

ANALYSE



SIMULATION / MÄRZ 2017

CYBER-PHYSISCHER SYSTEME

INHALT

1	EINFÜHRUNG UND RELEVANZ FÜR CPS	4
2	AKTUELLER STAND IN WISSENSCHAFT UND WIRTSCHAFT	5
3	FORSCHUNGSOPTIONEN	7
4	LITERATURVERZEICHNIS	8



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

Autoren

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

Stefan Gries
Volker Gruhn
Marc Hesenius
Julius Ollesch
Christian Wahl

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



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

1 EINFÜHRUNG UND RELEVANZ FÜR CPS

Cyber-physische Systeme (CPS) sind hochgradig vernetzte und zur Laufzeit dynamisch veränderbare Computersysteme, die in Wechselwirkung mit der physischen Welt völlig neue Nutzungspotentiale erschließen. Die Integration von Wahrnehmung, Kommunikation, Verhaltensadaptation, Inferenz und Lernverhalten in CPS birgt die Chance, eine neue Generation von intelligenten und autonomen Systemen zu entwickeln [1]. Die Voraussetzung für eine nutzbringende Vernetzung ist ein zweckorientiertes, detailliertes, in Computern verwendbares Abbild der physischen Welt, das in der Literatur z.B. als digitales oder virtuelles Abbild, digitaler Zwilling oder digitaler Schatten bezeichnet wird [2]. Ein solches Abbild beschreibt die kontinuierlichen und diskreten Prozesse physischer Objekte in hybriden Modellen. Im Verbund mit den informationstechnischen Modellen der Computertechnik sind genaue Simulationen möglich, die Aufschluss über das Verhalten cyber-physischer Systeme geben und die Möglichkeit zur Anwendung umfassender Testverfahren bieten. Daraus abgeleitete Erkenntnisse können nicht nur für die Systementwicklung sondern auch zur Laufzeit genutzt werden, um das Systemverhalten online vorherzusagen und die Simulationsgenauigkeit stetig zu verbessern [3].

Der Begriff der Simulation ist in der Literatur nicht eindeutig belegt. Im engeren Sinne versteht man unter Simulation den Gesamtkomplex der Vorausberechnung oder des Nachstellens eines bestimmten Szenarios [4]. In den Ingenieurs- und Naturwissenschaften werden Simulationen in den meisten Anwendungsgebieten (beispielsweise in der Physik, Chemie oder Mechanik) von Theoretikern zur Ausübung virtueller Experimente genutzt. In den Computerwissenschaften und insbesondere im Software Engineering sind Systemsimulationen und umfassende Testverfahren für einen wirtschaftlichen und qualitativ hochwertigen Entwicklungsprozess unverzichtbar. Meist können nur mithilfe entwicklungsbegleitender Simulationen kritische Spezifikations- und Systemfehler frühzeitig erkannt und behoben werden. Zudem sind die Kosten bei einer Systemänderung minimal, wodurch potentielle Möglichkeiten zum Experimentieren und kreativen Denken gefördert werden [3]. Obwohl der Aufwand einer modellgetriebenen Entwicklung bei entsprechender Komplexität eines Systems hoch ist, werden Simulationen benötigt, um CPS in variablen Größenordnungen (Skalierbarkeit) und in akzeptablen Zeitrahmen zu erforschen. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Entwicklung und Verhaltensweisen der Systeme sind besonders wertvoll, da sie die Definition neuartiger Software Engineering Methoden für cyber-physische Systeme ermöglichen.

Aufgrund der Dynamik der Umwelt und der hochgradigen Vernetzung der Teilsysteme gestaltet es sich als zunehmend schwierig, ein CPS bezüglich der Erfüllung seiner Aufgaben und Zuverlässigkeit zu überprüfen. Da sich die Mehrheit der derzeit für CPS angebotenen Lösungen auf die Simulation einzelner Teilsysteme beschränken wird häufig entwicklungsbegleitend ein physischer Prototyp erstellt. Der Kosten- und Zeitaufwand für diesen Ansatz ist aufgrund der Dynamik und Vielschichtigkeit eines CPS sehr hoch und zu Entwicklungsbeginn nicht bestimmbar. Konzeptionelle Änderungen der Systemarchitektur oder nicht berücksichtigte Einflüsse auf das System bergen gar die Gefahr, den physischen Prototyp gänzlich unbrauchbar zu machen. Zudem besteht die Wahrscheinlichkeit einer zu starken Parametrisierung physischer Prototypen und das damit verbundene Risiko einer Überanpassung [5]. Diese äußert sich in der Tatsache, dass ein System in verschiedenen Umgebungen ein abweichendes Verhalten aufzeigen kann und häufig auch zeigen muss. Eine zu starke Parametrisierung an eine einzelne Testumgebung macht den Prototypen „blind“ für die Dynamiken der realen physischen Welt.

2 AKTUELLER STAND IN WISSENSCHAFT UND WIRTSCHAFT

Obwohl in cyber-physischen Systemen wohlbekannte und deterministische Modelle aus den Ingenieurs- und Naturwissenschaften genutzt werden, kann deren Kombination mit Modellen der Computerwissenschaft ein möglicherweise nicht-deterministisches System erzeugen [6]. In Folge ist es nicht möglich das Verhalten eines Systems hinreichend genau simulieren zu können. Für eine aussagekräftige Simulation cyber-physischer Systeme müssen demnach geeignete deterministische Modelle geschaffen werden, die es erlauben die Zustände des Systems und seine Wechselwirkung mit der Umwelt zu beschreiben und somit zukünftige Zustände vorhersagen zu können [3]. Dazu ist es nicht ausreichend die physischen und informationstechnischen Prozesse eines CPS getrennt voneinander zu betrachten. Vielmehr müssen deren Interaktionen und die daraus resultierende Dynamik verstanden werden [7]. Diese notwendige Perspektive auf das Gesamtsystem umfasst die Sicht auf alle Komponenten eines CPS, einschließlich der gesamten Netzwerktopologie, des Netzwerkverkehrs, des Hard- und Softwareverhaltens, der Messdaten und Umwelteinflüsse [5].

Dennoch gilt: Ein physischer Prototyp lässt sich trotz einer hohen Simulationsgenauigkeit nicht gänzlich ersetzen. Die Wechselwirkung cyber-physischer Systeme mit der Umwelt und die damit verbundenen Rückkopplungen zwischen physikalischen und informationstechnischen Prozessen erfordern ein unterstützendes Testen in der realen Welt. Häufig kann auch schlichtweg kein genaues Systemmodell erstellt werden, da nicht alle notwendigen systembeschreibenden Informationen öffentlich zugänglich sind. So unterscheiden sich beispielsweise die Implementierungen standardisierter Kommunikationsprotokolle bei verschiedenen Herstellern [8]. Daraus folgt das Problem, dass ein Modell zwar sprachlich äquivalent zum Referenzsystem ist, jedoch in anderen Umgebungen ein abweichendes Verhalten erzeugen könnte [6]. Die Simulation cyber-physischer Systeme sollte deshalb als eine ergänzende Möglichkeit gesehen werden, die Erstellung eines Prototyps zu beschleunigen und das System verbessern zu können [5].

Ein Beispiel einer simulationsbasierenden Architektur cyber-physischer Systeme zeigt die im Jahr 2016 veröffentlichte Arbeit von Gabor et al. [3]. Die wesentlichen Komponenten dieser Architektur sind das kognitive System, die physische Welt und das Weltmodell (= digitaler Zwilling). Abweichend von der klassischen Sicht einer simulationsbasierten Architektur, in welcher das Weltmodell im Softwaresystem eingebettet und von Algorithmen zur Handlungsplanung verwendet wird, bietet sich das Weltmodell dieser Architektur gleichwertig zur realen physischen Welt als Schnittstelle an. Da der digitale Zwilling die physische Welt möglichst genau abbildet ist er ebenso in der Lage, gleichwertiges Verhalten der Sensorik und Aktorik zu produzieren. Mithilfe dieser Architektur ist es somit möglich die kognitive Komponente des Systems entgegen der virtuellen Schnittstelle zu entwickeln und mit hoher Skalierbarkeit und niedrigem Zeitbedarf zu testen. Ein weiterer großer Vorteil liegt zudem in der Fähigkeit, die von der kognitiven Komponente geplanten Aktionen zunächst entgegen des digitalen Zwillings zu trainieren und die so gewonnenen Daten zur Verbesserung des Systemverhaltens in der physischen Welt zu nutzen.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Kumar et al. in ihrer Testumgebung für die Analyse robuster cyber-physischer Systeme in sicherheitskritischen Anwendungen [8]. Die oft spezialisierte Auslegung eingebetteter Computer in solchen Szenarien geht einher mit der eingeschränkten Rechenkapazität ihrer Systeme. Mithilfe einer *closed-loop Simulation* können auch für leistungseingeschränkte Systeme die physikalischen Gegebenheiten der Umgebung, die Netzwerkcharakteristiken und die Sensoren und Aktoren des Systems nachgebildet werden. Entge-

gen einer open-loop Simulation, in welcher keine Rückkopplung der physischen Welt in das System erfolgt, nutzt die *closed-loop Simulation* dieses Feedback um die Prozesse des Systems in geeigneter Weise zu regulieren [9]. Im Ergebnis ist es möglich das spezifische Verhalten der Sensoren und Aktoren der Teilsysteme, aber auch deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu analysieren. Die Integration solcher Testverfahren kann am schnellsten und einfachsten mit *hardware-in-the-loop* [auch HIL] Simulationen erreicht werden. Das HIL-Verfahren ist eine *closed-loop Simulation*, in welcher ein eingebettetes System über seine Ein- und Ausgänge an einem Simulator angeschlossen und entgegen einer simulierten Systemumgebung getestet wird. Zusätzlich zum HIL-Verfahren müssen die physischen Prozesse, die Hard- und Software und das Netzwerkverhalten des CPS möglichst genau nachgebildet werden. Zu diesem Ziel stellt die Testumgebung von Kumar et al. folgende Komponenten bereit: eine anwendungsangepasste Hardware zur Integration der Softwareschicht, eine Netzwerkinfrastruktur, mehrere Simulationsumgebungen um ein physikalisches Modell zu integrieren und eine Schnittstelle zur Verbindung der Anwendungsprozesse mit der Simulation [7]. Für jede dieser Komponenten ist die detailgetreue Nachbildung des realen Systems von größter Wichtigkeit.

Ein weiterer Ansatz, veröffentlicht von Feng und Fei [10], beschäftigt sich ebenfalls mit *hardware-in-the-loop* Simulationen cyber-physischer Systeme. Die dort vorgestellte Testumgebung unterstützt *Multitasking Realtime Scheduling* und simuliert die gängigsten Kommunikationsprotokolle regulärer Bussysteme. Zusätzlich wird eine Schnittstelle zur Implementierung weiterer Protokolle angeboten. Besonders erwähnenswert ist die Fähigkeit zur Manipulation der Kommunikation der Teilsysteme zur Laufzeit. Hieraus ergibt sich eine hocheffiziente und flexibel einsetzbare Testumgebung für cyber-physikalische Systeme.

Insbesondere in Anwendungsbereichen mit beliebiger Skalierbarkeit, wie bei Smart Cities, im Verkehrsmanagement oder beim Precision Farming, werden Simulationen benötigt um das Verhalten groß angelegter CPS genau abbilden zu können. Bei einer sehr großen Anzahl von interagierenden Systemkomponenten stellt sich ein Grad von Komplexität ein, der die Simulationsleistung zum Schlüsselfaktor werden lässt. Die Simulation groß angelegter komplexer Systeme wird bereits durch eine Vielzahl an *state-of-the-art* Tools auf Hochleistungsrechnern oder Mehrkernumgebungen geleistet [11], [12], [13]. Dennoch gibt es immer noch Einschränkungen bei der Simulation von CPS die aus tausenden von Knoten zusammengesetzt sind und insgesamt Millionen von Aufgaben parallel verarbeiten. Häufig stellt sich die Simulationszeit als unzureichend lang heraus oder die Simulationsleistung ist schlichtweg unzureichend. Garraghan et al. stellen diesbezüglich ein Verfahren vor, das es erlaubt, Simulationen hochgradig komplexer und groß angelegter CPSs zu partitionieren und hardwareunabhängig auf beliebig vielen Knoten zu verteilen [5]. Diese partiellen Simulationen eines Gesamtnetzwerkes beinhalten alle relevanten Informationen und können auf Knoten passender Rechenkapazität ausgelagert und im weiteren Verlauf erneut synchronisiert werden.

3 FORSCHUNGSOPTIONEN

Bei der Simulation cyber-physischer Systeme ist die gewünschte wechselseitige Optimierung mit dem hardwareseitigen Prototyp noch nicht erreicht worden [3]. Die zur Laufzeit anfallenden Daten der physikalischen und informationstechnischen Prozesse werden unzureichend aufbereitet und analysiert, wodurch potentielle Optimierungen und systemübergreifende Erkenntnisse ausbleiben. Es müssen Modelle und Verfahren erforscht werden, die diese Daten in der Simulation berücksichtigen und in der Lage sind Aktionen zu planen und entgegen der physischen Schnittstelle unter Berücksichtigung des Gesamtsystems zu verifizieren. Aus den gewonnenen Informationen können Rückschlüsse zur Angleichung von Simulation und Prototyp abgeleitet werden. Das Lernverhalten bezüglich dieser gewünschten Optimierung bietet ein hohes Potential zukünftiger Forschungen. Einhergehend mit der kontinuierlichen Optimierung ergibt sich das Problem der Erzeugung von unterschiedlichen Instanzen digitaler Zwillinge. Ist das Vorhersageverhalten der Simulation aufgrund mehrerer Zwillinge gestört, müssen Verfahren zur Abstimmung oder Aussortierung dieser Instanzen geschaffen werden. Solche liegen zum derzeitigen Zeitpunkt noch nicht vor.

Ferner gilt es zu erforschen, wie die Entwicklung digitaler Zwillinge möglichst optimal im Entwicklungsprozess und Lebenszyklus des Systems integrierbar ist. Da die digitalen Zwillinge jeden Aspekt der Hardware genaustens simulieren müssen, aber die Hardware eines CPS meist erst nach mehreren Prototypen feststeht und sich im Lebenszyklus ändern kann, liegt hier ein klassisches Henne-Ei-Problem vor [3].

Im Bereich partitionierter und verteilter Simulationen hoch skalierbarer CPS zeigten Experimente, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen Simulationsleistung, Größe der Recheninfrastruktur und Simulationsskalierung gibt [5]. Obwohl größere Recheninfrastrukturen eine bessere Simulationsleistung zur Folge haben, vergrößert sich auch gleichzeitig der operationelle Aufwand und die Kosten der Simulation. Auf der anderen Seite resultieren kleinere Infrastrukturen in eine niedrigere Simulationsleistung und geringerem Aufwand. Gleichzeitig erhöht sich die Simulationszeit signifikant, woraus sich ein nicht zu rechtfertigender Energieverbrauch ergibt oder die Simulationsleistung schlichtweg nicht ausreichend ist. Für diesen offensichtlichen Zusammenhang ergibt sich das Forschungspotential eines Optimierungsproblems, das unter Berücksichtigung der Ansprüche der Nutzer (Stichwort: Software-as-a-Service), ein Gleichgewicht zwischen diesen beiden Optionen schaffen könnte.

Jüngst wird DEVS (*discrete event system specification*), ein Formalismus zur Beschreibung von hybriden Simulationsmodellen mit kontinuierlicher und diskreter Zeitdynamik, bei der Entwicklung von CPS genutzt. Die Verifikation des abgeleiteten Modells ist gegenwärtig ein Problem, da verschiedene Semantiken der Zustandsübergänge ein manuelles Eingreifen von Experten nötig machen [14]. Lee und Lee schlagen eine Unterklasse von DEVS vor, die zwar weniger ausdrucksstark, dafür aber verifizierbar ist [15]. Zusätzlich soll eine visuelle Modellierungssprache zur Förderung der Modularität und Wiederverwendbarkeit der Modelle entwickelt werden. Formale Beschreibungen hybrider Modelle, die es ermöglichen CPS in ihren diskreten und kontinuierlichen Prozessen abzubilden, stellen zukünftig einen wichtigen Forschungsschwerpunkt dar.

4 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] CPS-Steering-Group, „CPS Executive Summary“, 2008.
- [2] K. Zeman, T. Pumhössel, J. Reisinger, G. Winter, und A. Kainz, „Modellbildung und Simulation – eine permanente Herausforderung auf dem Weg zur cyber-physischen Produktion“, *BHM Berg- Hüttenmänn. Monatshefte*, Bd. 161, Nr. 11, S. 532–538, 2016.
- [3] T. Gabor, L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck, und A. Neitz, „A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems“, in *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing [ICAC]*, 2016, S. 374–379.
- [4] H.-J. Bungartz, S. Zimmer, M. Buchholz, und D. Pflüger, *Modellbildung und Simulation*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [5] P. Garraghan, D. McKee, X. Ouyang, D. Webster, und J. Xu, „SEED: A Scalable Approach for Cyber-Physical System Simulation“, *IEEE Trans. Serv. Comput.*, Bd. 9, Nr. 2, S. 199–212, März 2016.
- [6] E. A. Lee, „The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models“, Bd. 15, Nr. 3, S. 4837–4869, 2015.
- [7] E. A. Lee und S. A. Seshia, *Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach*. Morrisville, NC: LeeSeshia.org, 2011.
- [8] P. S. Kumar, W. Emfinger, und G. Karsai, „A testbed to simulate and analyze resilient cyber-physical systems“, in *2015 International Symposium on Rapid System Prototyping [RSP]*, 2015, S. 97–103.
- [9] S. Preusse, H.-C. Lapp, und H.-M. Hanisch, „Closed-loop system modeling, validation, and verification“, in *Emerging Technologies & Factory Automation [ETFA], 2012 IEEE 17th Conference on*, 2012, S. 1–8.
- [10] F. Gao und F. Deng, „Design of a Networked Embedded Software Test Platform Based on Software and Hardware Co-simulation“, in *2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion [QRS-C]*, 2016, S. 375–381.
- [11] B. White u. a., „An Integrated Experimental Environment for Distributed Systems and Networks“, *SIGOPS Oper Syst Rev*, Bd. 36, Nr. SI, S. 255–270, Dez. 2002.
- [12] L. Peterson, A. Bavier, M. E. Fiuczynski, und S. Muir, „Experiences Building PlanetLab“, in *Proceedings of the 7th Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, Berkeley, CA, USA, 2006, S. 351–366.
- [13] J. E. Miller u. a., „Graphite: A distributed parallel simulator for multicores“, in *HPCA - 16 2010 The Sixteenth International Symposium on High-Performance Computer Architecture*, 2010, S. 1–12.
- [14] S. Minopoli und G. Frehse, „From Simulation Models to Hybrid Automata Using Urgency and Relaxation“, in *Proceedings of the 19th International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*, New York, NY, USA, 2016, S. 287–296.
- [15] H. Y. Lee und S. J. Lee, „Poster Abstract: Modeling, Simulation and Verification Environment for Engineering Cyber-Physical Systems Based on Discrete Event System Specification“, in *2016 ACM/IEEE 7th International Conference on Cyber-Physical Systems [ICCPs]*, 2016, S. 1–1.

Gefördert durch



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
**Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung**