

# **Digital-physische Verbundkonzepte: Gegenüberstellung, Nutzeffekte und kritische Hürden**

## ***Concepts for Digital-Physical Connection: Comparison, Benefits and Critical Issues***

Richard Scheer, Steffen Straßburger, TU Ilmenau, Ilmenau (Germany),  
richard.scheer@de.bosch.com, steffen.strassburger@tu-ilmenau.de

Marc Knapp, Robert Bosch GmbH, Stuttgart (Germany),  
marc.knapp@de.bosch.com

**Abstract:** Several concepts for digital-physical connection exist in literature and practice. This paper provides an overview over prevalent concepts. It characterises their specific attributes and places them in contrast with each other. Furthermore, it describes the major benefits as well as the most critical issues in the implementation of these concepts. These potential benefits and issues might then also serve as indicators for further research. From a practical perspective, this paper introduces a straightforward procedure to indicate the appropriate and most efficient concept for any specific implementation of a digital-physical connection system. It bases this indication on the specific requirements of the application.

## **1 Einführung**

Im Rahmen industrieller Entwicklungsstrategien, wie z.B. Industrie 4.0, wird wiederholt die Notwendigkeit von Verbundsystemen zwischen physischen Komponenten der Produktion und computergestützter Simulation betont. Es mangelt jedoch an klarer Differenzierung zwischen den verschiedenen digital-physischen Verbundkonzepten. Prävalente Konzepte wie Online-Simulation, Symbiotische Simulation, Digitale Zwillinge, Cyberphysische Systeme (CPS) oder Dynamic Data Driven Application Systems (DDDAS) müssen zunächst gegenübergestellt und voneinander abgegrenzt werden, zumal dies in der Literatur bisher nicht genügend erfolgt ist.

Im Kontext von Produktion und Logistik verspricht ein digital-physischer Verbund stellenweise signifikante Vorzüge gegenüber einem klassischen System. Gleichzeitig erfordern jene Verbundsysteme enorme Konzipierungs-, Implementierungs- sowie Betriebsaufwendungen. Folglich ist es für den effizienten Einsatz von digital-physischen Verbundsystemen notwendig, Aufwand und Nutzen apriorisch

abzuwägen und die tauglichste Methodik zu identifizieren. Eine Erfassung der wichtigsten Nutzeffekte und Aufwände soll im Laufe dieser Abhandlung angerissen werden, um eine strukturiertere Vorgehensweise jener Effizienzbetrachtung zu unterstützen. Es wird jedoch keine tiefgehende Analyse einzelner Aufwendungen und einzelner Nutzeffekte von digital-physischen Verbundsystemen erfolgen. Vielmehr sollen diese Aspekte aufgezeigt werden, um potenzielle Nutzer zu sensibilisieren und weitergehende Forschungspotenziale aufzuzeigen. Aus einer praktischen Perspektive soll dieser Beitrag helfen, ein geeignetes Verbundsystem für einen Anwendungsfall auszuwählen.

## **2 Begriffliche Klärung und Abgrenzung**

Bevor eine Analyse der Nutzeffekte und Implementierungshürden einzelner Verbundkonzepte durchgeführt werden kann, müssen diese zunächst einzeln definiert und voneinander abgegrenzt werden. Die Konzepte der deskriptiven Fertigungsdatenanalyse (auch Data Analytics oder Data Mining im Produktionskontext) und der Offline-Simulation (Ablaufsimulation bzw. Materialflusssimulation) sollen zwar Teil der Abgrenzung sein, werden jedoch an dieser Stelle nicht näher erläutert, da sie keine Verbundkonzepte sind. Für nähere Information kann man Meister et al. 2019 respektive Gutenschwager et al. 2017 konsultieren.

### **2.1 Online-Simulation**

Die erste signifikante Untersuchung des Konzeptes Online-Simulation erfolgte durch Davis (1998), in welcher er den Grundgedanken äußerte, dass ein Simulationsmodell in Echtzeit die gleichen Umwelteinflüsse erfahren müsse wie sein physisches Gegenstück. Laut Hanisch et al. (2003) sowie Cardin und Castagna (2011) müsse in jedem Fall eine Initialisierung des Simulationsmodells anhand des Zustands des Realsystems durchgeführt werden, da innerhalb dieser Methodik der Anfangszustand der Simulation besonders bedeutend sei. Ebenso müssen Simulationsergebnisse ausreichend schnell zur Verfügung gestellt werden, um nützlich zu sein (Hanisch et al. 2003). Obwohl ein allgemeines Verständnis des Konzeptes besteht, existiert keine allgemeingültige Begriffsdefinition (Weigert et al. 2017).

### **2.2 Dynamic Data Driven Application System**

Laut Darema (2005) handle es sich bei einem DDDAS um die Integration von historisch oder gegenwärtig aufgenommenen Daten in eine ausführbare Anwendung, wobei jene Anwendung den Aufnahme- bzw. Messprozess der Daten dynamisch steuern könne. Alle Stellgrößen, die ein DDDAS beeinflussen kann, sind rein virtuell, d. h. das physische System wird ausdrücklich nicht beeinflusst (Blasch et al. 2018). Schlussendlich handelt es sich bei einem DDDAS um einen Regelkreis zwischen Simulation und Messung bzw. Datenaufnahme (Darema 2005). Im Rahmen eines DDDAS lassen sich Open- und Closed-Loop-Strategien differenzieren. Ein Open-Loop DDDAS verwendet Realdaten, um den Simulationsprozess zu beeinflussen, wobei bei einem Closed-Loop DDDAS zusätzlich die Simulation den Aufnahmeprozess der Realdaten beeinflusst (Knight et al. 2007).

### 2.3 Symbiotische Simulation

Im Rahmen des Dagstuhl-Seminars im Jahr 2002 wurden Symbiotische Simulationen als eine der größten Zukunftsherausforderungen im Themengebiet von Modellierung und Simulation identifiziert (Fujimoto et al. 2002). Symbiotische Simulation besitzt stellenweise große Ähnlichkeit zur Online-Simulation und dem DDDAS (Aydt et al. 2009). Ein symbiotisches Simulationssystem besteht aus physischer und simulierter Komponente, wobei die Simulation anhand von realen Sensordaten initialisiert wird und das physische System einen Nutzen aus den Simulationsergebnissen bezieht (Aydt et al. 2008). Ähnlich wie beim DDDAS wird dabei zwischen Open-Loop und Closed-Loop unterschieden. Während in einem Open-Loop System nur die simulative Komponente Informationen aus dem physischen System bezieht, so findet in einem Closed-Loop System ein bidirektionaler Informationsaustausch statt (Aydt et al. 2008). Ein wichtiges Instrument, um in diesem Kontext alternative Handlungsmöglichkeiten zu bewerten, ist die What-If-Analyse (Aydt et al. 2009).

### 2.4 Digitale Zwillinge

Die erste bedeutende Nennung des Begriffs erfolgte durch Shafto et al. im Jahr 2012 im Kontext der Simulation von Luft- und Raumfahrtvehikeln und deren Subsystemen. Seit einiger Zeit wird der Digitale Zwilling als ein wichtiges Konzept des Industrie 4.0 Paradigmas verwendet. Kuehner et al. (2021) führten jüngst einen Meta-Review (ein Review von Reviews) zum Thema durch und konnten dabei feststellen, dass zu Fragen von einer Definition, dem wahrgenommenen Entwicklungsstand, den potenziellen Anwendungen sowie den wichtigsten Forschungsfragen wenig wissenschaftliche Einigkeit vorliegt. Anhand wiederkehrender Aspekte definierten sie den Digitalen Zwilling anhand von vier Punkten:

- Digitale Repräsentation des physischen Gegenstücks
- Dient als Simulationsbasis oder ist selbst ein Simulationsmodell
- Hat eine bidirektionale (Daten-)Verbindung mit dem physischen Gegenstück
- Bidirektionale Verbindung kann über mehrere Systemlebensphasen bestehen

### 2.5 Cyberphysische Systeme

Im Jahr 2006 wurde der Begriff des CPS durch die National Science Foundation der USA verwendet (Lee 2015). Laut Lee (2015) handle es sich bei einem CPS um eine Erweiterung von einem physischen System um eingebettete Computer, welche physische Prozesse überwachen und steuern könnten (hauptsächlich in Form von Regelkreisen). Gleichzeitig sei auch das physische System in der Lage, die Berechnung der Computer zu beeinflussen. Letztlich wird damit ein physisches System um eine integrierte Cyber-Komponente erweitert. Diese Cyber-Komponente, in der Regel ein Modell, kann in Komplexität dabei von einer verhaltensbeschreibenden Differentialgleichung bis zu einem komplexen Simulationsmodell rangieren (Lee 2015). Bei der Ausweitung des CPS-Konzeptes auf ein ganzes Produktionssystem spricht man von einem Cyberphysischen Produktionssystem. Laut Monostori (2014) bestehe ein solches System aus autonomen, kooperativen Elementen, die über verschiedene Ebenen (z.B. Maschine, Produktion, Logistiknetzwerk) miteinander verbunden sind.

## 2.6 Abgrenzung

Die fünf genannten Konzepte voneinander abzugrenzen wird dadurch erschwert, dass nicht für alle dieser Konzepte eine allgemein akzeptierte Definition existiert. Dies führt zu mangelnder Trennschärfe und führt u.U. zu begrifflicher Verwirrung. Zudem kann es vorkommen, dass ein Verbundsystem die Definition von mehr als einem dieser Konzepte erfüllt. So könnte eine Symbiotische Simulation bspw. auch eine Online-Simulation oder DDDAS sein (Aydt et al. 2009). Demnach kann an dieser Stelle nur eine Abgrenzung anhand der hier selektierten Definitionen und Literatur erfolgen.

Zunächst haben alle Verbundkonzepte eine physische sowie eine digitale Komponente, die bspw. durch Simulation zum Gesamtsystem beiträgt. Zudem existiert in allen Konzepten zumindest eine monodirektionale Verbindung vom physischen zum digitalen System. In Tabelle 1 sind wesentliche Unterscheidungsmerkmale zwischen den fünf Verbundsystemen sowie Offline-Simulation und der Fertigungsdatenanalyse aufgeführt. Die hauptsächlichen Unterscheidungsmerkmale der digital-physischen Verbundsysteme untereinander sind die Art der digital-physischen Kopplung, sowie der Integrationsgrad der Recheneinheit. Um Übersichtlichkeit zu gewährleisten, wurde bewusst auf den Vergleich weiterer Verbundsystem-spezifischer Nuancen verzichtet.

**Tabelle 1:** Unterschiede zwischen prävalenten digital-physischen Verbundkonzepten

	P → D Verbindung	D → P Verbindung	Simulation	Recheneinheit integriert
Fertigungsdatenanalyse	+	-	-	-
Offline-Simulation	-	-	+	-
Online-Simulation	+	-	+	-
DDDAS	+	-(Messung)	+	-
Symbiotische Simulation	+	+/-	+	-
Digitaler Zwilling	+	+	+	-
CPS	+	+	+	+

P – Physisch, D - Digital

## 3 Nutzeffekte digital-physischer Verbundsysteme

Der grundsätzliche Vorteil von digital-physischen Verbundsystemen ist die Verfügbarkeit von Realdaten im Gegensatz zu den lediglich hinreichend repräsentativen Annahmen oder Zufallsverteilungen in Offline-Systemen. Im Kontext der Simulation bedeutet dies eine Reduktion des Simulationsfehlers (Weigert et al. 2017), wie Abbildung 1 veranschaulicht. Es ist zu sehen, dass wiederholte Initialisierung den Simulationsfehler reduziert. Gleichzeitig ist zu erkennen, dass Simulationen in Verbundsystemen nur dann Vorteile gegenüber klassischen Simulationen erbringen, wenn der Zeithorizont klein ist (d. h. operativ, ggf. taktisch), da diese auf erneute Initialisierungen angewiesen sind. Damit ist über strategische

Zeiträume der Gütegewinn einer Online-Simulation gegenüber einer Offline-Simulation relativ gering.

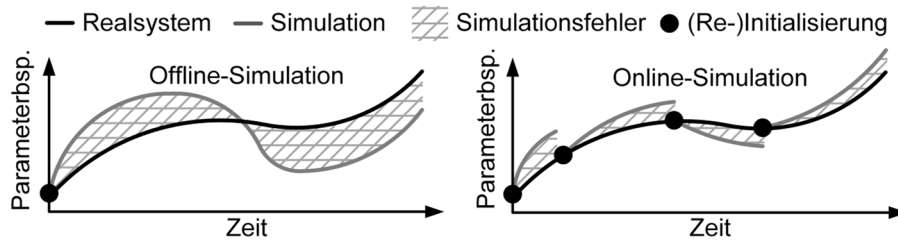


Abbildung 1: Vergleich Offline-/Onlinesimulation, angelehnt an Weigert et al. 2017

Angesichts der großen Heterogenität der Anwendungsfelder von Simulation im Bereich von Produktion und Logistik ist eine Auflistung aller Nutzeffekte von Verbundsystemen unrealistisch, da spezifische Anwendungsfälle äußerst zahlreich sind. Jedoch kann die allgemeine Nützlichkeit bzw. Funktionalität eines Verbundkonzeptes eingeschätzt werden, indem man die Verantwortungsaufteilung zwischen Mensch und Verbundsystem als Indikator verwendet.

Der Funktionsumfang eines spezifischen Verbundsystems soll an den gelisteten vier Hürden gemessen werden. Die Definition dieser Hürden ist durch die Reifegradabstufung aus der Fertigungsdatenanalyse (Meister et al. 2019) sowie durch die Klassifizierung von Symbiotischen Simulationen in Open- und Closed-Loop Varianten (Aydt et al. 2008) inspiriert.

- System zur Deskription
- System zur Prognose
- System zur indirekten Präskription
- System zur direkten Präskription

Tabelle 2: Vergleich Funktionsumfänge von betrachteten Konzepten

	Deskription	Prognose	Indirekte Präskription	Direkte Präskription
Fertigungsdatenanalyse	+	-	-	-
Offline-Simulation	-	+	-	-
Online-Simulation	+	+	+	-
DDDAS	+	+	+	- (Messung)
Symbiotische Simulation	+	+	+/-	+/-
Digitaler Zwilling	+	+	+	+
CPS	+	+	+	+

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht des Funktionsumfangs der hier behandelten Verbundkonzepte.

Ein System zur Deskription hat einen informativen und ggf. diagnostischen Charakter und bezieht sich auf den gegenwärtigen Zustand, d. h., alle Interpretationen und Aktionen auf Basis dieser Interpretationen obliegen dem Nutzer.

Ein System zur Prognose stellt einen meist probabilistischen Blick auf den zukünftigen Systemzustand zur Verfügung. Alle Aktionen zur Sicherstellung oder Vermeidung dieser Zukunft obliegen dem Nutzer.

Indirekte Präskription erfolgt dann, wenn ein Verbundsystem anhand von gegenwärtigen Informationen Handlungsoptionen zur Verfügung stellt, die gewünschte Zustände hervorbringen können. Eine Plausibilisierung, Auswahl und Umsetzung der Handlungsoptionen erfolgen durch den Nutzer.

Ein System zur direkten Präskription evaluiert ein System anhand von gegenwärtigen sowie prognostizierten Daten und erstellt Strategien sowie Handlungsmaßnahmen, um einen Zielzustand zu erreichen oder zu halten. Die Auswahl und Durchführung dieser Maßnahmen obliegen ebenso dem Verbundsystem. Der Nutzer hat im operativen Betrieb keine aktive Rolle.

#### **4 Kritische Implementierungshürden**

Die Implementierungshürden von digital-physischen Verbundsystemen sind abhängig von deren Funktionen. Dementsprechend sollen diese anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Funktionsumfänge strukturiert werden.

Ein System, welches der Deskription dient, benötigt eine Infrastruktur, um Daten aus dem physischen System zu beziehen. Kuehner et al. (2021) stellten bspw. fest, dass die Erzeugung und der Betrieb einer robusten Dateninfrastruktur eine der größten Herausforderungen im Kontext von Digitalen Zwillingen sind. Daten könnten z.B. periodisch aus Datenbanken bezogen werden (Aydt et al. 2009), sollten jedoch echtzeitnah verbunden sein, damit z.B. Simulationen mit dem aktuellen Zustand des physischen Systems initialisiert werden können (Hanisch et al. 2003). In einem konkreten Anwendungsfall kann die Implementierung einer solchen Infrastruktur sehr aufwändig sein. Moderne Fertigungs- und Montageanlagen bieten jedoch häufig Schnittstellen zur Datenaufnahme und -übermittlung, die diesen Prozess unterstützen können.

Ein weiterer kritischer Punkt ist der Datenschutz und die Datensicherheit, wie Barricelli et al. (2019) bspw. im Bezug auf Digitale Zwillinge feststellen. Die Aufnahme und Verarbeitung von personenbezogenen Daten sind besonders prekär und in den meisten Situationen unerwünscht. In breitflächiger, ungerichteter Datenaufnahme durch verschiedene Sensoren ist eine Herstellung von einem Personenbezug häufig möglich und muss daher behutsam verarbeitet werden. Des Weiteren stellen diverse Komponenten von digital-physischen Verbundsystemen potenzielle Ziele für Cyberattacken dar (Singh und Jain 2018) und müssen daher aktiv gesichert werden.

Ein System, das zur Prognose dienen soll, muss einen Mechanismus beinhalten, welcher Aussagen über die Zukunft generieren kann. In der Regel handelt es sich dabei um ein Simulationsmodell. Die Erstellung von geeigneten Modellen ist häufig

zeitaufwändig und erfordert entsprechende Kompetenzen. So identifizierten bspw. Kuehner et al. (2021) Aufwände für Modellierung und Simulation als eine der größten Hürden bei der Implementierung von Digitalen Zwillingen. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Fähigkeit des Modells gelegt werden, mit dem physischen System synchronisiert werden zu können. Es ist zudem zu beachten, dass hochfrequente Synchronisierung evtl. einen erhöhten Rechenaufwand bedeuten kann (Modoni et al. 2018).

Ein präskriptives System erfordert Algorithmen bzw. Heuristiken, die aus dem gegenwärtigen und aus dem prognostizierten zukünftigen Zustand Handlungsstrategien entwickeln können. Diese Handlungsalternativen stellen sicher, dass gewünschte Verhaltensmuster eintreten oder vermieden werden. Beispielsweise kann eine solche Generierung und Bewertung von Handlungsalternativen über What-If-Analysen (Aydt et al. 2009) realisiert werden. In indirekt präskriptiven Systemen müssen die Handlungsalternativen dem Nutzer in geeigneter Form zur Verfügung gestellt werden.

In direkt präskriptiven Systemen erfolgen die Validierung und Umsetzung der Handlungsalternativen vollautomatisiert. Jedoch trägt eine solche Konfiguration die gleichen Risiken, die alle autonomen Systeme wie z.B. autonomes Fahren mit sich ziehen. Dies umfasst rechtlich-regulatorische Aspekte wie z.B. strafrechtliche Verantwortung im Schadensfall (Beck 2020) oder ethisch-moralische Aspekte, wie sie im wissenschaftlichen Feld der Maschinenethik behandelt werden (Winfield et al. 2019).

## 5 Auswahl eines geeigneten Verbundkonzeptes

Eine Effizienzbetrachtung kann an dieser Stelle nur qualitativ erfolgen. In diesem Kontext muss ein Verbundsystem so gewählt werden, dass der minimale Aufwand für die gewünschte Funktionalität anfällt. Ohne näher auf konzeptspezifische Nuancen einzugehen, die potenziell im einzelnen Anwendungsfall interessant sind, kann eine grundsätzliche Strategie zunächst nur durch Vermeidung unnötiger Aufwände strukturiert werden. Abbildung 2 zeigt eine solche Strategie. Dabei stellt sich ein Nutzer Fragen zum beabsichtigten Nutzen bzw. den notwendigen Fähigkeiten des Verbundsystems und wird daran in der Auswahl eines geeigneten Konzeptes unterstützt. In der Abbildung wird eine positive Antwort auf eine Frage durch ein Häkchen gekennzeichnet, während eine negative Antwort durch ein Kreuzchen symbolisiert wird. Möchte man bspw. ein System entwickeln, welches Realdaten extrahiert und auf deren Basis ein Simulationsmodell betreibt, so würde man die ersten zwei Fragen positiv und die dritte Frage negativ beantworten. Somit wäre das effizienteste System in diesem Fall eine Online-Simulation.

Diese Strategie ersetzt nicht die anschließende detaillierte Auseinandersetzung mit dem ausgewählten oder ähnlichen Verbundkonzepten. Vielmehr dient sie der inhaltlichen Initialorientierung und der ersten Eingrenzung von konzeptionellen Optionen.

Es ist zudem zu beachten, dass in der Kontrastierung der Konzepte das zu verbindende physische System in Dimension, Detailgrad und zu einem gewissen Grad auch Funktionalität vergleichbar sein muss. Beispielsweise ist der

Implementierungsaufwand eines Maschinen-CPS nicht mit dem eines Digitalen Zwillings einer ganzen Produktionslinie vergleichbar.

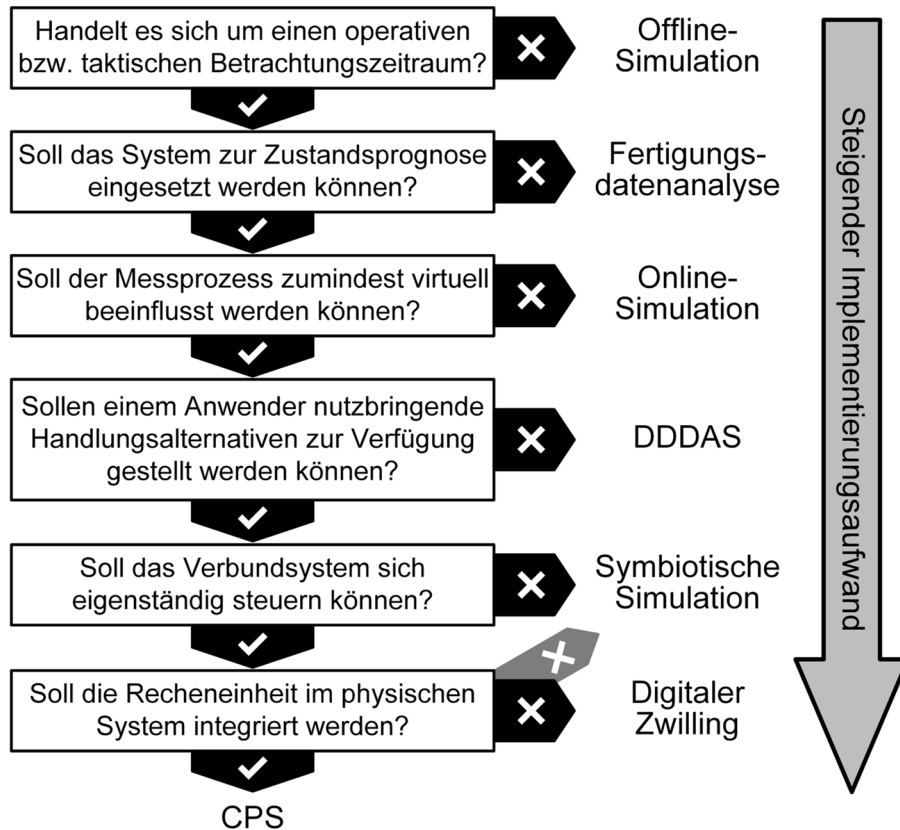


Abbildung 2: Strategie zur effizienten Verbundkonzeptauswahl

## 6 Fazit

Dieser Beitrag identifiziert prävalente digital-physische Verbundkonzepte, präsentiert deren Kernaspekte und grenzt diese voneinander ab. Zudem erfolgt eine Kategorisierung der Verbundkonzepte anhand ihrer Funktionsumfänge, um anschließend eine generelle Aussage über deren wahrscheinliche Implementierungshürden und damit -kosten zu treffen. Schließlich wird eine übersichtliche Vorgehensweise zur Auswahl eines Verbundsystems präsentiert. Die Selektion erfolgt dabei anhand des benötigten Funktionsumfangs und kann so den Implementierungsaufwand im Anwendungsfall minimieren.

Dieser Beitrag bewertet weder die Validität noch die Reife der einzelnen Konzepte. Im Rahmen der Übersichtsgenerierung kann auch nicht in eine signifikante Detailtiefe vorgedrungen werden, sodass evtl. konzeptspezifische Nuancen nicht betrachtet werden. Zudem reicht die hier präsentierte Vorgehensweise nicht als alleinige



Vorbereitung für eine Implementierung aus, sondern muss um eine konzeptspezifische Recherche ergänzt werden. Schlussendlich eignet sich die entwickelte Vorgehensweise somit hauptsächlich als erster Aufsatzpunkt.

Zukünftig ist es notwendig, die hier aufgezeigten Verbundkonzepte stärker in den Fokus zu stellen, um eine Trennschärfe zwischen den Konzepten herstellen zu können. Dies wirkt auch etwaigen Falschklassifizierung entgegen. Des Weiteren müssen die Punkte, die in Kapitel 3 und 4 aufgeführt wurden, näher untersucht werden. Zum einen müssen die Nutzeffekte von digital-physischen Verbundsystemen stärker ausgenutzt werden und zum anderen müssen deren Implementierungsbarrieren abgebaut werden.

## Literatur

- Aydt, H.; Turner, S.; Cai, W.; Low, M.Y.H.: Symbiotic Simulation Systems: An Extended Definition Motivated by Symbiosis in Biology. In: 22<sup>nd</sup> International Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation, Rom (Italien), 3.-6. Juni 2008, S. 109-116.
- Aydt, H.; Turner, S.; Cai, W.; Low, M.Y.H.: Research issues in symbiotic simulation. In: Rosetti, M.D.; Hill, R.R.; Johansson, B.; Dunkin, A.; Ingalls, R.G. (Hrsg.): Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, Austin (USA), 13.-16. Dezember 2009, S. 1213-1222.
- Barricelli, B.R.; Casiraghi, E.; Fogli, D.: A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications and Design Implications. IEEE Access 7 (2019), S. 167653-167671.
- Beck, S.: Die Diffusion strafrechtlicher Verantwortlichkeit durch Digitalisierung und Lernende Systeme. Zeitschrift für Internationale Strafrechtsdogmatik 2 (2020), S. 41-50.
- Blasch, E.; Bernstein, D.; Rangaswamy, M.: Introduction to Dynamic Data Driven Application Systems. In: Blasch, E.; Ravela, S.; Aved, A. (Hrsg.): Handbook of Dynamic Data Driven Application Systems. Cham (Schweiz): Springer 2018, S. 1-25.
- Cardin, O.; Castagna, P.: Proactive production activity control by online simulation. International Journal of Simulation and Process Modelling 6 (2011) 3, S. 177-186.
- Darema, F.: Grid Computing and Beyond: The Context of Dynamic Data Driven Applications Systems. Proceedings of the IEEE 93 (2005) 3, S. 692-697.
- Davis, W.J.: On-Line Simulation: Need and Evolving Research Requirements. In: Banks, J. (Hrsg.): Handbook of Simulation: Principles, methodology, applications and practice. New York (USA): John Wiley & Sons 1998, S. 465-516.
- Fujimoto, R.; Lunceford, D.; Page, E.; Uhrmacher, A.M. (Hrsg.): Grand Challenges for Modelling and Simulation – Dagstuhl Seminar Report 350. Dagstuhl, 26.-30. August 2002.
- Gutenschwager, K.; Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: Simulation in Produktion und Logistik – Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer 2017.
- Hanisch, A.; Tolujew, J.; Raape, U.; Schulze, T.: Online-Simulation für Personenströme in einem Frühwarnsystem. In: Hohmann, R. (Hrsg.): Tagungsband ASIM 2003 – 17. Symposium Simulationstechnik, Magdeburg, 16.-19. September 2003, S. 221-226.

- Knight, D.; Ma, Q.; Rossmann, T.; Jaluria, Y.: Evaluation of Fluid-Thermal Systems by Dynamic Data Driven Application Systems – Part II. In: Shi, Y.; van Albada, G.D.; Dongarra, J.; Sloot, P.M.A. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 International Conference on Computational Science, Beijing (China), 27.-30. Mai 2007, S. 1189-1196.
- Kuehner, J.; Scheer, R.; Strassburger, S.: Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review. Angenommen zur Veröffentlichung in Proceedings of the 54<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems, 2021.
- Lee, E. A.: The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. *Sensors* 15 (2015) 3, S. 4837-4869.
- Meister, M.; Beßle, J.; Cviko, A.; Böing, T.; Metternich, J.: Manufacturing Analytics for problem-solving processes in production. In: Butala, P.; Govekar, E.; Vrabic, R. (Hrsg.): *Procedia CIRP* 81 – Proceedings of the 52<sup>nd</sup> Conference on Manufacturing Systems, Ljubljana (Slowenien), 12.-14. Juni 2019, S. 1-6.
- Modoni, G. E.; Caldarola, E. G.; Sacco, M.; Terkaj, W.: Synchronizing physical and digital factory: benefits and technical challenges. In: Teti, R. (Hrsg.): *Procedia CIRP* 79 – Proceedings of the 12<sup>th</sup> CIRP Conference on Intelligent Computing in Manufacturing Engineering, Golf von Neapel (Italien), 18.-20. Juli 2018, S. 472-477.
- Monostori, L.: Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. In: ElMaraghy, H. (Hrsg.): *Procedia CIRP* 17 - Proceedings of the 47<sup>th</sup> CIRP Conference on Manufacturing Systems, Windsor (Kanada), 28.-30. April 2014, S. 9-13.
- Shafto, M.; Conroy, M.; Doyle, R.; Glaessgen, E.; Kemp, C.; LeMoigne, J.; Wang, L.: Modeling, simulation, information technology & processing roadmap. Washington DC (USA): National Aeronautics and Space Administration, 2012.
- Singh, A.; Jain, A.: Study of Cyber Attacks on Cyber-Physical System. In: Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Internet of Things and Connected Technologies, Jaipur (Indien), 26.-27. März 2018, S. 686-690.
- Weigert, D.; Reggelin, T.; Tolujew, J.: Material Flow Simulation of Logistics Processes – An Approach of Online Analysis, Planning and Control of Logistics Processes of Supply Chains. In: Proceedings of MultiScience – XXXI. MicroCAD International Scientific Conference, Miskolc (Ungarn), 20.-21. April 2017, (ohne Seitenzahlen).
- Winfield, A.F.; Michael, K.; Pitt, J.; Evers, V.: Machine Ethics: The Design and Governance of Ethical AI and Autonomous Systems. *Proceedings of the IEEE* 107 (2019) 3, S. 509-517.