

CYBER PHYSICAL DEVICES – DIE SCHNITTSTELLE ZWISCHEN CYBERSPACE UND REALER WELT

NORDRHEIN-WESTFALEN AUF DEM WEG ZUM DIGITALEN INDUSTRIELAND

IKT.NRW

SCHRIFTENREIHE

Die Studie "**Cyber Physical Devices – Die Schnittstelle zwischen Cyberspace und realer Welt**" erläutert die Herausforderungen und Chancen an den technischen Schnittstellen und den Mensch-Maschine-Schnittstellen in Cyber Physical Systems.

Autoren

Bernd Kleinjohann
Lisa Kleinjohann
Gregor Engels

Kontakt

Bernd Kleinjohann
C-LAB, Universität Paderborn
Fürstenallee 11
33102 Paderborn
bernd.kleinjohann@c-lab.de
<http://www.c-lab.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, Dezember 2013

INHALT

01	Cyber Physical Devices	4
	Architektur und Anforderungen	6
	Sensorik und Aktorik	8
	Eingebettete Systeme als CPDs	10
	Verteilte CPDs	11
	Autonome und selbstorganisierende CPDs	12
	Einsatzgebiete von CPDs	14
02	Device-Schnittstellen	16
	Die Mensch-Maschine-Schnittstelle	18
	Die technische Schnittstelle	20
03	Dienste aus Sicht der Devices	24
	Ereignisgetriebene Dienste	27
	Periodische Dienste	30
	Dienste zur Selbstoptimierung	32
04	Anwendungsbereiche und Geschäftsfelder	35
	Energieversorgung	37
	Mobilität	39
	Automatisierung	41
	Ubiquitous Computing	44
05	Fazit	46
06	Anhang:	
	Das Umfeld von Cyber Physical Systems in NRW	50
	A.1 Energieversorgung	52
	A.2 Mobilität	57
	A.3 Automatisierung	62
	A.4 Ubiquitous Computing	67
	Literaturverzeichnis	71

01 CYBER PHYSICAL DEVICES

Die rasante Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnik hat die Entwicklung neuer Anwendungsfelder eröffnet. Die Leistungsfähigkeit insbesondere der Kommunikationstechnik erlaubt mittlerweile auch die effiziente Übertragung und verteilte Verarbeitung von physikalischen Daten. Physikalische Daten sind zeitabhängig und müssen meist in Echtzeit verarbeitet werden. Das Einhalten von Zeitschranken ist die Voraussetzung für das getrennte Erfassen, Versenden und Verarbeiten von physikalischen Daten.

Vor diesem Hintergrund hat Prof. Edward A. Lee, UC Berkeley, USA, etwa 2006 im Rahmen der universitätsübergreifenden CPS Steering Group den Begriff **Cyber Physical Systems (CPS)** miteingeführt [Lee06, Lee08, CPS08, LS11]. Ursprünglich wurde mit dem Begriff die situationsabhängige Kooperation von echtzeitfähigen Anwendungen bezeichnet. Die Verwendung von echtzeitfähigen Diensten aus dem Internet wurde erst später unter dem CPS-Begriff diskutiert. Ein Überblick über CPS ist in [GB12, BIT10, IKT13] zu finden.

Die Integration von (fast) beliebigen Gegenständen in die Informationsverarbeitung wurde bereits um 1999 von Kevin Ashton vom MIT mit dem Begriff „Internet of Things“ bezeichnet [Ash2009]. Es werden Gegenstände (Physical Devices), die im Allgemeinen nur sehr einfache Funktionen haben, mit dem Internet verbunden. Hierzu gehören z. B. mobile Schalter, die das Raumlicht schalten und die für die Funkübertragung benötigte Energie aus der Betätigung des Schalters beziehen (Energy Harvesting). Die Energie kann z. B. durch piezoelektrische Effekte oder durch Induktion erzeugt werden. CPS und Internet of Things (Internet der Dinge) bezeichnen im Wesentlichen die gleichen Systemtypen und Anwendungen. Bei CPS steht allerdings der Gedanke der Echtzeitfähigkeit stärker im Vordergrund.

CPS interagieren mit der realen Welt. Sie müssen daher Schnittstellen zwischen dem Cyberspace und der realen Welt haben. Den Endgeräten, die die Schnittstelle zwischen der realen, physikalischen Welt und dem Cyberspace realisieren, kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Sie werden in dieser Studie in Anlehnung an den Begriff Physical Device als **Cyber Physical Devices (CPD)** bezeichnet [GK10, Tem11]. In einem CPS arbeiten meist mehrere, teils auch sehr unterschiedliche CPDs an verschiedenen physikalischen Orten zusammen. CPDs können Dienste, die in einem CPS angeboten werden, nutzen. CPS können auch hierarchisch strukturiert sein. Ein CPS arbeitet in diesem Fall als CPD für ein übergeordnetes CPS. Neben der Erfassung von Daten können CPDs auch aktiv in die reale Welt eingreifen. Bei Manipulationen der realen Welt muss berücksichtigt werden, dass die physikalische Umwelt nach festen Regeln und Gesetzen reagiert. Im Gegensatz zu menschlichen Benutzern, die versuchen Systemfehler weitgehend durch Anpassung auszugleichen, kann dies von der physikalischen Umwelt nicht erwartet werden. CPDs, die die physikalische Umgebung erfassen und manipulieren, verzeihen daher weniger Fehler. Insbesondere können auch Fehler bei der Einhaltung von Echtzeitanforderungen zu signifikanten Fehlfunktionen und Schäden in der Umwelt führen. Ein „undo“ ist in den meisten Fällen nicht möglich.

ARCHITEKTUR UND ANFORDERUNGEN

Ein CPD kann CPS-Dienste, die auf einer CPS-Infrastruktur ausgeführt werden, nutzen. Der Datenaustausch untereinander bzw. zwischen den Endgeräten und den CPS-Diensten erfolgt über ein CPS-Kommunikationsnetz. In den Endgeräten können ggf. lokale Dienste ausgeführt werden. Ein CPD ist in dieser Architektur als Endgerät zu verstehen, das physikalische Daten im Netzwerk zur Verfügung stellt, Kommunikations- und CPS-Dienste nutzt und ggf. die Manipulation der realen Umwelt ermöglicht. CPDs können sich ad hoc untereinander vernetzen oder ad hoc Dienste in der CPS-Infrastruktur anfordern und verwenden. Abbildung 1 zeigt die Architektur eines CPS und die Anbindung unterschiedlicher CPDs wie Smartphones, Fahrzeuge oder Produktionsanlagen an ein CPS.

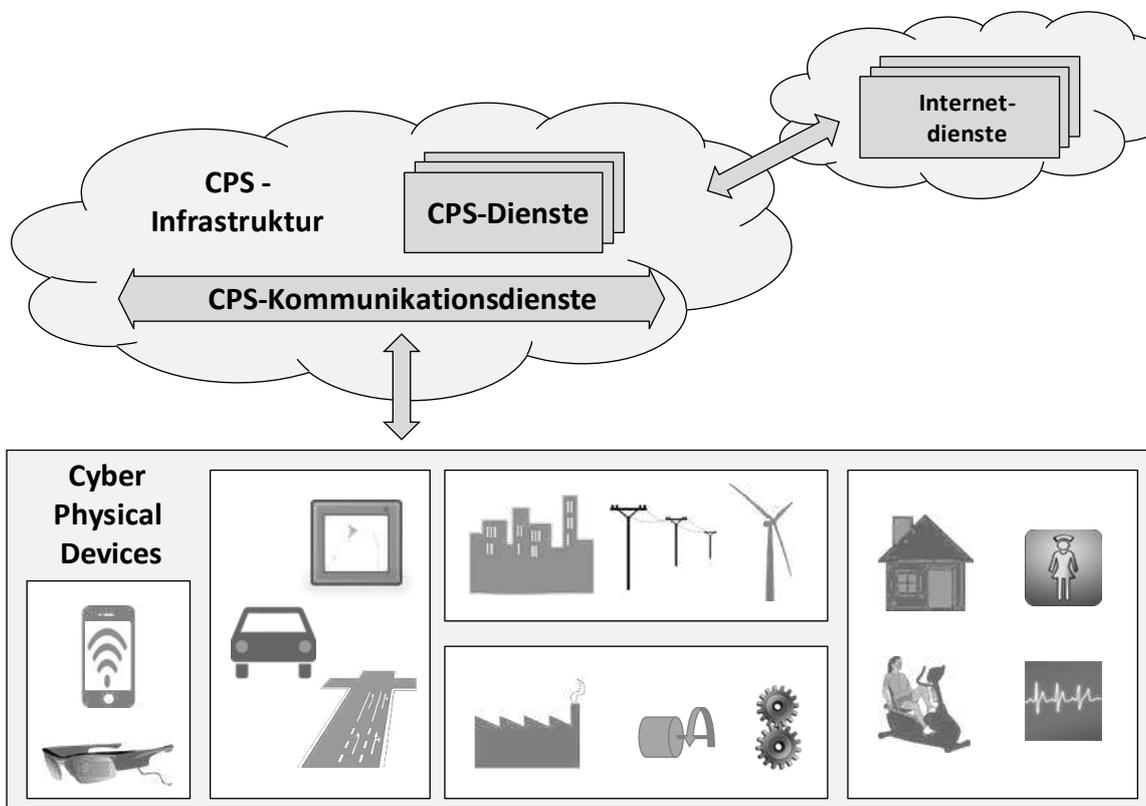


Abbildung 1: Cyber Physical System

Technologisch können CPDs danach unterschieden werden, ob sie

- Messwerte erfassen,
- Manipulationen der Umwelt durchführen,
- Ein-/Ausgabeschnittstellen zum Anwender realisieren,
- lokale Dienste (z. B. Regelungen, Berechnung von Routen) ausführen.

Je nach Anwendung sind unterschiedliche Kombinationen sinnvoll.

CPS-Anwendungen und damit auch die CPDs müssen sehr viel stärkeren Anforderungen genügen als es bei Internetdiensten üblich ist. Von CPS und CPDs werden daher zusätzliche und strengere Eigenschaften gefordert. Folglich müssen CPS und CPDs sowohl bezüglich ihrer Funktion als auch bezüglich ihrer Eigenschaften sorgfältig entworfen werden. Von den Rahmenbedingungen hängt ab, welche der folgenden Eigenschaften gefordert werden:

- **Echtzeitverhalten:** Das Erfassen von physikalischen Daten und das Setzen von Aktorwerten durch CPDs müssen innerhalb von vordefinierten Zeitschranken möglich sein.
- **Funktionssicherheit:** Viele Anwendungen sind sicherheitskritisch und können im Fehlerfall ernsthafte Schäden verursachen.
- **Angriffs- und Datensicherheit:** Personenbezogene, vertrauliche Daten müssen schon im CPD sicher vor unberechtigter Nutzung geschützt werden.
- **Zuverlässigkeit:** CPDs werden häufig in produktiven Umgebungen eingesetzt und müssen daher ohne große Ausfallzeiten funktionieren.
- **Energieeffizienz:** CPDs, die als mobile Geräte eingesetzt werden und nicht in einer Umgebung verbaut sind, sind in ihrem Energiebedarf eingeschränkt.
- **Akzeptanz:** Die Interaktion zwischen CPDs und Anwendern muss benutzerfreundlich gestaltet werden und die Entscheidungen eines CPS müssen durch das CPD dem Anwender transparent und nachvollziehbar dargestellt werden.

Die geforderten Eigenschaften müssen von Beginn an bei der Entwicklung innovativer CPDs berücksichtigt werden.

SENSORIK UND AKTORIK

Die eingesetzten Technologien und die Komplexität der CPDs hängen ebenso wie die Anforderungen an die CPS-Dienste ganz wesentlich von der Anwendung ab und können sehr unterschiedlich sein. Im einfachsten Fall misst ein Sensor einen Wert der Umwelt (Wetterdaten, Verkehrsaufkommen, ...) und stellt diese Daten im Netzwerk zur Verfügung. Diese aus Sicht des CPD sehr einfache Funktion kann jedoch technologisch sehr anspruchsvoll werden, wenn beispielsweise die neueste Sensortechnologie zur Erfassung von Blutwerten oder Vitalwerten aus dem Inneren eines menschlichen Körpers eingesetzt wird. Zur Messwerterfassung können auch ganze Sensornetze als CPD verwendet werden, beispielsweise zur Waldbranderkennung. Aus Sicht des übergeordneten CPS ist hier das gesamte Sensornetzwerk nur als ein CPD zur Erfassung von physikalischen Daten zu betrachten, da es meist mit einer proprietären internen Technik arbeitet. Ein Sensornetzwerk kann aber ebenfalls als CPS aufgefasst werden. Die einzelnen Sensorknoten sind dann die CPDs des CPS Sensornetzwerk. Zur Auswertung der Daten eines Sensornetzwerkes können verfügbare CPS-Dienste verwendet werden.

Bei der Entwicklung von Sensoren, die in CPDs eingesetzt werden, sind zwei grundsätzliche Richtungen sichtbar, die stark von der jeweiligen Anwendung bzw. der adressierten Kundengruppe geprägt sind. Durch die weite Verbreitung von Smartphones ist jede Person zu fast jedem Zeitpunkt mit einem Netzwerk verbunden. Durch die in Smartphones verbauten Sensoren können diese dann auch als CPDs verwendet werden. Werden attraktive Zusatzgeräte mit den dazu passenden Diensten entwickelt, so kann sehr schnell eine hohe Marktdurchdringung erreicht werden. Dies wiederum führt schnell zu Datensätzen, die die Qualität der CPS-Dienste steigern. Diese positive Rückkoppelung wird zu einer hohen Dynamik für innovative CPDs führen. Auf CPD-Seite können jedoch nur Sensor- und Aktortechniken eingesetzt werden, die den Kostenrahmen von Privatkunden nicht sprengen. Andererseits führen die zu erwartenden hohen Stückzahlen zu preiswerteren CPDs. Dieser Markt könnte sich analog zur früheren Verbreitung von PCs oder von Computerspielen (Grafik) entwickeln.

Bei der Entwicklung von High-End-CPDs spielen die Kosten eine weniger zentrale Rolle. Hier wird angeboten, was technisch umsetzbar ist. Neben Luft- und Raumfahrtanwendungen werden auch in der Militärtechnik Spitzentechnologien eingesetzt. Hierzu gehören CPDs zur Aufklärung, zur Auswertung multispektraler Bilder oder Steuerung autonomer Fahrzeuge. Auch medizinische Anwendungen nutzen mittlerweile fortgeschrittene Sensortechniken. Durch CPDs können z. B. Konzentrationen von Blutzucker etc. bestimmt werden.

Zu Sensoren, die komplexere Informationen liefern, gehören bildgebende Sensoren wie Kameras, Echolote, Radarsysteme, Röntgensysteme oder auch Sensoren, die Audiosignale der verschiedensten Frequenzbereiche liefern. Aus den von diesen Sensoren erfassten Daten können die unterschiedlichsten physikalischen Größen extrahiert werden. Aus dem Videostrom, der z. B. von einer Verkehrskamera aufgenommen wird, kann neben dem Verkehrsaufkommen auch die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs errechnet werden. Aus markanten Geräuschen eines Audiostroms kann z. B. bestimmt werden, ob eine Materialprobe zu reißen droht. Für all diese Anwendungen ist erheblicher Rechenaufwand zur Analyse der Sensordaten notwendig. Ein eigenständiger CPS-Dienst,

der die komplexen Informationen analysiert, erscheint bei diesen Sensortypen sinnvoll. Meist sind die zu extrahierenden Informationen zum Entwurfszeitpunkt noch nicht vollständig spezifiziert und müssen zu einem späteren Zeitpunkt durch zusätzliche Analysetechniken berechnet werden. Der anwendungsübergreifende Einsatz dieser Sensoren kann hierbei unterstützt werden, indem nachträglich maßgeschneiderte Dienste entwickelt und angeboten werden.

Übliche Aktoren wie Motoren werden meist über einfache Regelungen z. B. zur Anpassung der Umdrehungszahl oder zumindest über Steuerungen wie z. B. Licht an-/ausschalten angesprochen. Die Entwicklung von technisch fortgeschrittenen Aktoren ist in der Mikro- bzw. Nanosystemtechnik zu erwarten. Durch die Miniaturisierung von Aktoren werden sich vor allem in der Medizin Anwendungen entwickeln, die heute noch nicht abzusehen sind. Ein weiterer Entwicklungsschub ist zu erwarten, wenn komplexe Endgeräte als Aktoren im Netz zur Verfügung stehen. In den letzten Jahren hat die 3D-Drucktechnik erhebliche Fortschritte gemacht. Neben dem industriellen Einsatz in der Produktionstechnik hat sich eine Bewegung unter dem Namen FabLabs entwickelt, in der 3D-Drucker und andere Produktionsmaschinen privaten Anwendern in ihrer Wohnumgebung zur Verfügung gestellt werden. Die Grundlage dieser Bewegung wurde um 2005 von Neil Gershenfeld am MIT entwickelt [Ger05]. Mittlerweile existieren international mehrere Dutzend FabLabs (davon ca. 15 in Deutschland), die alle auf der Basis einer gemeinsamen Charta arbeiten. Aus CPS-Sicht könnten die in der Automatisierung entwickelten Dienste so weiterentwickelt werden, dass sie auch von privaten Anwendern genutzt werden können.

EINGEBETTETE SYSTEME ALS CPDs

Technologisch sind CPDs sehr eng mit eingebetteten Systemen verwandt. Nachdem es aufgrund zunehmender Rechenleistung möglich wurde, Regelungen statt in analoger Technik auch in digitaler Technik zu realisieren, konnten immer komplexere Aufgabenstellungen in Echtzeit durch Mikrocontroller oder Steuergeräte realisiert werden. Mittlerweile werden viele Funktionen und Produkteigenschaften durch eingebettete Systeme realisiert. Die Bandbreite reicht hier von der Steuerung von Haushaltsgeräten bis zu komplexen Ablaufsteuerungen in der Prozesstechnik oder Fahrerassistenzsystemen.

Eine wesentliche Eigenschaft dieser Systeme ist, dass periodisch Messwerte durch Sensoren erfasst und vorverarbeitet werden. Basierend auf den Messwerten werden anschließend durch Regelalgorithmen die Stellwerte für die Aktoren berechnet. Diese Regelalgorithmen werden meistens strukturell und hierarchisch geschachtelt. Die Zeitkonstanten bzw. die Frequenz nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Hierarchiestufe ab (siehe Abschnitt „Periodische Dienste“, S. 30). Im Laufe der weiteren Entwicklung sind anwendungsspezifische Kommunikationssysteme, wie z. B. Feldbussysteme, entwickelt worden, sodass die einzelnen Verarbeitungsschritte in einem vorgegebenen System von Steuergeräten räumlich getrennt realisiert werden können. Durch CPS wird es nun möglich, die einzelnen Verarbeitungsschritte nicht nur innerhalb eines abgeschlossenen eingebetteten Systems zu realisieren, sondern sie können analog zu Internetdiensten im Netz, in der CPS-Infrastruktur, verteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Position, an der ein Messwert erfasst wird oder an der ein Aktor eingebaut wird, durch physikalische Randbedingungen vorgegeben sein kann. Die Beschleunigung eines Fahrzeugs sollte z. B. möglichst im Masseschwerpunkt erfasst werden. Diese Randbedingungen haben zur Entwicklung von intelligenten Sensoren geführt, die nach der Vorverarbeitung ihre Messwerte auf einem Feldbus zur weiteren Verwendung zur Verfügung stellen.

Die Basis jedes CPS-Dienstes sind die physikalischen Daten, die im CPS zur Verfügung stehen und verarbeitet werden können. Durch die Kombination von Mikro- und Nanosystemtechnik ist die Erfassung einer Vielzahl von physikalischen Messwerten möglich. Durch die Integration von kleinen Massen oder Strukturen, die Magnetfelder erfassen, können z. B. Translations- und Rotationsbewegungen erfasst werden. Durch die zusätzliche Integration von kleinen Motoren oder Pumpen können kleine vernetzte CPDs für medizinische Anwendungen realisiert werden, die implantiert werden können (z. B. Insulinpumpen). Die Mikrosystemtechnik ermöglicht es auch, die unterschiedlichsten Sensoren in einem Modul/Baustein zu integrieren. Da viele Messwerte physikalisch voneinander abhängen, können die Messungen unterschiedlicher Werte so verrechnet (fusioniert) werden, dass genauere Messergebnisse erreicht werden können. Die hohe Integration von Elektronik, miniaturisierten Sensoren und Aktoren durch die Mikro- und Nanosystemtechnik ist für die Weiterentwicklung von CPDs als Schlüsseltechnologie zu betrachten.

VERTEILTE CPDs

In vielen Fällen werden eingebettete Systeme, die ggf. intern bereits hierarchisch aufgebaut und vernetzt sind, als CPDs in einem übergeordneten CPS verwendet. Beispiele hierfür sind Fahrzeuge, Flugzeuge oder Werkzeugmaschinen. Teilweise interagieren bis zurzeit weit über hundert Steuergeräten in einer Fertigungsanlage, einem Fahrzeug oder einem Flugzeug. Die eingesetzten eingebetteten Systeme haben meist eine statische Struktur und erfüllen fest vorgegebene Aufgaben mit einem fest vorgegebenen Zeitverhalten. Derartige verteilte eingebettete Systeme können über ein Netzwerk auf die Dienste eines CPS zugreifen, um sich zu koordinieren, ihre Funktion zu verbessern oder um Sensordaten oder Manipulationen in der Umwelt im Netzwerk zur Verfügung zu stellen.

Zum einen muss die aus Sicherheitsgründen bisher meist statische Struktur aufgebrochen werden, um CPS-Dienste in vollem Umfang zu nutzen. Zum anderen müssen die CPS-Dienste und die Kommunikation verlässlich realisiert werden, um den Sicherheitsanforderungen der eingebetteten Systeme zu genügen. Eigenschaften, die üblicherweise in eingebetteten Systemen garantiert werden müssen (Safety, Dependability, Ausfallsicherheit, ...) [ALRL04], übertragen sich daher auf die CPS und CPDs. Dies gilt ebenso für die beim Entwurf von CPDs verwendeten Techniken. Hier können etablierte Techniken aus dem Entwurf von eingebetteten Systemen auf den Entwurf von CPS und CPDs übertragen werden. Im Flugzeug- oder Automobilbereich existieren beispielsweise ausführliche Sicherheitsstandards und Regularien, die beim Entwurf berücksichtigt werden müssen [EAS13, ISO13].

Ein Ansatz, die geforderte Sicherheit (Safety) beim Entwurf von CPDs zu erreichen, ist, dass die CPDs zu jedem Zeitpunkt ein Verhalten kennen, das keine oder nur geringe Schäden verursacht (fail-safe, fail-secure, fail-operational). Ausfälle von CPS-Diensten oder die Verspätung von Daten können so abgefangen werden. Hierzu müssen die Devices jedoch in gewisser Weise in die Zukunft schauen können (Prädiktion), um das Verhalten von kooperierenden Teilsystemen abschätzen zu können.

Gelingt eine teilweise Automatisierung des Entwurfs, der die Einhaltung der geforderten Eigenschaften sicherstellt, so können CPS on-the-fly, also für jede spezifische Anfrage, erzeugt oder angepasst werden. Ziel ist es, sich möglichst gut an eine einzelne Anwendung anzupassen und trotzdem die geforderten Eigenschaften zu garantieren.

Auch das Vorhandensein lokaler Intelligenz auf dem CPD, um eigenständig Dienste auszuführen, ist ein Unterscheidungskriterium. Besitzt ein CPD lokale Intelligenz, so werden die auf einem CPD laufenden Dienste üblicherweise an ein CPS angeschlossen. Die in diesem Fall zu beachtenden Zeitkonstanten sind i. Allg. größer als für rudimentäre Funktionen.

AUTONOME UND SELBSTORGANISIERENDE CPDs

Da CPDs aktiv ihre Umwelt durch Sensoren erfassen und Manipulationen in der Umwelt aufgrund von (eigenen) Entscheidungen durchführen können, sollte auch die Entwicklung von autonomen Systemen betrachtet werden. Die in einem CPD realisierten lokalen Dienste können so komplex sein, dass beispielsweise wie in der Robotik ein CPD aus seinen rudimentären Messergebnissen ein komplexes Weltmodell aufbaut und im Netz zur Verfügung stellt. Analog zur Datenerfassung kann lokale Intelligenz in einem CPD genutzt werden, um komplexe Handlungsabläufe selbstständig durchzuführen. Ein extremes Beispiel sind autonome, u. U. humanoide Roboter, die im Rahmen eines CPS als CPD agieren. Allgemein wird von CPDs erwartet, dass sie den Kontext, in dem sie arbeiten, kennen (Context Awareness).

Schon die ursprünglich von Jennings und Wooldridge eingeführten Multiagentensysteme [WJ95] zeigten proaktives Handeln und wurden bereits zur Steuerung von physikalischen Systemen, z. B. am Flughafen Sydney, eingesetzt [RG95]. Die Selbstorganisation von Diensten wurde von IBM im Jahr 2001 unter dem Schlagwort „Autonomic Computing“ bearbeitet [JLNY04, KC03]. Die Grundidee hierbei ist, dass Wartungs-, Konfigurations- und Optimierungsarbeiten sowie Arbeiten zum Selbstschutz weitgehend automatisiert werden. Die Systeme sollten Self-x-Eigenschaften erhalten, wobei Self-x für

- selbst-konfigurierend
- selbst-optimierend
- selbst-heilend
- selbst-schützend

steht. Diese Forderungen können auf autonome CPDs übertragen werden.

Technisch sollte jeder Dienst eines CPDs durch eine zusätzliche Komponente überwacht werden, die dann diese Self-x-Eigenschaften auf der Grundlage eigener Entscheidungen sicherstellt. Der Einsatz von Lern- und Entscheidungsverfahren ist für diese Systeme unverzichtbar. Um 2003 sind diese Eigenschaften in Deutschland unter dem Begriff „Organic Computing“ (ITG/VDE, DFG SPP Organic Computing) [MSP13] auf Systeme übertragen worden, die in einer physikalischen Umgebung arbeiten. Es wurden Beispiele aus der Automatisierung, der Verwaltung von Rechnerressourcen oder zur Verkehrssteuerung betrachtet. Zur Realisierung von Self-x-Eigenschaften wurden hier auch Architekturen (Observer-Controller-Architekturen) zur Überwachung von Diensten entwickelt (siehe auch Abschnitt „Dienste zur Selbstoptimierung“, S. 32). Die Paradigmen zur Lösung stammten meistens aus dem soziobiologischen Umfeld. Es wurden meistens vollständig dezentrale Systeme, die nur aus CPDs bestehen, betrachtet. Es bieten sich aber auch Architekturen an, bei denen der Dienst auf einem CPD ausgeführt wird, während der Observer in der CPS-Infrastruktur realisiert ist.

Die Paradigmen zur Realisierung von Self-x-Eigenschaften stammen meistens aus dem soziobiologischen Umfeld. Als „Vorbild“ dienen häufig die Wirtschaft, Ameisenverhaltensweisen oder das Immunsystems von Lebewesen. Ein zentrales Thema in diesen Ansätzen ist die Untersuchung von emergentem Verhalten von Systemen, die aus einer großen Anzahl autonomer Teilsysteme bestehen. Die im Rahmen von Organic Computing betrachteten Systeme finden sich größtenteils auch unter der doch breiter aufgestellten CPS-Thematik wieder.

EINSATZGEBIETE VON CPDs

Aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungen ist es schwierig, CPDs zu klassifizieren. Meist werden CPDs nach ihren Einsatzgebieten (Domänen) unterschieden, da viele Systemeigenschaften vom Anwendungsgebiet abhängen. Typischerweise können folgende Anwendungsgebiete unterschieden werden:

- **Energieversorgung:** Unter dem Stichwort Smart Grid wird die dezentrale Verteilung von Energie meist auf Verbraucherebene betrachtet. Ziel ist es, die regenerativen Energien, die in der Fläche erzeugt werden, mit den zunehmend auch dezentral in Privathaushalten stehenden Energiespeichern so zu koordinieren, dass die Energieverteilung optimiert wird. Die Steuerungen zur Verteilung der Energie im Haushalt ebenso wie auf der Mittel- oder Hochspannungsebene können hier als CPDs realisiert werden (siehe auch Abschnitt „Energieversorgung“, S. 37, und A.1, S. 52).
- **Mobilität:** In dieser Domäne werden Anwendungen aus dem Umfeld der Verkehrsleitsysteme betrachtet (Smart Mobility). Auch Servicefunktionen für Fahrzeuge wie autonomes Kreuzungsmanagement oder das Fahren in Kolonnen, um Energie zu sparen, gehören in diese Domäne. Aktuell werden viele Szenarien aus dem Bereich der Elektromobilität betrachtet. Neben der Kommunikation im und zwischen Fahrzeugen (Intra/Inter Vehicle Communication) können in diesem Anwendungsgebiet z. B. die Komponenten der Verkehrsinfrastruktur wie einzelne Sensoren zur Erfassung der Verkehrslage oder Ampelsteuerungen als CPDs verwendet werden (siehe auch Abschnitt „Mobilität“, S. 39, und A.2, S. 57).
- **Automatisierung:** Ziel dieser Anwendungsdomäne ist die Flexibilisierung und die Optimierung der Produktion und Zulieferketten. Die nahtlose Integration von verschiedenen Produktionsschritten, ja ganzen Produktionsanlagen, steht hier im Vordergrund (Smart Factory). Standort- und firmenübergreifend sollen die Produktionsprozesse besser integriert werden. Eine weitere Zielsetzung beschäftigt sich mit der Optimierung der Produktion von kleinen Stückzahlen. Als CPDs können hier z. B. speicherprogrammierbare Steuerungen, Produktionsmaschinen oder auch ganze Produktionsanlagen sowie die Steuerung der Logistik eingesetzt werden (siehe auch Abschnitt „Automatisierung“, S. 41, und A.3, S. 62).
- **Ubiquitous Computing:** Unter dem Begriff „Ubiquitous Computing“ (Allgegenwärtige Informationsverarbeitung), der von Mark Weiser, Xerox PARC, etwa 1991 geprägt wurde [Wei91], werden eine Vielzahl von Anwendungen zusammengefasst, in denen der Computer in den Hintergrund tritt und quasi unsichtbar wird in dem Gerät, mit dem ein Nutzer interagiert. Die Steuerung zur Energieverteilung in einem Haus beispielsweise kann auch für weitere Servicefunktionen verwendet werden (Smart Home). Die automatische Steuerung von Fenstern, Haushaltsgeräten oder Heizungsanlagen (CPDs) gehören hierzu. Im europäischen und nationalen Forschungsumfeld sind diese Ideen (um 2004) unter dem Thema „Ambient Assisted Living“ aufgegriffen worden. Das Wohnumfeld sollte durch Dienste komfortabler werden. Die Domäne Healthcare beschäftigt sich in diesem Kontext damit, kranke und gebrechliche Personen bezüglich ihres Gesundheitszustands zu überwachen. Es sollen Hilfestellungen gegeben werden, um

möglichst lange ein selbstständiges Leben führen zu können. Für diese Unterstützung werden u. a. auch Haushaltsroboter eingesetzt. Ein weiteres Ziel ist die rechtzeitige Erkennung von kritischen und gefährlichen Situationen. Als CPDs können hier Geräte eingesetzt werden, die Vitalfunktionen überwachen (siehe auch Abschnitt „Ubiquitous Computing“, S. 44, und A.4, S. 67).

Die einzelnen Anwendungsfelder sind nicht immer eindeutig voneinander zu trennen. Die Thematik Smart Home, die Dienste zur Kontrolle privater Häuser betrachtet, überschneidet sich z. B. mit der Gesundheitsüberwachung und mit der Energieverteilung (Smart Grid). Der Bereich der Logistik kann sowohl dem Feld Smart Mobility als auch Smart Factory zugeordnet werden. Solche domänenübergreifenden Anwendungen sind gewollt und bieten ein großes Potenzial für innovative Dienste und Kosteneinsparungen bei CPS. Für den Bereich der Mobilität ist ein domänenübergreifendes Beispiel in Abbildung 3 dargestellt.

Die bisher betrachteten Anwendungsfelder erfassen bei weitem nicht alle Einsatzbereiche von CPDs. Die im „normalen“ Leben allgegenwärtige Datenverarbeitung (Ubiquitous Computing) über Smartphones in Verbindung mit Zusatzgeräten wird sich in Zukunft auch verstärkt auf physikalische Daten stützen. In diesem Anwendungsgebiet werden sich mit hoher Dynamik neue Dienste entwickeln. Neben den sowieso in Smartphones enthaltenen Sensoren (GPS, Kompass, Beschleunigung, ...) werden zusätzlich angeschlossene Geräte weitere physikalische Daten erfassen. Ein großes Potenzial liegt hier in den kommenden Jahren in der Bildverarbeitung in Verbindung mit Benutzerinteraktion, Lokalisierung und Kontexterkennung. Die von AR-Brillen wie Google Glass [Goo13] aufgenommenen Bilder können zur Erfassung von Umweltdaten genutzt werden. Über Zusatzgeräte, die am Handgelenk getragen werden (iWatch), können Vitalfunktionen wie Herzschlag oder Blutdruck während des Fitnessstrainings erfasst werden. Auf Basis dieser Daten kann dann ein optimales Trainingsprogramm erzeugt und überwacht werden. Es existieren bereits Prototypen von Sportschuhen, die über Drucksensoren den korrekten Bewegungsablauf beim Joggen abhängig von Geländeverlauf überwachen.

CPDs erfüllen in ihren Einsatzgebieten verschiedene Aufgaben und müssen unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Sie sind häufig mithilfe verteilter eingebetteter Systeme realisiert und agieren zunehmend autonom. In allen Einsatzbereichen bilden CPDs mit ihren Sensoren und Aktoren die Schnittstelle eines CPS zur physikalischen Welt und zum Menschen. Auch miteinander bzw. innerhalb eines CPS müssen sie interagieren. Diese Schnittstellenfunktionen werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

02 DEVICE-SCHNITTSTELLEN

CPDs zeichnen sich dadurch aus, dass sie physikalische Werte der Umwelt erfassen können. Durch eine **technische Schnittstelle** müssen daher Sensoren der unterschiedlichsten Technologien angeschlossen werden. Neben Sensoren, die schon von Haus aus digitale Werte liefern wie z. B. GPS-Sensoren und Kameras, müssen auch einfachere Sensoren, die analoge Werte bereitstellen, an ein CPD angeschlossen werden können. Ebenso müssen, abhängig von der Anwendung, Aktoren über die technische Schnittstelle an ein CPD angeschlossen werden können. Die Aktoren und Sensoren sollen in einem CPS von anderen CPDs oder CPS-Diensten erreichbar sein. CPDs sind daher meist über echtzeitfähige Kommunikationsdienste untereinander oder mit CPS-Diensten, die durch eine CPS-Infrastruktur ausgeführt werden, verbunden. CPDs können eng vernetzt sein und müssen daher über ihre technische Schnittstelle auf CPS-Kommunikationsdienste zugreifen (siehe Abbildung 2).

In CPS wird auch die dynamische Vernetzung von komplexen Systemen, wie z. B. eingebetteten Systemen, unter Echtzeitbedingungen betrachtet. Von einfachen eingebetteten Systemen zur Steuerung von Motoren bis zur Vernetzung ganzer Fahrzeuge oder Produktionsanlagen reicht die Komplexität der in CPS betrachteten CPDs.

CPDs können durch sehr unterschiedliche Techniken/Technologien realisiert werden. Neben den in der Consumer-Elektronik verbreiteten Endgeräten (z. B. Smartphones, Tablets) werden häufig mechatronische Systeme (z. B. Fahrzeuge, Produktionsmaschinen) als CPDs eingesetzt. Mechatronische Systeme zeichnen sich durch eine enge Kopplung von mechanischen, elektrotechnischen und informationstechnischen Komponenten aus. Auch Geräte der Mikrosystemtechnik (z. B. Herzschrittmacher) und Sensornetzwerke (z. B. zur Waldbranderkennung) werden als CPDs eingesetzt. Die technische Schnittstelle muss sich an die jeweils verwendete Technologie anpassen, um über lokale Netzwerke mit den Netzwerken eines CPS verbunden zu werden.

CPDs erfassen nicht nur physikalische Daten und manipulieren die Umwelt, sie interagieren auch mit Menschen. Bei einem Navigationssystem werden einem Anwender Ratschläge erteilt. Auch die Manipulation der Umwelt geht letztendlich auf Anweisungen zurück, die von einem Menschen gegeben werden. Die **Mensch-Maschine-Schnittstelle** ist daher ein wesentlicher Faktor, der beeinflusst, ob die Dienste eines CPS vom Menschen akzeptiert werden (siehe Abbildung 2). Vielfach benötigt ein CPS Zielvorgaben oder zumindest Situationsbewertungen, um seine Aufgabe zu erfüllen. Dem CPS wird mitgeteilt, was (welcher Zustand der Welt) erreicht werden soll. Wie eine Aufgabe abgearbeitet werden soll, wird dem System überlassen. Bei komplexeren Diensten muss der Anwender mit Hilfe des CPDs Vorgaben auf höherem Abstraktionsniveau formulieren. Diese Anforderungen müssen bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle berücksichtigt werden.

Erfasst ein CPD implizit personenbezogene Daten durch Sensoren, so gehört diese Funktionalität ebenfalls zur Mensch-Maschine-Schnittstelle. Der Benutzer interagiert hier mit dem CPD, ohne es direkt zu bemerken. Dies wirft Fragen des Datenschutzes sowie der Sicherheit und Vertraulichkeit auf, wie sie bereits oben angesprochen wurden.

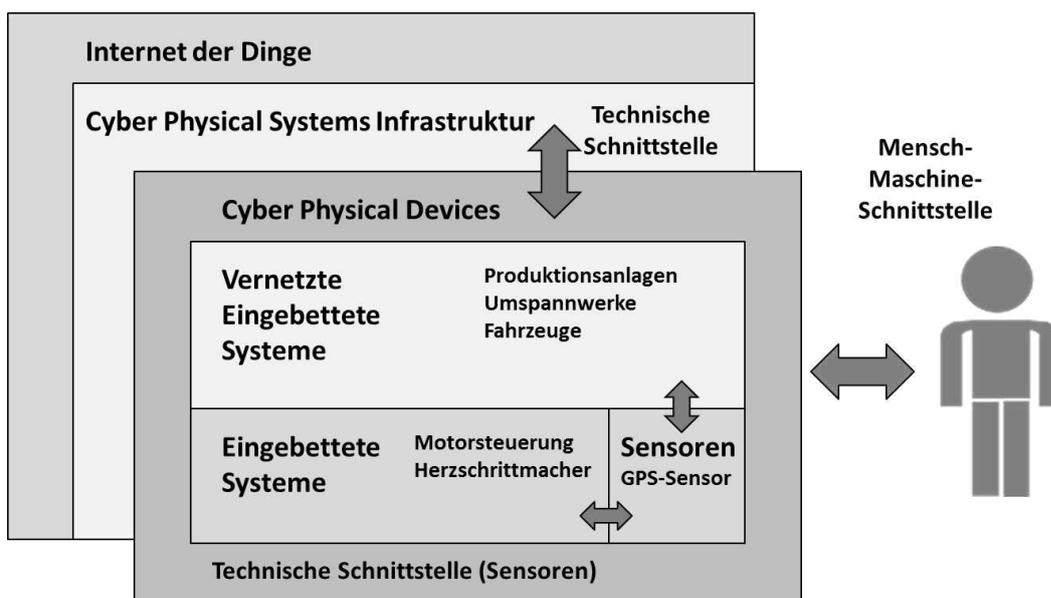


Abbildung 2: Schnittstellen von Cyber Physical Devices

DIE MENSCH-MASCHINE-SCHNITTSTELLE

CPDs werden in vielen unterschiedlichen Umgebungen, wie z. B. im öffentlichen Leben, in Bürouräumen oder im privaten Umfeld, benutzt. Die Anwender befinden sich in speziellen Situationen, denen die Bedienoberfläche eines CPDs angepasst werden muss. Die Anforderungen, die durch die unterschiedlichsten Umgebungen (Büro, Fahrzeug, Leistände, ...) an eine Oberfläche gestellt werden, sind jedoch so verschieden, dass hier keine allgemeinen Aussagen über die konkrete Gestaltung gemacht werden können. Hier müssen Usability-Techniken und Techniken zum barrierefreien Entwurf aus der jeweiligen Anwendungsdomäne eingesetzt werden. Komplexe Interaktionsgeräte, die z. B. mit Force-Feedback arbeiten oder die Nervensignale zur Steuerung von Prothesen nutzen, können selbst als CPDs aufgefasst werden, wenn sie Dienste aus dem CPS nutzen. Es ist zu erwarten, dass sich aufgrund der Analyse von Nervensignalen zusätzliche Interaktionsformen zwischen Mensch und Maschine entwickeln werden.

In vielen Anwendungen muss der Benutzer eine Vielzahl von Ein- und Ausgaben zur Steuerung komplexer Handlungsabläufe verarbeiten. Viele Anwendungen, insbesondere wenn sie auf der Auswertung von mehreren Datenquellen beruhen, sind nicht oder nur schwer für einen Anwender nachvollziehbar. Ein CPS sollte daher in der Lage sein, eine nachvollziehbare Begründung für eine Ausgabe oder einen Ratschlag zu erzeugen. Rät ein Navigationssystem mitten in einer Fahrt dazu, eine Autobahn zu verlassen, so sollte durch Erklärungskomponenten ersichtlich sein, warum dieser Ratschlag erteilt wurde (weil z. B. ein Stau die Änderung der Route nahelegt). Bei der Steuerung von Maschinen können diese Sachzusammenhänge sehr kompliziert und dementsprechend auch nur schwer zu visualisieren sein. Die in technischen Systemen häufig üblichen kryptischen Fehlermeldungen reichen bei CPS nicht aus, da sonst die Akzeptanz der Systeme durch den Anwender sinkt. Der interne Zustand eines CPS sollte dem Anwender in geeignet abstrahierter Form und nachvollziehbar dargestellt werden.

Auf Seite der Eingabe müssen z. B. Ziele, die ein CPS erreichen soll, über ein CPD angegeben werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die Eingabe nicht zu viel Vorwissen erfordert und dass die Auswirkungen eines Dienstes auf die physikalische Umwelt deutlich werden. An dieser Stelle können z. B. on-the-fly generierte an die jeweilige Situation angepasste Oberflächen (Situation Awareness) eingesetzt werden.

CPDs erfassen je nach Aufgabenstellung unterschiedliche personenbezogene Daten. Dies geschieht häufig implizit, ohne dass der Benutzer es bemerkt oder explizit autorisiert. Allein die von Smartphones erfassten Daten können schon heute zu aussagekräftigen Anwenderprofilen zusammengesetzt werden. Durch die zusätzliche Erfassung von physikalischen Daten wird sich dieser Trend noch verstärken. Um den Schutz personenbezogener Daten zu erreichen, müssen schon im CPD entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Daten schon durch ein CPD weitgehend anonymisiert weitergegeben werden. Auch der unberechtigte Zugriff insbesondere auf personenbezogene Daten muss über geeignete Verschlüsselungstechniken verhindert werden [Tem11]. Der Entwurf von eingebetteten Systemen

vernachlässigt diese Fragestellungen oftmals, da eingebettete Systeme bisher meist als abgeschlossene, nicht mit der Umwelt vernetzte Systeme entworfen werden.

Der Einsatz von CPS wird sowohl das private als auch das berufliche Umfeld stärker beeinflussen als es die bisherigen Internetdienste getan haben. Die Gründe hierfür liegen zum einen in der impliziten Erfassung von personenbezogenen Daten durch Sensoren. Zum anderen nimmt ein CPD, das die Umwelt manipuliert und komplexe Handlungsfolgen ausführt, dem Menschen viele (Detail-)Entscheidungen ab. Ein Stück weit wird die Entscheidungshoheit vom Menschen über das CPD an das CPS übertragen. Ob diese Entwicklung von den Anwendern akzeptiert wird und welche gesellschaftlichen, sozialen und juristischen Folgen der Einsatz von CPS und die Verwendung von CPDs in den unterschiedlichen Lebenssituationen haben wird, sollte auf jeden Fall untersucht und durch Feldstudien abgesichert werden. Die gesellschaftliche Brisanz kann zurzeit bei der Diskussion über Flugdrohnen (Parrot Drohne), auch im privaten Bereich, beobachtet werden.

DIE TECHNISCHE SCHNITTSTELLE

Aus technischer Sicht haben CPDs Schnittstellen zur realen Welt und zu Netzwerken, um CPS-Dienste nutzen zu können (siehe Abbildung 2). Zur Erfassung von physikalischen Werten und zur Manipulation der Umwelt sind CPDs mit Aktoren und Sensoren verbunden. Durch die unterschiedlichsten Technologien werden Messwerte in Spannungen und Strömen umgewandelt, die dann digitalisiert und anschließend durch die Software auf einem CPD weiterverarbeitet werden. Die Sensortechnik bietet eine Vielfalt von Sensoren für die Erfassung der unterschiedlichsten physikalischen Größen. Außer den üblichen physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Beschleunigung oder Magnetfelder werden auch spezialisierte Sensoren zur Erfassung von Gaskonzentrationen oder Konzentrationen von in Flüssigkeiten gelösten Substanzen angeboten. Auf die Vielzahl dieser Techniken kann im Rahmen dieser Studie nicht detailliert eingegangen werden. Die Entwicklung der Sensortechnik muss jedoch aus Sicht der CPDs sorgfältig beobachtet werden, da jeder neue Sensortyp ein Potenzial für neue CPS-Dienste eröffnen könnte.

In der Sensortechnik ist eine weitere Tendenz zu beobachten. Die Messwerte vieler Sensoren sind stark von den physikalischen Bedingungen in ihrer Einsatzumgebung abhängig. So können z. B. Temperaturschwankungen, Magnetfeldänderungen etc. die Messwerte stark verfälschen. Um solche Fehlmessungen zu korrigieren, werden z. B. zusätzliche Temperatursensoren eng mit dem eigentlichen Sensor integriert. Die Messwerte dieser internen zusätzlichen Sensoren werden meist nicht extern zugänglich gemacht. Hier liegt ein erhebliches Potenzial zur Erfassung zusätzlicher Messwerte, wenn diese Messungen im Netz zur Verfügung gestellt werden.

Verallgemeinert man diese Entwicklung, so werden in Zukunft durch die Mikrosystemtechnik mehrere Sensoren in einer Baugruppe integriert, die die unterschiedlichsten Werte erfassen können und diese einem CPD zur Verfügung stellen [Hil06]. Kombinierte Sensoren zur Erfassung von Axial- und Drehbewegungen sowie zur Magnetfeldauswertung sind schon heute verfügbar. Besonders interessant wird diese Entwicklung, wenn die Sensoren auch den Ort, an dem sie Messwerte erfassen, detektieren können und die kombinierten Messwerte im Netz zur Verfügung stellen. Die Messwerte könnten dann im CPS weiterverarbeitet werden, ohne dass das CPD die weitere Verarbeitung der Daten durch einen CPS-Dienst kennen muss. Umgekehrt muss ein Dienst im CPS nicht wissen, von welchem Device die Messwerte erfasst wurden. Die Messwerte werden über Broadcast veröffentlicht. Dies erleichtert die automatische Vernetzung von Sensoren, Diensten und Aktoren. Im Umfeld der Automobiltechnik sind solche auf Broadcast basierenden Techniken in den Kfz-lokalen Diensten heute schon üblich. Auch Videoströme werden schon heute über Broadcast verteilt (WebCam).

Das Ansteuern von Aktoren in CPDs erfolgt meist direkt (Elektromotor) oder indirekt (Magnetventile) über das Setzen von elektrischen Größen. Die Spannweite der eingesetzten Techniken reicht von der Mikro- und Nanosystemtechnik, um z. B. Medikamentenpumpen innerhalb eines menschlichen Körpers zu betreiben, bis zur Ansteuerung von Leistungsantrieben. Antriebe, wie sie in (Elektro-)Fahrzeugen verwendet werden, oder hydraulische und pneumatische Systeme, wie sie in Produktionsanlagen verwendet werden, sind gebräuchliche Aktoren. Pneumatische oder

hydraulische Systeme werden indirekt über elektrisch betriebene Magnetventile angesteuert. Auch hier werden häufig Sensoren und Aktoren lokal eng integriert, um z. B. temperaturabhängiges Verhalten von Aktoren zu kompensieren.

Auch mechatronische Systeme stellen eine Form von CPDs dar, wenn sie CPS-Dienste verwenden. Einfache mechatronische Systeme nutzen regelungstechnische Ansätze, um nach außen ein definiertes Verhalten zu zeigen und ihre Handhabung zu vereinfachen. Ansätze der Sensorvorverarbeitung sorgen in mechatronischen Systemen dafür, dass die erfassten Sensorwerte exakter werden und dass Messfehler möglichst vermieden oder zumindest erkannt werden. Auch können aus den Daten komplexer Sensoren, wie z. B. Kameras, die relevanten Daten (z. B. erkannte Straßenschilder) durch Sensorvorverarbeitung extrahiert werden. Der informationstechnische Anteil von mechatronischen Systemen wird meist auf Steuergeräten oder Mikrocontrollern ausgeführt und ist als eingebettetes System realisiert. Regelungstechnische Systeme benötigen einen Sollwert als Eingabe. Dieser Sollwert kann aus Messungen von zusätzlichen Sensoren durch eine übergeordnete Regelschleife oder auch andere Verfahren berechnet werden. Die Berechnung des Sollwertes kann z. B. durch ein CPS unterstützt werden, indem ein entsprechender CPS-Dienst dafür eingesetzt wird. Dies gilt insbesondere dann, wenn in einem komplexeren CPD schon mehrere Aktoren und Sensoren über unterschiedliche Abstraktionsebenen (bezüglich Zeit und Ort) miteinander verbunden sind oder wenn mehrere CPDs kooperieren sollen.

Um seine Funktion zu realisieren, müssen in einem mechatronischen System Daten zwischen Sensoren, Aktoren und einem verteilten eingebetteten System ausgetauscht werden. Die Komplexität der ausgetauschten Daten reicht von einfachen physikalischen Werten zur Steuerung von Motoren bis zu Produktionsplänen für Produktionsanlagen. Sowohl Sensordaten als auch Stellwerte für Aktoren oder Daten auf höheren Abstraktionsebenen (z. B. Sollwerte) werden in mechatronischen Systemen im Allgemeinen über Bussysteme ausgetauscht, die Echtzeitanforderungen für den Datenaustausch erfüllen müssen. Im Umfeld von verteilten eingebetteten Systemen hat sich eine Vielzahl von Feldbussystemen entwickelt. Je nach Anwendungsdomäne werden selbst innerhalb eines verteilten eingebetteten Systems mehrere unterschiedliche Bussysteme eingesetzt. In der Fahrzeugentwicklung werden z. B. Bussysteme für sicherheitskritische Bereiche (CAN, FlexRay) für Mediendaten (MOST) oder zum Anschluss einfacher Subsysteme wie verstellbare Spiegel oder verstellbare Sitze (LIN) parallel in einem Fahrzeug verwendet. Eine ähnliche Vielfalt von Bussystemen hat sich in der Automatisierungstechnik (Industrial Ethernet) oder der Gebäudeleittechnik (z. B. X10 und KNX) entwickelt.

Interessante Anwendungsfelder für CPS ergeben sich, wenn z. B. CPS-Dienste verwendet werden, um Produktionsmaschinen (CPDs) mit in der Umgebung installierten Sensoren wie Kameras oder Temperaturfühlern zu koppeln, beispielsweise um die Klimaanlage in einer Produktionsanlage energieeffizient zu regeln. Sollen solche Systeme als CPD in ein CPS integriert werden, so müssen unter Wahrung der Echtzeitfähigkeit Daten zwischen den internen Bussen und dem Kommunikationsnetzwerk eines CPS ausgetauscht werden. Aus Sicht der CPDs stellt die Kommunikation selbst einen Dienst dar, der die Voraussetzung zum Aufbau von Kommunikationsverbindungen ist. Ein wesentlicher Aspekt der CPDs ist es, dass sich mehrere CPDs dynamisch, also zur Laufzeit, und zur Lösung einer spezifischen Aufgabe untereinander und mit CPS-Diensten vernetzen. Dieser Ad-hoc-Aufbau von echtzeitfähigen Kommunikationsverbindungen muss durch die lokalen Netzwerke zwischen den CPDs und die Kommunikationsnetze in der CPS-Infrastruktur unterstützt werden (siehe auch Abbildung 9).

Beim Aufbau von Kommunikationsverbindungen ist weiterhin zu berücksichtigen, dass die beteiligten Netzwerke intern meist eine eigene Struktur (Topologie) besitzen, wobei die Teilnetze in unterschiedlichen Techniken realisiert sein können. Dies gilt sowohl für verteilte eingebettete Systeme als auch für die Kommunikationsnetze eines CPS. Werden CPDs über ein Netzwerk angeschlossen, so müssen die Datenpakete über die unterschiedlichsten Netzwerke weitergeleitet werden. An dieser Stelle werden Dienste des CPS-Kommunikationsnetzes benötigt, die die verschiedenen Adressierungsverfahren, Datenformate und Paketgrößen aufeinander abbilden, soweit dies technisch möglich ist. Falls Anforderungen nicht erfüllbar sind, muss dies den CPDs mitgeteilt werden, um ggf. alternative Dienste zu suchen.

Häufig wird auch die Anforderung auftreten, dass ein CPD zu bestimmten Zeiten einen physikalischen Messwert von einem bestimmten Ort abfragen möchte, ohne die an diesem Ort im Einsatz befindlichen CPDs zu kennen. Die Vermittlung von CPDs zum Erfassen von Messwerten oder zur Bewältigung einer Aufgabe sollte durch Dienste im CPS-Netzwerk oder eine CPS-Middleware unterstützt werden. Dies gilt insbesondere auch für CPDs, die in unterschiedlichen Anwendungsdomänen arbeiten (siehe auch Abbildung 3). CPDs ihrerseits sollten im Netzwerk ihre Dienste einschließlich der zu beachtenden Randbedingungen anmelden. Ein intelligentes, sich selbstorganisierendes CPS-Netzwerk sollte in der Lage sein, Sensoren von CPDs, die nicht mehr zur Verfügung stehen, automatisch durch gleichwertige Alternativen zu ersetzen. Auch sollte die Erfassung von redundanten Messwerten zur Steigerung der Genauigkeit oder zur Steigerung der Ausfallsicherheit unterstützt werden.

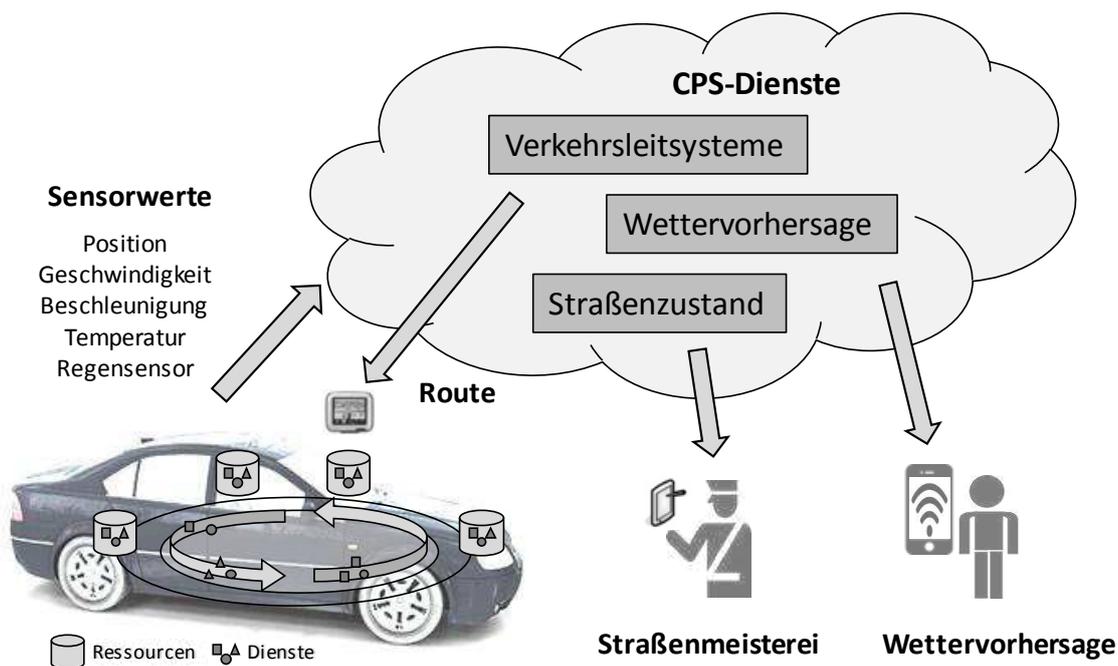


Abbildung 3: Automotive Beispiel

Aufgrund der zu erwartenden Steigerung der Anzahl von Endgeräten (CPDs) wird im Bereich der IP-Netze die Verbreitung des IPv6-Protokolls [Ohl13] eine wichtige Rolle spielen. Die Netzwerkschnittstelle dient zur Kommunikation mit einem CPS-Dienst oder zur Kommunikation von CPDs, die zur Erfüllung ihrer Aufgabe gerade kooperieren wollen. Aus den üblichen auf Ethernet basierenden IP-Netzen haben sich unter dem Oberbegriff "Industrial Ethernet" eine Menge von Echtzeitderivaten entwickelt, die schon seit Jahren in der Automatisierungstechnik eingesetzt werden. Echtzeit-

Ethernet (RTE) ist meist die Grundlage für die Vernetzung von intelligenten technischen Systemen in der Automatisierungstechnik. Eine Taxonomie der RTE ist in [Jas05] zu finden.

Die Konfiguration wird heute üblicherweise mit Hilfe herstellerspezifischer Softwarewerkzeuge durchgeführt, z. B. mit STEP7 von Siemens oder PCWORX von Phoenix Contact für die Planung und Konfiguration von PROFINET. In [RKH+10] wird aufgrund einer Analyse verschiedener RTE-Spezifikationen für die Selbstkonfiguration dieser Systeme ein aktivitätenbezogenes 5-Phasenmodell vorgeschlagen, welches am Beispiel von Ethernet Powerlink (EPL) validiert wird. Zur Verwaltung von Teilnehmern, die in Echtzeit kommunizieren wollen, existieren schon eine Vielzahl an domänenabhängigen Ansätzen. Entweder werden Standards definiert, an die sich die Entwürfe halten müssen, oder es werden Dienste oder Realisierungen einer Middleware angeboten, um die Kommunikation zu organisieren. Mit dem Ziel der Echtzeitfähigkeit wurde z. B. der anwendungsunabhängige objektorientierte Standard RT-CORBA [OMG05] entwickelt. In der Praxis haben sich in verschiedenen Domänen jedoch anwendungsspezifische Standards durchgesetzt, die nicht auf RTE, sondern auf Feldbussystemen wie FlexRay, CAN, MOST, LIN basieren. In der Automobilindustrie sind hier insbesondere OSEK/VDX [Ose07] und AUTOSAR [AUT11] zu nennen. Eine Übersicht über Middleware in der Automatisierungstechnik und deren Anforderungen ist in der VDI/VDE-Richtlinie 2657 [VDE13] zu finden. Weiterhin existieren eine Vielzahl dienstorientierter Technologien [BVT+08] wie z. B. JINI [Arn99] oder UPnP [ISO11]. Für den Entwurf von CPS, insbesondere der Kommunikation zwischen CPS-Diensten und CPDs, sollten analoge Ansätze entwickelt werden, die möglichst domänenübergreifend arbeiten und die existierenden Ansätze integrieren.

Die technische Schnittstelle eines CPDs, d. h. die Sensoren und Aktoren sowie die eingesetzte Kommunikationstechnik, bilden die Grundlage für die Entwicklung neuartiger CPS-Dienste. Insbesondere die Leistungsfähigkeit der Kommunikationstechnik hinsichtlich der Übertragung physikalischer Daten in Echtzeit ermöglicht erst die unterschiedlichen Alternativen zur Realisierung von echtzeitfähigen Diensten im CPD bzw. CPS. Zur Realisierung autonomer und selbstorganisierender CPDs (siehe Abschnitt „Autonome und selbstorganisierende CPDs“, S. 12) sowie von den im folgenden betrachteten Diensten zur Selbstoptimierung werden neben einer leistungsfähigen Kommunikationstechnik auch geeignete Sensoren und Aktoren benötigt, um den Zustand des CPS und seiner Umgebung zu erfassen und zu manipulieren sowie geeignete Systemoptimierungen vorzunehmen. Im folgenden Kapitel werden diese verschiedenartigen Realisierungen von Diensten näher erläutert.

03 DIENSTE AUS SICHT DER DEVICES

CPDs können Dienste verwenden, die in der CPS-Infrastruktur ausgeführt werden, sie können aber auch lokal Dienste ausführen. Eine Entscheidung darüber muss beim Entwurf eines CPDs berücksichtigt werden. Es ist möglich, dass in der Betriebsphase ein Dienst in Abhängigkeit von der aktuellen Situation alternativ lokal oder global ausgeführt wird.

Im einfachsten Fall werden von CPDs nur die Kommunikationsdienste eines CPS verwendet, um mit anderen CPDs zu kooperieren. Durch den spontanen Aufbau von Funknetzen können auch solche Kommunikationsdienste quasi lokal, ohne explizite Infrastruktur, aufgebaut werden. Solche Ansätze werden z. B. bei der Car-to-Car-Kommunikation verfolgt. Die Dienste werden hier lokal auf den CPDs ausgeführt.

Neben dem einfachen Auslagern eines Dienstes in die Infrastruktur eines CPS besteht auch die Möglichkeit, neue Dienste aus einem CPS zu laden und dann lokal in CPDs auszuführen. Je nach Anwendung können alle Alternativen sinnvoll sein, da sehr unterschiedliche Anforderungen an das CPS bzw. das CPD und das Kommunikationsnetz gestellt werden. Eine weitere Alternative ist, dass die Dienste, die lokal auf einem CPD ausgeführt werden, durch Dienste im CPS unterstützt werden. Im einfachsten Fall wird durch das CPD auf zusätzliche physikalische Daten zugegriffen, die von Sensoren eines anderen CPDs im Netz zur Verfügung gestellt werden.

Es sind darüber hinaus auch Dienste im CPS denkbar, die lokal auf den CPDs laufende Dienste überwachen und ggf. verbessern. Auf diese Weise können Dienste angeboten werden, die sich selbst zur Laufzeit durch Anwendung von Lernverfahren optimieren. Als Grundlage für die Optimierung können die im CPS vorliegenden Datensätze verwendet werden, die von einer Vielzahl von Anwendungen stammen.

Nicht alle Anwendungen in einem CPS stellen gleich strenge Anforderungen an das Zeitverhalten. Entweder wird für jede einzelne Berechnung eine Zeitgrenze gefordert oder es wird sozusagen ein Dienst abonniert, der während seiner Laufzeit periodisch Berechnungen zu festen Zeitpunkten erwartet. Auch die Folgen, die eine Zeitüberschreitung verursacht, können unterschiedlich bewertet werden. Bei üblichen Internetdiensten fällt der Nutzen, den die berechneten Daten haben, mit zunehmender Zeit ab (siehe Abbildung 4a). Je länger z. B. die Antwort auf eine Suchanfrage dauert, desto schlechter fällt die Bewertung des Dienstes durch einen Anwender aus. Wird ein Dienst nicht erbracht, wird also keine Antwort berechnet, entsteht meist kein unmittelbarer Schaden. Nur die Reputation des Dienstes verschlechtert sich.

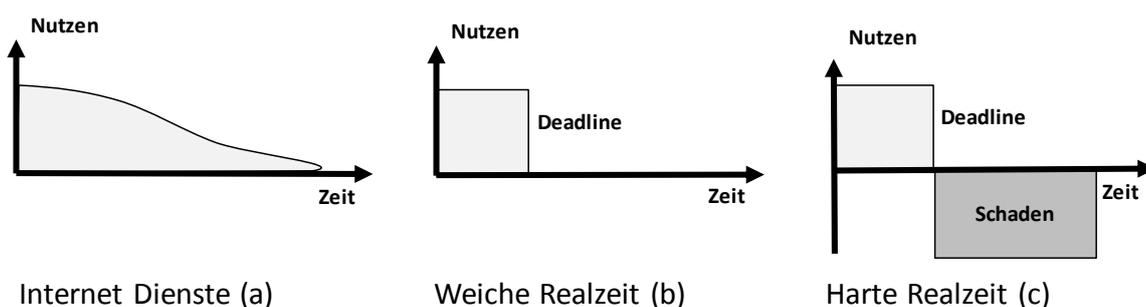


Abbildung 4: Zeitverhalten

Wird für einen Dienst Echtzeitfähigkeit gefordert, so betrifft dies sowohl die benötigten Kommunikationszeiten als auch die Ausführungszeit eines Dienstes. Typischerweise wird zwischen harten und weichen Echtzeitanforderungen unterschieden. Weiche Echtzeit heißt in diesem Zusammenhang, dass der Dienst mit einer definierten hohen Wahrscheinlichkeit sein Ergebnis rechtzeitig abliefern. Bei weichen Echtzeitanforderungen kann ein Ergebnis, das erst nach einem vereinbarten Zeitpunkt geliefert wird, auch vollständig nutzlos sein. Der Dienst hat dann die an ihn gestellten Anforderungen nicht erfüllt. Es entsteht auf Anwenderseite in der Regel aber kein Schaden (siehe Abbildung 4b).

Wird z. B. eine angeforderte Stauinformation zu spät zu einem Navigationssystem gesendet, sodass eine schlechtere Route berechnet wird, so entsteht kein unmittelbarer Schaden. Harte Echtzeitbedingungen erfordern in jedem Fall das termingerechte Ausliefern der Daten, da sonst ernsthaft Schäden gerade auch für den Anwender entstehen können (siehe Abbildung 4c). Beispiele für harte Echtzeitsysteme sind die Berechnung der Stellwerte für den Antriebsstrang eines Fahrzeugs oder das Auslösen des Airbags. Werden z. B. Stellwerte für Bremsen oder Lenkung während einer Autobahnfahrt nicht bezüglich fester Zeitschranken berechnet oder wird der Airbag wegen eines zu langsamen Dienstes im CPS, der die Sensorauswertung durchführt, zu spät ausgelöst, so sind Unfälle mit Personenschaden zu befürchten. Echtzeiteigenschaften hängen nicht von der Länge der geforderten Antwortzeiten ab. Auch Antwortzeiten im Umfang von mehreren Tagen können in harten Echtzeitbedingungen gefordert werden. Harte oder weiche Echtzeitanforderungen sind ebenfalls unabhängig davon, ob ein System jeweils nur für einen Berechnungsschritt Zeitanforderungen stellt, wie es für ereignisgetriebene Dienste üblich ist, oder ob periodisch Zeitanforderungen erfüllt werden müssen.

EREIGNISGETRIEBENE DIENSTE

Ereignisgetriebene CPS-Dienste sind dadurch charakterisiert, dass ein CPD eine Anfrage an einen CPS-Dienst oder an andere CPDs stellt. Auf dieses Ereignis (die Anfrage) erwartet das CPD bis zu einem spezifizierten Zeitpunkt ein Ergebnis von dem entsprechenden CPS-Dienst zur weiteren Verarbeitung. Zur Erfüllung seiner Aufgabe kann ein CPD diesen Kommunikationszyklus aus Anfrage und Erhalt des Ergebnisses mehrfach durchlaufen, die Antwortzeit wird jedoch bei jeder einzelnen Interaktion neu festgelegt. Insbesondere kann ein Dienst eine Folgeanfrage auch ablehnen. Er geht jeweils nur für eine einzelne Abfrage eine Verpflichtung ein (siehe Abbildung 5). Ein CPS-Dienst unterscheidet sich hierbei dadurch von Internetdiensten, dass die Ergebnisse bis zu einem definierten Zeitpunkt im CPD vorliegen müssen. Dies ist dadurch bedingt, dass physikalische, zeitabhängige Daten verarbeitet werden. Ändert sich z. B. die physikalische Umwelt wesentlich schneller als die Umweltdaten im CPS verarbeitet werden können (Antwortzeit), so wird das CPD nicht mehr mit aktuellen Daten arbeiten und daher nur einen schlechten oder fehlerhaften Service realisieren.

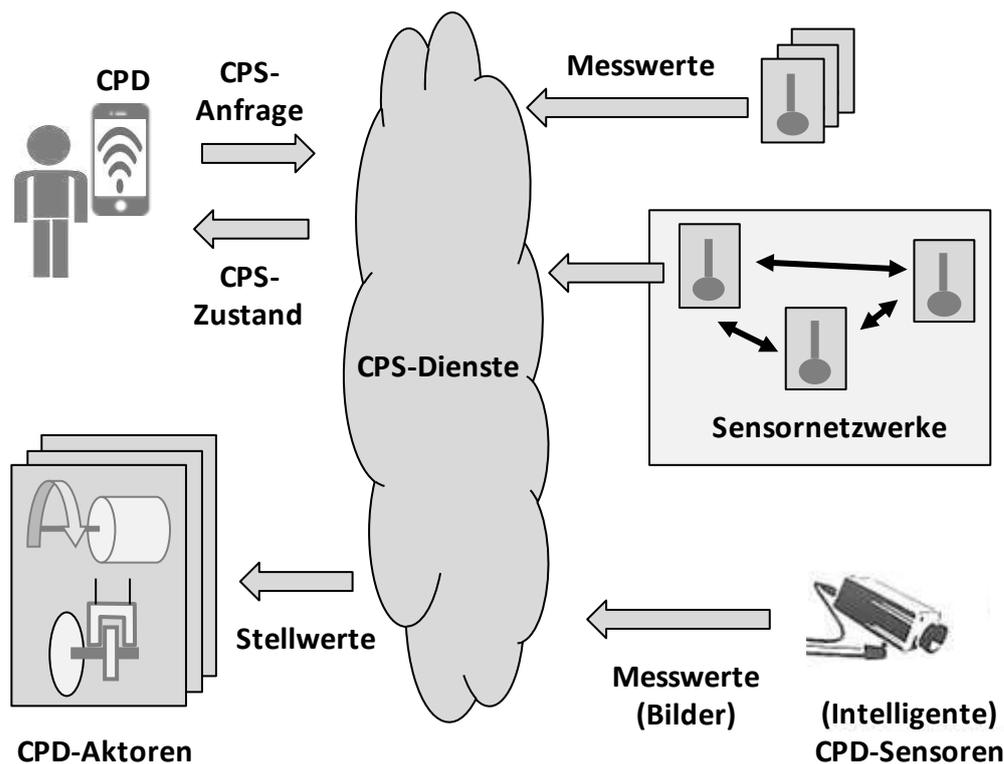


Abbildung 5: Ereignisgetriebene Cyber Physical Systems

Im einfachsten Fall werden aus den Antwortdaten lediglich Ratschläge oder Handlungshinweise für den Anwender erzeugt und es findet keine Manipulation der Umwelt statt. Ein Navigationssystem oder eine Wettervorhersage sind typische Anwendungsfälle für solche Systeme. Neben klassischen Wetterstationen kann zur großflächigen Erfassung von Wetterdaten auch auf andere Sensordaten zugegriffen werden. Durch Sensornetzwerke, also kleine, autark arbeitenden Systeme, die jeweils

nur mit ihren Nachbarn kommunizieren, könnte die Temperaturverteilung in Gewässern oder Meeren erfasst werden. Solche Netzwerke organisieren sich meist selbstständig und stellen über Eintrittspunkte die gemessenen Werte zur Verfügung. Diese Eintrittspunkte des Sensornetzwerks stellen aus Sicht des CPS ein CPD dar. Auch die in fast jedem Fahrzeug vorhandenen Temperatur- und Regensensoren könnten zur Wettervorhersage verwendet werden (siehe Abbildung 3). In diesem Fall hätten jedoch nicht die Fahrzeuge als diejenigen CPDs, die die Werte erfasst haben, den vorrangigen Nutzen der Auswertung der Daten. Den Nutzen hätten meteorologische Institute, deren Geschäftsfeld nicht mit dem Geschäftsfeld der Fahrzeughersteller verbunden ist. Hierbei handelt es sich um domänenübergreifende Systeme. Geschäftsmodelle für derartige Systeme müssen meist erst neu etabliert werden.

Aktuelle Navigationssysteme planen ihre Routen lokal auf dem Device und berücksichtigen auf Wunsch Stauinformationen. Sind diese Stauinformationen nicht mehr aktuell oder werden zu langsam auf den aktuellen Stand gebracht, so können z. B. Routen berechnet werden, die Staus umgehen, die sich längst aufgelöst haben. Die Stauinformationen zu aktualisieren, ist in erster Linie kein Problem der Rechen- oder Kommunikationsleistung. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die rechtzeitige Erfassung von entstehenden und sich auflösenden Staus. Der Mehrwert eines CPS entsteht unter anderem dadurch, dass durch einen Dienst Datensätze von einer Vielzahl von CPDs erfasst werden, die einem einzelnen CPD nicht zugänglich sind. In der Verkehrsinfrastruktur existiert schon heute eine Vielzahl von Sensoren, die die Verkehrslage erfassen. Neben Mautbrücken und Ampelanlagen, die den durchfahrenden Verkehr registrieren, können auch komplexere Sensoren, wie z. B. Kameras an Kreuzungspunkten, dazu genutzt werden, ein aktuelles Bild der Verkehrssituation zu erzeugen. Kameras in CPDs können kontinuierlich Videoströme über das Netzwerk übertragen. Ob für eine Anwendung ein Datenstrom unter harten oder weichen Echtzeitbedingungen übertragen und ausgewertet werden soll, hängt von der Anwendung ab. Sollen physikalische Werte wie Abstände oder Geschwindigkeiten von Gegenständen zu Regelungszwecken erfasst werden, so sind harte Echtzeitbedingungen gefordert. Zu Überwachungszwecken werden dagegen weiche Echtzeitbedingungen genügen.

Die Vorverarbeitung und Auswertung der Sensorinformation kann entweder im CPD durchgeführt werden, an dem die Sensoren angeschlossen sind, oder durch explizite Dienste in einem CPS. Welche Alternative sich durchsetzt, hängt meist nicht von technischen Randbedingungen ab. Es werden vielmehr ökonomische Interessen und Geschäftsmodelle entscheiden, wo welche Berechnung durchgeführt wird. Je komplexer die Sensordaten sind, desto sinnvoller erscheint eine Auswertung in der CPS-Infrastruktur.

An dem Verkehrsbeispiel kann noch eine weitere Eigenschaft von CPS verdeutlicht werden. In CPS müssen Vorhersagen über die zukünftige Entwicklung der Umwelt erstellt werden, damit diese rechtzeitig in die Planung zukünftiger Handlungsweisen einfließen können. CPDs bzw. CPS-Dienste müssen diese prädiktiven Informationen erzeugen und können dieses Wissen auswerten oder auch als Dienst im CPS zur Verfügung stellen. Bei diesen prädiktiven Informationen besteht jedoch aufgrund ihrer Unsicherheit häufig ein großer Interpretationsspielraum, der zu unterschiedlichen Auswertungen und daraus resultierenden Handlungsweisen führen kann. Wird in einem Navigationssystem auf einer Route zu einem Zeitpunkt ein Stau detektiert, so ist nicht sicher, ob dieser Stau noch einen Effekt auf die geplante Route hat. Er könnte sich schon aufgelöst haben. Ebenso könnten z. B. durch Massenveranstaltungen schon wieder neue zu berücksichtigende Staus entstanden sein.

Zurzeit wird die Entscheidung, ob ein Stau bei der Routenplanung berücksichtigt werden soll, auf den Anwender abgeschoben.

In Zukunft werden Entscheidungen bezüglich des zukünftigen Handlungsverlaufs zunehmend vom CPD bzw. den CPS-Diensten getroffen oder zumindest vorbereitet. Dies gilt insbesondere, wenn die Ausgabe eines CPDs nicht ausschließlich aus Hinweisen und Informationen besteht. Werden durch ein CPD Manipulationen in der Umwelt durchgeführt, so muss ein CPD oder ein CPS-Dienst aktiv Entscheidungen treffen, welche Aktionen wann in der Umwelt durchgeführt werden sollen. Dies ist z. B. der Fall wenn ein Fahrerassistenzsystem aktiv in die Fahrzeugsteuerung eingreift (Lenken, Bremsen, Geschwindigkeitsregelung). Solche Systeme sind sehr viel sicherheitskritischer und arbeiten unter harten Echtzeitbedingungen.

PERIODISCHE DIENSTE

Viele Dienste in einer physikalischen Umwelt sind nicht rückwirkungsfrei. Nicht jede Größe, z. B. der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen, kann einfach eingestellt werden. Die Veränderung der Geschwindigkeit beider beteiligter Fahrzeuge ändert kontinuierlich den Abstand. In regelmäßigen Zeitabständen (periodisch) muss daher der Abstand durch Anpassen der Geschwindigkeiten nachgeregelt werden. Periodische Dienste stellen hohe Anforderungen hinsichtlich der Quality of Service (QoS) an die verwendete CPS-Infrastruktur. Es werden kurze Antwortzeiten (Latenzen) mit hoher Frequenz unter harten Echtzeitbedingungen erwartet. Auch die Ausfallsicherheit solcher Systeme muss in der Regel hoch sein. Die in diesem Beispiel beschriebene Funktionalität wird heute schon häufig durch verteilte eingebettete Systeme realisiert. Der zusätzliche Aspekt, der durch die Realisierung als CPD ermöglicht wird, ist, dass mehrere Systeme (CPDs) sich zur Lösung einer Aufgabe ad hoc durch regelungstechnische, periodische Verfahren koordinieren. Hierzu müssen die beteiligten CPDs Kontakt miteinander aufnehmen und in harter Echtzeit über die quasi öffentlich zugänglichen Netze des CPS miteinander kommunizieren. Der Aufbau der möglichen Kooperationen kann durch Verfahren, wie sie in der Selbstorganisation üblich sind, unterstützt werden.

Öffentlich zugängliche Netzwerke, die die benötigten QoS-Eigenschaften besitzen, werden nicht überall flächendeckend zur Verfügung stehen. Als Alternative entwickeln sich lokale (Funk-) Netzwerke, die spezifisch für die Anforderungen einer Anwendungsdomäne ausgelegt sind und ad hoc aufgebaut werden können. Als Beispiel mögen hier die aktuellen Entwicklungen in der Car-to-X-Kommunikation zwischen Fahrzeugen dienen (siehe auch Abbildung 9).

Viele Aufgaben zur Kooperation von CPDs entstehen spontan. Sie sind zum Entwurfszeitpunkt der CPDs noch nicht vorhersehbar. In der CPS-Infrastruktur kann nach Diensten gesucht werden, die die gewünschte Aufgabe ausführen. Ist ein solcher Dienst gefunden worden, so kann er, falls die vorhandene CPS-Infrastruktur den Anforderungen genügt, auch in der Infrastruktur ausgeführt werden (siehe Abbildung 6a). Wird ein Dienst häufiger angefordert, so ist zu erwarten, dass im Laufe der Zeit immer bessere, optimierte Versionen angeboten werden.

Eine alternative Unterstützung von kooperierenden CPDs besteht darin, dass von den CPDs passende periodische Dienste zur Ausführung auf das CPD heruntergeladen werden (siehe Abbildung 6b). Die Anforderungen an die CPS-Infrastruktur sind in diesem Fall meist erheblich geringer. Die Ausführung und auch die Kommunikation zwischen den einzelnen CPDs können dann über lokale Kommunikationsstrecken (Netzwerke, Peer2Peer) erfolgen. Hierzu müssen gemäß der Aufgabenstellung echtzeitfähige Dienste gefunden werden, die zu den jeweiligen CPDs mit deren Sensoren und Aktoren passen. Evtl. muss die Aufgabe in Teilaufgaben zerlegt werden, die erst zusammen in der konkreten Situation die Aufgabenstellung erfüllen. Dieser Ansatz kann noch weiter verfeinert werden: Soll eine Aufgabe von einer Gruppe von CPDs gelöst werden, so könnte ein CPS allen beteiligten CPDs Rollen zuweisen, die für die Aufgabenstellung sinnvoll sind. Durch eine Rolle wird der Handlungsspielraum festgelegt, den ein CPD zur Aufgabenerfüllung hat. Verfolgt man diesen Denkansatz noch einen Schritt weiter, so können Dienste gemäß den Anforderungen, die sich

ad hoc aus einer konkreten Situation ergeben, on-the-fly zusammengesetzt werden und die Funktion von mehreren CPDs koordinieren, die ad hoc miteinander kommunizieren.

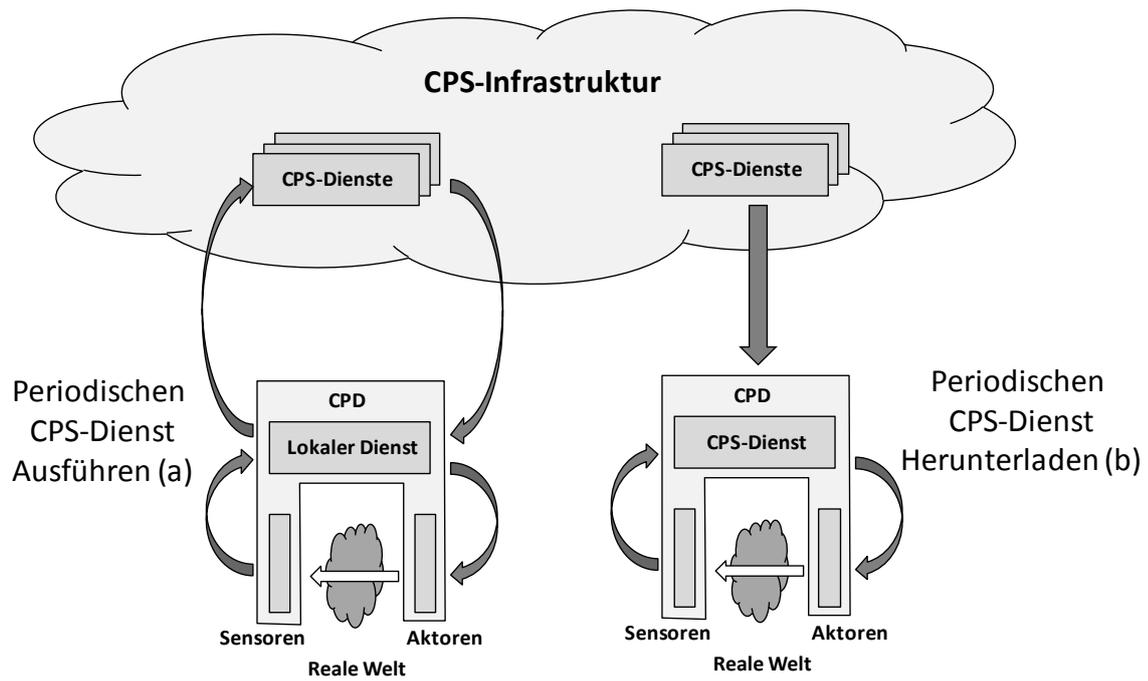


Abbildung 6: Periodische CPS-Dienste

DIENSTE ZUR SELBSTOPTIMIERUNG

Ein CPS kann ein CPD nicht nur dadurch unterstützen, dass es Dienste zur direkten Lösung einer Aufgabe in der physikalischen Umwelt anbietet. Es können auch Überwachungs- und Optimierungsaufgaben für Dienste im CPS angeboten werden. Für Internetdienste wurden Architekturen entwickelt, die aus Controllern (den eigentlichen Diensten) und Observern bestehen. Die Observer beobachten die Controller während der Ausführung (Monitor), analysieren die Beobachtungen (Analyse), planen darauf aufbauende Verbesserungen am Controller (Plan) und führen sie zur Laufzeit durch (Execute) (siehe Abbildung 7). Dieses Architekturkonzept ist im weiteren Verlauf auch auf physikalische Anwendungen und auf eingebettete Systeme übertragen worden. U. U. sind hier die Observer hinsichtlich ihrer Komplexität und der einzuhaltenden (Echtzeit-)Bedingungen hierarchisch strukturiert. Es können Verfahren zur Adaption und zur Optimierung unterschieden werden (Reflektiver Operator, Kognitiver Operator). Während die Adaption i. Allg. nur eine direkte Anpassung von Systemparametern an die aktuelle Situation vornimmt (Reflektiver Operator), kann die Optimierung beispielsweise auch Lernverfahren einsetzen und damit sowohl die Struktur als auch das Verhalten auch an längerfristige Entwicklungen anpassen (Kognitiver Operator). Die Anwendungen von Observer-Controller-Architekturen reichen von der Verkehrssteuerung, der Robotersteuerung oder der Verwaltung von Ressourcen in IT-Systemen bis zur Optimierung mechatronischer Systeme. Ziel ist es hierbei, Selbstorganisation in einem System oder einem Dienst zu realisieren. Unter dem Begriff Selbstorganisation werden meist Verfahren zur Selbstoptimierung, Selbstkonfiguration, Selbstheilung etc. zusammengefasst. Der Rechenaufwand selbstorganisierender Systeme liegt erheblich höher als bei konventionell entworfenen Systemen, da jedem Dienst eine zusätzliche Komponente zugeordnet wird, die den Dienst überwacht und ggf. verbessert. Dieser Aufwand lohnt sich jedoch, da viele Aufgaben zur Anpassung, Konfiguration und Wartung eines Systems automatisiert werden. Der hierfür notwendige Aufwand muss jeweils nur einmal (für die Realisierung der entsprechenden Selbstorganisationsmethode) geleistet werden. Auch können die Dienste flexibler an die jeweilige Aufgabe angepasst werden.

Im Rahmen von CPS können die Aufgaben der Überwachung und Optimierung zur Realisierung von Self-x-Eigenschaften nicht nur auf dem CPD selbst, sondern auch auf der Infrastruktur eines CPS ausgeführt werden. In diesem Fall wird nur der eigentliche Dienst, der die Sensordaten verarbeitet und die Aktorstellwerte berechnet, auf einem CPD lokal ausgeführt (siehe Abbildung 7). Gleichzeitig werden die Datenströme der Sensoren, evtl. in vorverarbeiteter Form, an CPS-Dienste weitergeleitet. Diese analysieren die Sensordatenströme, detektieren Anomalien und berechnen Verbesserungen des Dienstes in Form von neuen Konfigurationsdaten oder auch alternative, bessere Dienste, die dann heruntergeladen und auf dem CPD installiert werden, um den alten Dienst zu ersetzen. Dieser Typ von Diensten erfordert i. Allg. nicht ganz so hohe Datenkommunikationsraten wie die direkte Auslagerung von regelungstechnischen (periodischen) Diensten in die CPS-Infrastruktur. Zusätzlich zum Herunterladen von Diensten müssen jedoch die Datenströme zur Überwachung übertragen werden. Auch bei diesem Typ von Diensten müssen harte Echtzeitbedingungen erfüllt werden, um zu jedem Zeitpunkt eine korrekte Funktionsweise der CPDs sicherzustellen.

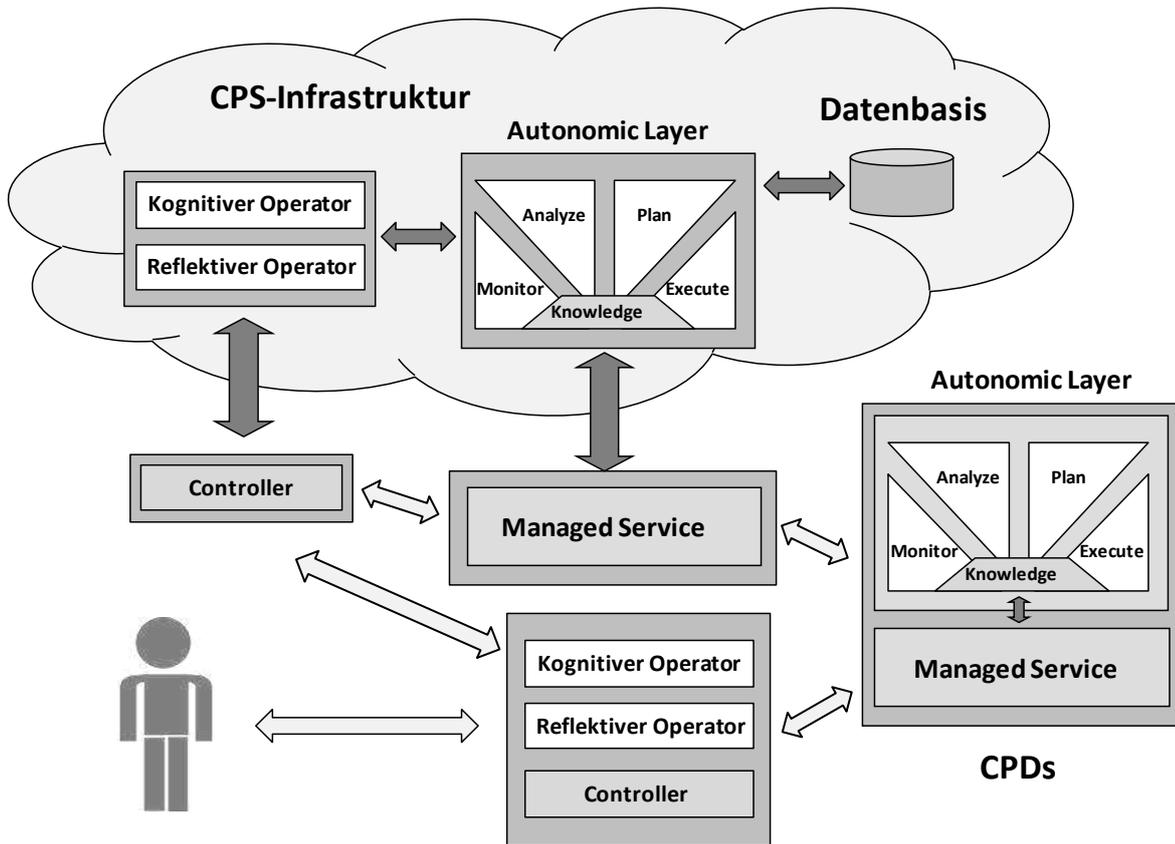


Abbildung 7: Selbstoptimierende CPS-Dienste

Durch die Überwachung von Diensten der verschiedensten Anwendungen fallen große Datenmengen an. Zur Analyse und Auswertung können hier Verfahren aus den Bereichen „Big Data“ und „Data Analytics“ eingesetzt werden, soweit die Echtzeitanforderungen nicht verletzt werden. Diese großen Datensätze beinhalten ein großes Wissen in nicht aufbereiteter Form und stellen an sich schon einen Wert dar. Sie sind die Grundlage für Lernverfahren, mittels derer die Daten zur Verbesserung der Dienste ausgewertet werden. Einzelne CPDs können, auch wenn sie in Gruppen zusammenarbeiten, diese Lernfunktion nur sehr eingeschränkt ausführen, da ihnen aufgrund der fehlenden Datenbasis weniger Lernmuster zur Verfügung stehen. Auf der Ebene der CPS-Infrastruktur können sich die Dienste über der Zeit weiterentwickeln. An dieser Stelle können Verfahren zur Selbstorganisation aus dem Organic Computing eingesetzt werden. Die bisher am weitesten verbreiteten Verfahren zur Selbstorganisation basieren auf Marktmechanismen. Es ist auch denkbar, dass die Summe der sich entwickelnden Verhaltensweisen emergentes Verhalten zeigt. So können u. U. vollständig neue Dienste und Anwendungsfälle aus der Vielzahl der Anwendungen ad hoc zusammengestellt werden.

Eine zur Selbstorganisation in der Infrastruktur gegenläufige Entwicklung zeichnet sich allerdings auch ab. Viele Systeme, die die Umwelt manipulieren, werden zunehmend autonomer gestaltet. Bei autonomen Verhaltensweisen wird versucht, alle Lern- und Optimierungsstrategien lokal im Device und speziell für eine Umwelt zu entwickeln. Der Entwurf von autonomen Robotern gehört in diese Kategorie. Auch diese Systeme müssen aber zumindest in Echtzeit Daten über digitale Kommunikationsmedien austauschen. Die Aufgabenstellung und auch die Koordinierung von Teilaufgaben solcher Systeme werden häufig durch Angabe von Zielen oder durch Angabe von

Bewertungen, die maximiert werden sollen, definiert. Im Laufe der weiteren Entwicklung wird sich ein Gleichgewicht zwischen zentraler Optimierung in der Infrastruktur und lokaler Optimierung auf einem Device einstellen. Dieses Gleichgewicht wird jedoch je nach Anwendungsfall sehr stark variieren.

Im folgenden Kapitel wird der Einsatz von CPDs und der mit ihrer Hilfe realisierten Dienste in verschiedenen Anwendungsbereichen und Geschäftsfeldern illustriert.

04 ANWENDUNGSBEREICHE UND GESCHÄFTSFELDER

CPDs können je nach Anwendungsgebiet vollständig unterschiedlich aussehen. Eine große Zahl von Anwendungen erfordert CPDs, die mobil sind und am Körper getragen werden. Solche CPDs reichen von Massenprodukten wie intelligenten Armbanduhren oder Brillen bis hin zu medizinischen Hightech-Geräten zur Kreislaufbeobachtung oder zur Medikation (siehe Abschnitt „Ubiquitous Computing“, S. 44). Miniaturisierung und Energieeffizienz sind hier maßgebliche Eigenschaften von CPDs. Die Energieeffizienz ist bei allen mobilen Anwendungen, die z. B. auf Smartphones basieren, ein zentrales Thema, insbesondere wenn Zusatzgeräte mit Energie versorgt werden müssen.

Ein weiteres Anwendungsgebiet ergibt sich im Bereich der öffentlichen Infrastrukturen. Hier dienen CPDs zur Unterstützung der Versorgung der Bevölkerung mit Gas, Wasser oder elektrischer Energie (siehe Abschnitt „Energieversorgung“, S. 37). Auch die Steuerung des ÖPNV (Öffentlicher Personennahverkehr) oder von Rettungsfahrzeugen sowie die Verkehrssteuerung in größeren Städten gehören dazu (siehe Abschnitt „Mobilität“, S. 39). CPS zur Unterstützung von Infrastrukturen haben das Ziel, die Gesamtanwendung beispielsweise hinsichtlich der Energieverteilung zu optimieren. Lokale Optimierungsstrategien für einzelne CPDs müssen zwar beachtet werden, spielen aber nur eine untergeordnete Rolle.

Im industriellen Umfeld werden CPDs zur Unterstützung der Produktion oder in der Logistik eingesetzt (siehe Abschnitt „Automatisierung“, S. 41). Auch diese CPS müssen das Zusammenspiel einer großen Anzahl von Devices optimieren. Ein CPS kann hier aber zu einem CPS, das von einer anderen Firma oder einer anderen Firmengruppe betrieben wird, in Konkurrenz stehen. Die aus dem Wettbewerb resultierenden Anforderungen, insbesondere bezüglich Datensicherheit, müssen bei konkurrierenden Systemen berücksichtigt werden. Die Optimierung von konkurrierenden Systemen auf der gleichen Datenbasis wird hier ein besonderes Problem sein.

Im Folgenden sollen CPS und die darin verwendeten CPDs in typischen Einsatzbereichen, die schon in Abschnitt 1.6 eingeführt wurden, beschrieben werden. Die Anwendungen werden dabei häufig als „smart“ charakterisiert. Smart heißt in diesem Zusammenhang, dass die in einer konkreten Situation über ein CPD verwendeten Dienste auf einer „globalen“, größeren Datenbasis basieren und dass sich die Dienste automatisch an die aktuelle Situation anpassen (siehe auch Abschnitt „Dienste zur Selbstoptimierung, S. 32).

ENERGIEVERSORGUNG

Durch die Energiewende werden sich die Anforderungen an die Kontrolle von Stromnetzen erheblich verändern. Es ist damit zu rechnen, dass vermehrt kleine dezentrale Einheiten zum Erzeugen, Verbrauchen und/oder Speichern von Energie am Netz angeschlossen werden. Auf der Hochspannungsebene stehen sehr gute Techniken für das Netzmanagement zur Verfügung. Hier stellt sich hauptsächlich die Frage, welche Erweiterungen in welcher Technik realisiert werden sollen, wie das Investment refinanziert wird und wie solche Systeme als CPD in ein CPS integriert werden können. Auf der Niederspannungsebene entwickelt sich zurzeit unter dem Begriff Smart Home eine Vielzahl von Steuergeräten, den CPDs, die aus Endanwendersicht den Energieverbrauch steuern und optimieren können. Auf die Einspeisung von Energie aus Solar- oder kleineren Windkraftanlagen kann jedoch nur sehr begrenzt Einfluss genommen werden. Kann die Energie nicht durch das Stromnetz verteilt werden, so geht sie verloren, obwohl weiterhin ein Anteil der entstandenen Produktionskosten erstattet wird. Am wenigsten Einfluss kann zurzeit auf der Mittelspannungsebene genommen werden. Dies gilt sowohl für die Schnittstelle zwischen Hoch- und Mittelspannungsnetzen, die üblicherweise durch Umspannwerke realisiert ist, als auch an der Schnittstelle zwischen Mittel- und Niederspannungsnetz, wo entsprechende Transformatorstationen eingesetzt werden (siehe Abbildung 8).

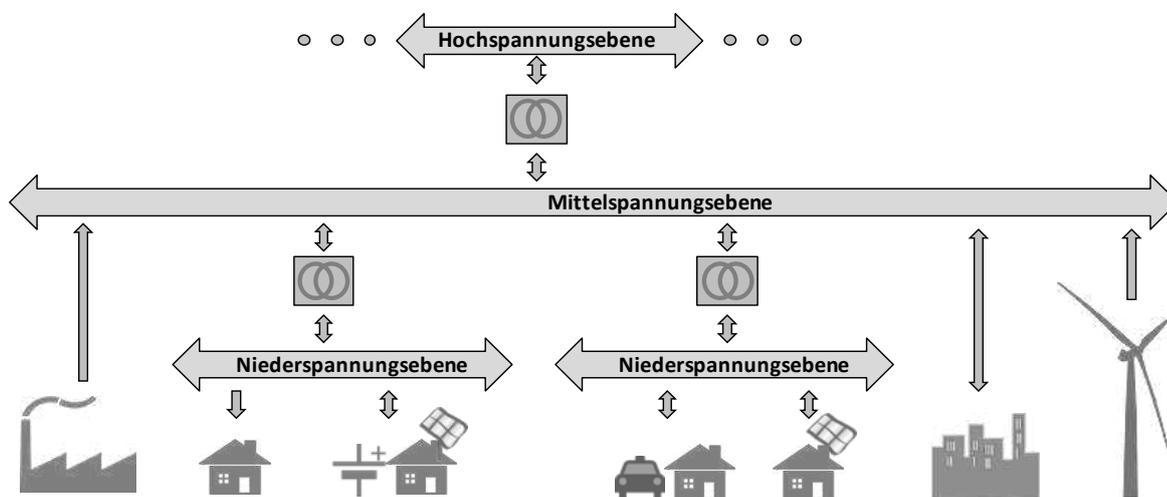


Abbildung 8: Smart Grid

Hier werden Mechanismen und Techniken zum optimalen Betrieb des Mittelspannungsnetzes und der angeschlossenen Endknoten benötigt. Die in der Mittelspannungsebene eingesetzten Steuerungen können dann die Funktion eines CPDs ausführen. Über Marktstrategien, die als CPS-Dienst realisiert sind, könnte so beispielsweise der Betrieb selbstoptimierend und selbstorganisierend gestaltet werden. Die im Netz verfügbaren Ressourcen zur Erzeugung, Speicherung und zum Verbrauch könnten mithilfe von Marktregeln möglichst kostengünstig (durch Optimieren einer

entsprechenden Zielfunktion) eingesetzt werden. Die grundlegende Idee hierbei ist, den Strommarkt von der Hochspannungsebene auf die Mittel- und Niederspannungsebene zu übertragen. Insgesamt sollte ein hierarchischer Ansatz verfolgt werden, bei dem nicht nur innerhalb eines Smart Grid auf der Niederspannungsebene die Energie verteilt wird. Es sollten auch Verhandlungen zwischen verschiedenen Smart Grids unterstützt werden. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist, dass auch Informationen, die ihren Ursprung außerhalb des Strommarktes haben, mitberücksichtigt werden. Das Wissen, welche Informationen vorhersagbare Auswirkungen haben, hat an sich schon einen Wert. Hier sollten nicht nur die offensichtlichen Korrelationen zur Wetterlage oder zu gerade stattfindenden Fußballspielen betrachtet werden; es sollten vielmehr Informationen von angeschlossenen Services verwendet werden, die diese Informationen aus dem Internet gefiltert haben.

Die Energieversorgung unterliegt einer ganzen Reihe von Anforderungen hinsichtlich ihrer Eigenschaften, die auch bei der Gestaltung von Diensten, insbesondere auch bei den oben beschriebenen selbstoptimierenden Diensten, berücksichtigt werden müssen. Es muss sichergestellt werden, dass keine kritischen oder selbstzerstörenden Zustände erreicht werden (Funktionssicherheit, Safety). Auch bei Störungen muss der Betrieb sichergestellt werden (Versorgungssicherheit, Ausfalltoleranz). Es muss daher ein ausreichender Schutz vor Hackerangriffen gewährleistet werden. Dies gilt nicht nur für die eigentliche Energieversorgung, es müssen auch die Verbraucherdaten vor unberechtigtem Zugriff geschützt werden (Privacy). Um Hackerangriffe zu erkennen und um die Verbraucherdaten zu anonymisieren, könnten Verfahren eingesetzt werden, die Anomalien im Betrieb des CPS erkennen und zusätzliche Schutzmechanismen selbstständig ausführen.

Änderungen im Markt sollten automatisch berücksichtigt werden. Wenn zusätzliche Teilnehmer mit dem Energienetz verbunden werden oder sich das Verbraucherverhalten ändert, müssen u. U. die Ressourcen des Energienetzes neu verteilt werden. Den beteiligten Anwendern (Verbraucher, Netzbetreiber, etc.) müssen jeweils der Zustand und die Absichten des Systems transparent gemacht werden, um die Akzeptanz eines solchen semiautomatischen Systems und der darin eingesetzten Dienste zur Optimierung des Betriebs in Stromnetzen sicherzustellen.

Im Energiemarkt könnten solche Dienste die Ressourcen Speicherkapazität, Energieproduktion, Verbrauch und Verteilung (Netze einschließlich deren Topologie, alternative Netzrouten) verwalten. Für Smart Grids können diese Ressourcen summarisch behandelt werden. Als Aktionen können diese Dienste etwa überschüssige Energie im internen oder globalen Netz speichern. Auch die Erhöhung der Nachfrage durch Anschalten zusätzlicher Verbraucher bzw. analoge Aktionen bei Energiedefiziten können durchgeführt werden. Zur Stabilisierung des Netzes, beispielsweise um Kettenreaktionen zu vermeiden, können die Routen der Ströme im Netz angepasst werden. Durch Veränderung von Kostenmodellen kann ebenfalls Einfluss auf das Verbrauchsverhalten genommen werden.

MOBILITÄT

Das Thema Smart Mobility beschäftigt sich mit der Unterstützung des Verkehrs und wird als eigenständige Anwendungsdomäne von CPS betrachtet. Fasst man ein Fahrzeug als komplexes CPD auf, so lassen sich viele Eigenschaften von CPDs erläutern. Zusammen mit der Verkehrsinfrastruktur lassen sich auch gut domänenübergreifende Szenarien darstellen. Die Automobil- und Verkehrstechnik spielt aber auch technologisch eine führende Rolle. Innerhalb von Fahrzeugen ist der Einsatz von elektronischen Steuerungen in den letzten Jahren enorm angestiegen. Viele Servicefunktionen sind ohne vernetzte Elektronik nicht denkbar. Ein Fahrzeug beinhaltet häufig mehr als 50 miteinander vernetzte Steuergeräte, die zumindest teilweise sicherheitskritische Aufgaben unter hohen Echtzeitanforderungen ausführen. Fast alle Basistechnologien, die für den Einsatz von CPS benötigt werden, werden in einem Fahrzeug schon eingesetzt. Lediglich der Einsatz von Funknetzwerken zur echtzeitfähigen Übertragung von Daten ist noch nicht flächendeckend im Einsatz und wird noch weiterentwickelt.

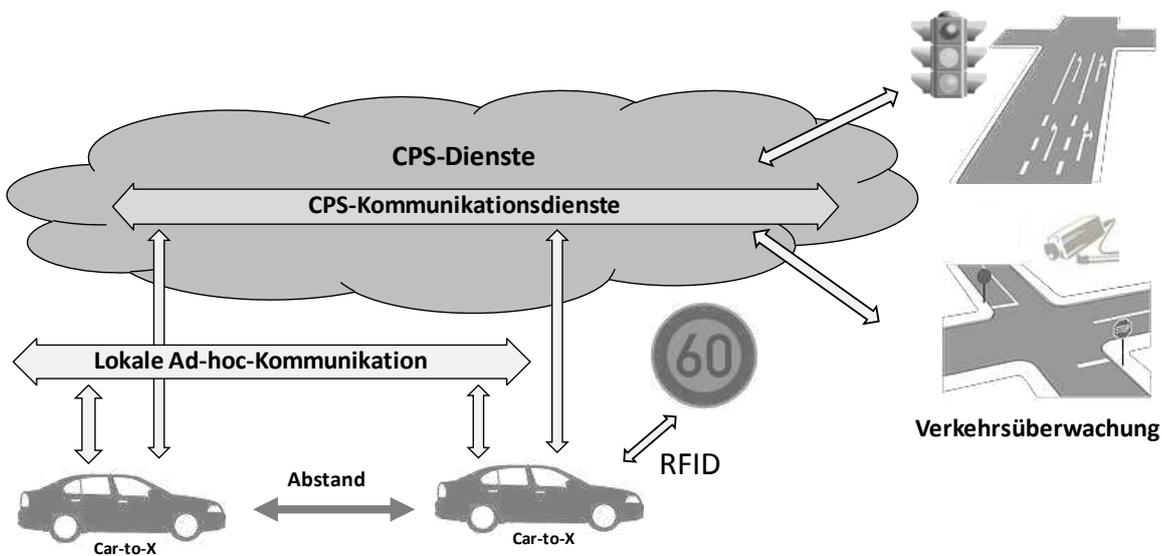


Abbildung 9: Smart Mobility

Die Kommunikation eines Fahrzeugs (CPD) mit seiner Umwelt kann auf verschiedenen Ebenen erfolgen, wie in Abbildung 9 dargestellt. CPS können über Netzwerkprovider Informationen für den Fahrer zur Verfügung stellen, wie schon mehrfach in dieser Studie angesprochen. Funktionen zur Unterhaltung (Medien) oder zur Navigation können weitgehend frei kommunizieren. CPS können aber auch in sicherheitskritische Bereiche eingreifen. Aus Sicherheitsgründen wird bisher die Steuerung in einem Fahrzeug als abgeschlossenes System entworfen. Für die Steuerung des Antriebsstrangs sowie für die Serviceelektronik (Carbody) wird schon beim Entwurf exakt festgelegt, welches Steuergerät (Core) welche Aufgabe zu einem Zeitpunkt bearbeitet und wann die Steuergeräte untereinander kommunizieren. Für die Ausführung sowie für die Kommunikation werden Zeitfenster (Slots) festgelegt, wann was passieren soll (synchrone Entwürfe). Die in Zeitfenstern strukturierte

Kommunikation wird durch einen eigens für den Automobilbau entwickelten Bus (FlexRay) unterstützt. Was eine technische Spezifikation beinhalten muss und wie Kommunikationsschnittstellen einschließlich des Zeitverhaltens im Automobilbereich beschrieben werden, wird im AUTOSAR-Konsortium standardisiert. Diese Standards stellen sicher, dass die Zusammenarbeit zwischen Automobilherstellern und Zulieferern reibungslos funktioniert. Momentan werden hier Erweiterungen des Standards zur Einführung zukünftiger Technologien, wie Mehrkernprozessoren (Multicore), und ihre Auswirkung auf die Codegenerierung und Fahrzeugsicherheit evaluiert. Es sollen z. B. Funktionen zwischen verschiedenen Rechenkernen migriert werden können und es soll ermöglicht werden, neue Berechnungen zu starten. Diese standardbasierte Entwicklung ist zwingend notwendig, wenn die Aktorik eines Fahrzeugs durch CPS-Dienste unterstützt werden soll, um z. B. neue Vorgaben oder neue lokale Dienste in die Fahrzeugsteuerung einzubringen. Technisch müssten Zeitslots zur Berechnung von Funktionen und zur Kommunikation dynamisch zur Laufzeit neu vergeben werden, ohne die Sicherheit des Systems zu gefährden. Auf diese Weise könnten Abstandsregelungen oder Regelungen zur gleichmäßigen Ausleuchtung von Straßen durch aktive Scheinwerfer realisiert und sogar nachinstalliert werden.

Unter dem Begriff Car-to-X (C2X) wird zurzeit an vielen Servicefunktionen gearbeitet, die auf der Kommunikation eines Fahrzeugs mit der Umwelt aufbauen. Auch hier wurden für die Automobil-domäne spezifische Funknetze zum Austausch von Echtzeitdaten definiert (G3, G4, IST-G5/802.11p). Es soll z. B. mit Ampelanlagen, Verkehrsschildern, vorausfahrenden oder entgegenkommenden Fahrzeugen kommuniziert werden. Aus der Kommunikation mit Ampelanlagen lässt sich z. B. eine optimale Geschwindigkeit bestimmen, um in einer „grünen Welle“ mitzufahren. Auch die Navigationsdienste müssen sich nicht auf das Straßennetz beschränken. Durch ein Parkleitsystem kann einem Fahrzeug der Weg zum nächsten freien Stellplatz mitgeteilt werden.

Die durch Ampeln oder Verkehrsschilder erfassten Daten sind auch für die Verkehrsinfrastruktur interessant, um z. B. genauere Informationen über den aktuellen Verkehrsfluss zu erhalten. Die Erfassung von Verkehrsflüssen in Großstädten kann ein Bestandteil eines städtischen Leitstandes sein. Ein solcher Leitstand könnte die Entscheidungsgrundlage für die Steuerung von Rettungskräften oder zur Auslösung von Maßnahmen zur Luftreinhaltung liefern oder Empfehlungen für diese Entscheidungen geben. An einen städtischen Leitstand könnten CPS aus den verschiedensten Anwendungsdomänen angeschlossen werden.

Im Rahmen der Elektromobilität soll und muss teilweise eine völlig neue Infrastruktur aufgebaut werden. Die Verteilung und Nutzung von Ladestationen wird ein entscheidendes Kriterium für die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen sein. Auch eine Ladesäule kann als CPD realisiert werden. Über die Erfassung der Nachfrage und die erfassten Verkehrsdaten muss dafür gesorgt werden, dass an den Ladesäulen genug Energie verfügbar ist, auch wenn gerade eine Massenveranstaltung stattfindet.

Neben dem Betrieb von Fahrzeugen und der Verkehrsinfrastruktur ist auch ihr Entwurf ein Anwendungsgebiet für CPS (siehe auch Anhang A.2).

AUTOMATISIERUNG

Der Entwurf von komplexen Systemen wie Fahrzeugen, Infrastrukturen oder Produktionsanlagen kann ebenfalls durch CPS unterstützt werden. Während des Entwurfs wird zunehmend die Simulation eingesetzt, um Entwurfsfehler möglichst frühzeitig zu erkennen. Denn jeder Fehler, der erst in der Prototypphase oder im Pilotbetrieb entdeckt wird, verursacht unnötige Kosten. Gerade beim Entwurf von physikalischen Systemen schleichen sich leicht Fehler ein, wenn die physikalische Umwelt nicht genau genug modelliert wurde. Um derartige Fehler frühzeitig zu erkennen, werden Hardware-in-the-Loop-Simulationen in der Entwicklungsphase eingesetzt. Reale Komponenten eines größeren Systems wie Baugruppen einer Produktionsanlage oder eines Fahrzeuges werden auf einem Prüfstand zusammen mit einer virtuellen Umgebung, die die Anlage bzw. das Fahrzeug darstellen, getestet. Der Prüfstand könnte in diesem Szenario als CPD aufgefasst werden. Das Umgebungsmodell sollte möglichst detailliert sein, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten und auch versteckte Detailfehler frühzeitig zu erkennen. Teilweise ist es hier sinnvoll, ganze Verbünde von Steuergeräten auf dem Niveau von Hardwarearchitekturen zu simulieren. Die für solche aufwändigen Simulationen benötigte Rechenleistung ist in den wenigsten Betrieben verfügbar. Sie könnte in einem CPS zur Verfügung gestellt werden. Dienste zur Simulation von Infrastrukturen zur Vorhersage oder zur Echtzeitvisualisierung von physikalischen Effekten (z. B. Strömungen oder Materialflüssen) könnten als CPS-Dienst angeboten und über ein CPD dargestellt werden. Auch hier ist zu vermuten, dass sich in naher Zukunft Tablets oder AR-Brillen als CPD zur Unterstützung des Entwurfsprozesses und der eingesetzten Werkzeuge zur Steuerung oder Bedienung von Echtzeitsystemen über Funk/WLAN durchsetzen.

Die Industrieautomatisierung ist ein etabliertes Anwendungsfeld für CPS. Produktionssysteme sollen autonom und flexibel gestaltet werden, sodass sie auch auf unvorhergesehene Ereignisse reagieren können. Die Produktion von Einzelanfertigungen (Losgröße eins) soll unterstützt werden. Ein modernes Produktionssystem setzt sich aus Komponenten zusammen, die Informationen auf unterschiedlichstem Abstraktionsniveau verarbeiten (siehe Abbildung 10). Die Erfassung von physikalischen Daten erfolgt auf der Fertigungsebene durch intelligente Sensoren und Anlagenkomponenten, die durch echtzeitfähige Netzwerke verbunden sind. Die Sensoren und Anlagenkomponenten (SPS, Prozesskontrollsysteme) können als CPDs auf der untersten Ebene aufgefasst werden. Die CPDs sollten als modulare Funktionsbausteine realisiert sein und sich selbstständig im Produktionssystem anmelden können. Teile dieser Funktionalität sind in dem sich etablierenden Kommunikationsstandard OPC-UA enthalten. Für den Einsatz in öffentlich zugänglichen Netzen oder für Verfahren der Selbstorganisation müsste OPC-UA jedoch angepasst bzw. erweitert werden. In der Automatisierungstechnik werden häufig echtzeitfähige Derivate des Ethernet eingesetzt (Industrial Ethernet), welche auch in der Automobiltechnik für einige Anwendungen diskutiert werden. Diese Netzwerke werden sich in Zukunft weiter verbreiten. Für die Entwicklung von CPDs bilden diese Netzwerke eine gute Ausgangsbasis.

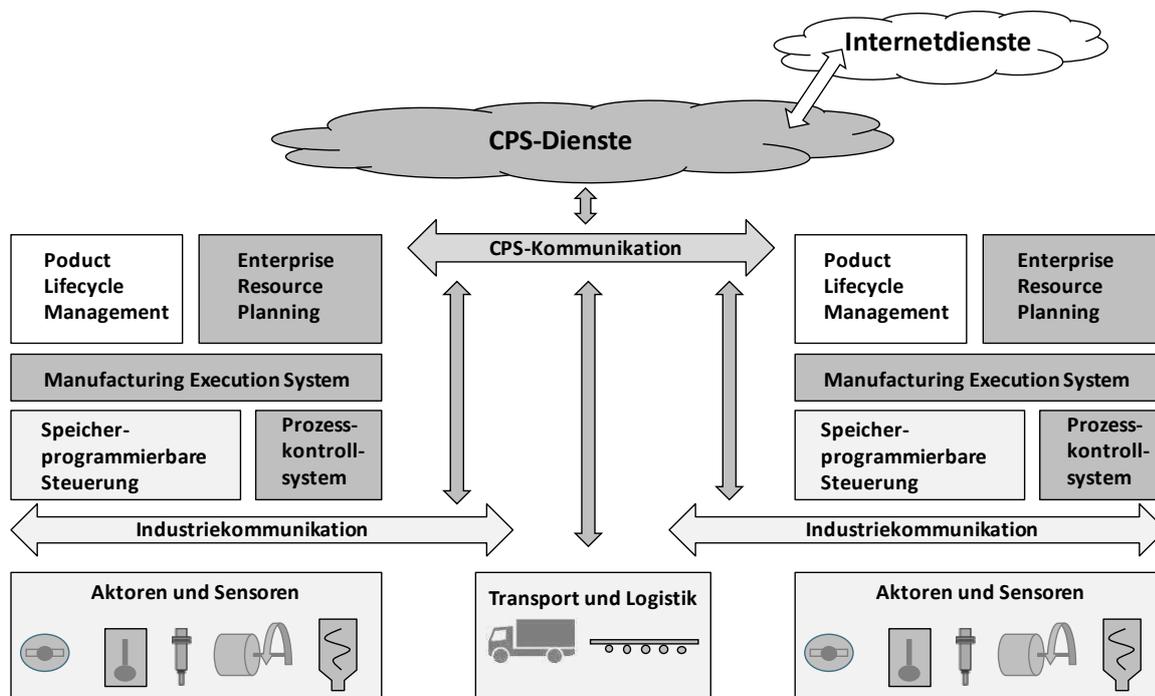


Abbildung 10: Smart Factory

Im Idealfall arbeitet eine automatisierte Produktionsanlage schon wie ein „lokal arbeitendes“ CPS. Dienste der Produktionsanlage, die auf der Verarbeitung physikalischer Daten beruhen, können in die CPS-Infrastruktur ausgelagert werden. Auch höherwertige, auf Echtzeitdaten basierende Funktionen, wie sie von Manufacturing Execution Systems und Enterprise Resource Planning Systems realisiert werden, können dann ausgelagert werden. Durch die Auslagerung von Diensten sind meist größere Datenbasen verfügbar, sodass die Dienste bessere Ergebnisse liefern können.

Durch den Einsatz zusätzlicher intelligenter Sensoren (CPDs) kann beispielsweise der Verschleiß in Produktionsanlagen rechtzeitig erfasst werden. So können auch schlecht planbare Aktivitäten wie die Wartung besser in den Produktionsprozess integriert werden. Auch die Steuerung von Prozessen, die verschiedene Technikbereiche umfassen, wird durch CPS ermöglicht. So kann z. B. die Steuerung von Klimaanlage in Produktionsräumen oder in Rechenzentren auf die reale Situation abgestimmt werden. Erste Entwicklungen statten auch die Werkstücke selbst mit lokaler Intelligenz aus, sodass sie als CPDs aufgefasst werden können. Diese Werkstücke „kennen“ den von ihnen zu durchlaufenden Produktionsprozess und können so automatisch durch die Produktionsanlage laufen. Für den Transport von Vorprodukten, Gepäckstücken in Flughäfen oder Containern in Terminals können ebenfalls CPS eingesetzt werden. In diesen Bereichen werden häufig RFID-Techniken zum Erfassen von Objekten und physikalischen Orten genutzt. Hier werden entsprechende Transponder und Lesegeräte als CPDs eingesetzt, welche bei neueren Installationen teilweise von Kamerasystemen mit intelligenten Bilderkennungsverfahren abgelöst werden.

Ein großes Innovationspotenzial aus Sicht der CPS besteht darin, die Auftragsabwicklung zwischen Auftraggeber, Produktionsanlage und Zulieferern zu koordinieren. In diesem Fall können ganze Produktionsanlagen als CPD aufgefasst werden. Neben der schon durch Internetdienste unterstützten Abwicklung von Aufträgen und Bestellungen von Zulieferern wird dann der physikalische Materialfluss von den Zulieferern über die Logistik und die Produktionsanlagen bis hin zum Kunden

automatisiert. Die Koordinierung von Produktionsanlagen einer Firma an verschiedenen Standorten ist aus dieser Sicht nur ein Spezialfall. In diesen Anwendungsszenarien entsteht im Idealfall ein großes, sich selbst organisierendes, automatisch arbeitendes Cyber Physical System.

Neben dem Aufbau von Hightech-Produktionsanlagen können CPS auch genutzt werden, um die in vielen kleinen und mittelständischen Betrieben existierenden gewachsenen Strukturen von der Akquise von Aufträgen über die Lagerhaltung bis zur Produktion und Produktauslieferung zu unterstützen. Sollen aktuelle Automatisierungstechniken eingesetzt werden, so ist im Allgemeinen ein starker Bruch in der Organisationsstruktur und in den Prozessabläufen zu erwarten. Soll z. B. die Lagerhaltung umgestellt werden, so müssen meist auch neue Räumlichkeiten gefunden werden, um teure Hochregallager zu installieren. Solche Umstellungen z. B. in der Lagerhaltung sind insbesondere für Mittelständler nicht in einem Zug realisierbar und beinhalten ein großes Risikopotenzial. Ebenso ist nicht in jedem Unternehmen die Umstellung von Produktionsanlagen auf eine vernetzte Steuerung möglich und/oder finanziell tragbar.

Mittels aktueller CPDs, die u. U. gar nicht für die industrielle Fertigung, sondern für den Consumer-Electronics-Markt entwickelt wurden, kann oft jedoch auch ein schrittweiser Einstieg in die Automatisierung erfolgen, dessen Risiken kalkulierbar bleiben. In einem Lager können z. B. Hinweise in einem AR-Device (Google Glass) eingeblendet werden, wo sich das gesuchte Material befindet. Auch Materialreste können mithilfe eines AR-Systems klassifiziert werden, ob sie als Ausgangsmaterial für weitere oder zukünftige Aufträge verwendet werden können und daher eine Lagerung sinnvoll erscheint. Bei der Produktion können Hinweise zum Einrichten oder Warten von Maschinen gegeben werden, auch wenn dies für ältere Maschinen bauartbedingt nicht oder nur schlecht möglich ist. Aus Sicht von Anbietern für Produktionstechnik können solche Dienste für den Einzelfall oft nur schlecht kostendeckend angeboten werden. Es müssen komplette Systeme angeboten werden, die leicht und ohne großen Aufwand durch einen Mittelständler selbstständig konfiguriert und angepasst werden können. Welche AR-Techniken oder mobilen Devices vor Ort eingesetzt werden sollten, hängt vom Anwendungsfall ab. Erste optische Qualitätskontrollen durch tragbare Kamerasysteme wie AR-Brillen lassen sich nahtlos in den Produktionsablauf integrieren. Alle Informationen, die sich über Bildauswertung erfassen lassen, können zur Unterstützung der Automatisierung verwendet werden. Hilfestellungen gerade auch für ungeschulte Mitarbeiter können dann in das Display eingeblendet werden.

UBIQUITOUS COMPUTING

Der Einsatz von CPS wird auch im privaten Umfeld zunehmen. Neben den schon in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Szenarien zur Mobilität und zur Energieversorgung ist die Steuerung von Sicherheits- und Komfortfunktionen in Gebäuden ein aktuelles Arbeitsgebiet. Die Steuerung zur Energieverwaltung in privaten Häusern wird auch als Zentrale zur Steuerung von Fenstern, vernetzten Feuermeldern, Fernbedienung der Heizung oder allgemein von Haushaltsgeräten verwendet. Auch Dienste zur Zugangskontrolle und Diebstahlsicherung werden durch CPDs (Schlosssysteme, Bewegungsmelder, Kameras etc.) bereitgestellt. In intelligenten Häusern ist eine große Menge von CPDs verbaut und vernetzt. In diesem Marktumfeld haben sich bisher mehrere u. U. nicht kompatible „De-facto-Standards“ etabliert, sodass Geräte unterschiedlicher Hersteller nicht kombiniert werden können. Auch die Gebäudeleittechnik für öffentliche Gebäude oder industriell genutzte Büro- und Produktionsräume setzt eine Vielzahl von Sensoren und Steuerungen zur Lichtsteuerung, Klimatisierung, Brandbekämpfung etc. ein. Hier haben sich analog zur Mobilität und zur Automatisierung ebenfalls Standards etabliert. Wünschenswert wäre, dass die CPDs in diesen Einsatzgebieten mehr lokale Intelligenz erhalten, sodass diese Systeme sich selbst organisieren können.

Im privaten Umfeld werden Servicefunktionen nicht nur zur Steigerung des Komforts eingesetzt. Ein Ziel ist es auch, behinderten oder alten Menschen möglichst lange das Wohnen in ihrer gewohnten Umgebung zu ermöglichen. Es wird z. B. an Systemen gearbeitet, die das Fallen von Bewohnern detektieren können. Ein CPS-Dienst kann dann, falls notwendig, Alarm auslösen, um Hilfe herbeizurufen. Die Überwachung durch ein intelligentes Kamerasystem (als CPD) kann zwar fallende Personen erkennen, eine kontinuierliche Kameraüberwachung im Privatbereich wird jedoch meist nicht von den Bewohnern akzeptiert. Eine Alternative besteht im Einsatz von druckempfindlichen Sensoren, die flächendeckend im Fußboden verteilt sind. Solche innovativen Sensorsysteme bieten wiederum das Potenzial für neue CPS-Anwendungen. Diese Bestrebungen, CPS und soziales Umfeld miteinander zu verbinden, mit dem Ziel, die Lebensqualität für Menschen vor allem im Alter zu erhöhen, werden unter dem Begriff „Ambient Assisted Living“ (AAL) zusammengefasst.

In der Prothetik werden zunehmend aktive Prothesen mit eigener Energieversorgung und Aktoren eingesetzt. Diese werden zum Teil auch durch Sensoren gesteuert, die Nervenströme detektieren. Durch eine Vernetzung dieser komplexen, eingebetteten Systeme könnten CPS-Dienste angeboten werden, mit denen sich die Prothesen besser auf den Träger einstellen lassen. Ebenso könnten die Fähigkeiten gesunder Menschen erweitert und ihre Kräfte z. B. durch Exoskelette erweitert werden, wie sie für die Prothetik oder für den militärischen Einsatz zurzeit entwickelt werden. Auch die Wahrnehmung kann durch zusätzliche Sensoren und Kamerasysteme erweitert werden. Viele Entwicklungen aus dem Bereich des Wearable Computing [Man97] können als CPDs eingesetzt werden, wenn sie in Echtzeit vernetzt sind. Systeme zur Ferndiagnose bei Montage und Wartungsarbeiten sind schon kurz vor der Einführung in der Industrie. Über AR-Brillen erhalten Beschäftigte perspektivisch korrekt eingeblendete Hinweise, welche Arbeitsschritte als nächstes durchzuführen sind und was dabei zu beachten ist, auch wenn sie ihren Kopf bewegen. Anwendungsgebiete können

hier die Wartung von Turbinen, die Demontage von Plastikverkleidungen in Fahrzeugen oder die Verdrahtung von Leitungen an unzugänglichen Stellen sein.

In den bisher vorgestellten Szenarien wird ein Mensch in seiner Tätigkeit durch CPDs unterstützt. Es werden auch Ansätze verfolgt, bei denen ein technisches System aus der Entfernung (remote) von einem Menschen gesteuert wird. Neben der Vernetzung der CPDs zur Steuerung wird ein Device als Stellvertreter des Menschen an einem entfernten Ort eingesetzt. Es gibt beispielsweise medizinische Systeme, bei denen ein Chirurg über große Distanzen eine Operation durchführt. In einem solchen Szenario müssen die fehlenden Wahrnehmungen des Bedieners durch unterstützende Dienste ersetzt werden. Solche Anwendungen sind auch im privaten Bereich denkbar. So könnten z. B. auch physikalische Avatare statt eines Menschen Museen oder andere interessante Orte besuchen (Telepräsenz).

Autonome Roboter gehen noch einen Schritt weiter. Sie erhalten eine Aufgabe und führen diese selbstständig aus. Staubsaugende oder rasenmähende Roboter für Privathaushalte sind überall erhältlich. Industrielle Reinigungsroboter werden auf Flughäfen oder großen Ladenflächen eingesetzt. Zurzeit wird an Robotern gearbeitet, die für behinderte und alte Menschen Assistenzleistungen wie einfache Hol- und Bringdienste ausführen. Beispiele sind der Care-O-bot 3 (IPA; Stuttgart, Hol- und Bringdienste) [IPA13], der semiautonome Assistenzroboter FRIEND (Universität Bremen; Bewegung, Greifunterstützung) [IAT12a] oder FAROMIR (Universität Duisburg-Essen; visuelle Auswertung des Gesundheitszustandes, Alarmmeldung bei Bedarf) [UDE13a]. Je komplexer die von autonomen Robotern auszuführenden Aufgaben sind, desto wichtiger ist ihre Vernetzung als CPD. Die Erfüllung ihrer Aufgaben kann dann durch Dienste im CPS unterstützt werden.

Aus Sicht der CPDs sollte genau beobachtet werden, welche Sensor- und Aktortechniken das Potenzial besitzen, in massentauglichen Devices verbreitet zu werden. Auch können durch das Einbinden einer Vielzahl von Nutzern bzw. ihrer CPDs mittels Crowdsourcing [How06] aktuelle Datensätze zur flächendeckenden Beschreibung der Umwelt erstellt werden. Die Idee hierbei ist, Systeme wie das Kartenwerk Open Streetmap quasi automatisch durch die Sensoren der CPDs auf dem aktuellen Stand zu halten. Hierfür wurde von Burke et al. auch der englische Begriff „Participatory Sensing“ geprägt [BEH+06].

05 FAZIT

Cyber Physical Systems stellen die nächste logische Entwicklungsstufe in der Informationsverarbeitung dar. Im CPS werden im Unterschied zum Internet und den dort typischerweise angebotenen Diensten auch physikalische Daten verarbeitet, die mittels CPDs erfasst und manipuliert werden. Dies ist erst durch die technische Weiterentwicklung bei der Ausführung von Diensten, der Kommunikation und der Sensorik ermöglicht worden. Die reale (physikalische) Welt und die Informationstechnik werden durch CPDs immer besser integriert werden. Über die erfassten Daten wird nach und nach ein immer genaueres Abbild (oder Modell) der Realität im Cyberspace entstehen.

Aus Sicht der Anwender werden im CPS Dienste zur Unterstützung des Menschen in den unterschiedlichsten Lebenslagen angeboten werden, die bisher technisch nicht oder nur sehr aufwändig realisiert werden können. Wichtig hierbei ist, dass die angebotenen Dienste auch vom Anwender akzeptiert werden. Die Funktionsweise muss für den Anwender nachvollziehbar sein und er muss sicher sein, dass die von ihm und über ihn erfassten Daten vertrauenswürdig behandelt werden. Auch müssen Entscheidungen, die von einem CPS/CPD getroffen werden, transparent für den Anwender sein. Die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle eines CPDs ist der Schlüssel für den Erfolg von CPS.

Aus Sicht der Dienste und Netzbetreiber wird sich eine Vielzahl von zusätzlichen Geschäftsfeldern entwickeln. Die durch ein CPD erfassten physikalischen Daten stellen hierbei einen eigenen Wert dar (ähnlich zu Adresslisten im Internet). Auf ihrer Basis lassen sich neue Dienste entwickeln, an die zum Zeitpunkt der Erfassung der Daten noch nicht gedacht wurde. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser neuen Geschäftsfelder wird im Vergleich zu der softwaretechnischen Entwicklung und dem Betrieb von Diensten immer weiter in den Vordergrund treten. Ähnliche Entwicklungen können zurzeit bei Google, Twitter oder Facebook beobachtet werden.

Produkthersteller können zusätzliche Produkteigenschaften realisieren, indem sie ihre Produkte als CPDs in CPS integrieren, und somit den Wert ihrer Produkte steigern. Schon heute werden viele Funktionen in Fahrzeugen, Maschinen oder auch Haushaltsgeräten durch eingebettete Software realisiert. Die Vernetzung als CPD ermöglicht nun Servicenfunktionen, die auf der Kooperation mehrerer Geräte basieren. Dadurch können Dienste auf die im CPS zusammengeführten Daten zugreifen und diese zur Produktverbesserung auch zur Laufzeit nutzen. Dienste, die während der Lebenszeit eines CPDs angeboten werden, bieten zusätzliche Geschäftsmodelle an und erhöhen die Kundenbindung.

Ein zusätzliches Potenzial für innovative CPS-Dienste entsteht, wenn CPDs domänenübergreifend eingesetzt werden können. Hier sind Geschäftsmodelle denkbar, in denen Messwerte von CPDs, die von dem Betreiber eines CPS-Dienstes erfasst wurden, im CPS-Netz für andere Betreiber, die in anderen Geschäftsfeldern tätig sind, angeboten werden. Obwohl hier großes Synergiepotenzial für die CPS-Anwender liegt, werden sich domänenübergreifende CPS-Anwendungen nur sehr langsam entwickeln. Gründe dafür liegen oft in Details (Vertraulichkeit, Standards, unterschiedliche Techniken etc.), die den initialen Aufbau von domänenübergreifenden CPS erschweren.

Die Grundlage jedes CPS-Dienstes sind die physikalischen Daten, die durch CPDs erfasst werden und die Möglichkeiten zur Manipulation der Umwelt durch CPDs. Innovative Aktoren und Sensoren, die in CPDs verbaut werden, eröffnen daher meist das Potenzial für zusätzliche Dienste und damit für zusätzliche Märkte. Die Entwicklung von Aktoren und Sensoren sollte daher insbesondere auch bezüglich ihrer Vernetzung unterstützt werden.

Aus der Verarbeitung physikalischer Daten ergeben sich viele technische Anforderungen insbesondere bezüglich des Zeitverhaltens an alle beteiligten Komponenten. Techniken aus der Datenverarbeitung im Internet müssen mit Konzepten aus technischen Anwendungen vereint werden. Die CPS-Dienste, die Infrastruktur zur Ausführung von CPS-Diensten, die CPS-Kommunikationsdienste und die CPDs müssen echtzeitfähig werden. Die Entwurfstechniken für Echtzeitsysteme bzw. eingebettete Systeme müssen auf den Entwurfsprozess von CPDs übertragen werden. Die Einführung einer CPS-Middleware, mit Hilfe derer CPDs auf die Sensoren anderer CPDs, CPS- oder Kommunikationsdienste zugreifen können, wäre ein Weg, den Entwurf von CPS zu unterstützen. In CPS können je nach Anwendung hunderte von CPDs kooperieren. In solchen Systemen ist es nicht

mehr möglich, dass sich die Teilnehmer gegenseitig kennen und zentral verwaltet werden. Prinzipien zur Selbstorganisation spielen daher beim Einsatz von CPDs eine große Rolle. Selbstoptimierung, durch die sich ein CPS zur Laufzeit selbstständig durch Adaption oder Lernen verbessert, ist ein wichtiger Aspekt der Selbstorganisation. Auch die Autonomie von CPDs muss bei der zunehmenden lokalen Intelligenz beachtet werden. CPDs werden zunehmend lokale Intelligenz besitzen und autonom handeln können. Wie solche CPDs in eine CPS integriert werden können und welche CPS-Dienste sie nutzen können, muss noch weiter untersucht werden.

Die Weiterentwicklung von CPDs wird parallel auf mehreren Linien erfolgen. Da die für CPS notwendige Infrastruktur für harte Echtzeitbedingungen noch nicht flächendeckend zur Verfügung steht, werden zunächst CPS entwickelt, in denen nur relativ wenige CPDs kooperieren. Diese CPDs werden lokal ad hoc die benötigte Infrastruktur mit eigenen Ressourcen aufbauen (z. B. Kolonne fahren). Diese Entwicklungslinie wird hauptsächlich durch den dynamischen Aufbau von harten Echtzeitsystemen geprägt. Dieser Typ von CPS-Anwendungen besitzt das größte technische Innovationspotenzial.

Eine andere Entwicklungslinie wird sich hauptsächlich mit der Erfassung von physikalischen Daten und deren Aufarbeitung beschäftigen und daraus Beratungsinformationen für den Anwender extrahieren (z. B. Verkehrsleitsysteme). Diese Entwicklungslinie stellt nur weiche Echtzeitanforderungen, nutzt aber eine sehr große Anzahl von CPDs. Die für den Aufbau solcher CPS benötigte Infrastruktur ist meist verfügbar, da moderne Kommunikationsnetze hierzu vielfach ausreichen. Viele andere Entwicklungslinien sind sehr stark domänenorientiert (z. B. Automatisierung) und basieren auf den jeweils in den Domänen verfügbaren Techniken.

Um die Weiterentwicklung von CPS, insbesondere aus Sicht der CPDs, zu forcieren, sollte die Bearbeitung verschiedener technischer Themenstellungen unterstützt werden. In jedem Fall sollte die weitere Entwicklung der CPS/CPDs anwendungsgetrieben erfolgen. In NRW erscheint es sinnvoll, alle in dieser Studie angesprochenen Domänen zu unterstützen, wenn eine konkrete Nachfrage besteht. Dies gilt auch für den Bereich der Consumer-Elektronik. Obwohl in NRW fast keine Hardwareentwicklung von Consumer-Devices stattfindet, sollte die Entwicklung von Zusatzgeräten für mobile Devices und die Programmierung von CPDs hier unterstützt werden. Anwendungsszenarien, die mehr als eine Domäne umfassen, sollten hierbei eindeutig bevorzugt werden. Die Pilotierung von domänenübergreifenden CPS sollte gefördert werden. Die Evaluierung der Systeme sollte besonders unterstützt werden. Gegebenenfalls sollte hier in Zusammenarbeit mit der Industrie der Aufbau von Testumgebungen und Teststrecken unterstützt werden, um auch den Einfluss von CPDs auf die reale Welt unter realistischen Bedingungen zu testen. Auch der Einsatz von prototypisch entwickelten, einfachen CPDs (CPD light) oder intelligenten Sensoren kann einen wesentlichen Beitrag zur Evaluation leisten.

Neben den anwendungsorientierten Szenarien sollte die Weiterentwicklung einiger Querschnittsthemen ermöglicht werden. Die zu bearbeitenden Themen können hier rund um eine „Entwurfsmethodik für CPS/CPD“ angeordnet werden. Ein wichtiger Punkt hierbei ist, dass die für eingebettete Systeme entwickelten Entwurfsverfahren auf CPS/CPDs übertragen werden. Das Echtzeitverhalten und die technische Unterstützung von Vertraulichkeit und Sicherheit der Daten (Reputation, Security, Privacy) sind hierbei zu beachten. Auch die Einbindung von Aktoren und Sensoren sowie die Gestaltung der Bedienoberflächen sollte berücksichtigt werden.

Viele CPS-Anwendungen zeichnen sich durch eine hohe Dynamik bezüglich der Teilnehmer und der Anpassung von Diensten zur Laufzeit aus. Hier müssen Ansätze aus der Selbstorganisation und

Selbstoptimierung betrachtet werden. Es sollte weiterhin untersucht werden, inwieweit sich der Prozess des Entwurfs von CPS automatisieren oder zumindest konfigurieren lässt, um CPS-Dienste, die gegebenenfalls auch lokal auf einem CPD ausgeführt werden, dynamisch anzupassen. Eine ähnliche Technik sollte für die On-the-fly-Generierung von Oberflächen untersucht werden.

Domänenübergreifende CPS-Anwendungen können auch durch technische Maßnahmen unterstützt werden. Die Entwicklung von domänenübergreifenden Modellen der verfügbaren (physikalischen) Daten würde zur Klärung der Zusammenhänge zwischen den Domänen beitragen. Ebenso ist es sinnvoll, die in den verschiedenen Domänen üblichen Standards zu untersuchen und soweit möglich zu integrieren. Evtl. müssen hier etablierte Standards aufgebrochen und offener gestaltet werden. Die CPS-Middleware könnte hier als Kristallisationspunkt für die Integration von Standards aus verschiedenen Anwendungsdomänen dienen.

Parallel zu den Forschungsthemen, die sich aus den Anwendungen und der Technik ergeben, müssen die gesellschaftlichen Auswirkungen betrachtet werden. Aus juristischer Sicht müssen Fragestellungen des Datenschutzes von personenbezogenen Daten und von vertraulichen Industriedaten untersucht werden. Auch der Rahmen für die Haftung muss für CPS/CPDs geklärt werden, insbesondere wenn die Systeme die reale Umwelt manipulieren oder eigenständige Entscheidungen treffen. Die Auswirkungen des Einsatzes von CPS/CPDs im täglichen Leben sollten durch Feldstudien erfasst werden, um die Akzeptanz sicherzustellen. Ein wichtiger Teilaspekt ist hierbei die transparente Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Das Umfeld für CPS und CPDs ist in NRW insgesamt sehr gut aufgestellt. Für alle Geschäftsfelder, in denen CPS entwickelt oder eingesetzt werden, finden sich in NRW maßgebliche Firmen. Diese Verteilung von CPS-Kompetenzen in einer flächenmäßig dicht besiedelten Industrieregion bietet die Chance, Vorreiter beim Einsatz von domänenübergreifenden CPS zu werden und diese durch Entwicklung geeigneter Geschäftsmodelle für alle Beteiligten zu einem wirtschaftlichen Erfolg zu führen. Die in NRW existierende Mischung aus urbanen und ländlichen Regionen ist auch ideal geeignet, um innovative Ansätze wie das Crowdsourcing von physikalischen Daten für die unterschiedlichsten Anwendungen zu testen. Hier könnten auch die in NRW ansässigen gemeinnützigen Organisationen von technikaffinen Einwohnern (ADAC, Rettungsorganisationen, FabLabs, oder Chaos Computer Club nahe Organisationen) mit einbezogen werden. Innovative Anwendungsfelder von CPS/CPDs in Forschungsprojekten führen oft zu neuen Geschäftsfeldern oder Firmenneugründungen. Um die Konkurrenzfähigkeit der hier ansässigen Firmen zu stärken, ist ebenfalls innerhalb der jeweiligen Domänen die Unterstützung von CPS/CPD-Entwicklungen notwendig. Insgesamt sollte das schon sehr gute Umfeld in NRW weiter gestärkt werden, damit eine technologische Spitzenstellung gehalten und ausgebaut werden kann.

06

ANHANG:

DAS UMFELD VON CYBER PHYSICAL SYSTEMS IN NRW

Das Land NRW ist eine Hochburg für die Entwicklung von Cyber Physical Systems. Dies gilt insbesondere für die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Anwendungsdomänen. In NRW sind eine Vielzahl von Unternehmen und Forschungseinrichtungen ansässig, die den Fokus auf CPDs und damit verbundene Anwendungen haben. Daneben gibt es jedoch auch viele Firmen, die ihren Schwerpunkt auf Infrastrukturdienste legen, die in diesen Anwendungen benötigt werden. Häufig sind Dienste jedoch nicht ausschließlich einem CPD zugeordnet bzw. werden nicht ausschließlich als CPS-Dienst realisiert, sondern arbeiten im Zusammenspiel beider Komponenten. Darüber hinaus sind sie u. U. auch für unterschiedliche Anwendungsbereiche relevant. Beispiele sind etwa Dienste zur Authentisierung oder Abrechnung und Bezahlendienste, die häufig auf speziellen CPDs beruhen.

Große IT-Dienstleister mit Sitz in NRW sind etwa Ericsson mit dem deutschen Hauptsitz in Düsseldorf, arvato in Gütersloh, MATERNA oder adesso in Dortmund, Orga Systems oder Morpho Cards in Paderborn. Wincor Nixdorf entwickelt ebenfalls Dienste, schwerpunktmäßig für den Sektor Handel und Banken. Hier steht jedoch die Gesamtlösung aus Diensten und CPDs im Vordergrund. So werden beispielsweise auch Kassensysteme oder Geldautomaten hergestellt.

Weitere Unternehmen mit Zentralen oder großen Entwicklungsstandorten in NRW unterstützen ebenfalls den Betrieb von Internetdiensten, die teilweise auch schon physikalische Daten verarbeiten. So betreut Atos beispielsweise seit 20 Jahren die Olympischen Spiele hinsichtlich der IT-Infrastrukturen und IT-Services neben der Entwicklung von branchenspezifischen Lösungen in unterschiedlichen Anwendungsdomänen. Die IBM Deutschland Mittelstand Services GmbH in Meerbusch bietet insbesondere Dienste für Mittelständler angefangen von betriebswirtschaftlichen Anwendungen bis hin zum Betrieb von Rechenzentren. Fujitsu Technologies entwickelt an seinem Standort in Paderborn Serversysteme sowie Lösungen und betreibt Rechenzentren für verschiedene Anwendungsgebiete.

Auch mobile CPDs werden von Firmen in NRW angeboten. Im Bereich der Consumer-Elektronik ist hier Medion mit Sitz in Essen zu nennen. Die Firma Mettenmeier in Paderborn hingegen stellt mobile industrielle Devices her, die auch für den Einsatz in Gefahrenbereichen zertifiziert sind.

Im Folgenden wird das Umfeld im Bereich CPS separat für die bereits in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungsdomänen Energieversorgung, Mobilität, Produktion und Ubiquitous Computing betrachtet. Es werden Unternehmen und Forschungseinrichtungen sowie ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten (F & E Aktivitäten) vorgestellt.

A.1 ENERGIEVERSORGUNG

In der Energieversorgung sind Cyber Physical Systems und Devices sowohl bei der effizienten Nutzung und Einsparung von Energie hilfreich als auch bei der Verteilung insbesondere der dezentral erzeugten erneuerbaren Energie. Die Potenziale, die sich in NRW durch die ansässigen Unternehmen und Forschungsinstitute und ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten ergeben, werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

A.1.1 POTENZIALE IN NRW

Innerhalb Deutschlands ist NRW die führende Energieregion. Dies zeigen auch die von den Clustern Energieforschung und Energiewirtschaft bereitgestellten Informationen [CEF13a, CEF13b, Ene13, NRW11]. In NRW werden 30 % der in Deutschland benötigten Energie erzeugt aber auch 40 % des in Deutschland benötigten Industriestroms verbraucht. Mit RWE in Essen und der E.ON AG in Düsseldorf sind in NRW zwei der vier größten Stromerzeuger Deutschlands ansässig, die zusammen rund 80 % des deutschen Strommarktes versorgen. Mit der STEAG AG in Essen, die ebenfalls zu den großen Stromerzeugern Deutschlands gehört und der Amprion GmbH in Dortmund, die nach eigenen Angaben Deutschlands längstes Höchstspannungsnetz betreibt, sind weitere Unternehmen der Energiewirtschaft in NRW ansässig. Auch Anlagen zur dezentralen Erzeugung regenerativer Energien werden in NRW produziert. Die SolarWorld AG in Bonn ist ein weltweit führender Hersteller von Solaranlagen. Die Winergy AG, der führende Komponentenhersteller für Windturbinen, hat ihren Sitz in Voerde.

Große Zentren zur Energieforschung befinden sich in Aachen und Münster. So unterstützt E.ON an der RWTH Aachen das E.ON Energy Research Center. Hier werden von fünf Instituten unterschiedliche Themen von der Energieerzeugung und -speicherung über Energienetze bis hin zu Energieökonomik, -management und -politik bearbeitet [EER13]. Mit der Speichertechnik sowohl für Batterien im Elektrofahrzeug als auch für die Speicherung von regenerativer Energie aus Sonne und Wind befasst sich das Forschungszentrum MEET (Münster Electrochemical Energy Technology) an der Universität Münster [MEE11]. Mit energieökonomischen Fragestellungen beschäftigt sich auch das EWI der Universität Köln, das von RWE, E.ON und dem Land NRW unterstützt wird [EWI13].

Die ef.Ruhr Forschungs-GmbH in Dortmund bündelt die Energieforschungsaktivitäten der TU Dortmund, der Ruhr-Universität Bochum und der Universität Duisburg-Essen. An der TU Dortmund wird insbesondere am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft ie3 zu CPS-relevanten Themen geforscht, beispielsweise zum Smart-Metering, zum Netto-Null-Energiehaus, zur Netzintegration für Elektrofahrzeuge, zum verteilten Energiemanagement, zu europäischen Transportnetzen oder zu ökonomischen Fragestellungen wie Energiehandel, Preisbildung oder Geschäftsmodellen. An der Ruhr-Universität Bochum arbeitet der Lehrstuhl Energiesysteme und Leistungsmechatronik unter anderem an innovativen Stromsensoren, dezentral vernetzten Energiesystemen oder Elektromobilitätsthemen. An der Universität Duisburg-Essen befasst sich der Lehrstuhl Elektrische Anlagen und Netze mit Sicherheitssystemen für elektrische Anlagen oder Energieeffizienz und Lastmanagement in elektrischen Energieversorgungsnetzen. Das

Fachgebiet Energietransport und -speicherung forscht etwa zum Thema Smart Home oder Elektromobilität. An der Universität Paderborn ist das Kompetenzzentrum für nachhaltige Energietechnik (KET) auf verschiedenen Gebieten wie der umweltfreundlichen Energieerzeugung, Wandlung und Nutzung, der dezentralen Energieversorgung, dem Smart Grid aber auch der Elektromobilität aktiv.

Für den Bereich CPD und CPS sind in NRW auch Aktivitäten auf dem Gebiet der Energieverteilung in intelligenten Stromnetzen (Smart Grid) bis hin zur effizienten Energienutzung im Smart Home von besonderem Interesse.

Die Mettenmeier GmbH in Paderborn ist, neben der Herstellung von Tablet-PCs für die industrielle Nutzung, in der Analyse und Bewertung u. a. von Stromnetzen auf der Hoch-, Mittel- und Niederspannungsebene aktiv. Die hier verwendeten CPDs erlauben es, die Netzdynamik insbesondere auch in Bereichen unterhalb 50 Hz zu messen. So können Effekte durch die dezentrale Energieeinspeisung regenerativer Energien von Windkraft- oder Photovoltaikanlagen frühzeitig ermittelt werden und Gegenmaßnahmen zur Netzstabilisierung eingeleitet werden.

In der Forschung und Entwicklung von intelligenten Geräten und Verfahren für Hoch- und Mittelspannungsnetze, die auch steuernd in die Netze eingreifen sind beispielsweise die TU Dortmund, die Bergische Universität Wuppertal, die STAWAG in Aachen oder die Beckhoff Automation GmbH in Verl aktiv.

Als CPDs im Bereich Smart Home werden in NRW sowohl Smart Meter als auch Hauskontrollstationen oder intelligente Haushaltsgeräte entwickelt. Smart Meter wurden den Stromkunden von beispielsweise von den Energieversorgern E.ON (bis 2012) [EON13] und von RWE im Rahmen eines Pilotprojektes in Mülheim [RWE13a] angeboten. Für den Betrieb im intelligenten Stromnetz entwickelt Miele Smart-Grid-fähige Haushaltsgeräte sowie Steuergeräte, die aufbauend auf Smart Metern die Hausgeräte erst dann starten, wenn der Strom günstig verfügbar ist [Mie13]. Die Vernetzung solcher Lösungen in Privathäusern wird beispielsweise im SmartHome Paderborn demonstriert [SHP13]. Betrachtet werden Anwendungen vom Energiemanagement, über die Haus- und Lichtsteuerung bis hin zur Telemedizin. Weitere vernetzte Gebäude zur Evaluierung unterschiedlicher Smart-Home-Lösungen finden sich im inHaus1 und inHaus2 in Duisburg [FHZ13]. Einen deutschlandweiten Überblick über solche Smart-Home-Musterwohnungen und Living Labs findet man in [SSK10, CLEV13]. An Fragestellungen, wie mit Hilfe solcher vernetzter CPDs eine effizientere Energienutzung ermöglicht wird, forschen in NRW z. B. das Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT mit Sitz in St. Augustin, die TU Dortmund, die Ruhr-Universität Bochum oder die Universität Duisburg-Essen. Der Aspekt des Datenschutzes im Smart Grid wird beispielsweise an der Universität Paderborn betrachtet.

A.1.2 F & E AKTIVITÄTEN IN NRW

Im Rahmen von CPS trägt die intelligente Vernetzung von Anlagen und Geräten für Energieerzeugung, Energiespeicherung, Energieverteilung und Energieverbrauch, zur Umsetzung der Energiewende bei. Zurzeit wird insbesondere auf der Ebene der Energieverteilung im Smart Grid und der effizienten Energienutzung beim Endverbraucher unter dem Begriff Smart Home an CPD-relevanten Themen geforscht.

SMART GRID

Im Smart Grid an der Schnittstelle zwischen Niederspannungsnetz und Mittelspannungsnetz befinden sich die Ortsnetzstationen, die im Rahmen der Energiewende zu intelligenten CPDs ausgebaut werden müssen, um eine dynamische Stromeinspeisung und weitergehende Dienste zur autonomen Regelung zu unterstützen. Mit dieser Thematik beschäftigen sich aktuelle nationale und internationale Projekte mit einer Vielzahl von Beteiligten aus NRW.

Die Smart Area Aachen hat den Aufbau, den Betrieb und die Erforschung eines intelligenten Stromnetzes im Stadtgebiet Aachen zum Ziel [STA13]. Die bearbeiteten Themen reichen von intelligenten Ortsnetzstationen, Regelungsverfahren für regelbare Ortsnetztransformatoren und intelligenten Kommunikationsinfrastrukturen über die Netzplanung und die Netzzustandsprognose bis hin zur Instandhaltung. Die Begleitforschung betrachtet übergreifende Fragestellungen sowie Geschäftsmodelle und Normungs-/Standardisierungsaspekte. An der Verwirklichung der Smart Area Aachen arbeiten zwölf Partner in mehreren Verbundprojekten, die vom BMWi unterstützt werden. Etwa die Hälfte der Partner stammt aus NRW. Dazu gehören die Stadtwerke Aachen AG STAWAG (Konsortialführung), das Institut für Hochspannungstechnik IFHT in Aachen, die RWTH Aachen, die TU Dortmund, die KISTERS AG in Aachen und die BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH in Aachen.

An der Bergischen Universität Wuppertal wird am Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung ebenfalls an intelligenten Ortsnetzstationen und geeigneten Automatisierungskonzepten für das Nieder- und Mittelspannungsnetz gearbeitet. Das Projekt iNES (intelligentes Verteilnetzmanagement-System) konzentrierte sich dabei auf die Niederspannungsebene [BUW13a, ZNO13]. Im Projekt NiVeAu (Netzintelligenz für die Verteilnetzautomatisierung) wird die dort entwickelte Technologie um ein im Umspannwerk angesiedeltes Automatisierungsgerät erweitert, das mit den unterlagerten Ortsnetzstationen und weiteren Aktoren und Sensoren kommuniziert, um einen sicheren Betrieb auch auf Ebene des Mittelspannungsnetzes zu gewährleisten [BUW13b]. Im Projekt NEmo (Netzintegration von Elektromobilität und regenerativen Einspeisern mithilfe einer intelligenten Ortsnetzstation) werden darüber hinaus Ladekonzepte für Elektrofahrzeuge entwickelt, die den Aufladungsvorgang an bestimmte Bedingungen knüpfen und die Ansteuerung der Ladeinfrastruktur sowie der Elektrofahrzeuge weiterentwickeln [BUW13c]. An dem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit BMU geförderten Projekt sind ebenso wie an den Vorgängerprojekten neben der Bergischen Universität Wuppertal die SAG GmbH in Langen, die Bilfinger Mauell GmbH in Velbert sowie die Mainova AG in Frankfurt beteiligt.

Auch am Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft ie3 der TU Dortmund wird an der Gerätetechnik zur Ausstattung der Mittelspannungsnetze mit Schutz und Automatisierungsfunktionen geforscht. Bis Mitte 2012 war das ie3 als Koordinator am EU-Projekt ICOEUR (Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of EU and Russian Power Grids) beteiligt, das die Integration von Energienetzen der EU und Russland zum Thema hatte [ICO13]. Im aktuellen EU-Projekt Grid4EU wird von sechs europäischen Energieerzeugern jeweils ein Demonstrator entwickelt und im Betrieb untersucht. In Deutschland soll der Demonstrator unter Leitung der RWE zusammen mit der TU Dortmund und der ABB entwickelt und in einem Feldtest in Reken (NRW) evaluiert werden. Ziel ist es, die Überwachung und Steuerung von Mittelspannungsnetzen mithilfe von Mess- und Schaltagenten (Sensoren und Aktoren), die über GPRS vernetzt werden, zu automatisieren [ERD13, ie312]. Schutz- und Automatisierungssysteme für das Smart Grid werden ebenfalls im aktuell vom BMWi geförderten Projekt I Protect gemeinsam mit dem OFFIS Oldenburg, der BTC

Business Technology Consulting AG, Oldenburg, der H&S Hard- und Software GmbH und Co. KG, der KoCoS Messtechnik AG und der Beckhoff Automation GmbH in Verl erforscht und evaluiert [OFF13].

SMART HOME

Zum Thema Energieeffizienz auf der Ebene der Endverbraucher stehen insbesondere öffentliche Gebäude und Infrastrukturen sowie Mietwohnungen großer Wohnungsgesellschaften im Fokus. Daneben gibt es jedoch auch Initiativen, die Privathäuser adressieren.

Im EU-Projekt eSESH (Saving Energy in Social Housing with ICT) wurden bis Mai 2013 beispielsweise Lösungen zur Energieeinsparung an mehreren Orten in Europa entwickelt und in Feldtests evaluiert [emp10]. Von den drei deutschen Pilotstudien fand eine in Solingen statt. Als Partner aus NRW waren daran die empirica Gesellschaft für Kommunikations- und Technologieforschung mbH in Bonn, die als Koordinator im Gesamtprojekt agiert, der Spar- und Bauverein Solingen eG, die envi-GmbH in Witten und die ISTA Deutschland GmbH in Essen beteiligt. Der Fokus in diesem Projekt lag auf der Messung und dem Vergleich des aktuellen Energieverbrauchs mit vergangenem Verbrauch und der Vorhersage des zukünftigen Verbrauchs, um den Bewohnern Hinweise zur Energieeffizienz zu geben. In einem weiteren von empirica koordinierten Projekt, dem EU-Projekt smartspaces (Saving Energy in Europe's Public Buildings Using ICT) sollen ähnliche Ansätze für öffentliche Gebäude entwickelt und am Beispiel des Hager Rathauses und des Emil-Schumacher Museums in Hagen evaluiert werden [emp11]. Neben empirica und der Stadt Hagen ist hier die envi Engineer and Consulting Company GmbH in Witten als Projektpartner beteiligt. In beiden Projekten soll jedoch nicht steuernd in das Energienutzungsverhalten eingegriffen werden, sondern nur beratend.

Die im Folgenden beschriebenen EU-Projekte, an denen das Fraunhofer-Institut für angewandte Informationstechnik FIT in Bonn beteiligt ist, sehen hingegen auch den steuernden Eingriff vor. Das EU-Projekt GreenCom: MyGrid; Energy Efficient and Interoperable Smart Energy Systems for Local Communities) hat zum Ziel, kurzfristige Schwankungen, die beim Verbrauch und der Erzeugung von Energie in lokalen Niederspannungsnetzen entstehen, auf MircoGrid-Level auszugleichen [Gre13]. Hierzu werden auf Haushaltsebene Daten über Geräte, Sensoren, Aktoren und Smart Meters in nahezu Echtzeit gesammelt, aggregiert und analysiert. Hieraus werden der aktuelle Verbrauch und Vorhersagen über den zukünftigen Verbrauch ermittelt. Diese dienen als Grundlage, um den Stromverbrauch durch intelligente Kontrolle der stromverbrauchenden Geräte ebenso wie die lokale Energieversorgung und -speicherung zu steuern. Auf dem Gebiet der Energieeffizienz für öffentliche Gebäude oder U-Bahnstationen ist das FIT an den EU-Projekten SEEMPubs (Smart Energy Efficient Middleware for Public Spaces) [SEE13] und SEAM4US (Sustainable Energy Management for Underground Stations) [SEA13] beteiligt. In beiden Projekten sollen verschiedene Sensor- und Aktornetze und weitere spezifische Geräte mit Hilfe einer Middleware integriert werden und die erfassten Daten zugreifbar gemacht werden, um den Energieverbrauch proaktiv steuern zu können.

Eine große Feldstudie in Privathaushalten wurde in dem vom BMWi geförderten Projekt E-DeMa (Entwicklung und Demonstration dezentral vernetzter Energiesysteme hin zum E-Energy Markt der Zukunft) Anfang 2013 abgeschlossen. E-DeMa entwickelte und testete Lösungen, damit Bürger ihren Stromverbrauch sinnvoll gestalten und auch als Anbieter aktiv an einem lokalen Strommarkt teilnehmen können [RWE13b]. In der Modellregion Mülheim an der Ruhr und in Krefeld haben sich rund 700 Teilnehmer daran beteiligt. Projektpartner waren die FH Dortmund, Miele, ProSyst, Ruhr-

Universität Bochum, RWE, Siemens, SWK, TU Dortmund und die Universität Duisburg-Essen. Hier wurden unterschiedliche CPDs wie Smart Meter von RWE, intelligente Hausgeräte von Miele oder IKT Gateways der TU Dortmund eingesetzt. Ein weiterer großer Feldtest in NRW soll in Wachtendonk durchgeführt werden. Hier bauen die Stadtwerke Krefeld AG und Siemens das Stromnetz zur einem Smart Grid um. 100 Haushalte sollen mit Smart Metern ausgestattet werden. Ebenso sollen intelligente Ortsnetzstationen in das Netz integriert werden [Sie13].

A.2 MOBILITÄT

Das Verkehrsmanagement inklusive der Vernetzung aller Verkehrsteilnehmer sowie die Entwicklung und Produktion von Fahrzeugen als intelligente CPDs, die aktiv am Verkehr teilnehmen, bestimmen zusammen mit Fragestellungen der Elektromobilität das Umfeld im Bereich Mobilität, das in den folgenden Abschnitten beschrieben ist.

A.2.1 POTENZIALE IN NRW

Im Bereich Mobilität ist die Automobilbranche in NRW stark vertreten, wie auch aus den Webseiten des AutoCluster.NRW [Aut13] oder der NRW.INVEST GmbH [NRW13a] ersichtlich. Drei große Fahrzeughersteller haben zurzeit Produktionsstätten in NRW; die Ford Werke GmbH in Köln, die Adam Opel GmbH in Bochum und die Daimler AG in Düsseldorf. Mit dem Ford Forschungszentrum hat Ford seinen einzigen Forschungsstandort außerhalb der USA in Aachen. Die Forschungsgebiete reichen von der Motorentwicklung über innovative Antriebstechniksysteme wie Brennstoffzellen- und Hybridtechnologien bis hin zu CPS-relevanten Themenstellungen wie Telematik und Sicherheitssystemen inklusive Car-to-Car-Kommunikation [For13].

Mit rund 800 Unternehmen sind in NRW etwa 30 % der deutschen Zulieferunternehmen ansässig [NRW13a]. Zu den Unternehmen, die auf den CPD-affinen Gebieten Aktorik, Sensorik, Fahrerassistenzsysteme oder Elektromobilität tätig sind, gehören beispielsweise die Benteler AG in Paderborn, die Hella KGaA Hueck & Co. in Lippstadt, die Kostal Gruppe mit Sitz in Lüdenscheid oder die paragon AG in Delbrück, von denen die ersten drei zu den 100 umsatzstärksten Automobilzulieferern zählen.

Die Benteler AG integriert beispielsweise mechatronische Elemente in Form von aktiven und semi-aktiven Aktoren ins Fahrwerk, um damit die Eigenschaften des Fahrwerksystems umzuschalten [Ben13]. Die weiteren genannten Firmen haben u. a. einen Fokus auf unterschiedlichen Sensorsystemen und realisieren mit ihrer Hilfe unterschiedliche Steuerungssysteme im Automobil, die die Kooperation mehrerer Automobile oder mit dem Menschen im Rahmen von CPS ermöglichen. So entwickelt Kostal im Geschäftsbereich Automobil Elektrik neben Bordsteuergeräten für Zentralverriegelung, Türsteuerung, Fensterheber, Wischer- und Lichtsteuerung auch Sensoren zur Ermittlung von Füllständen und Temperaturen und eine Fahrerassistenzkamera mit integrierter Regen- und Lichtsensorik [Kos10]. Ein solcher Sensor ist die Grundlage für Fahrerassistenzsysteme, die es erlauben, ein einfaches CPS beispielsweise zur Abstandskontrolle oder zum Kolonnenfahren aus mehreren Fahrzeugen aufzubauen, um die Sicherheit und den Komfort von Fahrzeugen zu erhöhen.

Hella entwickelt neben innovativen Lichtsystemen solche Fahrerassistenzsysteme zum Spurwechsel und zur Abstandswarnung, jedoch basierend auf einer Radarsensorik. Bezüglich der Forschung auf diesen Gebieten arbeitet Hella mit dem L-Lab der Universität Paderborn zusammen. Auch im Bereich Elektromobilität, der das Potenzial bietet, Fahrzeuge domänenübergreifend mit dem Energiesektor zu vernetzen, sind diese Unternehmen aktiv. Hella wie auch paragon entwickeln

Energiespeicher und Energiemanagementkomponenten (Batteriesensor, Ladesystem, Motor Controller) sowie deren Einbindung in das Bordnetzwerk.

Techniken und Werkzeuge für den modellbasierten Entwurf solcher Fahrzeuge werden in NRW beispielsweise von der dSPACE GmbH [dSP13], einem der führenden Anbieter von Werkzeugen für die Entwicklung und den Test mechatronischer Regelungssysteme, oder der iXtronics GmbH [iXt13] in Paderborn entwickelt. Im Test Center der ThyssenKrupp Automotive Systems GmbH in Essen, die ebenfalls zu den 100 umsatzstärksten Automobilzulieferern zählt, werden Prinzipuntersuchungen, Erprobungen und Dauerprüfungen an Modulen, Konzeptfahrzeugen und Prototypen in verschiedenen Entwicklungsstadien durchgeführt [TKA10].

Auch in der Forschungslandschaft werden aktuell die Themen Elektromobilität, Fahrerassistenz oder die Fahrzeugvernetzung, die häufig mit den Begriffen Vehicle-to-Vehicle (V2V) bzw. Car-to-Car (C2C) oder Car-to-X (C2X) bezeichnet wird, bearbeitet. Die betrachteten Fragestellungen haben oft auch einen Bezug zum Verkehrsmanagement (Intelligent Transport Systems).

So wird vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) das Programm Modellregion Rhein-Ruhr gefördert, um die Elektromobilität vor allem auf die Straße und damit in die Anwendung zu bringen. Hier sind neben Unternehmen, die zum Teil oben schon erwähnt wurden, Forschungseinrichtungen aus ganz NRW beteiligt. Dazu gehören beispielsweise die Ruhr-Universität Bochum, die Universität Duisburg-Essen, die RWTH Aachen, die Universität Siegen oder die TU Dortmund.

Das Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft ie3 der TU Dortmund leitet auch das NRW-Kompetenzzentrum Infrastruktur & Netze, eines von drei Kompetenzzentren, die im Rahmen des NRW Masterplans Elektromobilität gefördert werden [ETN13]. Hier sind CPS- und CPD-relevante Themen wie Vernetzung mit der Energiewirtschaft oder Einbindung von Informations- und Kommunikationstechniken angesiedelt. Das Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen forscht sowohl an modularen Antriebs- und Fahrsystemen für Elektrofahrzeuge als auch an Fahrerassistenzsystemen. Dem ika obliegt die Leitung des NRW-Kompetenzzentrums Fahrzeugtechnik.

Das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML in Dortmund entwickelt beispielsweise im Rahmen der Modellregion Rhein-Ruhr Lösungen zur effizienten Einsatzplanung von Elektrofahrzeugen im Lieferverkehr, die als Dienste im CPS zur Verfügung gestellt werden können. An der Gestaltung geeigneter Infrastrukturen und Geschäftsmodellen für die Elektromobilität arbeiten beispielsweise die Universität Paderborn, Atos, E.ON Westfalen Weser, Morpho Cards, Orga Systems und die UNITY AG. Ein Beispiel für solche Infrastrukturen sind Ladestationen, wie sie von der RWE Effizienz GmbH, Dortmund, oder von E.ON als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Stromnetz angeboten werden.

Im Hinblick auf ITS (Intelligent Transport Systems) zur Steigerung der Sicherheit und Effizienz im Straßenverkehr mittels Car-to-Car bzw. Car-to-Infrastructure Vernetzung, ist das „CAR 2 Car Communication Consortium“ (C2C-CC) [C2C13] auf dem Gebiet der Forschung, Entwicklung und Standardisierung für die Fahrzeugvernetzung aktiv. Hier sind neben Fahrzeugherstellern und Zulieferern aus ganz Europa auch einige Firmen und Forschungseinrichtungen aus NRW aktiv, wie die IMST GmbH aus Kamp Lintfort, die escrypt GmbH mit Hauptsitz in Bochum, das ika der RWTH Aachen, die Technische Universität Dortmund, die Heinrich Heine Universität Düsseldorf oder die Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) in Bergisch Gladbach.

A.2.2 F & E AKTIVITÄTEN IN NRW

In der Forschungslandschaft werden in aktuellen Projekten schwerpunktmäßig die oben bereits genannten Themen Elektromobilität, Intelligente Transportsysteme (ITS) und Fahrzeugvernetzung mit Bezug zum Einsatz von Fahrzeugen bzw. Fahrzeugkomponenten als CPDs in CPS bearbeitet. Darüber hinaus gibt es viele Projekte, die sich mit Entwurfswerkzeugen für den Automobilbereich befassen.

ELEKTROMOBILITÄT

Einen Überblick über Projekte, die vom Land NRW/EFRE gefördert werden, findet man in [ETN12]. Hier stehen die Themen Batterie, Fahrzeugtechnik, Infrastruktur und Netze, Geschäftsmodelle sowie Feldversuche im Rahmen der Modellregion Elektromobilität Rhein-Ruhr, aber auch in anderen Städten wie Bielefeld oder Köln im Vordergrund.

Ebenso finden sich Projekte, die Entwurfswerkzeuge für Elektrofahrzeuge zum Inhalt haben. Im Projekt Entwurfsumgebung E-Mobil wird beispielsweise von der dSPACE GmbH zusammen mit der dMecs GmbH in Köln sowie dem C-LAB und dem Fachgebiet LEA der Universität Paderborn an Simulationswerkzeugen zum Test virtueller Steuergeräte im Elektrofahrzeug gearbeitet.

Die Anbindung von Elektrofahrzeugen in Smart-Home-Infrastrukturen wird im Projekt ZAESAR unter Leitung der TU Dortmund zusammen mit der EMC Test NRW GmbH, der EVB Energy Solutions GmbH, der TÜV Informationstechnik GmbH, der Albrecht Jung GmbH & Co. KG und der EM Test GmbH untersucht. Ziel ist es, an jeder Steckdose eine individuelle Abrechnung zu Lasten des jeweiligen Elektrofahrzeuges zu ermöglichen.

Mit dem Leuchtturmprojekt ELMO (Elektromobile Urbane Wirtschaftsverkehre) wird im Rahmen der Modellregion Elektromobilität Rhein-Ruhr ein branchenübergreifendes Projekt in den Domänen Elektromobilität und Logistik vom BMVBS gefördert [IML13a]. Ziel ist es, neue Lieferkonzepte für Metropolen auf der Basis von elektromobilen Lkw ab 7,5 Tonnen Gesamtlast zu entwickeln und zu erproben. UPS, Tedi Logistik und CWS Boco lassen zehn Fahrzeuge im Alltagsbetrieb fahren, während ABB Busch-Jaeger die Infrastruktur testet. Fraunhofer IML (Konsortialführung) und Wirtschaftsförderung Dortmund bearbeiten Kommunikations- und Navigationsthemen.

Im Programm IKT für Elektromobilität II des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) werden Projekte im „Forschungsdreieck von Smart Car – Smart Grid – Smart Traffic“ gefördert. Einen Überblick liefert die Website des BMWi [BMW13]. Besonderen Bezug zum Einsatz von Fahrzeugen bzw. Fahrzeugkomponenten als CPDs in CPS haben die folgenden Projekte.

Im Projekt econnect Germany werden Verkehrsanwendungen unter Nutzung der Elektromobilität (Smart Traffic) und die Integration der Elektromobilität in das intelligente Stromnetz (Smart Grid) mittels Informations- und Kommunikationstechnik erforscht, entwickelt und an verschiedenen Standorten erprobt. In diesem Projekt wird das CPD Elektrofahrzeug und seine Vernetzung im Verkehrs- und Energiesystem betrachtet. In Aachen steht unter anderem das Aufladen von E-Fahrzeugen zu Hause in Verbindung mit dem Smart Home im Fokus der Forschung, in Duisburg das Laden am Arbeitsplatz. Als Projektpartner aus NRW sind die smartlab Innovationsgesellschaft mbH in Aachen (Konsortialführung), die Kellendonk Elektronik GmbH in Köln, die Phönix Contact Electronics GmbH in Bad Pyrmont, die RWTH Aachen, die Schleupen AG in Altenbeken, die Stadtwerke Aachen AG, die Stadtwerke Duisburg und die Universität Duisburg-Essen beteiligt [Hin13, smar13].

Im Projekt open ECOSPhERE (Enabling open Markets with Grid & Customer-oriented Services for Plug-in Electric Vehicles) wird ebenfalls die Integration von Elektrofahrzeugen in die Energiesysteme betrachtet. Ergänzend werden hier jedoch neue IKT-gestützte Komfortdienste wie Bezahlverfahren oder Reservierungen entstehen, die auf einer sicheren und echtzeitfähigen Vernetzung mittels Breitband Powerline aufbauen [PPC13]. RWE Effizienz GmbH (Konsortialführer), RWTH Aachen und TU Dortmund sind als Projektpartner aus NRW beteiligt.

Das Projekt oscar (Open Service Cloud for the Smart Car) hat zum Ziel, eine offene IKT-Systemarchitektur für Elektrofahrzeuge zu entwickeln, die die Anbindung des CPD Fahrzeug an CPS-Dienste in der Open Service Cloud unterstützt. In oscar werden Mobilitäts- und Entertainment-Dienste, die über Internetverbindungen realisiert werden, adressiert [Str13]. Projektpartner aus NRW sind StreetScooter GmbH in Aachen (Konsortialführer), FEV GmbH in Aachen, Hans Hess Autoteile GmbH in Köln, QSC AG in Köln, regio IT gesellschaft für informations-technologie mbh in Aachen, Institute SE (Software Engineering) und FIR (Forschungsinstitut für Rationalisierung) der RWTH Aachen. Darüber hinaus ist die DEE Dräxlmaier Elektrik- und Elektroniksysteme GmbH in Vilsbiburg, die zu den Top 100 Automobilzulieferern zählt, am Projekt beteiligt.

CAR-2-X UND ITS

Ziel des Leitprojektes Connected Car ist es, durch den direkten Austausch von Informationen zwischen Fahrzeugen (Car-to-Car, C2C) und mit der Infrastruktur (Car-to-Infrastructure, C2I) die Anzahl von Verkehrsunfällen signifikant zu verringern und zur Optimierung von Verkehrsflüssen beizutragen. In verschiedenen Szenarien soll beispielsweise vor Gefahrenstellen gewarnt werden. Weiterhin sollen Fahrerassistenzsysteme zur Abstandsregelung (Adaptive Cruise Control) untersucht werden. An dem vom BMWi geförderten Projekt arbeiten als Partner die IMST GmbH, die mimoOn GmbH, die Option Wireless Germany GmbH, das Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMST, die RWTH Aachen, die Universität Duisburg-Essen, die Heinrich Heine Universität Düsseldorf und die TU Dortmund, die alle in NRW ansässig sind [IMS13].

Ähnliche Ziele verfolgte das vom BMWi und BMBF unterstützte Projekt simTD (Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland), in dem neben vielen Fahrzeugherstellern auch Ford mit der Ford Forschungszentrum Aachen GmbH vertreten war. Hier werden außerdem anonymisierte Informationen zur Verkehrslage vom Fahrzeug an die Verkehrszentralen übermittelt, sodass die straßenseitige Infrastruktur optimal geschaltet und die weitere Verkehrsentwicklung zuverlässig prognostiziert werden kann. Diese Informationen können dann beispielsweise zur Routenplanung verwendet werden. In diesem Projekt wurde auch die Einrichtung einer Teststrecke durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und so die Durchführung von Feldversuchen ermöglicht [Dai13].

Aktuell wird vom BMWi im Rahmen des 3. Verkehrsforschungsprogramms der Forschungsverbund UR:BAN (Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement) gefördert [URB13]. Unter den 30 Partnern aus Automobil- und Zulieferindustrie, Elektronik-, Kommunikations- und Softwarefirmen sowie Forschungspartnern sind aus NRW die Universität Duisburg-Essen, die RWTH Aachen, das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Köln, die Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach und die Stadt Düsseldorf beteiligt. Hier sollen in mehreren Projekten u. a. Verkehrsinfrastruktur und intelligente Fahrzeuge miteinander vernetzt werden, um die Kapazität des Straßensystems besser zu nutzen. Es sollen ebenfalls intelligente

Fahrerassistenzfunktionen realisiert werden, beispielsweise zum Schutz von schwächeren Verkehrsteilnehmern oder zur Kollisionsvermeidung durch Ausweichen oder Bremsen. Aspekte der Bedienung solcher Assistenzsysteme, die gerade im urbanen Verkehr kritisch sind, werden ebenfalls betrachtet. Die Ergebnisse sollen in Feldversuchen in Düsseldorf und Kassel evaluiert werden.

Das Thema der Datensicherheit, das bei der Kommunikation in/mit Elektrofahrzeugen sowohl für Nutzer als auch für Energie- und Dienstleistungsanbieter von hoher Relevanz ist, betrachtet das Projekt SecMobil (Secure eMobility), das vom BMWi gefördert wird [esc13]. Hier wird unter anderem ein kryptografisch gesicherter Stromsensor und eine standardisierte Sicherheitsarchitektur für Elektroautos, die eine manipulationssichere Ladestrommessung unterstützt, entwickelt. Die Konsortialpartner escrypt GmbH (Konsortialführer), Daimler AG, ELMOS Semi-conductor AG, Ruhr Universität Bochum (RUB), smartlab Innovationsgesellschaft mbH, Westfälische Hochschule stammen bis auf die Daimler AG aus NRW.

Im Projekt PRESERVE (Preparing Secure Vehicle-to-X Communication Systems) steht ebenfalls der Sicherheitsaspekt im Vordergrund. Ziel dieses von der EU im 7. Rahmenprogramm geförderten Projektes ist es, ein skalierbares und kostengünstiges V2X Sicherheitssystem zu entwickeln, das durchgängig von den Fahrzeugsensoren über das Bordnetzwerk und die V2V/V2I Kommunikation bis hin zur Anwendung greift. Aus NRW ist hier die escrypt GmbH – Embedded Security beteiligt [UTw13].

A.3 AUTOMATISIERUNG

Die Automatisierung in den Bereichen Produktion und Logistik macht die Bedeutung, die die IKT für die Innovationskraft der Branche hat, besonders deutlich. Schon lange werden neue Funktionalitäten maschinenbaulicher Produkte zumeist mit Hilfe eingebetteter Systeme realisiert, sodass man hier von mechatronischen Systemen spricht. Dies gilt auch für die Produktions- und Logistikprozesse, deren Automatisierung vielfach auf neuen CPDs (oder Produkten) oder ihren innovativen Funktionen aufbaut. Auf diesem Gebiet wird zurzeit unter dem Begriff Industrie 4.0 die vierte industrielle Revolution vorangetrieben, die insbesondere auf die Vernetzung von Maschinen und Produktionsanlagen im Sinne von CPS zielt.

A.3.1 POTENZIALE IN NRW

Der Maschinenbau und die Produktionstechnik nehmen in NRW einen wichtigen Platz in der Wirtschaftsstruktur ein (vgl. [NRW13b]). Maschinen aus NRW genießen auch im Ausland ein hohes Ansehen. Etwa ein Viertel aller Betriebe in Deutschland sind in NRW angesiedelt. Die Exportquote betrug 2011 mehr als 60 %. Die Unternehmenslandschaft ist im Wesentlichen durch mittelständische Unternehmen geprägt, die häufig auch auf dem Weltmarkt zu den führenden Anbietern gehören. Viele haben sich in regionalen Netzwerken zusammengeschlossen, die mit dem NRW Cluster ProduktionNRW [Pro13] zusammenarbeiten, beispielsweise OWL-Maschinenbau, NEMAS (Netzwerk Maschinenbau Südwestfalen) mit jeweils etwa 100 Mitgliedern, NIRO (Netzwerk Industrie Ruhr Ost mit 65 Mitgliedern oder In|Die RegionRuhr. Auch die Städte Dortmund, Aachen oder Mönchengladbach haben Initiativen zur Vernetzung der Unternehmen und zur Förderung von Innovationen gegründet.

Im Kontext der Produktionsautomatisierung können zum einen die Produktionsanlagen bzw. ihre Komponenten als komplexe CPDs aufgefasst werden, die miteinander vernetzt sind. In NRW sind auf dem Gebiet der Automatisierung Firmen wie Beckhoff, Wago, Phönix, Weidmüller, Festo, Belden Electronics, Krohne Messtechnik, ifm elektronik, Harting Systems, Turck Electronics, Eaton Industries oder Invensys zu nennen.

Zum anderen können auch die produzierten Maschinen als CPDs betrachtet werden, die Dienste in der physikalischen Umwelt erbringen. In NRW werden Maschinen für unterschiedliche Anwendungsbereiche produziert. Beispiele sind CLAAS (Landmaschinen), Gildemeister (Werkzeugmaschinen), Kannegießer (Wäschereitechnik), Hettich (Möbel), Miele (Hausgeräte und industrielle Spül- und Waschanalgen), Wincor Nixdorf (Bezahlsysteme, Bankautomaten), ThyssenKrupp (Industrieanlagen), SMS-Siemag (Industrieanlagen), Deutz (Motoren), Vossloh (Schienenfahrzeuge), Caterpillar (Abbaugeräte und -fahrzeuge), Demag (Krane, Hebezeuge). Auch die Automobilindustrie gehört dazu (siehe Anhang, Abschnitt A.2, S. 57). Viele Innovationen dieser Firmen basieren auf der Vernetzung der Maschinen auch mit anderen Geräten und ihrer Einbettung in den Wertschöpfungsprozess des Anwenders.

Ein Forschungscluster auf den Gebieten der intelligenten Produktionssysteme und Produkte befindet sich mit dem Spitzencluster it's OWL – Intelligente Technische Systeme OstWestfalen-Lippe in Ostwestfalen-Lippe [its13]. Der Spitzencluster wird vom BMBF gefördert und vom Projektträger Karlsruhe betreut. Neben mehr als 150 Unternehmen aus der Region sind hier die Universität Bielefeld, die Universität Paderborn, die Hochschule Ostwestfalen-Lippe in Lemgo sowie die Fachhochschule Bielefeld, die Fachhochschule der Wirtschaft und die Hochschule Hamm-Lippstadt aktiv. Ebenfalls als Partner beteiligt sind weitere Forschungseinrichtungen der Universitäten Bielefeld und Paderborn und der Hochschule Ostwestfalen-Lippe sowie drei Fraunhofer-Institute, die Abteilung Advanced Systems Engineering, Paderborn, der Fraunhofer ENAS, das Fraunhofer-Anwendungszentrum Industrial Automation (IOSB-INA), Lemgo, und die Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik des Fraunhofer IPT, Paderborn.

Als Keimzelle des Spitzenclusters it's OWL kann der an der Universität Paderborn durchgeführte, von der DFG geförderte Sonderforschungsbereich Selbstoptimierende mechatronische Systeme (SFB 614) gelten, der im Juni diesen Jahres nach elf Jahren seinen erfolgreichen Abschluss hatte. Schon hier wurden die Prinzipien der Selbstoptimierung und ihre Umsetzung in Produkte systematisch untersucht und in der Praxis evaluiert.

Hinsichtlich einer Flexibilisierung der Produktion forscht z. B. das DMRC (Direct Manufacturing Research Center), das 2008 von Boeing, EOS Electro Optical Systems, Evonik Industries, SLM Solutions GmbH sowie von der Universität Paderborn gegründet wurde, an additiven Fertigungstechnologien.

Die RWTH Aachen bündelt ihre Produktionsforschung in einem Exzellenzcluster. Die mehr als 20 beteiligten Institute der RWTH Aachen aus der Material- und Produktionsforschung werden von der DFG gefördert und arbeiten mit rund 40 Partnern aus der Industrie zusammen am Thema integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer [AHI11].

Findet die Produktion unternehmens- oder standortübergreifend statt, müssen darüber hinaus auch logistische Probleme betrachtet werden. Ein regionaler Forschungsschwerpunkt zum Thema Logistik befindet sich mit dem EffizienzCluster LogistikRuhr in der Region Ruhr. Im Cluster sind mehr als 120 Unternehmen aus NRW und darüber hinaus vertreten. Als Hochschulen sind die Universität Duisburg-Essen mit dem Zentrum für Logistik und Verkehr (ZLV), die TU Dortmund, die private Universität Witten/Herdecke, die Hochschule für Ökonomie & Management in Essen sowie die Universität für Wirtschaft und Recht/European Business School in Wiesbaden beteiligt. Neben weiteren Forschungseinrichtungen sind auch das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML in Dortmund, eine der weltweit größten Forschungseinrichtungen im Bereich und „Keimzelle des EffizienzClusters LogistikRuhr“, sowie das Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST in Dortmund im Cluster aktiv [EC113].

A.3.2 F & E AKTIVITÄTEN IN NRW

Aktuelle Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet befassen sich sowohl mit der Vernetzung von Geräten, Maschinen und Anlagen, um hiermit neue CPS-Dienste in den jeweiligen Anwendungsgebieten zu generieren, als auch mit cyberphysischen Produktionssystemen, die auf der Vernetzung der Produktionsmaschinen beruhen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Betrachtung von Materialflüssen in logistischen Prozessen, in die neben den Produktionssystemen auch CPDs zum Transport von Gütern eingebunden sind.

INTELLIGENTE PRODUKTE UND PRODUKTIONS-AUTOMATISIERUNG

In NRW wird zurzeit auf diesem Gebiet der Spitzencluster it's OWL – Intelligente Technische Systeme OstWestfalenLippe gefördert. Hier wird in insgesamt 45 Projekten sowohl an Querschnittsthemen, wie intelligente Vernetzung, Energieeffizienz, Selbstoptimierung oder Mensch-Maschine-Interaktion, als auch an konkreten vernetzten mechatronischen Produkten und Produktionsverfahren gearbeitet. Eine Übersicht über die Projekte ist auf der Webseite des Spitzenclusters zu finden [its13]. Der Zusammenhang zu den in dieser Studie betrachteten Cyber Physical Devices ist besonders offensichtlich bei den Projekten zum Thema vernetzte Systeme, die sich häufig mit domänenübergreifenden Themen beschäftigen, die neben der Produktion auch andere Anwendungsbereiche wie Logistik, Energie oder Elektromobilität betreffen. Die im Folgenden vorgestellten Beispiele zeigen besonders anschaulich, wie durch die Techniken von CPS und die Integration von Geräten in den Cyberspace neue Dienste oder Verbesserungen an bisherigen Prozessen erst möglich werden.

Im Fokus des Projektes itsowl-KoMoS (Konzeption modellbasierter Benutzungsschnittstellen für verteilte Selbstbedienungssysteme) steht die Verknüpfung mobiler Endgeräte mit Selbstbedienungsterminals und die Unterstützung bei der Realisierung benutzergerechter Schnittstellen und Bedienkonzepte bei diesen vernetzten CPDs. An diesem Projekt sind die Wincor Nixdorf International GmbH und die Universität Paderborn beteiligt. Im Projekt itsowl-ReSerW (Ressourceneffiziente Selbstoptimierende Wäscherei) werden von der Firma Kannegiesser GmbH in Zusammenarbeit mit dem Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn, der Fraunhofer IPT Projektgruppe Entwurfstechnik Mechatronik in Paderborn und der Universität Bielefeld intelligente Regelungs-, Steuerungs- und Optimierungsstrategien entwickelt, die das Zusammenspiel der Maschinen und die Prozesse der gesamten Wäscherei insbesondere hinsichtlich des Energieverbrauchs optimieren. Hierzu gehören auch neuartige Automatisierungslösungen, wie beispielsweise ein intelligenter Greifroboter, die in den Prozess integriert werden. Im Projekt itsowl-RuMorS (Modellierung und Laufzeit-Unterstützung für hybride Wertschöpfung bei teilautonomen und mobilen Landmaschinen) wird von der Firma CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH und der FHDW Paderborn eine Software entwickelt, mit der sich die Landmaschinen an ihre Umgebung anpassen können und sich mit anderen Maschinen und weiteren Akteuren im Ernteprozess vernetzen können.

Die Vernetzung von Erntemaschinen wird auch im BMWi-geförderten Projekt marion (Mobile autonome, kooperative Roboter in komplexen Wertschöpfungsketten) von den Partnern CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH in Harsewinkel (Konsortialführung), Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI), Atos IT Services & Solutions GmbH in Paderborn und STILL GmbH in Hamburg bearbeitet [CLA13].

Das Projekt rorarob (Schweißaufgabenassistenz für Rohr und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem) betrachtet neben der Automatisierung des Produktionsprozesses insbesondere die Interaktion zwischen Mensch und Roboter [car13]. An diesem vom BMWi geförderten Projekt sind die carat robotic innovation GmbH in Dortmund (Konsortialführung), die Böcker Maschinenwerke GmbH in Werne, die TU Dortmund, die DEMGEN Werkzeugbau GmbH in Schwerte und die NIRO – Netzwerk Industrie RuhrOst e. V. in Unna als Partner aus NRW beteiligt. Daneben ist die MAN Diesel & Turbo SE mit der ehemaligen Tochter MAN Turbo AG in Oberhausen beteiligt.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt zur Produktion ist der Exzellenzcluster Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer an der RWTH Aachen. Bezüglich der Betrachtung des Produktionssystems als CPS ist hier insbesondere der Bereich der selbstoptimierenden

Produktionsprozesse von Interesse. Hier werden Prozesse auch über mehrere Produktions- und Montagezellen bis hin zur ganzen Fabrik betrachtet und die zur Selbstoptimierung notwendigen Aufrüst-, Überwachungs- und Steuerungsstrategien entwickelt [AHIP11].

Begleitend dazu wird im BMBF geförderten Projekt ProSense eine Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik entwickelt. Neben der RWTH Aachen (WZL, Konsortialführung und IAW) sind das Forschungsinstitut für Rationalisierung e.V. (FIR) an der RWTH Aachen, die Fachhochschule Aachen, die Ortlinghaus-Werke GmbH in Wermelskirchen, die Etags GmbH aus Kerpen sowie sechs weitere deutsche Partner beteiligt [WZL13].

LOGISTIK

Im EffizienzCluster LogistikRuhr werden Themen wie wandelbare Logistiksysteme, Logistics-as-a-Service, urbane Versorgung oder Güterverkehrsmanagement adressiert [ECL13]. Es werden sowohl Prozesse innerhalb von Logistikparks oder Lagern als auch Lieferketten über großräumig verteilte Standorte betrachtet. Die folgenden Projekte zeigen beispielhaft wie unterschiedliche Geräte zur Automatisierung und Optimierung von Logistikprozessen als CPS eingesetzt werden.

Im Zentrum des Projektes smaRTI (smart Reusable Transport Items) stehen intelligente Ladungsträger, die einzelne Packstücke zu Einheiten zusammenfassen und sich selbst durch ein globales Logistiknetz routen. Dazu sind sie untereinander und mit dem Logistiksystem vernetzt [IML13b]. An diesem Projekt sind das Fraunhofer IML in Dortmund (Konsortialführung), die TU Dortmund, die REWE-Informationen-Systeme GmbH in Köln, die Chep Deutschland GmbH in Köln, die Deutsche Post AG, Bonn sowie die Mars Services GmbH in Verden beteiligt. Im Projekt TiLO (Tracing intelligenter LogistikObjekte) werden unterschiedliche Geräte wie Kameras, RFID-Transponder oder anderer Sensoren zur Erfassung von Daten über logistische Prozesse eingesetzt, um die Abnahme, Instandhaltung und Steuerung ganzer logistischer Systeme zu unterstützen. Partner sind die Universität Duisburg-Essen (Konsortialführung), die Clatronic International GmbH, Kempen, die DEWIS GmbH, Wuppertal, die SDZ SimulationsDienstleistungsZentrum GmbH, Dortmund, die w3logistics AG, Dortmund, die Lufapak GmbH Neuwied und die Schenker Deutschland AG, Frankfurt [UDE13b]. Das Projekt Dynamics in Navigation hat die Vernetzung zwischen individuellen Navigationssystemen zum Thema. Durch Rückkopplung von individuellen Leitempfhlungen und kollektiven Steuermaßnahmen soll eine Optimierung der Routenempfehlung erfolgen [UDE13c]. Neben der Universität Duisburg-Essen (Konsortialführung) nahmen die TRC Transportation Research and Consulting GmbH, Essen, und die TomTom Development Germany GmbH, Berlin am Projekt teil.

Im Projekt DyCoNet (Dynamisches Container Netzwerk), das vom BMBF gefördert wurde, steht ebenfalls die Entwicklung intelligenter vernetzter Ladungsträger im Mittelpunkt [IML13c]. Hier sollen ULDs (Unit Load Devices) für den Luftverkehr mit Telematikmodulen versehen werden, die die Kommunikation untereinander oder mit Unternehmen weltweit via GSM/UMTS unterstützen. Über GPS wird das Tracking der Container ermöglicht. Die dafür benötigte Energie soll mittels Energy Harvesting aus der Umgebung (Vibration, Wärme, Licht) gewonnen werden. Mit dem Fraunhofer IML in Dortmund ist hier auch ein Partner aus NRW beteiligt. Weitere Partner sind die Lufthansa Cargo AG, (Konsortialführer), die EnOcean GmbH, die InnoTec DATA GmbH & Co. KG, die Jettainer GmbH und die PalNet GmbH.

CPDs und Software zur drahtlosen Fahrzeug- und Laderaumüberwachung zur Verbesserung der Effizienz, Sicherheit und Transparenz im Bereich Transport und Logistik wurden im Projekt DraFaLa entwickelt [omp09]. Zur Überwachung wird das Fahrzeug mit Kontrolleinheit (TCM-ECU) ausgerüstet, die über Funk mit einer Laderaumeinheit (LE) zur Anbindung verschiedener Sensoren im Laderaum verbunden ist. Der Überwachungsdienst kommuniziert mittels Geräten für den LKW-Mautbetrieb mit einer Zentrale und stellt damit schließlich die Informationen den Anwendern zur Verfügung. Sowohl die Geräte (TCM-ECU, LE) als auch der Mehrwertdienst wurden von den Partnern omp computer GmbH, Paderborn, Orga Systems GmbH, Paderborn und Universität Paderborn entwickelt. Das Projekt wurde im Rahmen des Automotive.NRW Förderwettbewerbs vom Land NRW und der EU gefördert.

A.4 UBIQUITOUS COMPUTING

Zu diesem Anwendungsbereich zählen neben dem in den folgenden Abschnitten betrachteten Gesundheitswesen, das viele Aspekte des Ambient Assisted Living berührt, auch die Gebäudeleittechnik oder die automatische Steuerung von Geräten im Haushalt. Diese Bereiche sind bereits im Abschnitt A.2 Energieversorgung betrachtet worden, da hier häufig die Reduzierung des Energieverbrauchs im Vordergrund steht.

A.4.1 POTENZIALE IN NRW

Ein Schwerpunkt der allgegenwärtigen Informationsverarbeitung liegt bei den in NRW ansässigen Unternehmen und Forschungseinrichtungen auf dem Gesundheitswesen und dem eng damit verbundenen Ambient Assisted Living. Mit mehr als 1,1 Millionen Beschäftigten und einem jährlichen Umsatz von ca. 58 Milliarden Euro ist die Gesundheitswirtschaft die bedeutendste Einzelbranche in NRW. Im Bereich des Gesundheitswesens werden in sechs Gesundheitswirtschaftsregionen sowie dem Gesundheitscampus Nordrhein-Westfalen Konzepte für das Gesundheitswesen in NRW entwickelt. In diesen Regionen sind etwa 400 Mitglieder organisiert [LZG13]. Die Regionen haben hinsichtlich der ansässigen Unternehmen und Aktivitäten unterschiedliche Schwerpunkte [CGW13, BGS11, CMT13]. In Südwestfalen ist die Zulieferindustrie stark vertreten. Hier liegt der Schwerpunkt auf Werkstoffen und Techniken für die Gesundheitswirtschaft. Ostwestfalen-Lippe (OWL) ist stark mit seiner Kliniklandschaft und seinen Universitäten und Hochschulen vertreten. OWL dient als Modellregion für Telemedizin. Im Raum Köln-Bonn ist neben den Kliniken, Dienstleistern, Kammern und Versicherungen auch die Pharmaindustrie stark vertreten. Thematisch steht diese Region für die Gesundheit für Generationen (AAL). Die präventive Medizin steht in der Region Münsterland im Vordergrund, während im Ruhrgebiet die Klinikwirtschaft den Schwerpunkt bildet. Für den Bereich CPS und CPD ist die Gesundheitsregion im Raum Aachen mit dem Themengebiet Medizintechnik und Life Sciences von besonderem Interesse.

Die Unternehmenslandschaft ist im Wesentlichen durch kleine und mittlere Unternehmen geprägt (vgl. [NRW13c]). Als ein größeres Unternehmen im Bereich CPDs ist die Medtronic GmbH in Moers zu nennen, die medizinische Geräte (CPDs) zur Therapieunterstützung entwickelt und herstellt. Ein weiteres Großunternehmen, die Firma Bayer Health Care, hat seine Unternehmenszentrale in Leverkusen. Das Unternehmen stellt Geräte zur Blutzuckerkontrolle her, die teilweise auch mit weiteren CPDs wie PCs oder Insulinpumpen vernetzt werden können.

Im Raum Aachen ist die RWTH Aachen mit ihren vielfältigen Aktivitäten hinsichtlich CPDs zu nennen. Sie nimmt insbesondere in der sogenannten personalisierten Medizintechnik eine führende Rolle ein. Hier wurden bis Mitte 2013 zusammen mit 40 Partnern aus der Region Aachen im Projekt „innovating medical technology in.nrw (medtec-in.nrw)“ personalisierte Lösungen für Herz-Kreislauf-Patienten entwickelt (s. u.). Ein Schwerpunkt an der RWTH Aachen lag u. a. auf der Entwicklung spezieller CPDs zur Herzüberwachung. Auch die Vernetzung verschiedener Geräte im Operationssaal wird an der RWTH Aachen erforscht. In Südwestfalen arbeitet das Zentrum für

Sensorsysteme (ZES) der Universität Siegen an der Entwicklung eines Assistenzrobotersystems, das zur interaktiven computergestützten Chirurgie eingesetzt werden soll [ZES13].

Auf dem Gebiet der Telemedizin ist OWL mit dem Institut für angewandte Telemedizin (IFAT) am Herz- und Diabeteszentrum in Bad Oeynhausen besonders aktiv. Hier werden Programme zur Überwachung unterschiedlicher Vitalparameter wie Gewicht, Blutdruck, Blutzucker, Blutgerinnung, EKG etc. durchgeführt und die Patienten zu Hause betreut. Der erfolgreiche Pilotbetrieb kann nun in den Regelbetrieb überführt werden. Im Ruhrgebiet wurde der Teleradiologieverbund Ruhr im Jahr 2010 gegründet [Med13]. Auch in Bochum, Düsseldorf, Dortmund, Köln oder Aachen sind einige Projekte auf diesem Gebiet angesiedelt. Eine Übersicht über weitere Aktivitäten findet man auf der Webseite des Instituts für Arbeit und Technik [IAT12b].

Die Fraunhofer Gesellschaft hat zum Thema Ambient Assisted Living (AAL) eine Allianz aus dreizehn Fraunhofer-Instituten gegründet, der auch drei Institute aus NRW angehören, das Fraunhofer-Institut für Software und Systemtechnik (ISST), das Fraunhofer-Institut für angewandte Informationstechnik (FIT) und das Fraunhofer-Institut Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (IMS). Das ISST in Dortmund ist sowohl im Gesundheitswesen als auch auf dem Gebiet AAL mit dem Thema Dienstleistung und Identifikation von Geschäftsfeldern aktiv. Im Raum Köln-Bonn ist das FIT angesiedelt, das beispielsweise im Bereich der Nanoelektronik für AAL Systeme forscht. Daneben ist in Duisburg das Fraunhofer inHaus-Zentrum mit einem LivingLab für den Bereich „Health und Care“ angesiedelt, das die Einbindung und Evaluierung unterschiedlicher CPDs in Klinik- und Pflegeabläufe unterstützt.

An der Ruhr-Universität Bochum wird an Technologien zur Entwicklung neuer Sensoren zur Diagnose erforscht. Auf dem Gebiet der Funktechnologien für moderne Diagnosegeräte forscht beispielsweise die Firma IMST GmbH. Die SNAP GmbH in Bochum forscht an Sensortechnologien zur Entwicklung von Prothesen.

A.4.2 F & E AKTIVITÄTEN IN NRW

In einer Reihe von Projekten werden Lösungen zur Vernetzung von Krankenhausabläufen oder für die Vernetzung des Operationssaals bearbeitet. Hier wird die Klinik als CPS betrachtet und die dort vorhandenen Geräte vernetzt. In telemedizinischen Anwendungen steht die Vernetzung des heimischen Umfeldes mit Kliniken, Pflegediensten oder Ärzten im Vordergrund. Aber auch innovative CPDs beispielsweise zur Unterstützung bei Pflege oder Rehabilitation und ihre Schnittstellen zum Menschen werden erforscht.

DAS CPS-KRANKENHAUS

Im Projekt Hospital Engineering, das vom Land NRW und der EU gefördert wird, werden Modelle zur Vernetzung der verschiedenen Bereiche im Krankenhaus (Logistik, Betriebswirtschaft, medizinische und pflegerische Prozesse) erarbeitet und umgesetzt. Beteiligt sind die Fraunhofer-Institute ISST und IML in Dortmund, IMS in Duisburg sowie UMSICHT (Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik) in Oberhausen. Zusammen mit der Universität Duisburg-Essen und mehreren Unternehmen werden an acht Krankenhäusern Fragestellungen der Gebäudetechnik, Betriebs- und Energietechnik sowie Medizintechnik und Informationstechnik bearbeitet. Dazu gehört beispielsweise die Kombination von Speiseversorgung und Medikamenteneinstellung, die Anwesenheitsüberwachung im Operationssaal, die Transparenz in der Materialwirtschaft oder die

Personal- und Patientenassistenz. Aus diesem Projekt heraus wurde die offene Initiative Hospital Engineering gegründet, der beispielsweise die oben genannten Fraunhofer-Institute angehören [ISS12a, ISS13]. Im Projekt RFID-Basierte Anwesenheitserfassung, das ebenfalls in diesem Kontext durchgeführt wird, wird mittels RFID Devices die Anwesenheit von Personal und Patienten an bestimmten Stationen im OP erfasst. Durch die Vernetzung mit dem Controlling-Bereich werden auch Abrechnungsvorgänge vereinfacht. Die Ausstattung medizinischer Geräte mit entsprechender Sensorik ist ebenfalls denkbar, beispielsweise um diese für Operationen vorzukonfigurieren [ISS12b].

Auf die für CPS relevante Vernetzung medizinischer Geräte im Operationssaal untereinander und mit angrenzenden IT-Systemen sowie deren Steuerung konzentrieren sich das gerade beendete Projekt smartOR [medi10] unter der Leitung des mediTEC der RWTH Aachen und das 2013 begonnene Projekt OR.NET [ZIM13] unter Leitung des Universitätsklinikums Heidelberg, der TU München und der RWTH Aachen – beide gefördert durch das BMBF. Das Projekt smartOR wurde von 14 Partnern, die mehrheitlich in NRW angesiedelt sind, durchgeführt. Das Projekt OR.NET erweitert den Partnerkreis auf Kliniken sowie Anbieter integrierter Operationssäle, Hersteller von Medizinprodukten, wie Medizingeräten und Medizintechnik-Komponenten, (IT-)Dienstleister und Forschungsinstitute aus mehreren Regionen Deutschlands und verbreitert damit auch die Basis für eine angestrebte Standardisierung der Ergebnisse.

TELEMEDIZIN UND TELEMONITORING

Auch im Bereich der Telemedizin wird in NRW geforscht. Für das Telemonitoring von Patienten mit Herzinsuffizienz wurden bis Anfang 2013 im Projekt BioMon-HF, gefördert durch das Land NRW und die EU, verschiedene Sensoren entwickelt, beispielsweise zum nächtlichen Monitoring des Blutdrucks, der Atem- und Herzfrequenz oder zur kapillaren Sauerstoffmessung [AKM13]. Projektpartner waren neben der RWTH Aachen die Philips Technologie GmbH, die Kardiologie des Universitätsklinikums Aachen, die I.E.M. GmbH, Takeda Pharma GmbH und das Forschungszentrum Jülich.

Im BMBF geförderten Projekt SAMDY entstand ein Frühwarnsystem aus verschiedenen in der Wohnung und im Bett installierten drahtlos kommunizierenden Sensoren, einem Lokalisierungssystem sowie einer Daten verarbeitenden Home-Station, die miteinander sowie mit einem Pflegedienst oder Betreuern vernetzt sind. Die Sensoren können das Schlaf- und Wachverhalten, die Bedienung von Hausgeräten sowie Vitaldaten wie Atmung und Puls messen [StG13]. Projektpartner sind das Sozialwerk St. Georg e. V., das Fraunhofer IMS, die Scemtec Automation GmbH, das Klinikum Duisburg, die inHaus GmbH und die akquinet AG. Des Weiteren existieren verschiedene Projekte im Zusammenhang AAL – Smart Home, die beispielsweise in [BGK13] beschrieben sind.

UNTERSTÜTZENDE CPDS

Bei der O.T.W.-Orthopädietechnik Winkler in Minden wird an intelligenten Prothesen geforscht in Zusammenarbeit mit der Universität Paderborn, der Universität Bielefeld, dem DLR Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik und der iXtronics GmbH in Paderborn [OTW13]. Die O.T.W. entwickelt im BMBF-Projekt CareJack gemeinsam mit überregionalen Partnern eine Oberkörperorthese zur Entlastung des Pflegepersonals bei körperlich belastenden Pflegeabläufen [BiB13].

Mit innovativen Methoden zur sensorbasierten neuronalen Steuerung von Prothesen beschäftigt sich die SNAP GmbH in Bochum. Die Sensortechnik wird nicht ins Gehirn implantiert, sondern liegt auf dem Kopf auf und misst von dort die Hirnströme. Der vom Land NRW und der EU geförderte

Forschungsbetrieb baut und betreibt einen Versuchstand zur Entwicklung neuronal gesteuerter adaptiver Prothesen [SNA13].

Nicht-invasive Techniken, die auf einem vernetzten System berührungslos arbeitender Sensoren und Aktoren basieren, verwendet auch das BewegungsanalySELabor des Instituts für Angewandte Medizintechnik an der RWTH für die Rehabilitation [AME13]. Hier wird die Bewegung durch unterschiedliche Sensoren wie Kameras, EMG oder Eyetracker im Raum erfasst und mittels eines Roboters werden reproduzierbare Bewegungsabläufe trainiert.

Im Projekt FAIR (Unterstützung körperlicher Funktionen durch hand-free Anwendungen in Erweiterter Realität) wird eine Videobrille, die u. a. auch als Assistenz- und Interaktionssystem für Menschen mit Behinderungen eingesetzt werden soll, entwickelt [int13]. In diesem vom BMBF geförderten Projekt ist neben der Interactive Minds Dresden GmbH (Koordinator), der Fraunhofer-Einrichtung für Organic, Materialien und Elektronische Bauelemente COMEDD, Dresden, der TU Dresden, der Trivisio Prototyping GmbH, Trier auch das Unternehmen Mecotec GmbH aus Hattingen beteiligt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [AHI11] Aachen House of Integrative Production Technology: Cluster of Excellence "Integrative Production Technology for High-Wage Countries". URL: http://www.production-research.de/_C12577F20052BDC7.nsf/html/de_index.html [Stand: 07.11.2013].
- [AKM13] AKM Innovationsmanagement GmbH: Biomon-HF Biomonitoring bei Herzinsuffizienz. URL: <http://www.medtec-innrw.de/index.php?id=39> [Stand: 08.11.2013].
- [ALRL04] Avizienis, A.; Laprie, J.-C.; Randell, B.; Landwehr, C.: Basic Concepts and Taxonomy of Dependable and Secure Computing. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, vol. 1, pp. 11-33, 2004.
- [AME13] Lehrstuhl für Angewandte Medizintechnik AME: Bewegungsanalyse. URL: <http://www.ame.hia.rwth-aachen.de/index.php?id=21&L=uohmmettqyexla> [Stand: 08.11.2013].
- [Arn99] Arnold, K.: The JINI Architecture: Dynamic Services in a Flexible Network. In 36th Design Automation Conference, 1999.
- [Ash09] Ashton, K.: That 'Internet of Things' Thing. RFID Journal, June, 2009.
- [AUT11] AUTOSAR: Virtual Functional Bus. AUTOSAR, 2011. URL: http://www.autosar.org/download/R4.0/AUTOSAR_EXP_VFB.pdf [Stand: 14.11.2013].
- [Aut13] AutoCluster.NRW: Automotive-Standort NRW. URL: <http://www.autocluster.nrw.de/index.php?id=20> [Stand 05.11.2013].
- [BEH+06] Burke, J.; Estrin, D.; Hansen, M.; Parker, A.; Ramanathan, N.; Reddy, S.; Srivastava, M. B.: Participatory Sensing. Workshop on World-Sensor-Web (WSW'06): Mobile Device Centric Sensor Networks and Applications (WSW'06), 2006, pp. 117-134. Online verfügbar: <http://escholarship.org/uc/item/19h777qd#> [Stand: 14.11.2013].
- [Ben13] Benteler AG: Produktgruppe Fahrwerk. URL: <http://www.benteler.de/automobiltechnik/produkte-und-kompetenzen/fahrwerke.html> [Stand: 05.11.2013].
- [BGK13] Book, M.; Gruhn, V.; Kleffmann, M.: Cyber Physical Systems - Potenzial und Kompetenzen in NRW. IKT.NRW Schriftenreihe "NRW auf dem Weg zum digitalen Industrieland". Herausgeber: Clustermanagement IKT.NRW, Wuppertal 2013. URL: <http://ikt.nrw.de/publikationen/> [Stand: 29.11.2013].
- [BGS11] Geschäftsstelle Brancheninitiative Gesundheitswirtschaft Südwestfalen e. V.: AG MT NRW – Arbeitsgemeinschaft Medizintechnik NRW. URL: http://www.gesundheitswirtschaft.net/_neu/home/aktivitaeten-projekte/ag-medizintechnik-nrw.html [Stand: 08.11.2013].
- [BiB13] Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung: Oberkörperorthese zur Entlastung des Pflegepersonals bei körperlich belastenden Pflegeabläufen – CareJack. URL: <http://www.demografie-portal.de/SharedDocs/Handeln/DE/GutePraxis/CareJack.html> [Stand: 08.11.2013].
- [BIT10] BITKOM: Cyber Physical Systems. URL: <http://www.bitkom.org/de/themen/54683.aspx> [Stand: 14.11.2013].

- [BMW13] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: IKT für Elektromobilität. URL: <http://www.ikt-em.de/> [Stand: 05.11.2013].
- [BUW13a] Bergische Universität Wuppertal: iNES - intelligentes Verteilnetzmanagement-System. URL: <http://www.evt.uni-wuppertal.de/forschung/forschungsgruppe-intelligente-netze-und-systeme/ines-intelligentes-verteilnetzmanagement-system.html> [Stand: 04.11.2013].
- [BUW13b] Bergische Universität Wuppertal: NiVeAu - Netzintelligenz für die Verteilnetzautomatisierung. URL: <http://www.evt.uni-wuppertal.de/forschung/forschungsgruppe-intelligente-netze-und-systeme/niveau-netzintelligenz-fuer-die-verteilnetzautomatisierung.html> [Stand: 04.11.2013].
- [BUW13c] Bergische Universität Wuppertal: NEmo - Netzintegration von Elektromobilität und regenerativen Einspeisern mithilfe einer intelligenten Ortsnetzstation. URL: <http://www.evt.uni-wuppertal.de/forschung/forschungsgruppe-intelligente-netze-und-systeme/nemo-netzintegration-der-elektromobilitaet.html> [Stand: 04.11.2013].
- [BVT+08] Brennan, R. W.; Vrba, P.; Tichy, P.; Zoitl, A.; Sünder, C.; Strasser, T.; Marik, V.: Developments in dynamic and intelligent reconfiguration of industrial automation. In Computers in Industry, Vol. 59, pp. 533-547, 2008.
- [car13] carat robotic innovation GmbH: Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktion durch ein Robotersystem. URL: <http://www.rorarob.de/> [Stand: 07.11.2013].
- [CEF13a] NRW Clustersekretariat: Energieforschung, Energieforschung und forschungsintensive Energietechnologien, CEF.NRW. URL: <http://www.exzellenz.nrw.de/clusterinfo/landescluster/energieforschung/> [Stand: 04.11.2013].
- [CEF13b] Cluster EnergieForschung.NRW: Energieforschung in Nordrhein-Westfalen. Der Schlüssel zur Energiewende. Online verfügbar: <http://www.exzellenz.nrw.de/clusterinfo/landescluster/energieforschung/> [Stand: 04.11.2013].
- [CGW13] Clustermanagement beim Landeszentrum Gesundheit Nordrhein-Westfalen auf dem Gesundheitscampus: CGW.NRW: Gesundheitswirtschaft Nordrhein-Westfalen CGW. URL: <http://www.gesundheitswirtschaft-nrw.de/gesundheitswirtschaft-nordrhein-westfalen.html> [Stand: 08.11.2013].
- [CMT13] Clustermanagement MedizinTechnik.NRW: Medizintechnik in NRW. URL: <http://www.medizintechnik-nrw.de/index.php?cid=4> [Stand: 08.11.2013].
- [CLA13] CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH: Das Projekt marion. URL: <http://www.projekt-marion.de> [Stand: 07.11.2013].
- [Con13] Connected Living e. V.: Übersicht SmartHome Musterwohnungen und Living Labs in Deutschland. URL: <http://www.connected-living.org/downloads/> [Stand: 04.11.2013].
- [CPS08] CPS Steering Group: A Cyber-Physical Systems - Executive Summary. CPS Week, St. Louis, MS, April 2008. URL: <http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS-Executive-Summary.pdf> [Stand: 14.11.2013].
- [Dai13] Daimler AG: Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland. URL: <http://www.simtd.de/index.dhtml/0651dffd6c226051523i/-/deDE/-/CS/-/> [Stand: 05.11.2013].
- [dSP13] dSPACE GmbH: Firmenprofil. URL: http://www.dspace.com/de/gmb/home/company/company_profile.cfm [Stand: 05.11.2013].
- [EAS13] European Aviation Safety Agency: Technical publications. URL: <http://easa.europa.eu/rulemaking/technical-publications.php> [Stand: 14.11.2013].
- [ECL13] EffizienzCluster Management GmbH: EffizienzCluster Logistik Ruhr. URL: <http://www.effizienzcluster.de/de/> [Stand: 07.11.2013].

- [EER13] RWTH Aachen: E.ON Energy Research Center. URL: <http://www.eonerc.rwth-aachen.de/aw/cms/website/themen/~ukq/home/?lang=de> [Stand: 04.11.2013].
- [emp10] empirica Gesellschaft für Kommunikations- und Technologieforschung mbH: eSESH Saving Energy in Social Housing with ICT. URL: <http://esesh.eu/home/> [Stand: 05.11.2013].
- [emp11] empirica Gesellschaft für Kommunikations- und Technologieforschung mbH: SMARTSPACES Saving Energy in Europe's Public Buildings with ICT. URL: <http://www.smartspaces.eu/S/home/> [Stand: 05.11.2013].
- [Ene13] NRW Clustersekretariat: Energiewirtschaft, Energiewirtschaft und anwendungsorientierte Energietechnik. EnergieRegion.NRW. URL: <http://www.exzellenz.nrw.de/clusterinfo/landescluster/energiewirtschaft/> [Stand: 04.11.2013].
- [EON13] E.ON Energie Deutschland GmbH: Smart Meter: Intelligente Zähler für die Zukunft. URL: https://www.eon.de/de/eonde/pk/energieUndZukunft/Smart_Energy/Smart-Meter/index.htm [Stand: 05.11.2013].
- [ERD12] ERDF - Electricité Réseau Distribution France: GRID4EU Innovation for Energy Networks. URL: <http://www.grid4eu.eu/> [Stand: 04.11.2013].
- [esc13] escrypt GmbH - Embedded Security: secmobil. URL: <https://www.secmobil.com/index.php?id=2> [Stand: 05.11.2013].
- [ETN12] Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger ETN (Hrsg.): Elektromobilität in NRW ein Überblick der Förderprojekte. Tagungsband 1. Kompetenztreffen, Zeche Zollverein, 27.11.2012. 2. Auflage 2012. Online verfügbar: <http://www.elektromobilitaet.nrw.de/service/downloadmediathek.html> [Stand: 05.11.2013].
- [ETN13] Projektträger ETN: Die NRW-Kompetenzzentren Elektromobilität – zentrale Anlaufstellen für Forschung & Entwicklung. URL: <http://www.elektromobilitaet.nrw.de/kompetenzzentren.html> [Stand: 05.11.2013].
- [EWI13] Gesellschaft zur Förderung des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (EWI) gGmbH: Das EWI. URL: <http://www.ewi.uni-koeln.de/institut/> [Stand: 05.11.2013].
- [FHZ13] Fraunhofer inHaus Zentrum: Intelligente Raum- und Gebäudesysteme. URL: <http://www.inhaus.fraunhofer.de/> [Stand: 05.11.2013].
- [FIT13] Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT: User-Centered Computing, Projekte. URL: <http://www.fit.fraunhofer.de/de/fb/ucc/projects.html> [Stand: 05.11.2013].
- [For13] Ford Werke GmbH: Ford Forschungszentrum in Aachen. URL: <http://www.ford.de/UeberFord/FordinDeutschland/Standorte> [Stand: 05.11.2013].
- [GB12] Geisberger, E.; Broy, M. (Hrsg.): agendaCPS – Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. acatech Studie, Springer 2012. Online verfügbar: <http://www.acatech.de/de/publikationen/empfehlungen/acatech/detail/artikel/acatech-studie-agendacps-integrierte-forschungsagenda-cyber-physical-systems.html> [Stand: 14.11.2013].
- [Ger05] Gershenfeld, N. A.: FAB: The Coming Revolution on Your Desktop - From Personal Computers to Personal Fabrication. Basic Books, New York 2005.
- [GK10] Ganapathy, V.; Kremer, U.: Establishing Integrity in Dynamic Networks of Cyber Physical Devices. NSF CPS PI Meetings 2010 CPS PI Meeting. URL: <http://cps-vo.org/content/establishing-integrity-dynamic-networks-cyber-physical-devices> [Stand: 14.11.2013].
- [Goo13] Google Inc.: Glass. URL: <http://www.google.com/glass/start/> [Stand: 14.11.2013].
- [Gre13] GreenCom: Meet the Project. URL: <http://www.greencom-project.eu/project-description.html> [Stand: 05.11.2013].

- [Hil06] Hilleringmann, U.: Mikrosystemtechnik. B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006.
- [Hin13] Hinrichs, H.: E-Mobilität; Sieben Versuchsfelder. stadt+werk, 04/2013, K21 media AG, 2013.
- [How06] Howe, J.: The Rise of Crowdsourcing. Wired, Issue 14.06, Juni 2006. Online verfügbar: <http://www.wired.com/wired/archive/14.06/crowds.html> [Stand: 14.11.2013].
- [IAT12a] Institute of Automation, Universität Bremen: Assistenzroboter FRIEND. URL: <http://www.iat.uni-bremen.de/sixcms/detail.php?id=1090> [Stand: 14.11.2013].
- [IAT12b] Institut Arbeit und Technik, Fachhochschule Gelsenkirchen: E-Health@Home Landkarte. URL: <http://www.iat.eu/ehealth/index.php> [Stand: 08.11.2013].
- [ICO13] ICOEUR Intelligent Coordination of Operation and Emergency Control of EU and Russian Power Grids. URL: <http://www.icoeur.eu/> [Stand: 05.11.2013].
- [ie312] ie3 Institut für Energiesysteme, Energieeffizienz und Energiewirtschaft der Technischen Universität Dortmund: 2012 Jahresbericht. Online verfügbar: <http://www.ie3.tu-dortmund.de/cms/de/Institut/Veroeffentlichungen/Jahresberichte/index.html> [Stand: 05.11.2013].
- [IKT13] Ministerium für Wirtschaft, Energie, Industrie, Mittelstand und Handwerk des Landes Nordrhein-Westfalen: IKT.NRW, Was sind Cyber Physical Systems?. URL: <http://ikt.nrw.de/cyber-physical-nrw-profilieren/was-sind-cyber-physical-systems/> [Stand: 14.11.2013].
- [IML13a] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: Elmo - Leuchtturmprojekt der Elektromobilität. URL: http://www.iml.fraunhofer.de/de/themengebiete/verkehrslogistik/themen_transportverkehrlogistik/Elmo.html [Stand: 05.11.2013].
- [IML13b] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: smaRTI Smart Reusable Transport Items. URL: <http://www.smart-rti.de/> [Stand: 07.11.2013].
- [IML13c] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: Forschungsprojekt DyCoNet. URL: <http://www.dyconet.de/> [Stand: 07.11.2013].
- [IMS13] IMST GmbH: Leitprojekt Connected-Car™. URL: <http://www.imst.de/imst/de/forschung/connectedcar.php> [Stand: 05.11.2013].
- [int13] interactive minds GmbH: Project FAIR assistance of body functions by hands-Free Applications In augmented Reality. URL: <http://fair.interactive-minds.com/> [Stand: 08.11.2013].
- [IPA13] Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Care-O-bot.URL: <http://www.care-o-bot.de/de/care-o-bot-3.html> [Stand: 14.11.2013].
- [ISO11] International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission: ISO/IEC 29341- 1:2011 Information technology – UPnP Device Architecture – Part 1: UPnP Device Architecture Version 1.01 2011. Online verfügbar: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57494 [Stand: 14.11.2013].
- [ISO13] International Organization for Standardization: Standards. URL: <http://www.iso.org/iso/home/standards.htm> [Stand: 14.11.2013].
- [ISS12a] Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST: Hospital Engineering - Willkommen auf der Homepage der Initiative „Hospital Engineering“!. URL: <http://www.hospital-engineering.org/index.html> [Stand: 08.11.2013].
- [ISS12b] Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST: Hospital Engineering – RFID-basierte Anwesenheitserfassung im OP. Online verfügbar: <http://www.hospital-engineering.org/publikationen.html> [Stand:08.11.2013].

- [ISS13] Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST: Hospital Engineering - Ganzheitliches Prozessmanagement im Krankenhaus. URL: <http://www.isst.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/it-fuer-die-gesundheitsversorgung/referenzprojekte/hospital-engineering.html> [Stand: 08.11.2013].
- [its13] it's OWL Clustermanagement GmbH: Das Technologie-Netzwerk. URL: <http://www.its-owl.de/technologie-netzwerk/> [Stand: 07.11.2013].
- [iXt13] iXtronics GmbH: Mechatronics, Tools & Technologies. URL: <http://www.ixtronics.com/cms/website.php> [Stand: 05.11.2013].
- [Jas05] Jasperneite, J.: Echtzeit-Ethernet im Überblick. Automatisierungstechnische Praxis (atp), Nr. 3, 2005, ISSN 0178-2320, S. 29-34.
- [JLNY04] Jacob, B.; Lanyon-Hogg, R.; Nadgir, D. K.; Yassin, A. F.: A Practical Guide to the IBM Autonomic Computing Toolkit. IBM Redbooks, 2004. Online verfügbar: ibm.com/redbooks [Stand: 14.11.2013].
- [KC03] Kephart, J. O.; Chess, D. M.: The Vision of Autonomic Computing. Computer, vol.36, no.1, pp.41-50, Jan 2003. Online verfügbar: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1160055&isnumber=26009> [Stand: 14.11.2013].
- [Kos10] Leopold Kostal GmbH & Co. KG: Kostal Geschäftsbereiche. URL: <http://www.kostal.com/german/thecompany/divisions.html> [Stand: 05.11.2013].
- [Lee06] Lee, E. A.: Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?. NSF Workshop on Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, 2006.
- [Lee08] Lee, E. A.: Cyber Physical Systems: Design Challenges. University of California, Berkeley Technical Report No. UCB/EECS-2008-8. Online verfügbar: <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.pdf> [Stand: 12.11.2013].
- [LS11] Lee, E. A.; Seshia, S. A.: Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach. Berkeley, CA, 2011. Online verfügbar: <http://leeseshia.org/> [Stand: 12.11.2013].
- [LZG13] Landeszentrum Gesundheit Nordrhein-Westfalen (LZG.NRW): Regionen im Profil. URL: http://www.lzg.gc.nrw.de/versorgung/gesundheitswirtschaft/Karte_Regionen/index.html [Stand: 08.11.2013].
- [Man97] Mann, S.: An historical account of the 'WearComp' and 'WearCam' inventions developed for applications in 'Personal Imaging'. The First International Symposium on Wearable Computers: Digest of Papers, IEEE Computer Society, 1997, pp. 66–73.
- [Med13] MedEcon Telemedizin GmbH: Teleradiologieverbund Ruhr. URL: <http://www.medecon-telemedizin.de/> [Stand: 08.11.2013].
- [MEE11] Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster: MEET - Where science MEETs industry. URL: <http://www.uni-muenster.de/MEET/> [Stand: 05.11.2013].
- [Mie13] Miele & Cie. KG: SmartStart Reduzierung von Stromkosten durch automatische Wahl günstiger Stromtarife. URL: http://www.miele.de/de/haushalt/produkte/44669_44674.htm [Stand: 05.11.2013].
- [MSP13] Müller-Schloer, C.; Pacher, M.: Organic Computing. URL: <http://www.organic-computing.de/> [Stand: 14.11.2013].
- [NRW11] NRW.INVEST GmbH: Energie in Nordrhein-Westfalen. Daten. Fakten. Online verfügbar: <http://www.exzellenz.nrw.de/clusterinfo/landescluster/energiwirtschaft/> [Stand: 04.11.2013].

- [NRW13a] NRW.INVEST GmbH: Automobilindustrie in Nordrhein-Westfalen. URL: http://www.nrwinvest.com/nrwinvest_deutsch/Branchen/Automobil/index.php [Stand: 05.11.2013].
- [NRW13b] NRW.INVEST GmbH: Maschinenbau und Produktionstechnik in Nordrhein-Westfalen Westfalen. URL: http://www.nrwinvest.com/nrwinvest_deutsch/Branchen/Maschinenbau/index.php [Stand: 07.11.2013].
- [NRW13c] NRW.INVEST GmbH: Gesundheitswirtschaft in Nordrhein-Westfalen. URL: http://www.nrwinvest.com/nrwinvest_deutsch/Branchen/Gesundheit/index.php [Stand: 08.11.2013].
- [OFF13] OFFIS e. V.: i-Protect - Schutz- und Leittechniksystem von morgen. URL: <http://iprotect.offis.de/index.php> [Stand: 05.11.2013].
- [Ohl13] Ohlbrecht, D.: IPv6-Portal.de, Informationen zum Internet Protokoll IPv6. URL: <http://www.ipv6-portal.de/> [Stand: 14.11.2013].
- [OMG05] Object Management Group Inc.: Real-time CORBA Specification, Version 1.2, OMG, January 2005. URL: <http://www.omg.org/spec/RT/1.2/PDF> [Stand: 14.11.2013].
- [omp09] omp computer gmbh: DraFaLa Drahtlose Fahrzeug- und Laderaumüberwachung. Eine Plattform für telematische Mehrwertdienste. URL: <http://www.drafala.de/> [Stand: 07.11.2013].
- [Ose07] OSEK: OSEK/VDX Operating System, Version 2.2.3, OSEK, 2005. URL: http://portal.osek-vdx.org/index.php?option=com_content&task=view&id=9 [Stand: 14.11.2013].
- [OTW13] Orthopädietechnik Winkler: Prothesenkompetenz Center Forschung. URL: <http://www.winkler-ot.com/index.php?id=4> [Stand: 08.11.2013].
- [Pro13] NRW Clustersekretariat: Maschinenbau/Produktionstechnik. ProduktionNRW. URL: <http://www.exzellenz-nrw.de/index.php%3Ffid%3D758> [Stand: 07.11.2013].
- [PPC13] Power Plus Communications AG: open ECOSPHERE verwandelt E-Mobilität in Energie-speicher. URL: <http://www.ppc-ag.de/222-0-open+ECOSPHERE.html> [Stand: 05.11.2013].
- [RG95] Rao, A. S.; Georgeff, M. P.: BDI Agents: From Theory to Practice. Proceedings of the First International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95), 1995.
- [RKH+10] Reinhart, G.; Krug, S.; Huttner, S.; Mari, Z.; Riedelbauch, F.; Schlogel, M.: Automatic configuration (Plug & Produce) of Industrial Ethernet networks. 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2010, pp.1-6, 8-10 Nov. 2010.
- [RWE13a] RWE AG: Smart Meter – Intelligente Mess- und Zähltechnik von Morgen. URL: <http://www.rwe.com/web/cms/de/238130/rwe/innovation/projekte-technologien/energieanwendung/smart-meter/> [Stand: 05.11.2013].
- [RWE13b] RWE Deutschland AG: E-DeMa* – Feldtest zum intelligenten Stromverbrauch in Privathaushalten. URL: <http://www.e-dema.de/de/projekt.html> [Stand: 04.11.2013].
- [SEA13] SEAM4US Sustainable Energy mAnageMent for Underground Stations. URL: <http://seam4us.eu/> [Stand: 05.11.2013].
- [SEE13] SEEMPubS: Smart Energy Efficient Middleware for Public Spaces. URL: <http://seempubs.polito.it/> [Stand: 05.11.2013].
- [SHP13] SmartHome Paderborn e. V.: SMARTHOME Paderborn. URL: <http://www.smarthomepaderborn.de/index.html> [Stand: 05.11.2013].
- [Sie13] Siemens Aktiengesellschaft: Energiewende in der Praxis: Test eines Smart Grids. Referenz-Nr.: IN 2013.01.8d. URL: http://www.siemens.com/innovation/de/news/2013/inno_1304_2.htm [Stand: 05.11.2013].

- [sma13] smartlab Innovationsgesellschaft mbH: econnect Germany – Das Projekt. URL: <http://www.econnect-germany.de/home/> [Stand: 05.11.2013].
- [SNA13] Sensor Basierte Neuronal Adaptive Prothetik GmbH (SNAP GmbH): Unser Kernprojekt. URL: <http://www.snap-gmbh.com/index.php/de/projekte> [Stand: 08.11.2013].
- [SSK10] Strese, H.; Seidel, U.; Knape, T.; Botthof, A.: Smart Home in Deutschland, Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE-IT, Berlin, 2010. Online verfügbar: <http://www.vdivde-it.de/publikationen/studien/smart-home-in-deutschland-untersuchung-im-rahmen-der-wissenschaftlichen-begleitung-zum-programm-next-generation-media-ngm-des-bundesministeriums-fuer-wirtschaft-und-technologie> [Stand: 05.11.2013].
- [StG13] Sozialwerk St. Georg e.V.: SAMDY Sensorbasiertes adaptives Monitoringsystem zur Sicherung der Pflege- und Assistenzqualität für die Zukunft. URL: <http://www.samdy.org/index.php> [Stand: 08.11.2013].
- [STA13] STAWAG Stadtwerke Aachen Aktiengesellschaft: smart area aachen – Das Projekt. URL: <http://smartarea.de/> [Stand: 05.11.2013].
- [Str13] StreetScooter GmbH: Oscar Open Service Cloud for the Smart Car, Kurzbeschreibung des Projektes. URL: <http://osc4car.de/> [Stand: 05.11.2013].
- [Tem11] Templeton, S. J.: Security aspects of cyber-physical device safety in assistive environments. Proceedings of the 4th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA '11). ACM, New York, NY, USA, 2011. Online verfügbar: <http://doi.acm.org/10.1145/2141622.2141685> [Stand: 14.11.2013].
- [TKA10] ThyssenKrupp Automotive Systems GmbH: Erprobung. URL: <http://www.tka-as.thyssenkrupp.com/de/services/testing.html> [Stand: 05.11.2013].
- [UDE13a] Universität Duisburg-Essen: Medizinisches Assistenzsystem FAROMIR. URL: <http://www.uni-due.de/faromir/> [Stand: 14.11.2013].
- [UDE13b] Universität Duisburg-Essen: Tracing intelligenter LogistikObjekte. URL: <http://www.tilo.uni-due.de/> [Stand: 08.11.2013].
- [UDE13c] Universität Duisburg-Essen: Dynamics in Navigation Projektbeschreibung. URL: <http://www.uni-due.de/zlv/effizienzcluster/dynamics-in-navigation.php> [Stand: 08.11.2013].
- [URB13] UR:BAN Büro: UR:BAN Urbaner Raum: Benutzergerechte Assistenzsysteme und Netzmanagement. URL: <http://urban-online.org/de/urban.html> [Stand: 05.11.2013].
- [UTw13] University of Twente: PRESERVE preparing secure v2x communication systems. URL: <http://www.preserve-project.eu/> [Stand: 05.11.2013].
- [VDE13] VDI/VDE Richtlinie 2657, Middleware in Industrial Automation, Part I, Beuth Verlag, Berlin, 2013.
- [Wei91] Weiser, M.: The Computer for the 21st Century. Scientific American 265(3):66-75 (Januar 1991). Online verfügbar: <http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/SciAmDraft3.html> [Stand: 14.11.2013].
- [WJ95] Wooldridge, M. Jennings, N.R.: Agent Theories, Architectures, and Languages: A Survey: Intelligent Agents. Springer, Berlin, Heidelberg, 1995, pp. 1-39.
- [WZL13] WZL - RWTH Aachen: ProSense Hochoflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik. URL: <http://www.prosense.info/de/default.html> [Stand: 08.11.2013].
- [ZES13] Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen: modiCAS - modular interactive Computer Assisted Surgery. URL: http://www.zess.uni-siegen.de/mecha_medi_home/mechatronik-medizintechnik/medizintechnik-modicas/ [Stand: 08.11.2013].

- [ZIMT13] Zentrum für Informations- und Medizintechnik: OR.NET – Sichere dynamische Vernetzung in Operationssaal und Klinik Ziele des Projektes. URL: http://mis.klinikum.uni-heidelberg.de/wp_ornet/?page_id=580 [Stand: 08.11.2013].
- [ZNO13] Zdrallek, M.; Neusel-Lange, N.; Oerter, C.: Intelligente Stromnetze schaffen die Energiewende. BUW.OUTPUT, Forschungsmagazin der Bergischen Universität Wuppertal, Ausgabe 9, Sommersemester 2013, S. 6-11. Online verfügbar: <http://www.buw-output.uni-wuppertal.de/en/edition9/intelligente-stromnetze-schaffen-die-energiewende.html> [Stand: 05.11.2013].

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