 18 Mitarbeiter der Forschungsgruppe haben sich nicht nur mit konkreten Forschungsfragen wie effizienteren Algorithmen und Datenstrukturen für relevante Szenarien befasst, sondern auch sehr stark daran gearbeitet, eine internationale Community zu etablieren, die sich mit den vielfältigen Themen im CPS-Umfeld beschäftigt.

Zu diesem Zweck wurde das „Cooperating Objects Network of Excellence (CONET)“ als Teil des FP7-Rahmenprogramms bei der Europäischen Kommission beantragt und nach positiver Begutachtung 2008 ins Leben gerufen. Heute zählt CONET mit 16 Hauptpartnern und 25 assoziierten Mitglieder zu einem der europäischen Leuchttürme für den Bereich Cooperating Objects / CPS und wird von der Europäischen Kommission tatkräftig unterstützt. Neben den wissenschaftlichen Ergebnissen, die im Rahmen von interdisziplinären Research Clusters erreicht wurden, zählen zu den Hauptergebnissen von CONET die Erarbeitung und Weiterführung einer Forschungs-Roadmap für Cooperating Objects, die gemeinsam mit Industrieunternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten erstellt wurde, sowie die Einrichtung eines European Center for Ubiquitous Technologies and Smart Cities (UBICITEC), das die Zusammenarbeit der CONET-Partner nach Ende des Projekts in einem formalen Rahmen ermöglicht und die Arbeit der Community verstetigt.

Angesichts der Resonanz und Relevanz des Themas wurde vom Springer-Verlag eine Buchreihe zum Thema Cooperating Objects und Internet of Things ins Leben gerufen. Aufgrund der Herausgeberschaft dieser Reihe und der erfolgreichen Koordination der europäischen Projektaktivitäten wurde Prof. Marrón 2011 als Experte in die Gruppe „Internet of Things“ eingeladen, um für das Europäische Parlament eine Reihe von Whitepapers als

Entscheidungsgrundlage für neue Policies und Empfehlungen an die Mitgliedstaaten zu erstellen.

Des Weiteren werden im Rahmen des PLANET-Projekts Forschungsaktivitäten wie der Entwurf und die Entwicklung einer Plattform für die effiziente Zusammenarbeit von unbemannten fliegenden Systemen und Sensornetzen erarbeitet. Die Szenarien und Anwendungsfelder von PLANET erfordern die Zusammenarbeit von Biologen, Informatikern und Ingenieuren, die dank der von der Universität Duisburg-Essen integrierten Plattform heterogene Systeme als Einheit bedienen können. In einem dieser Szenarien wird ein Test-Flughafen mit Sensoren instrumentiert und völlig autonom betrieben. Dabei werden auch Experimente zu Safety und Security durchgeführt, um Lösungen zu implementieren, die einen autonomen Flughafen auch bei Fehlern sicher und zuverlässig arbeiten lassen. Bei dem Projekt sind neben Biologen, die sich für großflächiges Environmental Monitoring interessieren, große Firmen wie Boeing und SELEX Galileo beteiligt, die innovative Lösungen für zuverlässige autonome Systeme gemeinsam mit anderen europäischen Forschern untersuchen.

Im Rahmen des GAMBAS-Projekts entwickeln Partner aus dem europäischen Ausland gemeinsame Lösungen für skalierbare Systemsoftware und Anwendungen, die sich in das Leben des Bürgers einer zukünftigen Smart City nahtlos integrieren lassen. Im Rahmen von konkreten Anwendungsfeldern werden u.a. bestehende öffentliche Verkehrssysteme wie das Busnetz in Madrid weiterentwickelt und neue verteilte und mobile Dienste installiert, die den Benutzern erlauben, neue Arten von persönlicher Mobilität zu erleben. Aus der Zusammenführung und Analyse der Daten werden neue Business-Modelle und Szenarien geschaffen, die von den einzelnen Benutzern auf anonyme und sichere Weise in die Infrastruktur der Smart City eingebracht werden. Dies erlaubt den Firmen, bessere Dienste anzubieten, die an die Benutzer der Systeme angepasst sind.

Schließlich ist auch der Bereich Ambient Assisted Living ein Schwerpunkt der Networked Embedded System Group. Zwei Projekte namens Living++ und WebDA, die von der EU und dem BMBF finanziert werden, beschäftigen sich mit der wichtigen Frage der Bereitstellung von Diensten und integrierten Lösungen, die älteren Menschen und/oder Patienten mit leichter Demenz erlauben, länger zu Hause zu bleiben, bevor sie in Betreuungseinrichtungen untergebracht werden. Die Universität Duisburg-Essen bietet dafür zwei Arten von Lösungen: Zum einen die präzise Ortung von einzelnen Gegenständen wie Geldbeutel oder Schlüssel, sowie von Personen innerhalb eines Raums; zum

anderen die effiziente Erkennung von verschiedenen Arten von Aktivitäten, die einem Betreuer Informationen über die Mobilität, Lage und/oder Bedürfnisse der Patienten liefert.

Alle genannten Projekte haben mehrere gemeinsame Eigenschaften, die charakteristisch für die Entwicklung und Integration von CPS in der Praxis sind:

- Sie benötigen interdisziplinäre Arbeit, die eine Forschungsgruppe oder eine einzelne Firma nicht allein bewältigen kann.
- Die erarbeiteten Lösungen müssen sich in das Leben der Nutzer integrieren lassen, ohne dass der Benutzer sie aktiv installieren oder konfigurieren muss.
- Die erarbeiteten Lösungen müssen flexibel, skalierbar und sicher sein, damit sie großflächig installiert werden können, ohne dass unnötige Kosten produziert werden.
- Die Lösungen ermöglichen die Errichtung neuer Geschäftsmodelle, die in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen werden.

Diese Eigenschaften sind besonders zu beachten, weil die zukünftige Erforschung und industrielle Anwendung von CPS immer komplizierter werden und daher stärker experimentell geprägte Anteile haben wird. Dabei werden nicht-funktionale Parameter von besonderer Bedeutung sein, so dass zu erwarten ist, dass neue Lösungen Faktoren wie Skalierbarkeit, Mobilität, Sicherheit u.a. explizit berücksichtigen müssen. Da fast alle CPS-relevanten Fragen von interdisziplinärer Natur sind, können sie nur wirklich erarbeitet werden, wenn die richtigen Kompetenzen vorhanden sind. Um diese Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen zu ermöglichen und zu vereinfachen, sind Institutionen wie das in Duisburg verankerte European Center for Ubiquitous Technologies and Smart Cities (UBICITEC) besonders wichtig und bis heute für das Thema Cyber Physical Systems einmalig in Europa (Abbildung 1). Bei UBCITEC haben Forschungs- und Industrie-Mitglieder die Möglichkeit, gemeinsame Projekte zu beantragen und durchzuführen, die zu der zentralen Forschungsfrage des Zentrums beitragen: „Wie sieht das Betriebssystem einer Smart City aus, und welche Dienste müssen von einer Smart City angeboten werden?“

UBICITEC weist eine Matrix-Struktur auf, bei der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der einzelnen Mitglieder (sog. Thematic Areas) mit Anwendungsgebieten (sog. Application Areas) zusammengeführt werden. Jede Thematic Area wird von einem international anerkannten Experten auf dem Gebiet geleitet, der den Überblick über die Forschungsaktivitäten und Industrie-

Anforderungen hält und aktiv dazu beiträgt, Forschungs- und Implementierungs-Roadmaps aktuell zu halten. Beispiele für Thematic Areas sind Sensornetze, Mobile Technologien, Robotik, Cloud Computing, Data Mining etc. Bei den Application Areas handelt es sich um eine ähnliche Struktur, die in der Regel von Industrieunternehmen in Zusammenarbeit mit Pilot Sites geleitet werden. Die Application Areas geben der Forschung einen Rahmen, in den Lösungen eingebettet werden können, und ermöglichen das Erproben der Forschungsaktivitäten in realen Pilot-Projekten. Beispiele für Application Areas sind Ambient Assisted Living, Smart Grid, Smart Airports, eHealth, Smart Traffic Management Systems etc.



Abbildung 1: UBICITEC-Partnerstruktur

# FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR MATERIALFLUSS UND LOGISTIK IML, DORTMUND

VON ANDREAS KAMAGAEW  
UND MICHAEL TEN HOMPEL

Cyber Physical Systems durchdringen immer stärker die Produktion und die Logistik. Durch die vierte industrielle Revolution – Industrie 4.0 – werden die physischen Welten des Materialflusses mit dem virtuellen Informationsfluss verknüpft. Bereits seit den 90er Jahren erforscht das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik in Dortmund die Thematik der AutoID-Technologien, die als Enabler für das Internet der Dinge in der Intralogistik dienen. CPS als Konsequenz des Internet der Dinge verbunden mit dem Internet der Dienste in der Intralogistik wird am Fraunhofer IML in verschiedenen nachfolgend erläuterten Projekten umgesetzt:

Intelligente und energieautarke Behälter, die sogenannten inBins (Abbildung 2), verknüpfen den physischen Materialfluss mit dem virtuellen Informationsfluss schon auf Stückerbene. Das Fraunhofer IML realisiert aktuell intelligente Behälter in der Größe von Luftfrachtcontainern bis zu Kleinladungsträgern für den selbststeuernden Materialfluss. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderte Projekt „DyCoNet – Dynamisches Container Netzwerk“, welches sich mit Luftfrachtcontainern beschäftigt und in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Lufthansa Cargo, Jettainer, InnoTec, EnOcean sowie PalNet durchgeführt wird, zeigt, wie CPS eine Schlüsseltechnologie für eine durchgängige Informationskette in der Luftfracht darstellen können. Dazu werden Transportbehälter in die Lage versetzt, miteinander zu kommunizieren, um einen autonomen Materialfluss aufzubauen. Das Projekt will für die grenzenlose Vernetzung der smarten Objekte überall erreichbare Technologien wie GSM/UMTS und GPS nutzen. So sind keine Änderungen an den bisherigen Prozessen und kein Aufbau neuer Hardware notwendig. Es werden völlig autonome Luftfrachtcontainer entwickelt, die ohne betriebliche Infrastruktur mit Funkknoten ausgestattet sind und mit einem übergreifenden Unternehmensnetzwerk überall auf der Welt interagieren können. So wird der Materialfluss echtzeitnah mit dem Informationsfluss weltweit verknüpft.

Das Fraunhofer-interne Forschungsprojekt „inBin – Intelligenter Behälter“ zeigt, wie sich durch immer kleiner und smarter werdende eingebettete Systeme die Vernetzung selbst auf der Ebene der Kleinladungsträger durchsetzt und zeichnet sich durch eine besonders hohe Fertigungstiefe aufgrund von Technology-on-Demand aus. Die Verwendung von Micro-Energy-Harvesting in Form von Photovoltaikzellen, energiesparendem Mikrocontroller, Energiepuffer mit niedriger Selbstentladung sowie Funkanbindung zeichnen das Projekt aus und ermöglichen die direkte Verbindung des inBin mit dem Internet. Durch die Erweiterung des Adressraumes mit dem IPv6-Standard erhält jedes „Smart Object“ im Internet der Dinge eine einzigartige Identifikationsnummer. Damit kommunizieren inBins per Funk barrierefrei über das Internet beispielsweise mit Cloud-basierten Diensten der Logistics Mall.



Abbildung 2: Intelligenter Behälter

Die Fraunhofer-Institute IML und ISST aus Dortmund arbeiten zusammen mit dem Industriepartner Logata GmbH im Rahmen des Fraunhofer-Innovationsclusters „Logistics Mall – Cloud Computing für Logistik“. Mit Cloud Computing stellt sich bereits heute ein deutlicher Wandel in der Bereitstellung und Nutzung von IT-Leistungen ein. Die synergetische Zusammenführung von Logistik und IT in Form von CPS hat großes Potenzial, innovative und tragfähige Cloud-Computing-Lösungen für die Logistik hervorzubringen. Die entwickelte Plattform Logistics Mall stellt Nutzern individuell zusammengestellte Softwarelösungen und Dienstleistungen der Logistik aus Public und Private Clouds zur

Verfügung. Dieses ermöglicht sowohl Start-Up-Unternehmen als auch etablierten Firmen, ohne hohe Investitionen neueste Softwarelösungen und Logistikprozesse, wie beispielsweise Schwärme autonomer Transportfahrzeuge, einzusetzen. Logistiksoftware und -Dienstleistungen sowie singular benötigte Rechenkapazitäten für eine Tagesplanung oder zum Anlernen neuer Topologien können dann dynamisch aus der Cloud bezogen werden. Bereits seit 2010 ist die Logistics Mall in Betrieb. Anwender haben seitdem die Möglichkeit, Logistik-IT-Funktionen in der Logistics Mall zu buchen und zu nutzen.

Im Rahmen des vom Land Nordrhein-Westfalen geförderten Projektes „Zellulare Transportsysteme“, das in Zusammenarbeit mit dem Unternehmen Dematic realisiert wurde, übernehmen autonome Fahrzeugschwärme mit ihren dezentralen, agentenbasierten Steuerungsarchitekturen sämtliche Aufgaben des innerbetrieblichen Materialflusses. Vernetzte Sensoren der Fahrzeuge ermöglichen durch den Einsatz von Sensorfusion und dezentralem Informationsaustausch einen Performancegewinn gegenüber konventionellen Systemen. Den großen Praxistest absolviert die technische Realisierung in Form von 50 Multishuttle Move im Dortmunder Fraunhofer IML seit Juni 2011. In einer eigens dafür gebauten, 1.000 m<sup>2</sup> großen und 65 m langen Versuchshalle übernimmt ein Schwarm die Aufgaben klassischer Materialflusstechnik (Abbildung 3). Der Betrieb wurde bereits kurz nach der Eröffnung realisiert. Die gesamte Anlage befindet sich in einem funktions- und einsatzfähigen Stadium, was bereits bei zahlreichen Demonstrationen, unter anderem auf dem Zukunftskongress der Logistik 2011, gezeigt wurde.



*Abbildung 3: Zellulares  
Transportsystem Multishuttle Move am  
Fraunhofer IML in Dortmund*

Die Vernetzung physischer und virtueller heterogener Systeme ist damit am Fraunhofer IML bereits Realität und wird aktuell in unterschiedlichen Ausprägungen erforscht. Damit gehört das Fraunhofer IML zu den führenden Institutionen in der Forschung, Entwicklung und Realisierung von CPS für die inner- und außerbetriebliche Logistik.

Die Vision, die das Fraunhofer IML in den nächsten Jahren verfolgt, ist die anwendungsorientierte Forschung und Umsetzung von CPS. Auch die Standardisierung, die im Rahmen von europäischen Forschungsprojekten wie „IoT-A – Internet of Things Architecture“ durch das Fraunhofer IML vorangetrieben wird, ist eine Herausforderung. In Zukunft werden CPS sowie deren Bediener überall, zu jeder Zeit und an jedem Ort mit dem Internet verbunden sein. Dieses Ziel gilt es in den nächsten Jahren zu erreichen.

# HEINZ NIXDORF INSTITUT, UNIVERSITÄT PADERBORN

## VON WILHELM SCHÄFER

Schwerpunkt der Forschung am Heinz Nixdorf Institut (HNI) der Universität Paderborn sind intelligente technische Systeme. Damit werden insbesondere maschinenbauliche Erzeugnisse charakterisiert, die sich durch vier Eigenschaften auszeichnen: Adaptivität, Robustheit, Fähigkeit zur Vorausschau und Benutzungsfreundlichkeit. Durch die Integration kognitiver Funktionen in mechatronische Systeme werden so Systeme mit inhärenter Teilintelligenz ermöglicht. Das Verhalten dieser künftigen Systeme wird durch die Kommunikation und Kooperation intelligenter Systemelemente geprägt sein. Erst durch ihr Zusammenspiel wird die geforderte Gesamtfunktionalität erzielt.

Da diese Eigenschaften vor allem durch den rasant zunehmenden Softwareanteil in solchen Systemen und die damit verbundene komplexe Vernetzung von Teilsystemen ermöglicht werden, erfordert die Entwicklung solcher Systeme nicht nur das enge symbiotische Zusammenwirken von Mechanik, Elektronik, Regelungstechnik und vor allem der Softwaretechnik, was auch als Mechatronik bezeichnet wird, sondern völlig neuartige Herangehensweisen bei der Entwicklung solcher Systeme.

Dies führt zur Leitidee der interdisziplinären Forschung am Heinz Nixdorf Institut, deren Ziel eine **neue Schule des Entwurfs technischer Systeme** ist. Diese umfasst Vorgehensmodelle, Spezifikations- und Modellierungstechniken, dedizierte Methoden und IT-Werkzeuge zur Synthese und Analyse sowie Aus- und Weiterbildungsprogramme. Die konzeptionelle Plattform, von der ausgegangen wird, bilden zum einen bisherige Arbeiten am HNI und zum anderen das Systems Engineering. Dabei handelt es sich um einen domänenübergreifenden Ansatz zur zweckmäßigen und zielgerichteten Gestaltung komplexer Systeme. Das Ziel besteht darin, verschiedene Disziplinen zu integrieren und die vielfältigen Aktivitäten von der ersten Idee bis zum erfolgreichen Markteintritt zu orchestrieren.

Deshalb arbeiten am HNI mit finanzieller Unterstützung der Heinz Nixdorf Stiftung neun Lehrstühle mit ca. 200 Mitarbeitern aus vier

Fakultäten der Universität Paderborn (Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Maschinenbau, Wirtschaftswissenschaften und Kulturwissenschaften) gemeinsam in vielen interdisziplinären Forschungsprojekten. Herausragend ist hier die Federführung an zwei Sonderforschungsbereichen der DFG („Selbstoptimierende Systeme des Maschinenbaus“ und „On the Fly Computing“), die Federführung bei dem im Juli gestarteten regionalen Spitzencluster „Intelligente Technische Systeme Ostwestfalen-Lippe“ mit 173 Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft, die Arbeit an einem völlig neuen individualisierten Bahnsystem auf Basis eines schienengebundenen Magnetantriebs (RailCab) sowie die Einrichtung der Fraunhofer-Projektgruppe „Entwurfstechnik Mechatronik“ im April 2011.

Insbesondere durch seine Federführung bei der Beantragung und Durchführung des Spitzenclusters ist das Heinz Nixdorf Institut nicht nur durch Prof. Jürgen Gausemeier als Vorsitzendem des aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik gebildeten Trägervereins it's owl e.V. an maßgeblicher Stelle beteiligt, sondern auch in eine Reihe von Projekten eingebunden. Vor allem gilt dies für die Beteiligung an drei der fünf Querschnittsprojekte, die die Technologieplattform für das gesamte Cluster entwickeln, sowie der Beteiligung an Innovations- und Nachhaltigkeitsprojekten wie z. B. den Projekten Intelligentes Gefahrstofflager, Intelligente Werkzeugmaschine oder Intelligenter Scheinwerfer. Im Bereich der vernetzten Systeme werden Themen wie intelligente Knetprozesse und intelligente Geldkreisläufe gemeinsam mit Industriepartnern bearbeitet (Abbildung 4).

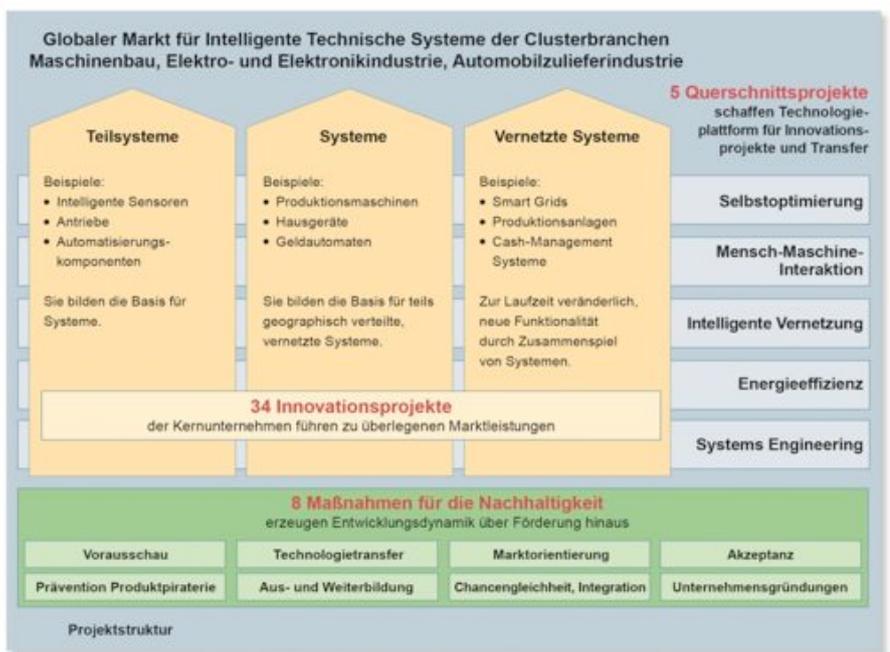


Abbildung 4: Projektstruktur des Clusters it's OWL

Die Entwicklung solcher Systeme beinhaltet eine Vielzahl von aktuellen Forschungsfragestellungen, von denen hier nur wenige, an denen das HNI arbeitet, erwähnt werden können:

- **Intelligente Vorausschau:** Die für CPS relevanten Umfelder wie Märkte, Technologien, gesetzliche Rahmenbedingungen, Forschungs-Community etc. verändern sich sehr dynamisch. Vor diesem Hintergrund sind die auch am HNI vorangetriebenen Anwendungen am Ende nur dann erfolgreich, wenn sie zum Zeitpunkt der Markteinführung den dann aktuellen Anforderungen und Rahmenbedingungen entsprechen. Daher ist es unabdingbar, Entwicklungen, die diese Umfelder bestimmen, frühzeitig wahrzunehmen, systematisch zu antizipieren und phantasievoll zu in sich schlüssigen Zukunftsszenarien zu verknüpfen.
- **Selbstkoordination und Selbstoptimierung verteilter Systeme:** Zur weiteren Verbesserung der Funktionalität ist es erforderlich, dass sich die verteilten Einheiten lokal und im Zusammenspiel mit anderen Einheiten an veränderliche Situationen anpassen, und dabei – teilweise „unabsichtlich“ aufgrund geschickter lokaler Steuerungs- und Anreizmechanismen – das globale Verhalten bezüglich gewisser Zielkriterien optimieren können. Dies beinhaltet auch die Fähigkeit, Defekte selbstständig zu heilen. Diese Defekte können durch den Ausfall oder das fehlerhafte Arbeiten von Knoten, durch Störungen der Kommunikation oder durch feindliche Angriffe entstehen.
- **Dienste in mobilen Systemen:** Die Herausforderung besteht darin, verteilte, lokal arbeitende Strategien z. B. für Routing, Exploration und Ressourcenverteilung zu entwickeln (auch unter eingeschränkter Information und zur Laufzeit des Systems), die zu einem global akzeptablen Verhalten des Gesamtsystems führen.
- **Simulation und Visualisierung:** Der Unterstützung des menschlichen Intellekts durch Visualisierungs- und Interaktionstechniken kommt im Bereich der Gestaltung komplexer dynamischer Systeme eine entscheidende Funktion zu. Manipulierbare virtuelle Welten entstehen, und zwar sowohl als Abbild oder Simulation realweltlicher Prozesse als auch als symbolische Repräsentationen.
- **Spezifikations- und Modellierungsverfahren:** Modelle werden im Entwurfsprozess eingesetzt, um Verhalten, Struktur und Gestalt der zu entwickelnden Systeme auf verschiedenen Abstraktionsebenen und im Verlauf unterschiedlichster Entwurfsschritte zu dokumentieren. Konträr zur heute noch

weitgehend verbreiteten Vorstellung, dass Modelle etwas Statisches darstellen, handelt es sich bei den von uns primär untersuchten Artefakten aber um dynamische Systeme, deren Struktur und Verhalten je nach Situation variieren kann. In diesen Systemen spielen Ad-hoc-Vernetzung, Rekonfiguration, Lernen und Selbstoptimierung eine wesentliche Rolle. Wesentliche Entwurfsentscheidungen werden in die Betriebsphase verlagert, was neue Konzepte der Modellbildung erfordert.

---

## 05 FORSCHUNGSLANDSCHAFT: PROJEKTE MIT CPS-BEZUG IN NRW

---

Forschung mit Bezug zu CPS – sei es an originären cyber physischen Systemen, an Enabling Technologies oder an CPS-affinen Domänenszenarien findet sich in NRW nicht nur an den portraitierten Standorten, sondern auf breiter Basis in einer Vielzahl von interdisziplinären Forschungsprojekten und Kooperationen von Wissenschaft und Praxis. Im Folgenden geben wir einen Überblick über Projekte und beteiligte Akteure aus ganz Nordrhein-Westfalen.

Im Bereich Ambient Assisted Living (AAL) existieren zahlreiche Projekte im Raum Nordrhein-Westfalen. Einen guten Überblick liefert die Website des VDE Verband Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. [45]. Dort wird die „Innovationspartnerschaft AAL“ vorgestellt – ein Projekt, welches bis März 2012 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde und auch seitdem aktiv fortgesetzt wird. Es handelt sich dabei um einen Zusammenschluss von interessierten Akteuren im Bereich AAL, mit dem Ziel, in Workshops, Seminaren und gemeinsamen Veranstaltungen Wissen auszutauschen und neue Ideen in diesem Themenfeld zu entwickeln.

Auf vorgenannter Website findet sich – jeweils sortiert nach Bundesland – eine Übersicht über die Mitglieder dieser AAL-Community. Vergleicht man die Zahl der aktiven Akteure, so fällt auf, dass Nordrhein-Westfalen das mit Abstand aktivste Bundesland in diesem Bereich ist [46]. Die Gruppe der Mitglieder ist dabei sehr heterogen: Sie reicht von großen Forschungsinstituten wie dem Fraunhofer-Institut über medizinische Einrichtungen bis hin zu Ingenieurbüros und Dienstleistern der Immobilienbranche. Ebenso beherbergt NRW die meisten Living Labs zum Thema AAL [47].

Bereits 2004 hat das Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik (ISST) mit Sitz in Dortmund zusammen mit der Hattinger Wohnungsgenossenschaft hwg eG das Projekt „SmarterWohnenNRW“ gestartet [49]. Bis 2007 wurden ca. 60 Wohneinheiten mit IT-gestützten Diensten wie z. B. vernetzten Rauchmeldern, Fensterkontrollen, Wohnungsbedienung per Knopfdruck sowie diversen Dienstleitungen wie Einbruchs- und Brandmeldung, Informationsdiensten und Seniorennotruf ausgestattet. Aufbauend auf diesem Pilotprojekt führt das Fraunhofer ISST derzeit zahlreiche weitere Projekte im Bereich AAL und e-Health durch [50].

Zu nennen wäre hier beispielsweise das Projekt „inHaus“ unter Leitung des Elektroingenieurs Klaus Scherer [51, 52]. „Deutschlands klügstes Haus“ steht in Duisburg und bietet komplexeste vernetzte Technik, die sich über ein Touchpad als zentrale Steueranlage kontrollieren lässt und verschiedenste Komponenten miteinander verbindet: „die Heizung mit der Tür, das

Fenster mit der Heizung, den Küchencomputer mit dem Kühlschrank, die Haustür mit dem Bügeleisen – und alles mit dem Internet“.

Ein ähnlicher Ansatz wird vom Verein SmartHome Paderborn e.V. verfolgt [53]. Auch dessen Ziel ist die kooperative Weiterentwicklung von Konzepten und Ideen rund um das Thema intelligent vernetzte Wohnungen und Häuser. Der Verein hat zahlreiche Partner und Unterstützer aus Paderborn und ganz NRW.

Ein weiteres Projekt des Dortmunder Fraunhofer ISST heißt „SMILEY“ und richtet sich vornehmlich an Senioren [54]. Das Ziel ist die „selbstbestimmte Nutzung von Technologie und Dienstleistungsangeboten insbesondere durch ältere Menschen“. Dieses soll durch eine Vernetzung des eigenen Wohnumfeldes mit Nachbarn oder externen Dienstleistungsunternehmen erreicht werden. Das Projekt wird seit 2010 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.

Die Aufwertung und Erweiterung von Wohnraum mit AAL-Systemen wird auch von professionellen Unternehmen, wie beispielsweise der Smart Living GmbH & Co. KG aus Dortmund [71], angeboten. Die vorgestellten Techniken werden bereits in verschiedenen Projekten umgesetzt. Als Partner treten dabei Wohnungsunternehmen oder Projektentwickler auf, „die mit der Lösung ihre Bestände aufwerten und sich damit Alleinstellungsmerkmale und Vermietungsvorteile sichern“ wollen. Betrachtet man die Anzahl der Projekte, so fällt auch an dieser Stelle wieder auf, dass NRW eine Führungsposition unter allen Bundesländern einnimmt.

Ein im Bereich e-Health angesiedeltes und im Rahmen eines Förderprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördertes Projekt ist „smartOR“ [56]. Dieses wird insbesondere vom Lehrstuhl für Medizintechnik der RWTH Aachen vorangetrieben. Bei „smartOR“ geht es um die Entwicklung von „innovativen[n] Kommunikations- und Netzwerkarchitekturen für den modular adaptierbaren integrierten OP-Saal der Zukunft“ [55]. Vernetzte technische Systeme wie z. B. computergestützte Navigation und Bildgebungssysteme sollen den Operateur bei seiner Arbeit unterstützen. Weitere Ziele sind die Erhöhung der Benutzerfreundlichkeit der Arbeitssysteme sowie insbesondere die Entwicklung internationaler Standards für deren Vernetzung.

Einen Überblick über zahlreiche weitere Projekte und Services aus dem Bereich Telemedizin und e-Health findet man auf der Website des Instituts für Arbeit und Technik [57].

Zusätzlich zu zahlreichen Referenzprojekten finden in NRW auch Veranstaltungen und Kongresse zum Thema Ambient Assisted Living und e-Health statt [48, 69, 70].

# ENERGIEVERSORGUNG

Der Begriff „SmartGrids“ bezeichnet „intelligente“ Stromnetze. Darunter versteht man Stromnetze, die verschiedene Akteure (z. B. Erzeuger und Verbraucher) miteinander verknüpfen und das Zusammenspiel zwischen diesen regeln. In Nordrhein-Westfalen gibt es zahlreiche Projekte aus dem SmartGrid-Bereich.

Beispielsweise fördert das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie im Rahmen des Förderprogramms E-Energy [58] das Projekt E-DeMa [59, 60], dessen Ziel die Optimierung des Stromverbrauchs in Privathaushalten ist. Zu diesem Zweck werden intelligente Stromzähler eingesetzt, die mit einem Kommunikationsmodul ausgestattet sind und mit dem privaten Computer der Teilnehmer kommunizieren. Über das Internet werden stets die aktuellen Strompreise abgerufen, die sich z. B. nach der Tageszeit oder danach richten, wie viel regenerative Energie derzeit im Stromnetz verfügbar ist. Diese Information wird an intelligente Geräte wie Waschmaschinen, Trockner und Spülmaschinen übertragen, die den teilnehmenden Haushalten zur Verfügung gestellt wurden. Die Geräte richten ihre Betriebszeit daraufhin automatisch nach den günstigsten Strompreisen aus. Ein Feldtest zu diesem Projekt läuft seit März 2012 mit ca. 700 Teilnehmern in den Modellregionen Mülheim an der Ruhr und Krefeld. Beteiligt an diesem „Energie-Marktplatz der Zukunft“ sind zahlreiche renommierte Partner aus Industrie und Forschung, wie z. B. Miele mit Sitz in Gütersloh, RWE in Essen, die Stadtwerke Krefeld, die Ruhr-Universität Bochum, die TU Dortmund und die Universität Duisburg-Essen.

Ein weiteres Projekt aus dem Förderprogramm E-Energy ist „Smart Watts“ [61, 62], welches in der Modellregion Aachen durchgeführt wird. Das Projekt besteht aus einem Verbund von 15 Stadtwerken mit dem Ziel, zu einem „Internet der Energie“ beizutragen. Hierzu werden ähnlich wie beim E-DeMa-Projekt die Haushalte mit intelligenten Stromzählern ausgestattet, so dass Haushaltsgeräte automatisch bevorzugt dann Strom verbrauchen, wenn er am günstigsten ist. Zusätzlich sollen den Teilnehmern detaillierte Informationen und neue Dienstleistungen zur Verfügung gestellt werden, z. B. eine Online-Energieberatung.

Von der Firma Phoenix Contact aus Blomberg stammt ein Projekt, welches im Rahmen der Hannover Messe mit dem Technologiepreis

der Deutschen Messe AG ausgezeichnet wurde [63]. Sie erhielt den Hermes Award 2012 für ihr Blitzstrommesssystem LM-S [64]. Das System misst Blitzströme in Blitzableitungen und leitet die Messergebnisse über das Internet an eine Fernwartungszentrale weiter. Dort kann das Ergebnis ausgewertet und entschieden werden, ob weitere Prüfungen oder Wartungsarbeiten erforderlich sind. Das Ziel ist die Erhöhung der Versorgungssicherheit bei gleichzeitiger Kostensenkung und Effizienzsteigerung der Wartungsarbeiten.

Ein internationales Projekt, das seit November 2011 läuft, ist „GRID4EU“ [65]. Hierbei handelt es sich um einen Zusammenschluss von sechs großen europäischen Stromnetzbetreibern wie z. B. RWE, Vattenfall, EDF und Enel. Diese werden von mehr als 25 Partnern aus Industrie und Forschung unterstützt, z. B. Siemens, Cisco, ABB, Telvent sowie der TU Dortmund. Die Ziele dieses Projekts sind die Erforschung, Weiterentwicklung und Etablierung von SmartGrid-Lösungen für Europa in verschiedenen Bereichen, z. B. Integration von erneuerbaren Energiequellen, verbesserte Energiespeicherung und Netz-Automatisierung. Derzeit laufen für die vorgenannten Bereiche verschiedene Modellprojekte in unterschiedlichen Ländern Europas, darunter in der Region Reken in Nordrhein-Westfalen. Dort sind insbesondere ABB und die TU Dortmund involviert. Ziel ist die Etablierung eines Multi-Agenten-Systems zur Integration einer großen Zahl dezentraler Energieproduzenten wie z. B. Wind- und Solarkraftwerke, um insbesondere eine höhere Zuverlässigkeit und eine kürzere Erholungszeit nach Netzzusammenbrüchen zu erreichen sowie Überwachungs- und Fernsteuerungsmethoden zu optimieren.

Weitere interessante Projekte werden vom Cluster IKT.NRW unter der Rubrik „Smart Cities“ durchgeführt [66]. Zu nennen wäre hier beispielsweise das „Universal Home Lab“ [67], dessen Ziel die „intelligente Verknüpfung von Anwendungen und Technologien zum Wohlbefinden der Bewohner“ und die Erwirtschaftung einer positiven Ressourcenbilanz in Privathaushalten ist. Ähnlich wie bei anderen Projekten wird dazu auch hier auf intelligente Stromzähler zurückgegriffen, die in Echtzeit Informationen über den Stromverbrauch in einem Haushalt darstellen können und somit zur Optimierung des Verbrauchs beitragen sollen. Beteiligt sind namhafte Industrie- und Forschungspartner aus NRW, wie z. B. Miele, Poggenpohl und der Lehrstuhl Mediendesign in der Medieninformatik der Fachhochschule Gelsenkirchen.

Ein Forschungsprojekt, welches E.ON in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen durchführt, ist die Realisierung eines

Echtzeitsimulators zur Simulation von elektrischen Netzen [68]. Dies soll den Anwender in die Lage versetzen, theoretische Überlegungen am Simulator umzusetzen und zu prüfen, bevor diese in realen Anlagen umgesetzt werden. Hierdurch können „unterschiedlichste Varianten des Netzausbaus und der Netzsteuerung [...] praxisnah getestet und teure Fehlinvestitionen vermieden werden“.

# PRODUKTION

Unter dem Titel „Industrie 4.0“ bilden CPS auch eine wichtige Komponente der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Unter Federführung des BMBF und BMWi sowie Mitwirkung des BMI liegen Schwerpunkte auf intelligenten Produktionssystemen und –verfahren („Smart Factory“), sowie der Verteilung und Vernetzung von Produktionsstätten und der unternehmensübergreifenden Produktionslogistik („Smart Production“) [72]. Vom BMWi wurden verwandte Themen bereits früh im Programm „next generation media“ gefördert [73].

In diesem Programm arbeitete z. B. das Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen im Sm@rtLogistics-Verbundprojekt an der Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Versorgung aller Verbrauchsstellen im Produktionsprozess mit. Die Bedarfsdeckung an benötigten Bauteilen und Materialien sollte dabei nicht mehr durch eine Zentralplanung gesteuert werden, sondern in autonomen Regelkreisen selbständig erfolgen [76].

An der RWTH Aachen ist auch der ExzellenzCluster „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ angesiedelt, dessen Ziel die Entwicklung von Wegen zur Erhöhung der Produktvariabilität bei Reduzierung des Produktionsaufwands ist [77]. In diesem Kontext werden in Aachen u.a. selbst-optimierende Produktionssysteme von der Maschinen- bis zur Gesamtbetriebs-Ebene entwickelt [78].

Im Spitzencluster Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe („it's OWL“) sind 34 Innovations- und fünf Querschnittsprojekte gestartet bzw. geplant, in denen Komponenten, Systeme und Systemnetze für die Branchen Maschinenbau, Elektro-/Elektronik-Industrie und Automobilzulieferindustrie entwickelt werden [79]. Die Universitäten Bielefeld und Paderborn spielen dabei eine tragende Rolle für die Grundlagen- und Begleitforschung, doch auch die Hochschule Ostwestfalen-Lippe und das Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) sind prominent im Cluster aktiv.

Der Überblick auf der Website des Spitzenclusters „it's OWL“ zeigt die Bandbreite der bislang gestarteten Projekte und der involvierten Partner, der sich im Anwendungsbereich von Automation (Koordination: Beckhoff Automation AG) und virtuellen Werkzeugmaschinen (Koordination: Gildemeister Drehmaschinen

GmbH), bis zu mechatronischen Fertigungskomponenten (Partner: Harting KGaA) sowie selbstkorrigierenden Fertigungsprozessen (Koordination: Weidmüller Interface GmbH & Co. KG) erstreckt. Im Rahmen der Querschnittsforschung untersuchen die akademischen Partner Fragen der Selbstoptimierung, intelligenten Vernetzung, Energie-Effizienz, Mensch-Maschine-Interaktion und des Systems Engineering [80].

Das Institut für Industrielle Informationstechnik (inIT) der Hochschule Ostwestfalen-Lippe und das Fraunhofer IOSB-INA haben des Weiteren mit der Lemgoer Modellfabrik eine „Smart Factory“ eingerichtet, in der die Integration von IKT-Komponenten für die Automation wandlungsfähiger, rekonfigurierbarer und energieeffizienter Produktionssysteme demonstriert wird [86].

Die Entwicklung intelligenter Werkzeuge und Systeme, die sich selbständig vernetzen, sich an selbst erkannte Situationen anpassen und mit Nutzern interagieren können, wird vom BMWi mit dem Technologieprogramm „Autonomik“ gefördert [81]. Mehrere in diesem Programm geförderte Projekte sind auch in NRW verankert:

Im rorarob-Projekt wird unter Führung der carat robotic innovation GmbH (Dortmund), der TU Dortmund und weiteren Partnern ein robotisches Assistenzsystem für Rohr- und Rahmenkonstruktionen entwickelt [82]. Ziel des von proXperts (Essen) geführten Projekts simKMU ist hingegen die Optimierung von Logistik- und Produktionsverfahren durch Simulation [83]. Das ebenfalls im Autonomik-Programm angesiedelte smartOR-Projekt der RWTH Aachen wurde bereits in der Domäne „Gesundheitswesen“ (Abschnitt 5.1) vorgestellt.

Mit RAN (RFID Automotive Network) ist im Autonomik-Programm auch ein Großprojekt angesiedelt, zu dessen Partnern u.a. die Adam Opel AG und das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) gehört. Ziel des Projekts ist es, durch die Verwendung von RFID-Chips die Kommunikationsprozesse zwischen den an der Automobil-Produktion beteiligten Akteuren zu optimieren. Der Test findet im Opel-Werk in Bochum statt [84].

Weitere Projekte sind aus den kürzlich abgeschlossenen Bewerbungsrunden zum Förderprogramm „Intelligente Vernetzung in der Produktion – Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ des BMBF zu erwarten [85].

# LOGISTIK UND VERKEHR

Eng mit dem Produktionsbereich verknüpft ist die Logistik. Mehrere Projekte, die das BMWi mit dem bereits 2005 aufgelegten Programm „next generation media“ zum Thema Internet der Dinge förderte, liefen in diesem Bereich unter Beteiligung bzw. Koordination von Partnern in Nordrhein-Westfalen [73].

So unterstützte der Lehrstuhl für Maschinenbauinformatik der Ruhr-Universität Bochum das LAENDmarKS-Projekt, dessen Ziel die Entwicklung von Maßnahmen zur Rückverfolgbarkeit von Automobilkomponenten durch den gesamten Produktionsprozess war, mit der Entwicklung von Prozessmodellen und Kennzahlensystemen für die Prozessbewertung [74].

Unter Führung des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund entwickelte (ebenfalls im „next generation media“-Programm) das LogNetAssist-Konsortium ein intelligentes Assistenzsystem zur Steuerung von Logistiknetzen mit RFID-gestützter Datenerfassung [75].

Im Jahr 2010 gewann der EffizienzCluster LogistikRuhr den Spitzencluster-Wettbewerb; er umfasst heute 120 Unternehmen und elf Forschungs- und Bildungseinrichtungen [87]. Im Rahmen des Leitthemas „Wandelbare Logistiksysteme“ sind hier insb. zwei CPS-verwandte Projekte zu nennen:

Ziel des vom Lehrstuhl für Transportsysteme und Logistik an der Universität Duisburg-Essen koordinierten TiLO-Projekts („Tracing intelligenter LogistikObjekte“) ist die Entwicklung eines kamerabasierten Analysesystems, mit dem die Verfolgung von Logistikobjekten sowie die Abnahme, Instandhaltung und Steuerung ganzer logistischer System vereinfacht werden soll [88].

Im smaRTI-Projekt unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund werden sog. „smart Reusable Transport Items“ entwickelt, d.h. Ladungsträger, die sich selbst ihren Weg durch das logistische Netzwerk suchen. Angestrebt werden „Prozesse, Technologien und Software, die der Identifizierung, Lokalisierung und Steuerung von Ladungsträgern dienen.“ [89]

Neben der Logistik stellt der allgemeine Straßenverkehr ein breites Anwendungsfeld für den künftigen Einsatz von CPS dar. Fahrzeugnahe Telematik-Anwendungen werden vom

ExzellenzCluster NRW als Cross-Innovation „automotive meets communications“ identifiziert [90]. In der Interaktion von Fahrzeug und Fahrer, von Fahrzeugen untereinander, von Fahrzeugen mit dem Lebensraum und der Verkehrsinfrastruktur ermöglichen CPS neuartige Anwendungen für Sicherheit, Energieeffizienz und Fahrkomfort.

So ist z. B. Ziel des vom Land NRW mit Ziel2-Mitteln geförderten Projekts „Active Safety Car“ die Reduktion von Unfällen bzw. Schäden bei Kollisionen. In dem von der Delphi Delco Electronics Europe GmbH (mit Sitz der Europazentrale für aktive Sicherheit in Wuppertal) koordinierten und von der Bergischen Universität Wuppertal wissenschaftlich begleiteten Vorhaben sollen in Fahrzeugen eingebaute Kameras potenzielle Kollisionen erkennen und die Information darüber an andere Fahrzeuge weitergeben [91].

Ähnlich gelagert ist das Ziel der Forschungsinitiative Ko-FAS, die Technologien und Systemkomponenten entwickelt, um mittels Sensoren und bildverarbeitender Verfahren kritische Verkehrssituationen frühzeitig zu erkennen und vorbeugende Maßnahmen anzustoßen. Aus NRW ist auch hier die Delphi Deutschland GmbH in Wuppertal beteiligt [94].

In dem von BMBF, BMWi und BMVBS gemeinsam geförderten Großprojekt simTD werden Verfahren für die sog. Car-to-X-Kommunikation, d.h. die Vernetzung von Fahrzeugen untereinander und mit der Verkehrsinfrastruktur, entwickelt. Ziel ist sowohl die Erkennung von und Warnung vor Gefahrenquellen, als auch die Vorhersage und Steuerung der Verkehrslage durch die Verkehrszentralen. Mit dem Ford Forschungszentrum Aachen ist unter einer Reihe renommierter Automobil-, Zulieferer- und Wissenschaftspartner aus ganz Deutschland auch ein Unternehmen aus NRW im Verbund vertreten [95].

Das Querschnittsthema IT-Sicherheit, das in praktisch allen CPS-affinen Bereichen eine besondere Rolle spielt, wird für die Domänen Mobilität und Energiewirtschaft bereits von mehreren Partnern in NRW bearbeitet: Im BMWi-Projekt „Secure eMobility“ unter Führung der ESCRYPT GmbH, einer Ausgründung aus der Ruhr-Universität Bochum, werden Technologien entwickelt, um Angriffe auf die IT-Infrastrukturen von „Smart Cars“ und „Smart Grids“ zu verhindern [92].

Weitere Organisationen, für die CPS künftig interessante Perspektiven eröffnen dürften, sind die im AutoCluster.NRW vernetzten Partner, darunter neben dem Ford Forschungszentrum Aachen (FFA) z. B. auch das Toyota Motorsport-Entwicklungszentrum in Köln [93].

---

## 06 FAZIT UND AUSBLICK

In Cyber Physical Systems setzt sich die Nutzung des Potenzials, das uns die großen Entwicklungstrends in Hardware, Netzen und Software eröffnen, konsequent fort. Erstmals steht uns auf allen drei Enabler-Feldern ein Standard von Grundtechnologien zur Verfügung, der hinreichend leistungsstark und konzeptuell fortgeschritten ist, um ihn in verschiedensten Branchen für Produkt-, Prozess- und Dienstleistungsinnovationen nutzen zu können, die die physische und digitale Welt noch intensiver verweben als bislang:

CPS nutzen das ganze Spektrum verfügbarer Hardware (von

Embedded Systems bis in die Cloud), ubiquitär verfügbare Netze, und intelligente, z.T. selbstorganisierende Software, um Anwendungsszenarien zu ermöglichen, deren Realisierung bislang von einer zu großen Lücke zwischen physischer Realität und digitaler Abbildbarkeit sowie Einflussmöglichkeit verhindert wurde.

Bei allem Fokus auf den neuen Möglichkeiten in den Anwendungsdomänen darf jedoch – wie in jedem erfolgreichen IT-Projekt – die Entwicklung von Fachlösungen nicht entkoppelt von der Technologie erfolgen: Das Verständnis des Wechselspiels von fachlichen und technologischen Anforderungen und Rahmenbedingungen, und die Entwicklung maßgeschneiderter Problemlösungen auf beiden Seiten, ist selbst für den Erfolg einfachster IT-Projekte unabdingbar. Diese wechselseitige Abhängigkeit und gemeinsame Innovationsnotwendigkeit wird um Größenordnungen komplexer und erfordert daher umso intensivere interdisziplinäre Zusammenarbeit, wenn in der CPS-Forschung Anwendungsinnovationen mit disruptivem Charakter für ganze Branchen entwickelt werden.

Für die Informations- und Kommunikationstechnologie ist diese Interdisziplinarität von Vorteil: Sie stellt sicher, dass Forschung und technische Innovation von den Anforderungen der Anwendungsdomänen getrieben sind und somit unmittelbaren Nutzen stiften, statt im Elfenbeinturm oder in peripheren Optimierungen zu verlaufen.

Bei aller Technologiezentriertheit und angestrebter Automatisierung der CPS-Forschung ist schließlich nicht zu vergessen, dass Cyber Physical Systems in erster Linie dem Menschen – seinem Komfort, seiner Gesundheit, seiner Sicherheit – dienen sollen. Eine querschnittliche Forschungsnotwendigkeit besteht daher in besonderem Maße für das Feld der **Mensch-Maschine-Interaktion**: Hier müssen praxistaugliche Lösungen für die Herausforderung entwickelt werden, selbst komplexeste Systeme, die u.U. eine Vielzahl von Sensoren, Prozessoren und Aktoren, von Gegenständen und Abläufen, von wirtschaftlichen, biologischen/chemischen/physikalischen und technischen Prozessen kontrollieren, möglichst effizient und dennoch fast „unsichtbar“ steuerbar zu machen. Zwei Aspekte von CPS machen dies zu einer besonderen Herausforderung:

Zum einen sind CPS häufig in Teilen selbstorganisierend, d.h. die menschlichen Nutzer haben nicht die alleinige Kontrolle über eine Anwendung, sondern interagieren vielmehr mit einem sich organisch an Kontext- und Umgebungsbedingungen anpassenden System. Zum anderen müssen aufgrund der engen Verwobenheit mit der physischen Realität die Sicherheitsmechanismen von CPS

sehr viel ausgeprägter sein als die rein digitaler Systeme: Während in digitalen Systemen nahezu jede Interaktion (mit entsprechender Vorbereitung) praktisch rückstandsfrei zurücknehmbar ist, werden von CPS oft physische Prozesse angestoßen, die u.U. nicht mehr halt- oder umkehrbar sind. Hinzu kommt, dass CPS aus gleichem Grund deutlich robuster gegen unerwartete Ereignisse sein müssen: Während in rein digitalen Systemen weitgehend definierbar und steuerbar ist, welchen Eingaben ein System ausgesetzt ist und wie sie zu verarbeiten sind, sind CPS der Realwelt ausgesetzt, deren Verhalten letztlich nicht durch Prozessmodelle vorgebar ist. Da in CPS die Schnittstelle zwischen physischer und digitaler Welt verschwimmt, ist es deutlich schwieriger, „Firewalls“ einzuziehen, die das System vor unerwarteten Situationen schützen.

In der Gesamtschau eröffnen CPS ein spannendes, weites Feld neuer Anwendungsvisionen in einer Vielzahl von Domänen, die integrale Facetten unseres täglichen Lebens prägen. Zur Realisierung dieser Visionen ist es jedoch geboten, die organisatorischen, politischen und finanziellen Rahmenbedingungen zu schaffen, um die bestehenden Forschungs- und Kooperationsaktivitäten in der Informations- und Kommunikationstechnologie sowie den Anwendungsbranchen deutlich auszubauen, um konzeptuelle und technische Grundlagen zu schaffen, Integrationsprototypen zu entwickeln und letztlich ausgereifte Systeme erfolgreich am regionalen, nationalen und europäischen Markt einzuführen. Das gesamte erforderliche Kompetenzspektrum, eine breite Kooperationsbereitschaft und einen ausgeprägten Innovationsgeist demonstrieren Wissenschaft und Wirtschaft in NRW bereits heute auf vielfältige Weise.

# SOFTWARE UND CPS INNOVATIONSPOTENZIAL FÜR NRW

## 01

Cyber Physical Systems bestehen oft aus einer Vielzahl **verteilter, mobiler Komponenten**, die teilweise unmittelbar – ohne zentrale Steuerung – miteinander interagieren. Die Informationen, die über die verschiedenen Geräte erfasst werden, bilden die Welt nur unscharf ab. Software-Komponenten müssen robust sein, damit sie auch in Fehler- und Ausnahmesituationen richtige Entscheidungen treffen können. **Neue Test- und Simulationsverfahren** für verschiedene Anwendungsszenarien werden daher entwickelt, um eine möglichst umfangreiche **Fehlerabschätzung in CPS** zu gewährleisten bzw. alternative Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen, wenn nicht genügend Informationen über physische Zustände und Prozesse vorhanden sind.

## 02

CPS zeichnen sich durch einen gewissen Grad an Autonomie aus. Sie haben die Fähigkeit, sich an wandelbare Prozesse anzupassen. Anders als oft propagiert und wünschenswert, kann vollständige Autonomie nicht in allen Bereichen umgesetzt werden, will man die Sicherheit und Zuverlässigkeit von CPS gewährleisten. In Best Practice-Szenarien wird untersucht, wann teilautonome und wann vollautonome Prozesse realisiert werden können. Es wird darüber hinaus an der Entwicklung von **Human-in-the-Loop-Ansätzen** gearbeitet, bei denen die Entscheidungsfindung und Steuerung nicht ausschließlich automatisch erfolgen kann, sondern durch menschliche Betreiber überwacht und ggf. korrigiert wird.

## 03

Im Gegensatz zu klassischen Softwaresystemen gestaltet sich die Interaktion von Anwendern mit einem CPS oft diffuser, da System und Anwender gemeinsam die Umwelt manipulieren. Am Beispiel ausgewählter Anwendungen werden **Software-Benutzerschnittstellen** so gestaltet, dass der Nutzer zu jedem Zeitpunkt die

Prozesse im CPS nachvollziehen und intuitiv das Verhalten des Systems positiv beeinflussen kann.

## 04

In Cyber Physical Systems verschärft sich das Problem des **Lifecycle-Managements**: Hardware, Software und Anwendungsdomäne weisen ein sehr unterschiedliches Evolutionstempo auf – während sich die Anforderungen der Anwendungsdomäne u. U. sehr schnell wandeln, sind einmal in Hardware gegossene Entwurfsentscheidungen kaum bzw. nur durch teuren Austausch zu verändern. Um trotz dieser unterschiedlichen Lebenszeitzyklen ein reibungsloses Zusammenspiel der Anwendungen zu ermöglichen, werden Ansätze für „**CPS-Softwareupdates**“ entwickelt.

## 05

Als komplexester und am ehesten schöpferisch gestalteter Systemteil bietet die Software die meisten Angriffspunkte. Sie ermöglicht aber andererseits auch, durch geschickte Implementierung Angriffe zu verhindern oder zumindest zu erkennen und angemessen darauf zu reagieren. Anhand von konkreten und häufig auftretenden Bedrohungsszenarien werden **Sicherheitskonzepte** entwickelt, die in verschiedenen Anwendungen zum Einsatz kommen können.

## 06

Die tiefgreifende Auswirkung von intelligenten Technologien auf Prozesse und Zustände in der realen Welt, wie sie für CPS charakteristisch ist, erfordert es, dass die Software nicht einfach nur auf physische Systeme wie Produktionsanlagen „aufgesetzt“ ist, sondern von Beginn an in die Entwicklung solcher Anlagen integriert ist. In branchenübergreifender Kooperation werden **interdisziplinäre Ansätze für ein gemeinsames Design von Software und spezifischen Branchenanwendungen** entwickelt.

## 07

Die Entwicklung von CPS erfordert ein interdisziplinäres Zusammenspiel von Experten aus der Softwaretechnik, vielen weiteren Disziplinen der Informatik sowie vielfältigen Ingenieurwissenschaften und Anwendungsdomänen. Aufgrund ihrer breiten Ausrichtung eignet sich die **Informatik** besonders gut **als Ausgangspunkt** für die Forcierung einer fundierten **CPS-Ausbildung**. Um die interdisziplinäre Perspektive in der Aus- und

Weiterbildung zu etablieren, werden **Konzepte für einen CPS-Studiengang** sowie die **Vermittlung von CPS-Kompetenzen in der Weiterbildung** entwickelt.

# LITERATURVERZEICHNIS

- [1] E. Geisberger, M. Broy (Hrsg.): agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. acatech-Studie, März 2012.  
<http://www.acatech.de/de/publikationen/empfehlungen/acatech/detail/artikel/acatech-studie-agendacps-integrierte-forschungsagenda-cyber-physical-systems.html>
- [2] D.A. Ladd, A. Datta, S. Sarker, Y. Yu: Trends in Mobile Computing within the IS Discipline: A Ten-Year Retrospective. CAIS, Vol. 27, pp. 285-316, 2010.  
[http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=1949999](http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1949999)
- [3] M. Satyanarayanan: Fundamental challenges in mobile computing. Proc. 15th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing (PODC'96), pp. 1-7. ACM, 1996.  
<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=248053>
- [4] G.H. Forman, J. Zahorjan: The Challenges of Mobile Computing. IEEE Computer, Vol. 27, No. 4, pp. 38-47. IEEE, Apr 1994. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=274999&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=274999&tag=1)
- [5] J. Rhoton: The Wireless Internet Explained, Digital Press, 2001
- [6] S. Poslad: Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions. Wiley, 2009
- [7] A. Dearle: Toward Ubiquitous Environments for Mobile Users. IEEE Internet Computing, Vol. 2, No. 1, pp. 22-32. IEEE, Jan 1998. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=656063>
- [8] L. Han, S. Jyri, J. Ma, K. Yu: Research on Context-Aware Mobile Computing. Proc. 22nd Intl. Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINAW 2008) Workshops, pp. 24-30. IEEE, Mar2008. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4482885](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4482885)
- [9] 14th Intl. Conf. on Ubiquitous Computing. <http://www.ubicomp.org/ubicomp2012/>
- [10] M. Weiser: Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing. CACM, Vol. 36, No. 7, pp. 75-84. ACM, Jul 1993. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=159617>
- [11] Deutscher Bundestag: Cloud Computing. März 2010.  
[http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2010/cloud\\_computing.pdf](http://www.bundestag.de/dokumente/analysen/2010/cloud_computing.pdf)
- [12] P. Mell, T. Grance: The NIST Definition of Cloud Computing. NIST, Sep 2011.  
<http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf>
- [13] R. Buyya, J. Broberg, A. Goscinski (Eds.): Cloud Computing: Principles and Paradigms. John Wiley & Sons, 2011. [http://media.johnwiley.com.au/product\\_data/excerpt/90/04708879/0470887990-180.pdf](http://media.johnwiley.com.au/product_data/excerpt/90/04708879/0470887990-180.pdf)
- [14] F. Gens: Defining „Cloud Services“ and „Cloud Computing“. IDC eXchange, Sep 2008.  
<http://blogs.idc.com/ie/?p=190>
- [15] H.T. Dinh, C. Lee, D. Niyato, P. Wang: A Survey of Mobile Cloud Computing: Architecture, Applications, and Approaches. J Wireless Communications and Mobile Computing, Wiley, Oct 2011.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.1203/full>
- [16] P. Marwedel: Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems. Springer, 2010
- [17] R. Zurawski: Embedded Systems Handbook, 2nd Ed.: Networked Embedded Systems. CRC Press, 2009
- [18] J. Sifakis: Embedded Systems – Research Challenges and Work Directions. LAAS, 2008.  
[http://www.laas.fr/laas/files/LAAS/40ans\\_LAAS-CNRS\\_Sifakis\\_Conf.pdf](http://www.laas.fr/laas/files/LAAS/40ans_LAAS-CNRS_Sifakis_Conf.pdf)
- [19] M. Satyanarayanan: Pervasive Computing: Vision and Challenges. IEEE Personal Communications, Vol. 8, No. 4, pp. 10-17. IEEE, Aug 2001. <http://dx.doi.org/10.1109/98.943998>

- [20] IEEE Intl. Conf. on Pervasive Computing and Communications, Mar 2013. <http://www.percom.org/>
- [21] G. Roussos, V. Kostakos: RFID in Pervasive Computing: State-of-the-Art and Outlook. *J Pervasive and Mobile Computing*, Vol. 5, No. 1, pp. 110-131. Elsevier, Feb 2009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119208001053>
- [22] IEEE Computer Society: J Pervasive Computing. <http://www.computer.org/portal/web/computingnow/pervasivecomputing>
- [23] J. Schonwalder, M. Fouquet, G. Rodosek, I. Hochstatter: Future Internet = Content + Services + Management. *IEEE Communications*, Vol. 47, No. 7, pp. 27-33. IEEE, Jul 2009. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5183469](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5183469)
- [24] G. Tselentis, J. Domingue, A. Galis, A. Gavras, D. Hausheer, S. Krco, V. Lotz, T. B. Zahariadis: Towards the Future Internet: A European Research Perspective. IOS Press, 2009
- [25] D. Raychaudhuri, M. Gerla: Emerging Wireless Technologies and the Future Mobile Internet. Cambridge University Press, 2011
- [26] P. Stuckmann: European Research on Future Internet Design. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 16, No. 5, pp. 14-22. IEEE, Oct 2009. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5300298](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5300298)
- [27] M. Brunner, H. Abramowicz, N. Niebert, L.M. Correia: 4WARD: A European Perspective towards the Future Internet. *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E93-B, No. 3, pp. 442-445. IEICE, Mar 2010. [http://search.ieice.org/bin/pdf\\_link.php?category=B&lang=&year=2010&fname=e93-b\\_3\\_442&abst=](http://search.ieice.org/bin/pdf_link.php?category=B&lang=&year=2010&fname=e93-b_3_442&abst=)
- [28] M. Conti, S. Chong, S. Fdida, W. Jia, H. Karl, Y.D. Lin, P. Mähönen, M. Maier, R. Molva, S. Uhlig, M. Zukerman: Research Challenges towards the Future Internet. *J Computer Communications*, Vol. 34, No. 18, pp. 2115-2134. Elsevier, Dec 2011. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366411002714>
- [29] G. Wood: IPv6: Making Room for the World on the Future Internet. *IEEE Internet Computing*, Vol. 15, No. 4, pp. 88-89. IEEE, Jul-Aug 2011. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5934857](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5934857)
- [30] J. Villasante: Internet of Services. European Commission, 2009. [http://challengers-org.eu/images/Documents/ssoku09\\_villasante\\_presentation.pdf](http://challengers-org.eu/images/Documents/ssoku09_villasante_presentation.pdf)
- [31] C. Schroth: Web 2.0 and SOA: Converging Concepts Enabling the Internet of Services. *IT Professional*, Vol. 9, No. 3, pp. 36-41. IEEE, May-Jun 2007. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4216107](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4216107)
- [32] J. Cardoso, K. Voigt, M. Winkler: Service Engineering for the Internet of Services. In: *Enterprise Information Systems, LNBI*, Vol. 19, Part 1, pp. 15-27. Springer, 2009. <http://www.springerlink.com/content/k4g47766q0005496/>
- [33] J. Cardoso, A. Barros, N. May, U. Kylau: Towards a Unified Service Description Language for the Internet of Services: Requirements and First Developments. *Proc. 2010 IEEE Intl. Conf. on Services Computing (SCC 2010)*, pp. 602-609. IEEE 2010. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5557283&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5557283&tag=1)
- [34] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito: The Internet of Things: A Survey. *J Computer Networks*, Vol. 54, No. 15, pp. 2787-2805. Elsevier, Oct 2010. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>
- [35] L. Tan, N. Wang: Future Internet: The Internet of Things. *Proc. 3rd Intl. Conf. on Advanced Computer Theory and Engineering (ICACTE 2010)*, Vol. 5, pp. 376-380. IEEE, Aug 2010. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5579543](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5579543)
- [36] G. Kortuem, F. Kawsar, D. Fitton, V. Sundramoorthy: Smart Objects as Building Blocks for the Internet of Things. *IEEE Internet Computing*, Vol. 14, No. 1, pp. 44-51. IEEE, Jan-Feb 2010. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5342399](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5342399)
- [37] M. Zorzi, A. Gluhak, S. Lange, A. Bassi: From Today's INTRANet of Things to a Future INTERNet of Things: A Wireless- and Mobility-Related View. *IEEE Wireless Communications*, Vol. 17, No. 6, pp. 44-51. IEEE, Dec 2010. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5675777](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5675777)
- [38] SINTEF: Internet of Things – Strategic Research Roadmap. Sep 2009. [http://sintef.biz/upload/IKT/9022/CERP-IoT%20SRA\\_IoT\\_v11\\_pdf.pdf](http://sintef.biz/upload/IKT/9022/CERP-IoT%20SRA_IoT_v11_pdf.pdf)

- [39] J. Krumm, N. Davies, C. Narayanaswami: User-Generated Content. IEEE Pervasive Computing, Vol. 7, No. 4, pp. 10-11. IEEE, Oct-Dec 2008. [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4653465](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4653465)
- [40] Future Internet Content Project. <http://www.fi-content.eu/>
- [41] D. Ghosh, R. Sharman, H.R. Rao, S. Upadhyaya: Self-Healing Systems – Survey and Synthesis. J Decision Support Systems, Vol. 42, No. 4, pp. 2164-2185. Elsevier, Jan 2007. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923606000807>
- [42] M. Mikic-Rakic, N. Mehta, N. Medvidovic: Architectural Style Requirements for Self-Healing Systems. Proc. 1st Workshop on Self-Healing Systems (WOSS'02), pp. 49-54. ACM, 2002. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=582138>
- [43] B.H.C. Cheng, R. de Lemos, H. Giese, P. Inverardi, J. Magee, J. Andersson, B. Becker, N. Bencomo, Y. Brun, B. Cukic, et al.: Software Engineering for Self-Adaptive Systems: A Roadmap. In: Software Engineering for Self-Adaptive Systems, LNCS, Vol. 5525, pp. 1-26. Springer, 2009. <http://www.springerlink.com/content/h380742725036312/>
- [44] VDI: CPS – Cyber-Physical Systems. März 2012. [http://www.vdi.de/6930.0.html?no\\_cache=1&tx\\_ttnews%5Btt\\_news%5D=56853](http://www.vdi.de/6930.0.html?no_cache=1&tx_ttnews%5Btt_news%5D=56853)
- [45] VDE: Innovationspartnerschaft AAL – Selbstverständnis. [http://partner.vde.com/bmbf-aal/About\\_us/Pages/default.aspx](http://partner.vde.com/bmbf-aal/About_us/Pages/default.aspx)
- [46] VDE: Innovationspartnerschaft AAL – Steckbriefe: Nordrhein-Westfalen. [http://partner.vde.com/BMBF-AAL/AAL-STECKBRIEFE/BUNDESLAENDER/Pages/Nordrhein\\_Westfahlen.aspx](http://partner.vde.com/BMBF-AAL/AAL-STECKBRIEFE/BUNDESLAENDER/Pages/Nordrhein_Westfahlen.aspx)
- [47] VDE: Innovationspartnerschaft AAL – Living Labs. <http://partner.vde.com/bmbf-aal/AAL-Steckbriefe/Pages/LivingLabs.aspx>
- [48] Deutsche Medienakademie: E-Health, Online-Gesundheit, Ambient Assisted Living – Was ist und bringt das? <http://www.medienakademie-koeln.de/termine/einzelansicht/e-health-online-gesundheit-ambient-assisted-living-was-ist-und-bringt-das.html>
- [49] W. Deiters, A. Hartmann, K. Scherer: Das Projekt SmarterWohnenNRW – IT-gestützte Mehrwertdienste auf der Basis vernetzter Haustechnik. [http://www.ag-seniorenwirtschaft.de/docs%20AAI/1-3-1\\_WolfgangDeiters.pdf](http://www.ag-seniorenwirtschaft.de/docs%20AAI/1-3-1_WolfgangDeiters.pdf)
- [50] Fraunhofer ISST: Referenzprojekte Ambient Assisted Living. <http://www.isst.fraunhofer.de/geschaeftsfelder/gfaal/referenzprojekte/>
- [51] Fraunhofer: inHaus aktuell. <http://www.inhaus.fraunhofer.de/de/inHaus-aktuell.html>
- [52] L. Berg: Das Haus denkt mit. Berliner Zeitung, Juni 2012. <http://www.berliner-zeitung.de/teil-3--wohnen/smart-home-das-haus-denkt-mit,16311104,16350168.html>
- [53] SmartHome Paderborn e.V. <http://www.smarthomepaderborn.de/index.html>
- [54] Fraunhofer ISST: Das Projekt SMILEY. <http://www.isst.fraunhofer.de/geschaeftsfelder/gfaal/referenzprojekte/smiley/index.jsp>
- [55] BMWi: smartOR. <http://www.autonomik.de/de/smartor.php>
- [56] smartOR-Projekt. <http://www.smartor.de/>
- [57] Institut Arbeit und Technik: E-Health@Home-Landkarte. <http://www.iat.eu/ehealth/>
- [58] E-Energy: Modellregionen. <http://www.e-energy.de/de/modellregionen.php>
- [59] E-Energy: E-DeMa. <http://www.e-energy.de/de/e-dema.php>
- [60] E-DeMa-Projekt. <http://www.e-dema.de/de/index.html>
- [61] E-Energy: Smart Watts. [http://www.e-energy.de/de/smart\\_watts.php](http://www.e-energy.de/de/smart_watts.php)
- [62] Smart Watts-Projekt. <http://www.smartwatts.de/>

- [63] DFKI: Prof. Wahlster überreicht Hermes Award 2012 bei der HANNOVER MESSE. April 2012.  
[http://www.dfki.de/web/presse/pressemitteilungen\\_intern/2012/prof-wahlster-uberreicht-hermes-award-2012-bei-der-hannover-messe/](http://www.dfki.de/web/presse/pressemitteilungen_intern/2012/prof-wahlster-uberreicht-hermes-award-2012-bei-der-hannover-messe/)
- [64] Phoenix Contact: Detect and Evaluate Lightning Strikes – LM-S Lightning Monitoring System.  
[http://www.phoenixcontact.com/global/products/63732\\_63768.htm](http://www.phoenixcontact.com/global/products/63732_63768.htm)
- [65] GRID4EU-Projekt. <http://www.grid4eu.eu/>
- [66] Exzellenz.NRW: Highlights IKT + Smart Cities. <http://www.exzellenz.nrw.de/ikt-neu/smart-cities-universal-home/clusterinfo/highlights/>
- [67] Exzellenz.NRW: Universal Home Lab bietet Vernetzung für das Wohnen der Zukunft.  
<http://www.exzellenz.nrw.de/ikt-neu/smart-cities-universal-home/clusterinfo/highlights/universal-home-lab-bietet-vernetzung-fuer-das-wohnen-der-zukunft/>
- [68] Exzellenz.NRW: Smart Grids: Neuer Echtzeitsimulator zur Simulation von elektrischen Übertragungs- und Verteilnetzen in Aachen. <http://www.exzellenz.nrw.de/nocl/smart-cities-universal-home/clusterinfo/highlights/smart-grids-neuer-echtzeitsimulator-zur-simulation-von-elektrischen-uebertragungs-und-verteilnetzen-in-aachen/>
- [69] VDE: Innovationspartnerschaft AAL – Fachtagung „Räume der Zukunft“. [http://partner.vde.com/bmbf-aal/Veranstaltungen/extern/Pages/2012-08\\_FachtagungRaeumederZukunft.aspx](http://partner.vde.com/bmbf-aal/Veranstaltungen/extern/Pages/2012-08_FachtagungRaeumederZukunft.aspx)
- [70] VDE: Innovationspartnerschaft AAL – RehaCare Kongress 2012: Wohn(t)raum – Selbstbestimmtes Wohnen und Pflege zuhause. [http://partner.vde.com/bmbf-aal/Veranstaltungen/extern/Pages/2012-07\\_RehaCare2013.aspx](http://partner.vde.com/bmbf-aal/Veranstaltungen/extern/Pages/2012-07_RehaCare2013.aspx)
- [71] Smart Living GmbH & Co. KG. <http://www.smartliving-gmbh.de/>
- [72] Die Bundesregierung: Industrie 4.0. <http://www.hightech-strategie.de/de/2676.php>
- [73] BMWi: next generation media.  
[http://www.bitkom.org/files/documents/next\\_generation\\_media\\_flyer.pdf](http://www.bitkom.org/files/documents/next_generation_media_flyer.pdf)
- [74] LAENDmarKS-Projekt. <http://www.laendmarks.com/>
- [75] Fraunhofer IML: Lognet Assist.  
[http://www.oid.fraunhofer.de/de/Forschungsprojekte/abgeschlossene\\_projekte/LognetAssist.html](http://www.oid.fraunhofer.de/de/Forschungsprojekte/abgeschlossene_projekte/LognetAssist.html)
- [76] RWTH Aachen: Sm@rt Logistics. [http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/8c86bc9c4d912183c12575c40048812a/projektbeispiel\\_f\\_smart\\_logistics\\_att.pdf](http://www.wzl.rwth-aachen.de/de/8c86bc9c4d912183c12575c40048812a/projektbeispiel_f_smart_logistics_att.pdf)
- [77] RWTH Aachen: Cluster of Excellence “Integrative Production Technology for High-Wage Countries”.  
<http://www.production-research.de>
- [78] RWTH Aachen: Self-Optimising Production Systems. [http://www.production-research.de/\\_C12577F20052BDC7.nsf/html/de\\_ad6a66f7601d27a3c1257829005261b3.html](http://www.production-research.de/_C12577F20052BDC7.nsf/html/de_ad6a66f7601d27a3c1257829005261b3.html)
- [79] Spitzencluster it's OWL: Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe. <http://www.its-owl.de>
- [80] Spitzencluster it's OWL: Die Projekte. <http://www.its-owl.de/technologiecluster/projekte/uebersicht.php?navanchor=1010023>
- [81] BMWi: AUTONOMIK – Auf einen Blick. <http://www.autonomik.de>
- [82] BMWi: AUTONOMIK – rorarob. <http://www.autonomik.de/de/rorarob.php>
- [83] BMWi: AUTONOMIK – simKMU. <http://www.autonomik.de/de/simkmu.php>
- [84] BMWi: AUTONOMIK – RAN – RFID based Automotive Network. <http://www.autonomik.de/de/ran.php>
- [85] BMBF: 32. Bekanntmachung „Intelligente Vernetzung in der Produktion – Ein Beitrag zum Zukunftsprojekt „Industrie 4.0““. [http://www.produktionsforschung.de/national/bekanntmachungen/UCM01\\_000913](http://www.produktionsforschung.de/national/bekanntmachungen/UCM01_000913)
- [86] Hochschule Ostwestfalen-Lippe: Lemgoer Modellfabrik. <http://www.hs-owl.de/init/research/lemgoer-modellfabrik.html>

- [87] EffizienzCluster LogistikRuhr. <http://www.effizienzcluster.de/de/index.php>
- [88] Universität Duisburg-Essen: Tracing intelligenter LogistikObjekte. <http://www.tilo.uni-due.de/>
- [89] smaRTI-Projekt. <http://www.smart-rti.de/>
- [90] Exzellenz.NRW: automotive meets communications. <http://www.exzellenz.nrw.de/nocl/automotive-meets-communications-amc/cross-innovationen/automotive-meets-communications/>
- [91] Active Safety Car-Projekt. <http://www.active-safety-car.de>
- [92] Ruhr-Universität Bochum: Das smarte Miteinander schützen – RUB-Forscher machen Elektronmobilität sicher – Start des BMWi-Projekts „Secure eMobility“. <http://aktuell.ruhr-uni-bochum.de/pm2011/pm00366.html.de>
- [93] AutoCluster.NRW: Übersicht ausgewählter Forschungseinrichtungen und forschender Unternehmen in Nordrhein-Westfalen. [http://www.autocluster.nrw.de/fileadmin/images/PDF/Forschungslandschaft\\_NRW.pdf](http://www.autocluster.nrw.de/fileadmin/images/PDF/Forschungslandschaft_NRW.pdf)
- [94] Forschungsinitiative Ko-FAS. <http://www.ko-fas.de/>
- [95] simTD-Projekt. <http://www.simtd.de>

## ÜBER IKT.NRW

IKT.NRW vernetzt die Akteure der nordrhein-westfälischen IKT-Branche:

Wirtschaft, Wissenschaft und Politik treiben gemeinsam die Weiterentwicklung des IKT-Marktes in Nordrhein-Westfalen voran. Ziel von IKT.NRW ist es, die Stärken der Branche, Synergiepotenziale und zukunftssträchtige Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren und Innovationsprozesse aktiv zu fördern. Darüber hinaus wird die öffentliche Wahrnehmung für den IKT-Standort NRW geschärft.

Das Clustermanagement IKT.NRW führt beispielsweise Kooperations- und Netzwerk-Veranstaltungen durch, unterstützt Unternehmen bei Messe-Teilnahmen und Unternehmerreisen und veröffentlicht regelmäßig Branchen- und Trendreports. Offene Innovationsprozesse sind ein wichtiger Bestandteil im Selbstverständnis von IKT.NRW. Ideen und Kooperationsanfragen sind deshalb immer willkommen.



EUROPÄISCHE UNION  
Investition in unsere Zukunft  
Europäischer Fonds  
für regionale Entwicklung

**Ziel2.NRW**  
Regionale Wettbewerbsfähigkeit und Beschäftigung