

ANALYSE



KERNTECHNOLOGIEN FÜR CYBER PHYSICAL SYSTEMS

/ Januar 2017

INHALT

1	Einleitung	5
2	Kerntechnologien	7
2.1	Complex Event Processing (CEP)	7
2.2	Mensch-Maschine-Interaktion	7
2.3	Wissensrepräsentation	8
2.4	Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)	8
2.5	Maschinenlernen/Künstliche Intelligenz	9
2.6	Mobile Netze	9
2.7	Sensorik & Aktorik	10
2.8	Netzwerktopologien	10
2.9	Simulation	11
2.10	Erkennung kaskadierender Fehler	11
2.11	Big Data	12
2.12	Echtzeitsysteme	12
2.13	Lokalisierung und Navigation	13
2.14	Cloud Computing	13
3	Fazit & Ausblick	14

Autoren

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

Marc Hesenius

Stefan Gries

Julius Ollesch

Volker Gruhn

Gefördert durch



EFRE.NRW

Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung

Kontakt



Institut SIKoM+ | Bergische Universität Wuppertal

Rainer-Gruenter-Straße 21
42119 Wuppertal

E-Mail: kontakt@cps-hub-nrw.de

Telefon: +49 202 439-1026

Fax: +49 202 439-1037

www.cps-hub-nrw.de | www.facebook.com/cpshubnrw | www.twitter.com/cpshub

Gefördert durch



1 Einleitung

Cyber Physical Systems (CPS) sind vernetzte Systeme, die reale Objekte und Prozesse beobachten und beeinflussen. Sie sind in der Lage, sich der aktuellen realen Umgebung und ihren Bedingungen selbstständig anzupassen. Außerdem können CPS aus heterogenen, zum Zeitpunkt der Entwicklung unbekannten Komponenten bestehen, die dem System dynamisch zur Laufzeit hinzugefügt und entfernt werden können. Durch diese Veränderung der Zusammensetzung autonomer Komponenten können CPS emergentes Verhalten zeigen und so zur Laufzeit neue Lösungsstrategien entwickeln.

CPS sind also anders als herkömmliche Software-Systeme. Sie stellen daher andere Anforderungen an Entwickler und Entwicklungsteams und müssen demnach anders angegangen werden. Sie erfordern insbesondere den Einbezug verschiedener Experten aus unterschiedlichen Fachdomänen: fachlich versierte Anwender und Anwendungsbetreuer arbeiten Hand in Hand mit Hard- und Software-Spezialisten, die technisch anspruchsvolle Lösungen für komplexe Anforderungen entwickeln. Dabei können bekannte Vorgehensmodelle und Methoden aus der Entwicklung klassischer Informationssysteme zum Teil übernommen werden, jedoch müssen sie an vielen Stellen weitergedacht und weiterentwickelt werden.

Neben methodischen stellen sich aber auch zahlreiche technische Fragen. Welche Technologien müssen beherrscht werden, um erfolgreich CPS zu realisieren? Welche Komponenten sind in einem derart komplexen System besonders wichtig und zentral? Und welche Eigenschaften machen CPS überhaupt erst aus? Die Eigenschaften von CPS sind für die Identifikation von Kerntechnologien besonders interessant, denn sie müssen sich zwangsläufig hier wiederfinden. Im Rahmen des CPS.HUB wurden in der Fachgruppe Software verschiedene CPS auf ihre wesentlichen Eigenschaften untersucht und daraus Rückschlüsse auf Kerntechnologien gezogen, die zur Implementierung verwendet werden können. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Eigenschaften und ordnet ihnen interessante Technologien zu.

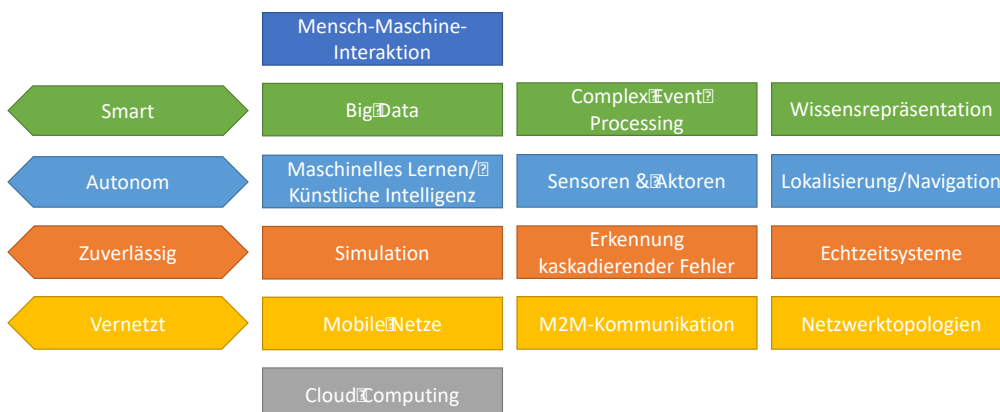


Abbildung 1: Eigenschaften und Kerntechnologien von CPS.

Während viel über die Integration von Sensoren und der resultierenden Datenflut diskutiert wird, die sowohl zur Laufzeit [Complex Event Processing (CEP)] als auch im Nachhinein (Big Data) analysiert werden muss, spielen noch weitere Technologien eine tragende Rolle. So werden natürlich Menschen mit CPS interagieren [Mensch-Maschine-Interaktion], aber auch technische Komponenten untereinander kommunizieren [M2M-Kommunikation] - und das insbesondere mobil [Mobile Netze]. CPS müssen darüber hinaus autonom arbeiten und daher auf grundlegendes Wissen zurückgreifen [Wissensrepräsentation], sich adhoc auf neue Situationen einstellen [Maschinenlernen/Künstliche Intelligenz] und frei navigieren können [Lokalisierung/Navigation]. Ihre Umwelt nehmen sie über Sensoren wahr und können sie über Aktoren beeinflussen [Sensorik & Aktorik]. Darüber hinaus sind CPS verteilte Systeme, die unterschiedlich aufgebaut sein können [Netzwerktopologien] und verlässlich sein müssen [Echtzeitsysteme]. Sie müssen robust sein und mit Fehlerkaskaden umgehen können, die aus der Weitergabe fehlerhafter Berechnungen in verteilten Systemen resultieren können [Erkennung kaskadierender Fehler]. Um all diese Komponenten erfolgreich unter unterschiedlichen Bedingungen im Labor testen zu können, muss die Ausführungsumgebung nachgestellt und einzelne Parameter manipuliert werden können [Simulation]. Die allgemeine Verfügbarkeit online erreichbarer Daten und Dienste ermöglicht CPS die Auslagerung intensiver Operationen [Cloud Computing], wodurch eigene Ressourcen geschont werden können.

Nur ein ganzheitlicher Blick auf die zugrundeliegenden Technologien kann zu einer erfolgreichen Implementierung von CPS führen. Konsequenterweise müssen Teams interdisziplinär aufgebaut sein und Know-how nicht nur aus der fachlichen Domäne vereinigen, sondern auch über technisches Fachwissen in unterschiedlichen Schwerpunkten verfügen. CPS.HUB liefert eine Übersicht relevanter Technologien, die im Rahmen der Entwicklung von CPS berücksichtigt werden sollten. Darüber hinaus wird jede Technologie auf offene Fragestellungen und potentielle Forschungsoptionen untersucht, um bestehende Lücken aufzuzeigen und den Weg zum industriellen Einsatz zu ebnen.

Im Folgenden sollen die einzelnen Kerntechnologien kurz und knapp vorgestellt und ihre Beziehung zu und Relevanz für CPS verdeutlicht werden. Im Rahmen der Reihe „Kerntechnologien für CPS“ werden die identifizierten Technologien näher betrachtet und für interessierte Leser aufbereitet. Dabei wird ausgehend von der Bedeutung für CPS zunächst der aktuelle Stand von Forschung und Entwicklung detailliert aufgezeigt. Darauf aufbauend werden offene Fragen und Forschungsoptionen erläutert.

2 Kerntechnologien

2.1 Complex Event Processing (CEP)

CEP ist eine Technologie zur Erkennung komplexer Verhaltensmuster und Situationen aus einer Vielzahl von Ereignissen. Während die meisten der heute verbreiteten Ansätze zur Datenanalyse rückwirkend arbeiten, also bereits bestehende Daten aus vergangenen Ereignissen betrachten, grenzt sich CEP dagegen durch die kontinuierliche Analyse von Daten zur Zeit ihrer Entstehung ab. Vereinfacht ausgedrückt können mit CEP-Systemen Muster ähnlich zu Datenbankabfragen definiert und gespeichert werden. Wird das CEP-System dann mit passenden Daten gefüttert, so sucht es im Bestand der gespeicherten Muster nach jenen, die sich aus den aktuellen Daten ergeben. Das grundlegende Prinzip einer Datenbank wird also umgedreht – statt auf einer Menge bereits existierender Daten die gewünschten mit einer Abfrage herauszufiltern, wird anhand aktuell auftretender Daten die passende Abfrage herausgesucht.

CEP ermöglicht es so, zur Laufzeit einfache Rohdaten, die z. B. von Sensoren geliefert werden, aufzuarbeiten und mit Daten aus anderen Quellen zu höherwertigen Ereignissen zu verbinden. So werden aus einfachen Datenströmen nützliche Informationen, die nicht nur technischen, sondern auch fachlichen Wert besitzen. Mit der enthaltenen Sensorik und ihrer Vernetzung erzeugen CPS eine Vielzahl ebensolcher Rohdaten – CEP hat das Potenzial, die resultierende Datenflut zu bändigen und dabei zur Laufzeit völlig neue Einblicke in Abläufe und Verhaltensmuster zu bekommen.

2.2 Mensch-Maschine-Interaktion

Während die steigende Automatisierung durch CPS gerne hervorgehoben wird, wird der Faktor Mensch oftmals außen vorgelassen. Tatsächlich werden CPS in vielen Bereichen menschliche Arbeiten übernehmen, den Menschen aber nicht vollständig ersetzen oder gar überflüssig machen. Seine Rolle wird sich zukünftig jedoch ändern – statt einzelne Arbeitsschritte auszuführen und somit aktiver Teil der Prozesskette zu sein, wird er zukünftig eher als Aufseher und Entscheider auftreten und die Steuerung und Überwachung von CPS übernehmen. Konsequenterweise wird die Interaktion zwischen Mensch und Maschine immer wichtiger. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsdomänen erschlossen, in denen klassische Bedienung mit Maus und Tastatur unpraktisch ist. Gesten- und Sprachsteuerung bieten sich hier als Alternativen an.

Dieser tiefgreifende Paradigmenwechsel im Umgang mit technischen Geräten kann seit einigen Jahren bereits beobachtet werden: Maus und Tastatur werden zunehmend verdrängt. Touch-Screens sind durch die Verbreitung von mobilen Geräten wie Smartphones und Tablets zum Standard avanciert – Multi-Touch-Gesten haben so den Weg in den Alltag gefunden. Wearables – kleine, am Körper getragene Computer – sind in Form von Uhren oder Brillen zunehmend erhältlich. Sprachsteuerung hat in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte gemacht und ist in Form digitaler Assistenten wie Apples Siri und Microsofts Cortana alltagstauglich geworden. Kombiniert mit den Fortschritten in der Robotik sind völlig neue Arbeitsweisen denkbar. Daraus resultieren aber völlig neue Herausforderungen an Entwickler und die Interaktion mit CPS muss tiefer im gesamten Entwicklungsprozess verankert werden.

2.3 Wissensrepräsentation

CPS bewegen sich oft unter unkontrollierbaren und unbekannten Rahmenbedingungen, die intelligentes Verhalten erfordern und damit voraussetzen, dass eine fundierte und für Maschinen verständliche Wissensbasis aus unterschiedlichen sowohl fachlich als auch technisch motivierten Gebieten vorhanden ist. Darüber hinaus sind Handlungen und Aktionen von CPS stark abhängig vom aktuellen Kontext, der sich u. U. aus Umgebungsparametern zusammensetzt, die während der Entwicklungszeit nicht näher definierbar sind. Konsequenterweise muss CPS ein „Erfahrungsschatz“ mit auf den Weg gegeben werden, auf den sie zurückgreifen und auch durch eigene „Erfahrungen“ erweitern können. Die Repräsentation von Wissen ist somit auch Grundlage für Maschinenlernen und künstliche Intelligenz – andere Kerntechnologien, die für smarte CPS notwendig sind.

Für die Entwicklung von CPS folgt daraus, dass die Anwendungsdomäne sowie der konkrete Anwendungsfall und alle spezifischen Besonderheiten von den beteiligten Entwicklern verstanden und so aufgearbeitet werden, dass auch Maschinen mit diesen Informationen umgehen können. Gleichzeitig ist aber die reale Welt voll von Ausnahmen, Besonderheiten und insbesondere Veränderung, auf die CPS entsprechend reagieren müssen. Der Wissensbasis und ihrer Repräsentation kommt somit eine wesentliche Bedeutung zu – vor allem in Anwendungsszenarien, in denen es zu maßgeblichem Schaden an Gütern, Maschinen oder gar menschlichem Leben kommen kann. Dabei können unterschiedliche Techniken und Methoden zum Einsatz kommen, die Wissen ordnen und nutzbar machen oder Schlussfolgerungen aus bekanntem Wissen und aktueller Situation möglich machen.

2.4 Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)

Kommunikation zwischen den einzelnen Teilsystemen ist ein wesentlicher, aber auch komplizierter Aspekt von CPS. Damit einher gehen neben Effizienz und Genauigkeit der Kommunikation auch zeitliche Aspekte wie die Dauer des Nachrichtenaustausches und der maximalen Wartezeit bis zum Erhalt einer Antwort. Jedes Teilsystem (oder jede mehr oder weniger autonome Komponente) ist für eine konkrete Aufgabe innerhalb des Gesamtsystems zuständig und muss zur Erfüllung seiner Aufgabe bzw. der Gesamtfunktionalität mit anderen Systemen kommunizieren. Eintreffende Daten anderer Maschinen müssen auf ihre Vertrauenswürdigkeit und Plausibilität geprüft werden, andernfalls öffnen sich für Angriffe Tür und Tor. Sicherheit ist somit ebenfalls ein wichtiger Aspekt, vor allem in Szenarien, in denen sich CPS autonom in der freien Welt bewegen und nicht auf einem abgeschlossenen und weitgehend überwachten Firmengelände. CPS kommunizieren dann auch mal mit Unbekannten – wie im wahren Leben ist hier Vorsicht geboten. Darüber hinaus spielt die Verschlüsselung der Kommunikationsdaten eine Rolle, um nicht belauscht zu werden. Anforderungen an sichere Kommunikation müssen also frühzeitig erfasst und explizit berücksichtigt werden.

Kommunizierende Maschinen sind natürlich kein Trend, der erst mit CPS an Relevanz gewonnen hat. Tatsächlich „unterhalten“ sich schon heute zahlreiche Systeme und tauschen eine unüberschaubare Vielzahl von Informationen aus. Die Beteiligten sind aber heute oftmals fest definiert – in dynamischen und adaptiven Umgebungen wie CPS ist dies aber nicht von vornherein gegeben. Die verschiedensten Maschinen und Komponenten unterschiedlichster Hersteller machen den Einsatz proprietärer Kommunikationslösungen schwierig. Konsequenterweise sind Standards und offene Schnittstellen nötig. Gerade der Definition und Dokumentation von Schnittstellen kommt dadurch eine besonders wichtige Rolle zu, um transparente Kommunikation von Maschinen untereinander zu schaffen und Fehlersituationen zu vermeiden.

2.5 Maschinenlernen/Künstliche Intelligenz

CPS arbeiten zukünftig autonom unter zur Entwicklungszeit unbekannten Bedingungen. Sie kooperieren miteinander, um gemeinsam Probleme zu lösen und neue Lösungsstrategien zu entwickeln. Somit müssen sie sich konstant an wechselnde Umgebungen anpassen und aus gemachten „Erfahrungen“ lernen. Die Basis für diese Flexibilität legen Technologien aus dem maschinellen Lernen und der künstlichen Intelligenz – feste Programmierung starrer Konzepte reicht nicht mehr aus, um den Anforderungen an neuartige Systeme gerecht zu werden. CPS liefern darüber hinaus konstant eine Vielzahl an Daten aus unterschiedlichen Sensoren, deren Interpretation sich in Abhängigkeit des aktuellen Kontexts ändern kann. Konsequenterweise sind Technologien nötig, die aufbauend auf vorhandenem Wissen neues Wissen akquirieren, weiterentwickeln und einsetzen können.

Maschinelles Lernen und künstliche Intelligenz sind aber keine singuläre Software, sondern umfassen eine Reihe unterschiedlicher Verfahren und Bausteine. Somit muss eher von einer Sammlung verschiedener Werkzeugen gesprochen werden, die sich je nach Anwendungsfall zum großen Ganzen zusammenfügen lassen. Bis ein CPS also eine Entscheidung treffen oder tatsächlich etwas „Hinzulernen“ kann, müssen zahlreiche Komponenten implementiert werden, die unterschiedliche Aufgaben wie die Klassifizierung und Bewertung eintreffender Daten, die Identifikation von Mustern und Häufungen und die Ableitung konkreter Aktionen übernehmen. Darüber hinaus muss je nach eingesetztem Verfahren ein mehr oder weniger intensives „Training“ bereits im Vorfeld stattfinden. Die unterschiedlichen Verfahren und Algorithmen eignen sich auch mehr oder weniger für unterschiedliche Anwendungsszenarien – eine konkrete Analyse und Auswahl muss also vor der Implementierung erfolgen.

2.6 Mobile Netze

Die für CPS notwendige Kommunikation setzt zwangsläufig ein passendes Medium voraus, über das Daten ausgetauscht werden. Während klassische Informationssysteme in der Regel statisch in definierten Arbeitsumgebungen positioniert und somit meist einfach mit einem Netzwerkanschluss versehen werden können, sind CPS oder zumindest einige ihrer Komponenten u. U. mobil. Konsequenterweise sind mobile, drahtlose Netzwerke für CPS eine wichtige Technologie. Dabei reicht die Spannweite von drahtlosen LAN- und WAN-Verbindungen, die von einer vorhandenen, aber räumlich mehr oder weniger begrenzten Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden (wie WLAN und LTE) hin zu kurzfristig aufgebauten Ad-Hoc-Verbindungen über z. B. Bluetooth und NFC. Der gegebenen Infrastruktur kommt aber naturgemäß eine besondere Rolle zu. Mobile Netzwerkverbindungen sind aus unterschiedlichen Gründen störanfällig: so können auf der einen Seite Gebäude und Mauerwerke die Qualität der Verbindung beeinflussen, auf der anderen Seite kann die eigenen Bewegungsgeschwindigkeit eine Rolle spielen. CPS müssen entsprechend mit Verbindungsabbrüchen, langsamer Datenverbindung u. ä. Phänomenen umgehen können – Probleme, die schon heute im mobilen Internet ärgerlich sind, aber für CPS essentielle Fragestellungen aufwerfen.

Robustheit, Fehlertoleranz und der jeweilige Anwendungsfall sind die entscheidenden Faktoren, die die Wahl des Netzwerks beeinflussen. Ausweichstrategien im Falle eines Netzwerkausfalles oder Verbindungsproblemen müssen entworfen und implementiert werden. Gleichzeitig stellen sich natürlich auch Fragen der Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit von Kommunikationsmedien und eintreffender Daten. Darüber hinaus kommt dem notwendigen Energieeinsatz der unterschiedlichen Medien eine weitergehende Bedeutung zu, die die Wahl einsetzbarer Geräte einschränken kann.

2.7 Sensorik & Aktorik

Eine wesentliche Eigenschaft von CPS ist, dass sie ihre Umwelt begreifen – zum einen nutzen sie Sensoren, um Umwelteinflüsse zu messen, und Aktorik, um mit der Umwelt interagieren und sie beeinflussen zu können. Entwicklern stehen heute viele unterschiedliche Sensortypen zur Verfügung, die die verschiedensten Werte messen und nicht nur günstig zu bekommen sind, sondern sich auch einfach integrieren lassen – sowohl aus Hardware- als auch aus Software-Sicht. Außerdem liegen drahtlose Sensoren im Trend, die sich zu Wireless Sensor Networks zusammenschließen lassen und somit eine Vielzahl unterschiedlichster Informationen von verschiedenen Orten zur Verfügung stellen können. Der Sammelbegriff der Aktoren bezeichnet den Teil eines CPS, der die reale Welt durch Aktionen beeinflussen kann. Er ist also das Gegenstück zum Sensor und erfasst die reale Umgebung nicht, sondern kann sie gezielt manipulieren. Ebenso wie eine Vielzahl unterschiedlichster Sensoren verfügbar ist, sind auch verschiedenste Aktoren erhältlich, die auf unterschiedliche Arten funktionieren und wirken können: neben dem weitverbreiteten mechanischen Prinzip sind auch elektromechanische, optische, thermische und sogar biologische Aktoren verfügbar.

Die Möglichkeiten, die Sensoren und Aktoren bieten, finden sich tief im Fundament von CPS wieder – sie sind die Schnittstelle der virtuellen zur realen Welt. Gleichzeitig wirft ihre Verwendung aber Fragen auf, die im Rahmen des Entwicklungsprozesses geklärt werden müssen. Sensordaten müssen vorverarbeitet, kategorisiert und analysiert werden. Aktionen, die durch Aktoren die reale Welt beeinflussen, müssen bewertet und auf potentielle Gefahren untersucht werden. Software-Tests spielen hierbei eine weiterführende Rolle, sind aber schwierig im Labor durchzuführen, da zum einen die reale Welt eine Vielzahl an relevanten Störfaktoren bereithält und andererseits die vielfältigen Konsequenzen auf reale Objekte schwer nachzustellen sind.

2.8 Netzwerktopologien

CPS sind verteilte Systeme und bilden ein Netzwerk unterschiedlicher Komponenten. Der Aufbau und die Struktur eines CPS sind je nach Anwendungsfall unterschiedlich zu gestalten, was zu unterschiedlichen möglichen Netztopologien führt. Die Wahl der jeweiligen Netztopologie hat durchaus Auswirkungen auf die Funktionsweise des Gesamtsystems: Aspekte wie Sicherheit, Stabilität, Leistungsfähigkeit und Performance werden direkt beeinflusst. Sicherheitskritische Anwendungen und Systeme, die häufig in fremden Umgebungen mit anderen Systemen interagieren müssen, haben andere Anforderungen an das Netzwerk als große Industrieanlagen, die in abgeschlossenen und vollständig überwachten Umgebungen zum Einsatz kommen. Konsequenterweise spielt die Auswahl der passenden Topologie somit eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von CPS und muss explizit betrachtet werden.

Topologien wie Client-Server-Systeme haben einen festen Platz in klassischen Informationssystemen und werden von einem hohen Maß an Zentralisierung geprägt. Für CPS, die oft autonom und unabhängig agieren müssen, kann eine solch starre Topologie unpassend sein. Darüber hinaus sind zentralisierte Topologien anfällig für Störungen und Ausfälle. Flexiblere und feingranulare Ansätze wie P2P-Netze, die aus (mehr oder weniger) gleichberechtigten Knoten bestehen und die Arbeits- und Entscheidungslast auf mehrere Komponenten aufteilen, können hier eher zum Einsatz kommen. So kann nicht nur der Ausfall einzelner Komponenten besser aufgefangen werden, sondern auch ein flexibleres Netzwerk geschaffen werden. Zentrale Server können aber natürlich immer noch relevant sein und auch in P2P-Netzen eingesetzt werden – man spricht dann von einem hybriden Netzwerk. Denkbar sind auch Cluster von Netzwerken: die unterschiedlichen Subsysteme können eigenen Topologien haben, die wiederum zum Gesamtnetzwerk zusammengeschlossen werden.

2.9 Simulation

Das Verständnis von CPS für ihre Umwelt und ihre Möglichkeiten zu Interaktion und Manipulation der Umgebung sind auf der einen Seite ihre wesentlichen Merkmale, auf der anderen Seite eines der Hauptprobleme bei der Entwicklung. Die Simulation möglicher Variationen im Entwicklungslabor ist somit notwendig und gleichzeitig eine wesentliche Herausforderung, insbesondere da mehrere Umweltparameter auch Wechselwirkungen haben können, die in der simulierten Umgebung nachgebildet werden müssen. Dazu kommt die Vielfalt der unterschiedlichen Umweltparameter sowie ihrer Abhängigkeiten, Wechselwirkungen und Unberechenbarkeit – schon die Simulation von Wetterphänomenen und ihrer Auswirkungen ist heute so rechenintensiv, dass komplexe Großrechner dafür benötigt werden. Im Falle von CPS müssen aber neben Umweltparametern auch z. B. andere Systeme, mit denen das CPS interagiert, simuliert werden können, und das in einer wirtschaftlich tragfähigen Entwicklungsabteilung.

Damit einher geht die Entwicklung von Testumgebungen und –szenarien, in denen die unterschiedlichen Einflussfaktoren manipuliert und so ausprobiert werden können. Von Sensoren erfasst Informationen und von Aktoren ausgelöste Aktionen müssen auf ihre Wertigkeit und Verlässlichkeit überprüft werden und es muss sichergestellt sein, dass sich das zu entwickelnde CPS in allen Situationen erwartungsgemäß und sicher verhält – insbesondere, wenn Schäden an Gütern oder gar Menschen möglich sind. Der Qualitätssicherung, die in der Software-Entwicklung gerne als erstes vernachlässigt wird, kommt also eine gesteigerte Bedeutung zu. Letztlich spielt noch ein rein wirtschaftlicher Faktor eine zentrale Rolle, der Simulation für CPS relevant macht: Tests durch menschliches Personal sind zeitaufwendig und kosten Geld. Konsequenterweise ist Testautomatisierung erstrebenswert, benötigt aber sowohl genau definierte Testszenarien als auch eine passende Testumgebung.

2.10 Erkennung kaskadierender Fehler

CPS sind verteilte Systeme, in denen unterschiedlichen Subsysteme untereinander Informationen austauschen, um ihre spezialisierten Aufgaben zum Gesamtsystem zusammenzufügen. Einzelne Komponenten sind dabei von Daten anderer Komponenten abhängig, z. B. von gemessenen und aufbereiteten Sensordaten. Rohdaten werden von unterschiedlichen Subsystemen gemessen, aufbereitet und an andere weitergegeben, die wiederum eine Aggregation und weitere Verarbeitung der Daten durchführen. Wird eine fehlerhafte Berechnung oder Messung weitergegeben, so kann sie Folgefehler verursachen, die aber u. U. von abhängigen Komponenten, bei denen der Fehler letztlich aufgetreten ist, nicht mehr aufgelöst werden können. Somit pflanzen sich Fehler durch das gesamte CPS hindurch fort und führen an unerwarteten Stellen, die nicht direkt mit der eigentlichen Fehlerursache in Verbindung stehen, zu unerklärlichen Phänomenen und Entscheidungen. Entsprechend müssen Betreiber von CPS bei der Analyse von Fehlersituationen unterstützt werden, um derart kaskadierende Fehler aufdecken und die Ursache zielsicher beheben zu können.

Während die Ursachen von Fehlerkaskaden technischer Natur sein können, sind die Konsequenzen eher auf der fachlichen Seite der Anwendung spürbar. Eine reine Überwachung und Protokollierung des Netzwerkverkehrs zwischen einzelnen Komponenten ist also nicht ausreichend – die übermittelten (und protokollierten) Daten müssen auf ihre fachliche Zusammengehörigkeit und die daraus folgenden Schlussfolgerungen, die das CPS getroffen hat, überprüft werden. Gleichzeitig erzeugt eine vollständige Protokollierung aller anfallen Daten einen entsprechenden Datenwust, den es zu verarbeiten gilt. Clevere Lösungen, die die zielgerichtete Verbindung von Fehlerfall und potentieller Ursache ermöglichen, sind gefragt.

2.11 Big Data

Die einzelnen Teilsysteme eines CPS erzeugen für sich viele verschiedene Daten, die in unterschiedlich aufbereiteter und strukturierter Form vorliegen. Sie sind für eine Analyse durch Menschen meist zu vielfältig, zu groß oder gar zu unstrukturiert. Intelligente Algorithmen jedoch können aus ihnen neue Erkenntnisse gewinnen. Wenn klassische Datenverarbeitung nicht mehr ausreicht, muss auf Methoden des Big Data zurückgegriffen werden. Big Data geistert als Schlagwort bereits seit mehreren Jahren durch die Schlagzeilen, bekommt aber mit der Weiterentwicklung von CPS eine neue Dimension. Im Gegensatz zu CEP arbeitet Big Data auf bestehenden (und beständig wachsenden) Datenbeständen und erlaubt somit, Schlüsse aus der Vergangenheit zu ziehen und diese für die Zukunft zu berücksichtigen. Darüber hinaus bieten sich interessante Schnittstellen zum maschinellen Lernen und der künstlichen Intelligenz, die oftmals ein gewisses Training auf bestehenden Daten voraussetzen.

Der Auswahl passender Algorithmen für den jeweiligen Anwendungsfall kommt natürlich auch mit Blick auf Big Data eine wesentliche Rolle zu. Da CPS sowohl mit diskreten als auch kontinuierlichen realen Prozessen arbeiten, ist eine genaue Bewertung und gezielte Auswahl von Analyseverfahren unumgänglich. So existieren in physischen Prozessen viele kausale Abhängigkeiten und entsprechende Korrelationen, was einige statistische Analysen nicht ausreichend abbilden können. Darüber hinaus stellen sich ob der interessanten Möglichkeiten, die die Sammlung und Auswertung von Daten bietet, auch für CPS die Fragen nach Datensicherheit und Privatsphäre. Davon ausgehend, dass Menschen zukünftig in erhöhtem Maße mit CPS interagieren werden, müssen auch diese Aspekte frühzeitig angesprochen und in der Entwicklung berücksichtigt werden.

2.12 Echtzeitsysteme

CPS sind werden immer tiefer in viele Bereiche integriert sein. Sie müssen somit verlässlich und vor allem rechtzeitig antworten, sowohl im Normal- als auch im Fehlerfall. Reale Prozesse bestimmen den Zeitpunkt, wann Informationen zur Verfügung stehen müssen. Verschärfte zeitlichen Anforderungen gelten heute schon für zahlreiche Informationssysteme, etwa wenn eine geschäftliche Transaktion in einer definierten Zeitspanne abgeschlossen sein muss. Systeme, die derartige Bedingungen erfüllten, werden als Echtzeitsysteme bezeichnet. Dabei wird der Begriff oft falsch verstanden: Echtzeit bedeutet nicht, dass eine Reaktion sofort eintritt, sondern eher, dass eine Antwort in einer definierten Zeitspanne zu erwarten ist. Es werden also vielmehr genaue Deadlines gesetzt, deren Einhaltung das System verspricht.

Die heute verbreitete Hard- und Software für CPS verursacht aber für Echtzeitanwendungen entscheidende Probleme. Prozessoren arbeiten taktgebunden und zyklisch. Berechnungen werden nach immer demselben Schema in einem bestimmten Rhythmus abgearbeitet. Pro Takteinheit kann der Prozessor Daten laden, schreiben oder Operationen auf ihnen ausführen. Durch die hohe Frequenz, mit der moderne Prozessoren heute arbeiten, erscheint es, als würden Eingaben sofort zu Ausgaben verarbeitet, tatsächlich sind aber mehrere tausend Bearbeitungszyklen durchgelaufen ehe eine Eingabe verarbeitet ist. Für Echtzeitsysteme ist die Geschwindigkeit der Verarbeitung gar nicht direkt interessant, sondern die genaue Festlegung wann welche Aktion/Berechnung durchgeführt werden muss. Bezieht man die verteilte Natur von CPS mit ein, so ergeben sich schnell Herausforderungen bezüglich der zeitlichen Synchronisation der einzelnen Subsysteme sowie der direkten Steuerung und Priorisierung zeitlicher Abläufe, auch über Systemgrenzen hinweg.

2.13 Lokalisierung und Navigation

CPS können autonome Systeme sein und müssen sich alleine in einer u. U. unbekannten Umgebung zurechtfinden. Lokalisierungs- und Navigationstechnologien, wie sie aus klassischen Navigationssystemen bekannt sind, müssen weitergedacht und mit anderen Kerntechnologien für CPS zusammengeführt werden, um stimmige Systeme zu kreieren. Darüber hinaus ist die Feingranularität der Lokalisierung eine wichtige Frage, die im Rahmen der Entwicklung geklärt werden muss. Mobile Geräte machen auch bereits vor, wie durch unterschiedliche Techniken – GPS sowie Verbindung zu WLAN und Mobilfunkmast – eine mehr oder weniger genaue Lokalisierung möglich ist. Außerdem bleibt zentimetergenaue Lokalisierung innerhalb von Gebäuden eine spannende Frage.

CPS müssen aber nicht nur ihre eigene Position zuverlässig bestimmen, sondern je nach Anwendungsfall auch interessante Objekte lokalisieren können. Automatisierte Warenlager beispielsweise müssen jederzeit wissen, wo sich bestimmte Waren befinden – vor allem mit Blick auf die Möglichkeit, dass diese beweglich sind und z. B. von einem unachtsamen Mitarbeiter an einen anderen Ort verlegt werden. Dabei können – je nach eingesetzter Technologie – unterschiedliche Rahmenbedingungen wie die Beschaffenheit der Regale die korrekte Funktionsweise beeinträchtigen.

2.14 Cloud Computing

CPS arbeiten auf einer Vielzahl von Daten, die in vielen Fällen überall und immer verfügbar sein müssen. Diese Verfügbarkeit wird durch die Verlagerung von Daten und Diensten in die Cloud ermöglicht. Gerade mobile CPS können dadurch auf einen schier endlos erweiterten Datenbestand und passende Rechenpower zurückgreifen. In der Entwicklung von CPS ist der mögliche Grad an Abhängigkeit von Daten, die in der Cloud liegen, zu definieren und darauf aufbauend eine passende Synchronisation der wesentlichen Daten zu implementieren, auf die im Falle eines Verlusts der Netzwerkverbindung zurückgegriffen werden kann. Darüber hinaus stellt sich eine einfache Kosten-Nutzen-Frage: Daten in die Cloud auszulagern spart jede Menge Administrationsaufwand, da die Bereitstellung und Wartung der notwendigen Hardware nicht selbst übernommen werden muss.

Neben der Bereitstellung von Daten ermöglicht die Cloud auch, dass Dienste global zur Verfügung gestellt werden können. Aufwendige Operationen können so ausgelagert und von spezialisierten Systemen durchgeführt werden, wodurch auch gänzlich neue Geschäftsmodelle entstehen können. CPS können somit Ressourcen sparen oder gleich mit günstiger Hardware oder weniger Energiespeicher ausgestattet werden. Gleichzeitig erhöht sich aber auch der Kommunikationsaufwand, sodass abgewogen werden muss, an welcher Stelle lokale Rechenressourcen eingesetzt oder eher auf externe Dienste zurückgegriffen werden soll. Mit der Integration separater Services geht aber auch die Übertragung von Daten an Dritte einher, für die in Deutschland und in der EU strenge Regeln herrschen. Potentielle Lösungen für unterschiedliche Probleme, die mit CPS und Services in der Cloud prinzipiell implementierbar wären, sind somit von zusätzlichen Einschränkungen betroffen, für die juristisch ausgebildete Experten hinzugezogen werden müssen.

3 Fazit & Ausblick

Dieses Kompendium soll eine Übersicht liefern, welche technologischen Herausforderungen die Entwicklung von CPS mit sich bringt. Vermutlich werden nicht alle Kerntechnologien in jedes CPS integriert werden, aber sie können als Startpunkt dienen, um wiederkehrende Probleme zu lösen und ein Gefühl zu bekommen, welches technische Fachwissen notwendig ist und mit welchen Spezialgebieten sich Entwickler, die an CPS arbeiten, beschäftigen sollten.

Zu jeder der vorgestellten Kerntechnologien erscheinen nun sukzessive spezielle Analysen, die die Bedeutung für CPS und den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sowie einen Ausblick auf potentielle Lücken und Forschungsoptionen geben. Die Spezialisten vom CPS.HUB unterstützen Sie gerne – z. B. durch die Entwicklung von Prototypen für spezielle Anwendungsfälle.

