

Blockchainbasierte cyberphysische Produktionssysteme

Blockchain-based cyber-physical production systems

Haci Bayhan
Robert Schulze Forsthövel
Pascal Kaiser
Michael ten Hompel

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund*

Durch cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) können dynamische Produktionsräume mit skalierbaren Modulen realisiert werden. Eine Problematik liegt vor allem in einer unternehmensübergreifenden Integration solcher Systeme. Die Technologie der Blockchain (BC) bietet dafür große Potentiale. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Umsetzungen wird jedoch eine Testumgebung zur Untersuchung und Entwicklung geeigneter Lösungen benötigt. In dem Beitrag werden die dafür erforderlichen Voraussetzungen analysiert. Darüber hinaus wird eine geeignete Testumgebung inklusive der technischen Ausstattung und der dezentralen Selbststeuerungsmethode eines CPPS vorgestellt. Diese ermöglicht in Zukunft die Erforschung BC-basierter CPPS.

[Schlüsselwörter: Industrie 4.0, Cyberphysische Produktionssysteme, Blockchain, Smart Contract]

Cyper-physical production systems (CPPS) allow the realization of dynamic production areas with scalable modules. One of the main problems is the cross-company integration of such systems. The technology of the blockchain (BC) offers great potential for this purpose. Due to the large number of possible implementations, however, a test environment is needed to investigate and develop suitable solutions. In this paper the necessary prerequisites are analyzed. Furthermore, a suitable test environment including the technical equipment and the decentralized self-control method of a CPPS is presented. This will enable the investigation of BC-based CPPS in the future.

[Keywords: Industry 4.0, cyber-physical production systems, blockchain, smart contract]

1 EINLEITUNG

Im Zuge der wachsenden Globalisierung wird auch das zukünftige Produktionsumfeld beeinflusst: Hohe Prozessgeschwindigkeiten, kürzere Produktlebenszyklen und

abnehmende Kundenloyalität sind die Folgen der weltweiten Verflechtungen in diesem Gebiet. Dabei werden kundenspezifische Produkte zu günstigen Preisen gefordert, die dem Kunden zudem in kürzester Zeit geliefert werden sollen [GH10]. Um die Wettbewerbsfähigkeit beizubehalten, müssen Unternehmen auf die individuellen Kundenwünsche eingehen und die sich stetig wechselnden Kundenanforderungen bedienen [Dau17]. Der Grad der Komplexität bei den Produktions- und Logistikprozessen nimmt zu, da die Produkte zunehmend nach den besonderen Wünschen der Kunden angefertigt werden und so zu einer drastisch steigenden Variantenvielfalt sowohl bei den Endproduktmodellen als auch bei den Ausstattungskomponenten führen [Pop18, Roy17]. Eine hohe Zahl von Einzelteilen sowie variierender Materialien, die für die Produktion bereitgestellt werden müssen, korrelieren mit der Anforderung eine kostengünstige Logistik mit niedrigen Beständen, worin die komplexen Strukturen und Anforderungen deutlich werden [Pop18].

In der weiteren Folge löst der globale Wettbewerb intensive Absatzschwankungen aus, sodass die Fähigkeit darauf mit flexiblen Produktionsabläufen zu reagieren unabdingbar ist [VBH17]. Zudem lässt sich der Trend verzeichnen dem Kunden die Möglichkeit zu gewähren, bis kurz vor Produktionsbeginn die Anforderungen an das Produkt zu ändern. Dies intensiviert solche Dynamiken in den Endproduktbedarfen und erschwert sichere Vorhersagen bezüglich der Nachfragemengen und folglich der Produktionsverläufe [BHV14, Dau17].

Aus diesen Gegebenheiten sehen sich Unternehmen gezwungen sich der Problematik zu stellen, eine hohe Anzahl von kundenspezifischen Varianten der individualisierten Produkte in kleinen Chargengrößen zu bieten, jedoch zugleich den zunehmenden Unsicherheiten und einer erhöhten Vielschichtigkeit im Produktionssystem gerecht zu werden [Kor17]. Um dabei Kundenaufträge flexibel abwickeln und auf Veränderungen zügig reagieren zu können, müssen materialflussbezogene Strukturen und Prozesse im

Unternehmen an neue äußere Situationen adaptiert werden [GH10].

Die klassischen, zentralisierten Planungs- und Steuerungsmethoden sind jedoch in aktuellen Produktionssystemen solchen komplexen und schwankenden Märkten nicht zugeschnitten, sodass neue Konzepte sowie technische Innovationen erforderlich sind, die eben diese Komplexität beherrschen und eine rapide Adaptivität des Produktionssystems an interne sowie externe Einflüsse bewerkstelligen können [Boc18, FHS04, SHR14].

In diesem Zusammenhang hat die Industrie 4.0 enorm an Bedeutung gewonnen, zumal unter anderem Lösungen zum einen für die Kontrolle der Komplexitätserhöhung und zum anderen für die Realisierung einer hohen Adaptivität gegenüber Umweltveränderungen konzipiert werden.

Dabei wird die Kontrolle über die Komplexität im Produktionssystem durch die zunehmende Dezentralisierung und Autonomisierung bewerkstelligt [BHV14], während cyberphysische Produktionssysteme (CPPS) als Ansatz für die Realisierung einer vollständig flexiblen Produktion dienen. Hierzu werden multiple autonom agierende cyberphysische Systeme (CPS) gekoppelt und über Internet of Everything miteinander vernetzt und können auf diese Weise kooperieren [Bau17, Boc18].

Dadurch entsteht ein flexibles Produktionsumfeld, in welchem eine autonome, sich in Echtzeit optimierende, transparente und vollflexible Ordnung herrscht, welche durch dezentrale Entscheidungsfindung, Digitalisierung, Vernetzung und vollständige Einbettung aller beteiligten Komponenten erreicht wird [Boc18, Heg15]. Das Ziel ist die Realisierung einer kundenindividuellen Produktion mit maximaler Variantenanzahl bis hin zur Losgröße 1 [Jah17, KWH13].

Da diverse Elemente eines CPPS an Entwurf, Produktion und Verifizierung von Produktbaugruppen teilhaben, kann es problematisch werden, die Zuverlässigkeit der Kommunikation zwischen den Einheiten sicherzustellen. Ausgedehnte Vertragsverhandlungen, Anerkennung bereits vergangener und abgeschlossener Leistungen, aktualisierte Zertifizierungen und Audits zur Gewährleistung der Konformität waren dabei klassische Mittel, um das gegenseitige Vertrauen zwischen Kunden und Herstellern zu schaffen. Aus diesen Verfahren zur Schaffung des Vertrauens entstehen Kosten innerhalb der Lieferketten einer Produktbaugruppe, welche auch als „Vertrauenssteuer“ bezeichnet werden kann. Der finale Verkaufspreis, den der Kunde am Ende aufbringen muss, umfasst auch die oben genannten Kosten (Vertrauenssteuer) [BS17].

Somit ist beim CPPS eine schnelle Kommissionierung wie auch Dekommissionierung von Systemelementen intendiert, für die eine signifikante Investition in Zeit und Kosten erforderlich ist. Auf diese Weise soll die Zuverlässigkeit in einer vernetzten Umgebung, welche aus mehreren

Geschäftsorganisationen besteht, gewährleistet werden. Die bisherigen, klassischen Verfahren zur Herstellung und Begutachtung des Vertrauens bzw. der Zuverlässigkeit stellen die wirtschaftliche Umsetzbarkeit von CPPS-Plattformen auf den Prüfstand [ACH18].

2 HERAUSFORDERUNGEN VON CPPS

Neben den zuvor genannten Potentialen, bringen CPPS auch Herausforderungen mit sich, unter anderem in der Umsetzung einer geeigneten IT-Architektur bzw. Datenverarbeitung. Problematiken können vor allem in den Bereichen Datensicherheit, Datenschutz, Transparenz, Datenintegrität und Robustheit auftreten [LAS19, LBH18]. Diese Herausforderungen treten gerade bei der Implementierung und Integration eines CPPS in einem unternehmensübergreifenden Szenario auf. In einem CPPS werden laufend Daten zwischen den verschiedenen Entitäten ausgetauscht, dessen Richtigkeit gewährleistet sein muss. Es gibt jedoch keine Vertrauensbasis zwischen den beteiligten Parteien aus verschiedenen Unternehmen. Daher muss sichergestellt sein, dass die Daten nicht willentlich oder unwillentlich manipuliert werden können. Das System muss gegen Cyberattacken sowie technische Fehler und Ausfälle geschützt sein. Um Vertrauen in das System zu schaffen, ist außerdem eine geeignete Transparenz nötig, die es den Parteien ermöglicht, auf relevante Daten zugreifen und die Prozesse überprüfen zu können. Neben diesen Anforderungen muss die IT-Architektur so belastbar sein, dass es auch bei einer großen Menge an Entitäten und kommunizierten Daten funktionierende und effiziente Prozesse gewährleistet und das dezentrale Prinzip eines CPPS ermöglicht. Eine Technologie, die große Potentiale hinsichtlich der genannten Herausforderungen aufweist, ist die Blockchain (BC).

3 BLOCKCHAIN ALS „ENABLER-TECHNOLOGIE“ IN CPPS

Die Technologie der BC ist als Grundlage von Kryptowährungen bekannt. Sie bietet aber auch Potentiale für viele andere Domänen. Neben der Finanzbranche ist das IoT eins der beiden Hauptanwendungsgebiete [Mul17]. Eine BC ist im Wesentlichen eine verteilte Datenbank, oder Distributed Ledger, mit Datensätzen aller digitalen Ereignisse oder Transaktionen, die ausgeführt und zwischen den beteiligten Parteien ausgetauscht wurden. Einmal in die Blockchain eingetragene Daten können nicht manipuliert oder gelöscht werden. Sie enthält daher überprüfbare Aufzeichnungen aller durchgeführten digitalen Ereignisse [Cro16]. Auf diese Weise ermöglicht die Blockchain ein Netzwerk ohne Intermediär, in dem die beteiligten Parteien sich vertrauen können, ohne sich außerhalb des Netzwerks vertrauen zu müssen. Entitäten, die in einem BC-Netzwerk zusammengeschlossen sind, werden Nodes genannt. Es existieren BC-Umsetzungen mit unterschiedlichen Klassen

von Nodes. Unterschieden wird häufig zwischen Full Nodes und Light Nodes bzw. Lightweight Nodes. Full Nodes speichern die gesamte Blockchain, wodurch die Richtigkeit der Daten sichergestellt wird. Light Nodes speichern und verarbeiten nicht die gesamte Blockchain, wodurch sie geringere Speicher- und Rechenkapazitäten benötigen [GLK18]

Aufgrund des Funktionsprinzips spricht die BC-Technologie die oben genannten Herausforderungen von CPPS an. Besonders wichtig in diesen Systemen ist der Schutz vor Datenmanipulation und Cyberangriffen sowie die Datenintegrität, in denen die BC-Technologie große Vorteile im Vergleich zu anderen Lösungen besitzt [GLG20], [DKJ17]. Durch die dezentrale und redundante Speicherung der Daten, wird außerdem eine hohe Transparenz und eine Sicherheit gegenüber technischer Ausfälle erreicht. Darüber hinaus bietet eine geeignete BC Potentiale im Bereich der Fehlertoleranz eines CPPS [VLW18] und kann ein skalierbares Netzwerk ermöglichen [LAS19, VLW18, ACH18].

Bestimmte Blockchain-Umsetzungen erlauben darüber hinaus das Ausführen von Smart Contracts. Smart Contracts sind selbstausführende Programme, die ebenfalls in der Blockchain gespeichert sind. Sie ermöglichen die Durchführung von Aktionen automatisch und ohne Einbeziehung Dritter. Dafür überwachen sie die Erfüllung bestimmter Bedingungen anhand der in der BC gespeicherten Daten und treffen darauf aufbauend Entscheidungen gemäß den festgelegten Algorithmen. Auf diese Weise kann eine vertrauensvolle Umgebung für transparente Interaktionen in einem Netzwerk geboten werden [AKS18]. Smart Contracts erlauben auch Micro-Payments zwischen CPS. Die CPS werden dadurch in die Lage versetzt sich autonom gegenseitig für bestimmte Aktionen zu bezahlen [AFK18].

Der Einsatz der BC-Technologie im Bereich des IoT bringt jedoch auch eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Diese betreffen vor allem die Rechen- und Speicherkapazität der Nodes sowie den Datentransfer. Auch die Skalierbarkeit und die Latenz ist in vielen heutigen Umsetzungen von BC problematisch [GLG20], [Tia16]. Darüber hinaus ist die Programmierung von Smart Contracts in vielen BC nicht oder nur bedingt möglich.

Aufgrund der verschiedenen Umsetzungsformen der BC und verwandter Distributed Ledgers wie IOTA [Iot20], die sich in einem noch relativ frühen Entwicklungsstadium befinden, können kaum allgemeingültige Aussagen über die Eignung dieser Technologien in CPPS getroffen werden. Es gibt noch keine systematische Studie über die Einbeziehung der BC-Technologie in solche Systeme [LAS19]. Die Potentiale und Herausforderungen müssen in praktischen Versuchen analysiert werden. Es besteht die Notwendigkeit, konkrete BC-Lösungen für CPPS in ausgereiften Piloten zu testen [GLG20]. Darüber hinaus müssen spezifische Smart Contracts für verschiedene Funktionen

und Prozesse in einem CPPS entwickelt und getestet werden.

Um aussagekräftige Versuche durchführen zu können, wird ein geeignetes Testfeld benötigt. Dieses muss ein umfangreiches CPPS abbilden, in dem BC-Lösungen untersucht werden können. Die Eignung bezieht sich zum einen auf die verfügbare Ausstattung und zum anderen auf eine Methode zur dezentralen Selbststeuerung des CPPS. Unterschiedliche, prinzipiell autonome CPS müssen physisch in der Lage sein, Prozesse eines CPPS durchzuführen und in einem Netzwerk miteinander verbunden sein. Die CPS bilden Nodes der BC. Aufgrund der begrenzten Rechen- und Speicherkapazität von CPS, wie Transportrobotern, kann es sinnvoll sein, dass diese lediglich Light Nodes darstellen. Neben Light Nodes werden Full Nodes für eine funktionierende BC benötigt. [AKS18] schlagen ein BC-basiertes CPPS vor, in dem universelle PCs bzw. Server als Full Nodes genutzt werden. Die Methode muss die Potentiale eines CPPS, z.B. bezüglich der Flexibilität, aufgreifen und die Steuerung realitätsnaher, umfassender Prozesse ermöglichen. BC-Umsetzungen bzw. programmierte Smart Contracts können dahingehend analysiert und bewertet werden, ob und wie gut sie die Logiken der Methode abbilden und im CPPS umsetzen können. Verhandlungen zwischen den CPS müssen durch die Smart Contracts auch unternehmensübergreifend autonom und dezentral durchgeführt werden. Darüber hinaus können durch praxisnahe Tests Rückschlüsse auf die Hardwareanforderungen für BC-basierte CPPS gezogen werden.

4 AUSSTATTUNG DES CPPS-TESTFELDS

Solch ein gefordertes Testfeld existiert in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund. Hier wurde ein funktionsfähiges CPPS aufgebaut, das aus verschiedenen Hardwarebausteinen und einem dezentralen Selbststeuerungsalgorithmus besteht.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über den Versuchsbereich, in dem ein Shopfloor nachempfunden werden kann. Die verschiedenen Entitätsgruppen bilden das CPPS. Im Gegensatz zu einem klassischen Shopfloor sind bspw. die Arbeitsstationen, die hier gruppiert dargestellt sind, ortsunabhängig, das heißt frei platzierbar. Die für eine Produktion notwendigen Komponenten werden in Kleinladungsträgern (KLT) aufbewahrt, die wiederum von Transportrobotern frei im Raum transportiert werden. Gelagert und kommissioniert werden die Komponenten im Lagerbereich. Alle relevanten Entitäten werden zudem durch ein Motion Capturing System erkannt, sodass deren Positionen bestimmt werden können.

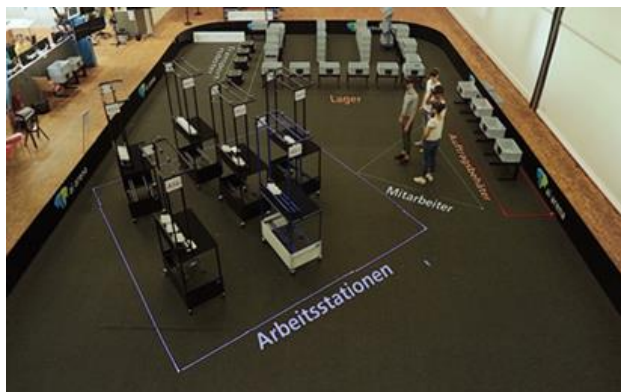


Abbildung 1. Ausschnitt der realen Versuchsproduktionsumgebung innerhalb des lehrstuhleigenen Forschungszentrums

Produkt: Als Beispielprodukt wurden Baustein-Drohnen gewählt (Abbildung 2.1). Deren Aufbau gleicht dem Steckprinzip von Lego. Das bedeutet, dass die Drohnen durch einfache Montageschritte in verschiedener Weise zusammgebaut werden können. Die Montageschritte können dabei in unterschiedlichen Reihenfolgen, aber nicht wahllos, abgearbeitet werden.

Konfigurator: Damit der Kunde eine Drohne nach eigenen Wünschen zusammenstellen kann, wurde ein Produktkonfigurator entwickelt (Abbildung 2.2). Durch diesen kann zwischen einem Quad- und Hexacopter sowie diversen Farben der Bauteile gewählt werden, wodurch eine Variantenvielzahl, von 24 verschiedenen Konfigurationen erreicht wird. Auf diese Weise wird die Massenindividualisierung abgebildet. Der Auftrag wird anschließend generiert und an das CPPS weitergeleitet.

Entitäten: In dem CPPS befinden sich die vier Entitätsgruppen Ladungsträger, Transportroboter, Mitarbeiter und Arbeitsstationen. Jede einzelne Entität besitzt einen digitalen Agenten. Die Agenten werden jeweils auf einem eigenen Device ausgeführt (z.B. einem Raspberry Pi), das wiederum der jeweiligen Entität zugeordnet und auch örtlich

an diese orientiert ist. Die Devices sind drahtlos miteinander vernetzt und erlauben es den Agenten so, miteinander zu kommunizieren und zu verhandeln. Die Devices können darüber hinaus Nodes einer BC darstellen. Durch die Autonomie der Entitäten, können für diese Zugehörigkeiten zu verschiedenen Parteien, bzw. Unternehmen simuliert werden.

Ladungsträger: Die Ladungsträger, in denen die Drohnen und die Bauteile transportiert werden, sind KLT. Jedes KLT ist mit einem PhyNode ausgestattet (Abbildung 2.3). Die PhyNodes besitzen Ressourcen zur Datenverarbeitung (es werden z.B. Informationen über die Ladung gespeichert) und zur Kommunikation mit den anderen Entitäten [RRR15].

Transportroboter: Autonome Transportroboter führen die Transportaufträge aus (Abbildung 2.4). Dabei fahren sie unter das jeweilige Gestell eines KLTs, heben dieses an und fahren daraufhin autonom zum Zielort.

Mitarbeiter – Ressource – Mensch: Die Abbildung 2.5 zeigt die Interaktion zwischen Mensch und Technik. Dabei bekommt der Mitarbeiter die Arbeitsaufträge und alle benötigten Informationen auf seinem mobilen Tablet oder Smartphone angezeigt.

Arbeitsstation: Die Arbeitsstationen sind frei in der Fläche platzierbar, das Layout ist demnach flexibel (Abbildung 2.6). Den Agenten der Arbeitsstationen können verschiedene mögliche Funktionen zugewiesen werden. Auf diese Weise sind Systeme möglich, in denen an jeder Arbeitsstation nur bestimmte und nicht alle insgesamt nötigen Arbeitsschritte ausgeführt werden. So werden differenzierte und realitätsnahe Produktionssysteme ermöglicht.

Neben diesen mobilen Entitäten stehen fest installierte, leistungsstarke Server im Testfeld zur Verfügung, die ebenfalls mit den Entitäten vernetzt sind. Diese können in einem blockchainbasierten CPPS als Full Nodes genutzt werden.

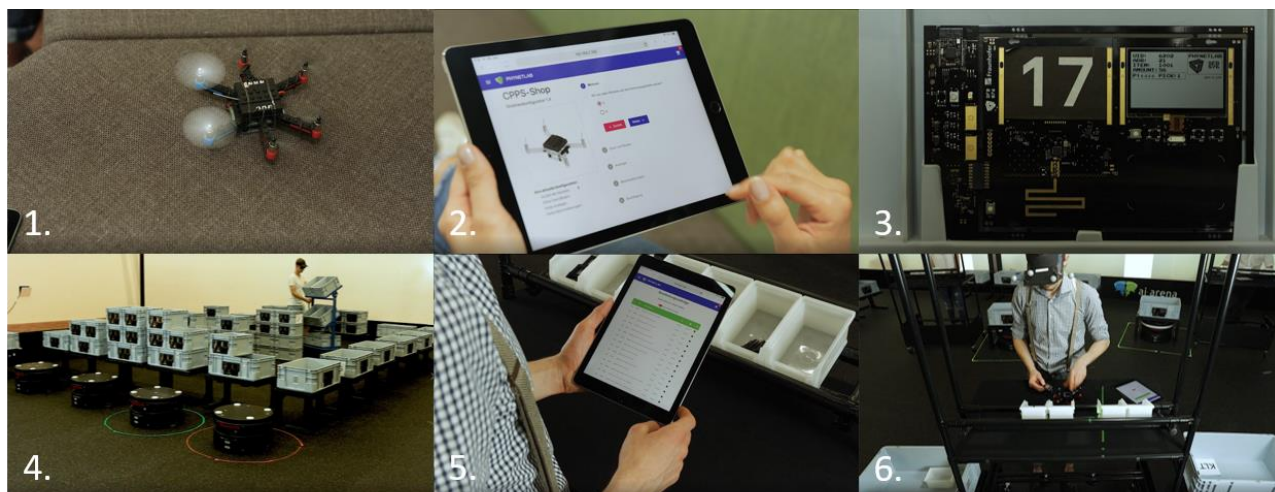


Abbildung 2. Übersicht vorhandener Hardware

5 SELBSTSTEUERUNGSMETHODE DES CPPS

Im Kontext einer dezentralen Selbststeuerung von CPPS in der auftragsbezogenen und diskreten Fertigung ist eine entsprechende Methode im Zuge eines interdisziplinären Forschungsprogramms am FLW der TU Dortmund konzipiert und belegt worden. Die Methode ist in der Lage den zunehmenden Schwankungen im Umfeld und dessen Komplexität mit einer hohen Adaptivität sowie Reaktionsfähigkeit gerecht zu werden. Sie ermöglicht dadurch auch die kontrollierte Steuerung der Produktion kundenspezifischer Produkte [ZH19].

Die Methode *Autonomous and Decentralized Production Order* wurde von Zeidler [ZH19] als solch eine innovative, auf diesen Anforderungen basierende Methode zur Produktionssteuerung entwickelt. In Verbindung mit den vorgestellten Hardwarebausteinen bildet diese ein umfassendes, funktionierendes CPPS. Eine vollständige BC-basierte Steuerung eines CPPS muss die im Folgenden beschriebene Methode inklusive der Verhandlungen zwischen den Entitäten durch Smart Contracts umsetzen können. Abbildung 3 zeigt symbolisch die Verhandlung zwischen verschiedenen Entitäten durch einen Smart Contract.



Abbildung 3. Symbolische Verhandlung zwischen Entitäten durch einen Smart Contract

Das im Forschungszentrum erforschte CPPS ist für die Anwendung in innerbetrieblichen Produktionsumgebungen mit diskreter Fertigung konzipiert, welche durch ein hohes Maß an Freiheitsgraden bezüglich Steuerungsentscheidungen gekennzeichnet ist. Die Grundlage für die Steigerung der Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit, die zu den vorrangigen Zielen bei der Entwicklung von CPPS im Forschungszentrum gehören, wird durch die Ausgangssituation gelegt. Wie aus der Beschreibung der Ausgangssituation hervorgeht sind starre Wertschöpfungsketten im Hinblick auf die Logistik kontraproduktiv. Daher muss die Basis-Produktionsumgebung die Fähigkeit zur freien und ungerichteten Verkettung der Arbeitsstationen (AS) besitzen, sodass ein produktabhängiges, hochdynamisches Routing von Production Orders (PO) möglich wird. Zur Erhöhung der Routing-Flexibilität müssen jeweils mehrere AS mit identischen Prozessfähigkeiten innerhalb der Basis-Produktionsumgebung eingesetzt werden, sodass gewisse Freiheitsgrade auf der strukturellen, physischen Ebene der

Basis-Produktionsumgebung geschaffen werden. Mit Hilfe von Anpassungen der Informationsstrukturen sollten zusätzliche Freiheitsgrade erzielt werden, damit Arbeitsvorgänge (AV) nicht länger in traditionellen Arbeitsplänen sequenziell aneinander zu reihen sind. Die Reihenfolgebedingungen der AVs zur Produktion einer spezifischen Produktvariante sollte jedoch von einem Vorranggraphen (VG) erfasst werden. Hinsichtlich der möglichen AV-Reihenfolgen bzw. -Sequenzen sind Entscheidungsalternativen zu unterstreichen, da sie die Summe der möglichen Pfade, auf denen eine PO durch ein gegebenes Produktionssystem geführt werden kann, erhöhen. Im CPPS müssen VG wichtige Informationen je Knoten umfassen, wie bspw. Stücklisteninformationen, das Zeitintervall für die voraussichtliche Abarbeitung eines AV wie auch einen Bewertungsreferenzwert, das die Vergleichbarkeit verschiedener Routing-Alternativen gewährleistet und maßgeblich im Routing- Prozess einer PO durch die Produktionsumgebung ist [ZH19].

Abbildung 4 stellt beispielhaft eine Basis-Produktionsumgebung unter Berücksichtigung ihrer charakteristischen Eigenschaften dar. Die Abbildung beinhaltet alle Entitäten der Basis-Produktionsumgebung. Neben der Struktur der Waben, die die freie und ungerichtete Verketzung der AS abbildet, werden mit Hilfe der Pfeile innerhalb einzelner Waben dargestellt, auf welchen Pfaden eine bestimmte PO auf Grundlage des entsprechenden VG durch die Basis-Produktionsumgebung gelenkt werden kann.

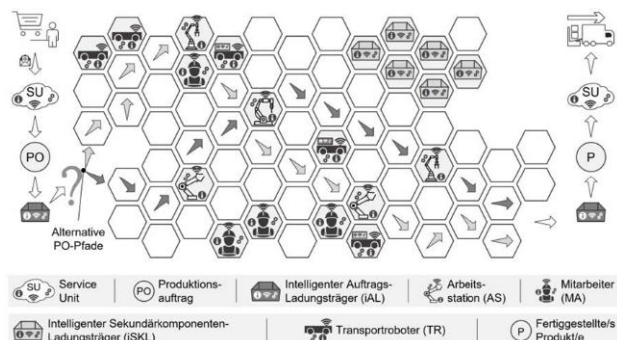


Abbildung 4. Basis-Produktionsumgebung

Die jeweilige AS kann mit der Montage erst beginnen, wenn alle erforderlichen Sekundärbedarfe bereitgestellt worden sind. Aus diesem Grund ist die Versorgung von Produktionseinheiten mit erforderlichen Teilen im Rahmen der innerbetrieblichen Materialbereitstellung von enormer Bedeutung und wirken sich maßgeblich auf die Lieferzeit und -treue aus [vgl. For03; NWF06]. Eine Materialbereitstellungsstrategie garantiert die Erfüllung der Aufgaben der Materialbereitstellung, welche durch Einflussfaktoren und Gegebenheiten entschieden werden. Dazu gehören das Produktionssystem, die Materialbereitstellung selbst und die bereitzustellenden Materialien.

Solch eine Materialbereitstellungsstrategie bestimmt alle materialbezogenen Richtlinien in Bezug auf den innerbetrieblichen Transport, auf die Kommissionierung, Lagerung bis zum Abgriff an der Arbeitsstation und wirkt sich auf logistische Ziele für den Produktionsprozess aus [Gol14, VK14, VK16]. Mit der höheren Menge bereitzustellender Materialien und der gewachsenen Flexibilität der Produktionssysteme, nehmen die Materialbereitstellungsprozesse massiv an Komplexität zu.

Deshalb wurde für die Produktionsversorgung aus den beiden Lagerbereichen des CPPS mit dem realProS [BMK20] ein eigenständiges Konzept entwickelt und implementiert. Die Umsetzung dieses Konzepts wird nachfolgend näher beschrieben.

Benötigt eine AS Materialien für einen Auftrag, stellt sie eine Anfrage an die beiden Lagerbereiche. Aus dem einen Lagerbereich werden die Sekundärbedarfe sortenrein an die AS geliefert. Dort wird von einem Mitarbeiter die entsprechende Menge aus dem KLT entnommen. Dieser Lagerbereich wird als Pufferlager bezeichnet. Materialien aus dem zweiten Lagerbereich werden auftragsbezogen kommissioniert und an die AS transportiert. Dieser Lagerbereich wird als Zentrallager bezeichnet. Zuerst überprüfen beide Lagerbereiche, ob sie die benötigten Materialien in der entsprechenden Menge vorrätig haben. Hat ein Lagerbereich nicht alle benötigten Materialien auf Lager, bricht er den Prozess ab. Anschließend gibt es für jeden Lagerbereich einen separaten Prozess. Im Zentrallager wird eine Kommissionieranfrage erzeugt. Hierfür werden alle verfügbaren Kommissionierstationen angefragt. Diese wiederum stellen bei den Mitarbeitern eine Anfrage für einen Kommissionierer. Die Agenten der verfügbaren Mitarbeiter handeln untereinander den günstigsten Mitarbeiter für den Auftrag aus. Dieser Mitarbeiter sendet eine Bestätigung mit seinen Kosten an die Kommissionierstation. Basierend auf den Kosten des Mitarbeiters, den Kosten der Kommissionierstation und dem verfügbaren Zeitslot der Kommissionierstation, berechnet die Kommissionierstation ein Angebot. Die Kommissionierstationen vergleichen untereinander ihre Angebote und wählen das beste Angebot aus. Diese Kommissionierstation fragt daraufhin den Transport des Kommissionierbehälters bei den Transportrobotern an. Die Transportroboter ermitteln basierend auf Ihrer aktuellen Position den zurückzulegenden Weg und berechnen daraus Ihre Transportkosten. Zusätzlich wird die Abweichung des Lieferzeitpunkts vom geplanten Startzeitpunkt der AS in Betracht gezogen. Basierend auf dynamischen Gewichtungsfaktoren werden aus den gesamten Kosten (Transportkosten und Kosten der Kommissionierung) und der zeitlichen Abweichung ein Bewertungsergebnis berechnet. Die Transportroboter wiederum wählen untereinander den Transportroboter mit dem besten Bewertungsergebnis aus. Dieses beste Angebot des Zentrallagers wird anschließend mit dem Angebot des Pufferlagers verglichen. Sind im Pufferlager alle Materialien vorhanden, wird überprüft ob von einem Material mehrerer Behälter

vorrätig sind. In diesem Fall wird nach dem FiFo Prinzip der zu verwendende Behälter ausgewählt. Sind alle zu liefernden Behälter definiert, fragt jeder Behälter seinen Transport zur entsprechenden Arbeitsstation bei den Transportrobotern an. Die verfügbaren Transportroboter prüfen, welche Behälter Transportroboter Kombination die geringsten Kosten aufweist. Auch in diesem Fall wird basierend auf den dynamischen Gewichtungsfaktoren ein Bewertungsergebnis berechnet. Hierzu werden die gesamten Transportkosten sowie die größte Lieferzeitabweichung verwendet. Dieses Bewertungsergebnis wird anschließend mit dem Ergebnis aus dem Zentrallager verglichen und das bessere der beiden Angebote wird an die AS geschickt. Diese verwendet die Ergebnisse wie bisher und erstellt ein Angebot für den angefragten Arbeitsvorgang.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Umsetzung von CPPS steht gerade unternehmensübergreifend vor Herausforderungen. Die BC-Technologie bietet für diese Herausforderungen große Potentiale. Es werden jedoch geeignete Testfelder benötigt, in denen Lösungen für BC-basierte CPPS entwickelt und untersucht werden können. Am FLW der TU Dortmund ist so ein Testfeld entstanden. Die zugehörige Ausstattung wurde ebenso vorgestellt wie die Steuerungsmethode, des CPPS. Es ist zukünftig möglich BC-basierte Anwendungen in diesem Testfeld zu untersuchen. Dafür wird die Integration der verschiedenen CPS in eine geeignete BC-Umgebung angestrebt. Darüber hinaus werden zunächst ausgewählte Ausschnitte der Steuerungsmethode in Smart Contracts überführt und ausgeführt. Langfristig wird ein BC-basiertes Softwaresystem konzipiert, entwickelt und umgesetzt, durch welches ein CPPS gesteuert werden kann. Durch Untersuchungen in dem geschaffenen Testfeld werden sowohl Erkenntnisse über die Eignung verschiedener BC-Umsetzungen für CPPS, als auch über die Anforderungen an die Hardware erwartet.

7 DANKSAGUNGEN

Dieser Artikel entstand in Kooperation mit den beiden nachfolgenden Forschungsprojekten:

- „Innovationslabor – Hybride Dienstleistungen in der Logistik“, gefördert durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- GRK 2193 „Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

LITERATUR

- [ACH18] A. Angrish, B. Craver, M. Hasan, and B. Starly, “A Case Study for Blockchain in Manufacturing: ‘FabRec’: A Prototype for Peer-to-Peer Network of Manufacturing Nodes,” *Procedia Manufacturing*, vol. 26, pp. 1180–1192, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.154.
- [AFK18] M. Ya. Afanasev, Y. V. Fedosov, A. A. Krylova, and S. A. Shorokhov, “An application of blockchain and smart contracts for machine-to-machine communications in cyber-physical production systems,” in *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, May 2018, pp. 13–19, doi: 10.1109/ICPHYS.2018.8387630.
- [AKS18] M. Ya. Afanasev, A. A. Krylova, S. A. Shorokhov, Y. V. Fedosov, and A. S. Sidorenko, “A Design of Cyber-physical Production System Prototype Based on an Ethereum Private Network,” in *2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Jyväskylä, May 2018, pp. 3–11, doi: 10.23919/FRUCT.2018.8468296.
- [AR11] E. Abele and G. Reinhart, *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Hanser, 2011.
- [Bau17] T. Bauernhansl, “Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma,” in *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*, B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, and M. ten Hompel, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, pp. 1–31.
- [BHV14] T. Bauernhansl, M. Ten Hompel, and B. Vogel-Heuser, Eds., *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [BMK20] H. Bayhan, M. Meißner, P. Kaiser, M. Meyer, and M. ten Hompel, “Presentation of a novel real-time production supply concept with cyber-physical systems and efficiency validation by process status indicators,” *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 108, no. 1–2, pp. 527–537, May 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05373-z.
- [Boc18] L. S. Bochmann, “Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für variantenreiche Produkte,” *ETH Zurich*, 2018.

- [BS17] B. Blechschmidt and C. Stocker, “How Blockchain Can Slash the Manufacturing Trust Tax,” p. 20. 2017.
- [Cro16] M. Crosby, “BlockChain Technology: Beyond Bitcoin,” no. 2, p. 16, 2016.
- [Dau17] K. Däuschinger, Abrufsteuerung bei Bedarfsschwankungen in der automobilen Beschaffungs- und Produktionslogistik. München: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, 2017.
- [DKJ17] A. Dorri, S. S. Kanhere, R. Jurdak, and P. Gauravaram, “Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home,” in 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops), Kona, HI, Mar. 2017, pp. 618–623, doi: 10.1109/PERCOMW.2017.7917634.
- [FHS04] M. Freitag, O. Herzog, and B. Scholz-Reiter, “Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen,” p. 5, 2004.
- [For03] M. Förster, Variantenmanagement nach Fusionen in Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus. 2003.
- [GCK08] W. A. Günthner, R. Chisu, R. Kraul, F. Kuzmany, and P. Tenerowicz, “Vom Prozess zum Ereignis - Ein neuer Denkansatz in der Logistik,” in Jahrbuch Logistik 2008, 2008.
- [GH10] W. A. Günthner and M. Ten Hompel, Eds., Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin: Springer, 2010.
- [GLG20] N. Große, D. Leisen, T. Gürpınar, R. S. Forsthövel, M. Henke, and M. Ten Hompel, “Evaluation of (De-)Centralized IT technologies in the fields of Cyber-Physical Production Systems,” 2020, doi: 10.15488/9680.
- [GLK18] D. Gruber, W. Li, and G. Karame, “Unifying Lightweight Blockchain Client Implementations,” presented at the Workshop on Decentralized IoT Security and Standards, San Diego, CA, 2018, doi: 10.14722/diss.2018.23010.
- [Gol14] J. Golz, Materialbereitstellung bei Variantenfließlinien in der Automobilendmontage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.
- [Heg15] T. Hegmanns et al., Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0 im Mittelstand. 2015.
- [Iot20] IOTA Foundation, IOTA Documentation. <https://docs.iota.org/> (accessed Jul. 24, 2020).
- [Jah17] M. Jahn, Industrie 4.0 konkret. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [Kor17] A. Korge, “Agile Organisation und Führung 4.0: Entscheidungshilfe für unternehmensspezifische Weichenstellungen,” ZWF, vol. 112, no. 5, pp. 289–292, May 2017, doi: 10.3139/104.111714.
- [KWH13] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig, and A. Hellinger, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0; Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern; Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0; Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Berlin, 2013.
- [LAS19] J. Lee, M. Azamfar, and J. Singh, “A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems,” Manufacturing Letters, vol. 20, pp. 34–39, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.mfglet.2019.05.003.
- [LBH18] Z. Li, A. V. Barenji, and G. Q. Huang, “Toward a blockchain cloud manufacturing system as a peer to peer distributed network platform,” Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, vol. 54, pp. 133–144, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.rcim.2018.05.011.
- [Mul17] A. Mulholland, “Blockchain or Distributed Ledger? Defining the requirement, not the technology,” Constellation Research Inc., Jul. 12, 2017. <https://www.constellationr.com/blog-news/blockchain-or-distributed-ledger-defining-requirement-not-technology-0> (accessed Jul. 28, 2020).
- [NWF06] P. Nyhuis, H.-P. Wiendahl, T. Fiege, and H. Mühlenbruch, “Materialbereitstellung in der Montage,” in Montage in der industriellen Produktion, B. Lotter and H.-P. Wiendahl, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 323–351.
- [PK18] M. Pustišek and A. Kos, “Approaches to Front-End IoT Application Development for the Ethereum Blockchain,” Procedia Computer Science, vol. 129, pp. 410–419, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.03.017.

- [Pop18] J. Popp, "Neuartige Logistikkonzepte für eine flexible Automobilproduktion ohne Band," 2018, doi: 10.18419/OPUS-9987.
- [Roy17] D. T. Roy, *Industrie 4.0 - Gestaltung cyber-physischer Logistiksysteme zur Unterstützung des Logistikmanagements in der Smart Factory*. Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin, 2017.
- [RRR15] A. K. Ramachandran Venkatapathy, A. Riesner, M. Roidl, J. Emmerich and M. t. Hompel, "PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab," *Smart SysTech 2015; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, Aachen, Germany, 2015, pp. 1-8.
- [SHR14] B. Scholz-Reiter, F. Harjes, and D. Rippel, "Von der Selbststeuerung zu cyber-physischen Systemen," in *Enterprise-Integration*, G. Schuh and V. Stich, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 63–76.
- [Tia16] F. Tian, "An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology," in 2016 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), Kunming, China, Jun. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICSSSM.2016.7538424.
- [TUD20] Technische Universität Dortmund, "GRK 2193 – Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld," FLW – Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen. <https://flw.mb.tu-dortmund.de/forschung/projekte/grk-2193/> (accessed Jul. 28, 2020).
- [UHK13] E. Uhlmann, E. Hohwieler, and M. Kraft, "Selbstorganisierende Produktion mit verteilter Intelligenz. Intelligente Werkstücke steuern ihren Weg durch die Fertigung," *Wt Online*, vol. 103, pp. 114–117, Jan. 2013.
- [VBH17] B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl, and M. Ten Hompel, Eds., *Handbuch Industrie 4.0*. Bd. 1: Produktion, 2., erweiterte und bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- [VK14] N. Vojdani and M. Knop, "Adaptive Materialbereitstellung in flexiblen Produktionssystemen auf Grundlage einer agentenbasierten Transportsteuerung," Volume 2014, p. Issue 01, 2014, doi: 10.2195/LJ_PROC_VOJDANI_DE_20141_01.
- [VK16] N. Vojdani and M. Knop, "Leistungsorientierte Bewertung und Auswahl von Materialbereitstellungsstrategien mittels Fuzzy Axiomatic Design," Volume 2016, p. Issue 05, 2016, doi: 10.2195/LJ_PROC_VOJDANI_DE_201605_01.
- [VLW18] A. Vatankhah Barenji, Z. Li, and W. M. Wang, "Blockchain Cloud Manufacturing: Shop Floor and Machine Level," in *Smart SysTech 2018; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, Jun. 2018, pp. 1–6.
- [ZH19] F. Zeidler, M. ten Hompel, and Praxiswissen Service UG, "Beitrag zur Selbststeuerung cyberphysischer Produktionssysteme in der auftragsbezogenen Fertigung," 2019.

Haci Bayhan, M.Sc., Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University Dortmund. He studied Mechanical Engineering.

Phone: +49 231 755-3442, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: haci.bayhan@tu-dortmund.de

Robert Schulze Forsthövel, M.Sc., Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University Dortmund. He studied Logistics.

Phone: +49 231 755-4831, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: Robert.schulze-forsthoevel@tu-dortmund.de

Pascal Kaiser, M.Sc., Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University Dortmund. He studied Logistics.

Phone: +49 231 755-2794, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: pascal3.kaiser@tu-dortmund.de

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, head of the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University of Dortmund and Managing director of the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics.

Phone: +49 231 9743-600, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: michael.tenHompel@tu-dortmund.de

Address: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany