

■ BLOCKCHAIN NAVIGATOR

WIE KOMMT EIN CYBER- PHYSISCHES SYSTEM IN DIE BLOCKCHAIN?



DIE REIHE BLOCKCHAIN NAVIGATOR

Die Veröffentlichungs-Reihe Blockchain Navigator gewährt Einblicke in aktuelle Forschungsergebnisse des Blockchain Europe Projekts. Es werden gleichsam wissenschaftlich fundierte »Insights«, wie auch praxisgerecht aufgearbeitete Leitfäden und Methoden als »Toolbox« präsentiert, um einen effektiven und zielgerichteten Einsatz der Blockchain-Technologie in den Geschäftsprozessen unterschiedlicher Industrien zu ermöglichen – von der initialen Überlegung bis zur tatsächlichen Einführung. Ganz im Sinne einer open community und des open-knowledge-Ansatzes stellen wir unsere Ergebnisse über dieses Format frei zugänglich zur Verfügung und laden zur Diskussion ein.

BLOCKCHAIN INSIGHTS

Die Insights Reihe begleitet die wissenschaftliche Erschließung der Entwicklungsprojekte in Blockchain Europe, dem Projekt zum Aufbau des Europäischen Blockchain-Instituts in Nordrhein-Westfalen. Die Reihe bietet aktuelle Einblicke in innovative Themen rund um den Einsatz der Blockchain-Technologie, die aktuell erforscht werden. Erkenntnisse werden in dieser Reihe wissenschaftlich aufbereitet, sodass sie einfach nachvollzogen werden können. Im Fokus steht der wissenschaftliche Diskurs. Die präsentierten Inhalte sollen daher nicht nur den Stand der Forschung wiedergeben, sondern darüber hinaus neue Ideen und Impulse vermitteln und zum Mit- und Weiterdenken anregen.

INHALT

Dieser Insights-Beitrag untersucht die Möglichkeiten zur Anbindung von unterschiedlichen Cyber-Physischen Systemen (CPS) an ein Blockchain-Netzwerk. Die grundlegenden Charakteristika von CPS und Blockchain-Netzwerken werden erläutert und die Vorteile einer Anbindung solcher Systeme an die Blockchain dargestellt. Anhand einer Einordnung von am Markt etablierten CPS (low bis high-performance, stationär und mobil) findet eine Diskussion von Anbindungsformen statt. Abschließend werden Anbindungsempfehlungen formuliert.

4. November 2022

Ausschließlich zum Zweck der besseren Lesbarkeit wird auf die geschlechtsspezifische Schreibweise verzichtet.
Alle personenbezogenen Bezeichnungen auf dieser Webseite sind somit geschlechtsneutral zu verstehen.

Autoren

Larissa Krämer, TU Dortmund
Rico Ahlbäumer, TU Dortmund
Dominik Sparer, Fraunhofer IML
Dominik Schmitt, Fraunhofer IML
Max Austerjost, Fraunhofer IML

Internet

Der Beitrag steht Ihnen auch im Internet unter www.blockchain-europe.nrw/blockchain-navigator zur Verfügung.

DOI

10.24406/publica-412

Herausgeber

Prof. Dr. Dr. h.c. Michael Henke
Prof. Dr. Dr. h.c. Michael ten Hompel

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Materialfluss
und Logistik IML

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2–4
44227 Dortmund

info@blockchain-europe.nrw.de

INHALT

Einleitung	1
Arten von Knoten in einem Blockchain Netzwerk	2
Was ist ein CPS und warum ergibt die Anbindung an eine Blockchain Sinn?. . . .	4
Kategorien von CPS-Komponenten	6
Stationäre und Mobile CPS-Komponenten:	7
High Performance CPS-Komponenten:	7
Middle-Class CPS-Komponente:	8
Low Performance CPS-Komponente:	8
Möglichkeiten zur Anbindung von CPS an die Blockchain	9
Zusammenfassung & Ausblick.	12
Literaturverzeichnis.	13

Einleitung

Steigende Kundenanforderungen bezüglich kurzer Lieferzeiten, individualisierter Produkte und kürzerer Produktlebenszyklen stellen Supply Chains vor große Herausforderungen [1, S. 837]. Das Streben nach hoher Produktvielfalt bei gleichzeitiger Individualisierung macht immer häufiger niedrige Losgrößen bis hin zur Losgröße 1 erforderlich [2, S. 29]. Konkret lässt sich eine Evolution von Supply Chains beobachten, die sich durch eine flexible Anpassung von Unternehmen an die Kundenanforderungen auszeichnet. Die damit einhergehende steigende Komplexität lässt sich durch Selbstorganisation und Dezentralisierung lösen. Hierfür sind echtzeitnahe Informationen ebenso essentiell wie Möglichkeiten der Datenverarbeitung und -analyse sowie individuelle Reaktionsmöglichkeiten auf eintretende Ereignisse. Vernetzte Maschinen und Produkte, Computer und Sensoren erheben Daten, treffen Entscheidungen innerhalb von Millisekunden und ermöglichen eine intelligente, autonom agierende Supply Chain. Eine bedeutende Rolle spielen hierbei Cyber-Physische Systeme (CPS), die die physische Welt mit ihrem digitalen Abbild verbinden [3, S. 9]. Sie stellen eine Enabling-Technologie dar, die sich im Zuge der Digitalisierung aus der Vernetzung eingebetteter Systeme entwickelt hat. Abbildung 1 gibt eine Übersicht zu den Entwicklungsstufen von CPS. Während zunächst geschlossene eingebettete Systeme dominierten, die im Logistikkontext zum Beispiel einzelne Displays darstellen, bildeten sich hieraus vernetzte eingebettete Systeme. In der Logistik sind dies zum Beispiel vernetzte Zustandssensoren. In einer weiteren Entwicklungsstufe entstehen hieraus CPS wie intelligent vernetzte Produktionssysteme oder Schwärme autonomer Fahrzeuge. Diesen übergeordnet steht die Vision des Internets der Dinge, Daten und Dienste, die sich exemplarisch in einer Smart Factory widerspiegelt. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung und tiefergehenden Vernetzung der Systeme gehen zahlreiche Herausforderungen wie Datensicherheit, Transparenz und Ausfallsicherheit durch Dezentralität [4, S. 385] einher. Diese stellen eine Barriere bei der Durchdringung der Supply Chain mit intelligenten, autonomen Systemen dar. Einen Lösungsansatz hierfür liefert die Blockchain-Technologie, die diesen Herausforderungen aufgrund ihrer inhärenten Eigenschaften begegnet [5, S. 6f.]. Ein Rückgriff auf die Blockchain-Technologie setzt voraus, dass die einzelnen Bestandteile eines CPS in eine Blockchain integriert werden. Ansätze hierfür werden im vorliegenden Whitepaper beschrieben und diskutiert.

Hierfür findet im Folgenden eine Vorstellung der Grundlagen der Blockchain-Technologie statt und die Möglichkeiten zur Integration von CPS in eine Blockchain werden analysiert. Es werden ferner die Teilkomponenten eines CPS charakterisiert. Abschließend wird aufgezeigt, in welcher Art und Weise die verschiedenen Kategorien von CPS in eine Blockchain eingebunden werden können.

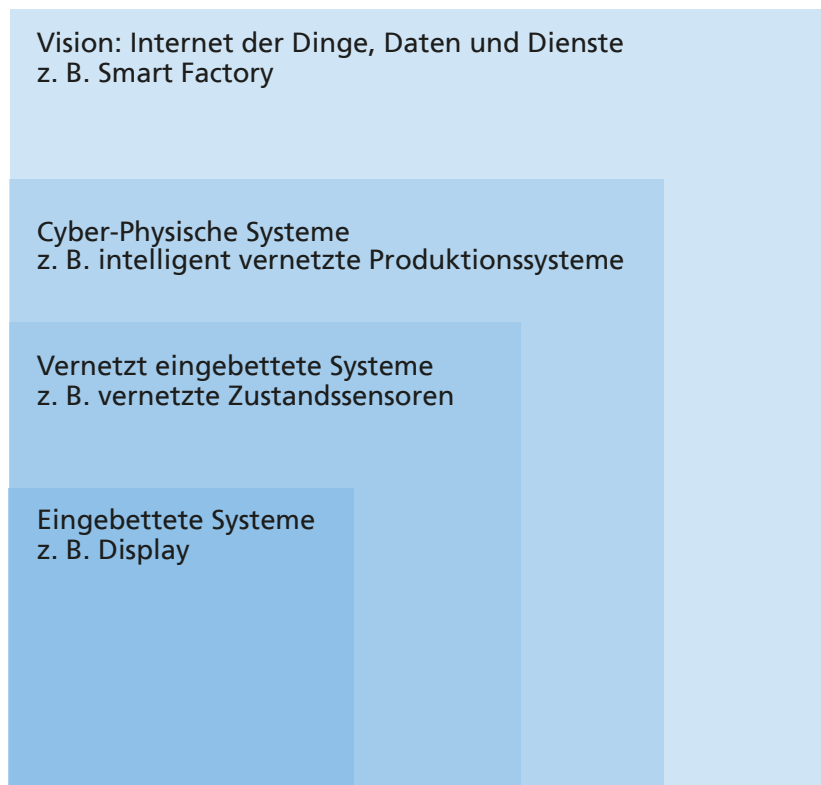


Abbildung 1: Die Entwicklung von eingebetteten Systemen zur Vision des Internets der Dinge, Daten und Dienste (i.A.a. [6])

Arten von Knoten in einem Blockchain Netzwerk

Eine Blockchain ist ein dezentraler, verteilter und fälschungssicherer Datenspeicher, der einen sicheren Datenaustausch ohne Intermediär ermöglicht [7, S. 2292ff.]. Daten (Bestellungen, Auftragserteilungen, Zertifikate, etc.) werden in sogenannten Transaktionen abgebildet und in Blöcken zusammengefasst [8, S. 46]. Der Aufbau eines Blocks besteht im Wesentlichen aus einem Blockheader und einer Menge an Transaktionen. Im Blockheader werden Metainformationen über den Block gespeichert [9, S. 88], beispielsweise ein Zeitstempel und der Hashwert des vorherigen Blocks. Der Hashwert dient als digitaler Fingerabdruck und verkettet die verschiedenen Blöcke einer Blockchain miteinander [10, S. 11; 11, S. 16]. Manipulationen eines Blocks, beispielsweise durch nachträgliche Änderungen einer Transaktion, führen zu Veränderungen des Hashwerts, die durch das Blockchain-Netzwerk erkannt und abgelehnt werden [12, S. 5ff.]. Dadurch wird die Unveränderlichkeit der Daten in einer Blockchain sichergestellt und das Vertrauen zwischen den Netzwerkteilnehmern erhöht.

Bevor ein neuer Block der bestehenden Blockchain hinzugefügt wird, muss überprüft werden, ob es sich um legitime Transaktionen handelt [12, S. 72f.]. Hierzu wird innerhalb eines Blockchain-Netzwerks ein Konsensmechanismus eingesetzt. Es gibt heute eine Vielzahl an Konsensmechanismen, die je nach Art des Blockchain-Netzwerkes, der Netzwerkteilnehmer und dem zugrundeliegenden Anwendungsfall ausgewählt werden können. Beispiele solcher Mechanismen sind der Proof-of-Stake (PoS), die Byzantine Fault Tolerance Algorithmen (BFT) oder auch der tendenziell veraltete Proof-of-Work (PoW), der im Bitcoin-Netzwerk eingesetzt wird. Ziel dieser Mechanismen ist zum einen doppelte Ausgaben von Transaktionen zu vermeiden [13, S. 58f.] und zum anderen das gesamte Blockchain-Netzwerk zu synchronisieren [12, S. 72f.].

Ein Blockchain-Netzwerk ist im Wesentlichen ein Peer-to-Peer-Netzwerk. Informationsfluss und Datenhaltung verlaufen dabei dezentral und verteilt. Teilnehmer eines Blockchain-Netzwerks werden als Knoten bezeichnet. Dabei kann ein Blockchain-Netzwerk aus verschiedenen Arten von Knoten bestehen, beispielsweise Full Nodes oder Light Nodes [14, S. 19]. Ein Full Node hält typischerweise die gesamte Historie an Transaktionen einer Blockchain, erstellt neue Blöcke und fügt sie der Blockchain hinzu. Full Nodes sind, neben der reinen Datenhaltung und Blockbildung, auch am Konsensmechanismus beteiligt. Ferner können sie über zusätzliche administrative Rechte verfügen, um neue Knoten dem Blockchain-Netzwerk hinzuzufügen oder bestehende Knoten auszuschließen [15, S. 3]. Abhängig vom eingesetzten Blockchain-Framework können spezielle Full Node Typen definiert werden. Insbesondere werden innerhalb eines Blockchain-Netzwerks oftmals spezielle Full Nodes definiert, die den Konsensmechanismus ausführen, um die Konsensfindung zu beschleunigen. Diese Full Nodes werden häufig als Validatoren bezeichnet.

Ein Light Node verfügt nicht über die gesamte Transaktionshistorie, sondern beschränkt sich in der Regel auf Informationen des Blockheaders. Light Nodes können Transaktionen erstellen und diese an eine Menge von Full Nodes übermitteln. Im Vergleich zu Full Nodes geht die eingeschränkte Funktionalität von Light Nodes mit niedrigeren technischen Anforderungen einher.

Für ein besseres Verständnis wird ein typischer Aufbau eines Blockchain-Netzwerks in Abbildung 2 dargestellt. Für eine weiterführende Erläuterung der Funktionsweisen und Eigenschaften von Full und Light Nodes wird auf [15] verwiesen.

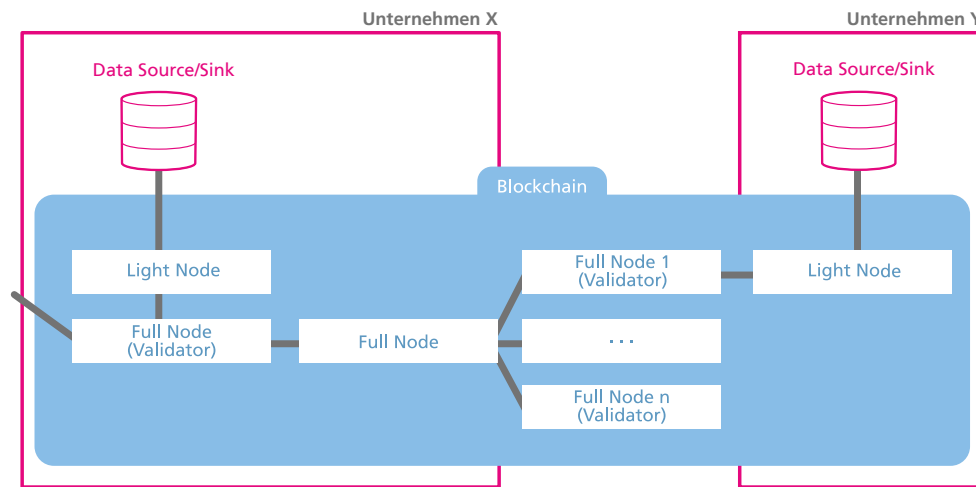


Abbildung 2:
Typischer Aufbau
eines Blockchain-
Netzwerks und
dessen Integration in
die Unternehmens-
infrastruktur

Was ist ein CPS und warum ergibt die Anbindung an eine Blockchain Sinn?

In CPS verschmilzt die reale, physische Welt mit der virtuellen, digitalen Welt. Eingebettete Systeme überwachen und steuern die physische Umwelt mittels Sensoren und Aktoren, während die physischen Prozesse durch Rückwirkung z. B. über Datenerfassung mit Sensoren die digitalen Prozesse beeinflussen [16, S. 737]. Die erfassten Daten werden dafür ausgewertet und gespeichert. Neben dieser Interaktion mit digitaler und physischer Welt zeichnen sich CPS durch eine globale Vernetzung und Nutzung weltweit verfügbarer Daten und Dienste aus und verfügen meist über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle [6, S. 13]. Abbildung 3 zeigt die Charakteristika eines CPS.

Diese Eigenschaften bringen Herausforderungen für funktionierende CPS mit sich. So handelt es sich bei CPS um ein dynamisches Netzwerk aus verschiedensten, meist heterogenen Teilkomponenten, die in das Netzwerk ein- und austreten [4, S. 385]. Dies erschwert die Nachvollziehbarkeit von im Netzwerk durchgeführten Aktionen und den zugehörigen Berechtigungen. In CPS vollzogene, komplexe Entscheidungsprozesse erfordern zudem eine Echtzeitfähigkeit des Systems. In zentral organisierten CPS besteht außerdem die Abhängigkeit von einem zentralen Leitrechner, welcher die Robustheit

¹ Der Mining-Prozess des PoW – als Verifikation der Blockchain-Einträge – ist Ursache für hohe Stromverbräuche des Bitcoin-Netzwerkes.

und Fehleranfälligkeit des Systems negativ beeinflussen kann. Auch die Skalierbarkeit, d.h. die Netzwerkgröße und somit die Anzahl der eingebundenen CPS-Komponenten, wird von diesem zentralen Ansatz beeinflusst [17, S. 34]. Weitere Herausforderungen bestehen in unternehmensübergreifenden Szenarien, in denen diverse heterogene Teilkomponenten miteinander interagieren. Diese Herausforderungen resultieren in einem Mangel an Transparenz in CPS und erhöhen die Störfähigkeit und Sicherheitsrisiken in solchen Systemen. Dies wirkt sich auf das gegenseitige Vertrauen der Teilnehmer in CPS aus.

CPS Merkmale

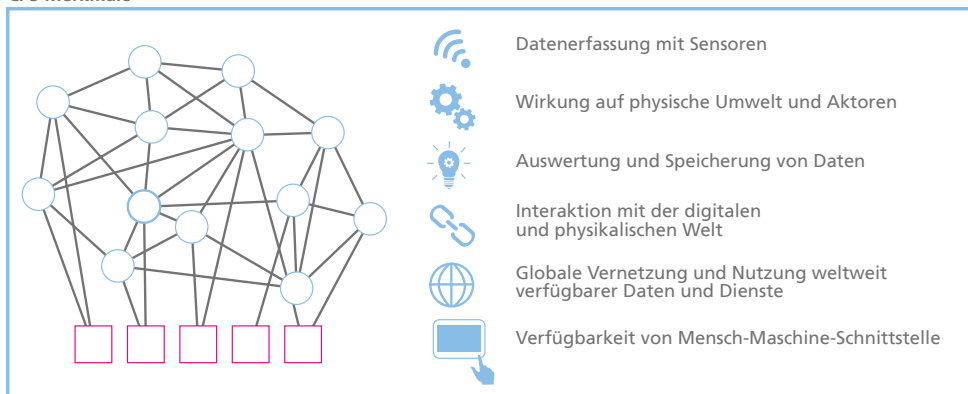


Abbildung 3:
Merkmale und
Eigenschaften von CPS

Die Blockchain-Technologie bietet durch ihre inhärenten Eigenschaften einen Lösungsansatz für diese Herausforderungen. Durch die Einbindung der CPS-Komponenten in die Blockchain kann jede Komponente eindeutig und manipulationssicher identifiziert und mit erteilten Berechtigungen verknüpft werden. So kann ein Blockchain-basiertes Register von autorisierten CPS-Teilkomponenten erstellt werden, das manipulative Aktionen verhindert und die Sicherheit im System verlässlich stärkt [18, S. 179]. Angebundene Komponenten kommunizieren entweder direkt oder über eine gesicherte Zwischenschicht (IoT Broker) mit der Blockchain, sodass die von ihnen gesendeten und empfangenen Daten integer verwaltet werden können. Der dezentrale Aufbau einer Blockchain erhöht zudem die Robustheit von CPS, da die Abhängigkeit von zentralen Leitrechnern vermieden oder stark reduziert wird und Transaktionen für alle Teilnehmer transparent gespeichert werden [5, S. 6]. Des Weiteren erlaubt die Blockchain-Technologie CPS-Devices einen hohen Grad der Autonomie, da diese über Smart Contracts abgesichert und eigenständig handeln und sogar Finanztransaktionen durchführen können [19, S. 781].

Damit diese Potentiale ausgeschöpft werden können, ist eine Anbindung der einzelnen Teilkomponenten in CPS an eine Blockchain erforderlich.

Kategorien von CPS-Komponenten

Um die Anforderungen zur Anbindung verschiedener CPS-Komponenten oder Teilkomponenten, im Folgenden nur noch Komponenten genannt, an die Blockchain zu hinterfragen, wird nachfolgend ein Kategorisierungssystem von Komponenten vorgestellt. Die Einordnung von Komponenten in diesem System dient als Entscheidungshilfe, um die geeignetste Art der Anbindung an ein Blockchain-Netzwerk festzulegen. Nachfolgend werden die Arten von Komponenten vorgestellt und die Bewertungskriterien beschrieben.

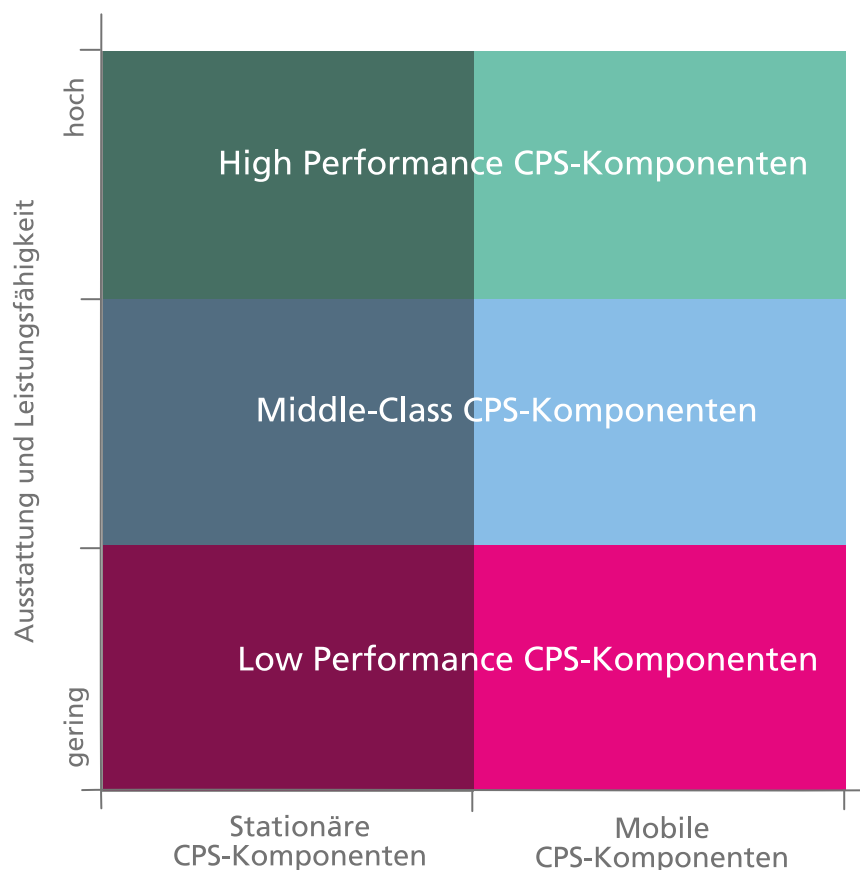


Abbildung 4:
Vorschlag zur
Einteilung der CPS-
Komponenten zur
Nutzung mit einer
Blockchain

STATIONÄRE UND MOBILE CPS-KOMPONENTEN:

In der oben dargestellten Matrix (Abbildung 4) existieren sechs Arten von Komponenten, welche sich in der Ausstattung und dem Mobilitätsgrad unterscheiden. Unter dem Mobilitätsgrad wird verstanden, ob Komponenten fest an einer Maschine platziert werden oder ob diese von einem Mitarbeiter, Lieferant oder ähnlichem "mitgenommen" werden können. Ein klassisches Beispiel für eine mobile Komponente ist ein Smartphone oder ein Tablet. Dagegen versteht man unter einer stationären Komponente beispielsweise einen Mikroprozessor, der mit einem Sensor ausgestattet ist, um Temperaturdaten einer Maschine zu verarbeiten und zu versenden.

Im weiteren Verlauf wird auf die Eigenschaften "Ausstattung" aus Abbildung 4 eingegangen und die Unterschiede in den jeweiligen Klassen mit Blick auf den Mobilitätsgrad beschrieben. Dabei werden die fünf Kriterien Energieverbrauch, Speicherkapazität, Verfügbarkeit, Anbindungsaufwand und Eigenleistung Blockchain herausgestellt, welche die funktionale Ausstattung einer Komponente beschreiben, siehe Tabelle 1 für die Resultate. Eine hohe Bewertung in Energieverbrauch bedeutet, dass diese Komponente mehr Energie benötigt, bzw. für den Betrieb der Komponente ein stärkerer Akku eingebaut werden muss. Eine hohe Bewertung in Speicherkapazität beschreibt die Möglichkeit, ohne Leistungseinbußen einen größeren Speicher in die Komponente einzubauen. Unter Verfügbarkeit wird verstanden, wie häufig die Komponente eingeschaltet ist und sich in einem Netzwerk befindet. Unter dem Anbindungsaufwand versteht man den Aufwand, der nötig ist, die geeignete Software auf der Komponente zu installieren. Zuletzt beschreibt die Bewertung der Eigenleistung Blockchain, welche zusätzliche Schichten genutzt werden müssen, damit eine jeweilige Komponente an eine Blockchain angeschlossen werden kann, bspw. über eine Light Node.

HIGH PERFORMANCE CPS-KOMPONENTEN:

In einer Produktionsumgebung nutzen Mitarbeiter ein Smartphone oder Tablet, um ihre Arbeit zu signieren, so dass diese Arbeitsschritte in einer Blockchain protokolliert werden. Ebenso kann ein Smartphone in der Supply Chain eingesetzt werden, um einzelne Schritte zu dokumentieren / validieren. Da diese Komponente hauptsächlich genutzt werden, um einzelne (Arbeits-)Schritte zu dokumentieren, ist eine Akkulaufzeit über einen Tag hinausgehend nicht erforderlich und moderne Smartphones und Tablets halten dies ein. Ebenso ist es nicht notwendig, dass die vollständige Blockchain auf dieser Komponente gespeichert wird. Als mobile Komponente ist die Verfügbarkeit der Blockchain abhängig vom mobilen Netz / WLAN, daher kann hier keine Bestleistung erreicht werden. Im Gegensatz hierzu erreicht ein stationäres High Performance

CPS-Komponente Bestleistungen in der Verfügbarkeit. Wie auch Middle-Class CPS-Komponenten (s.u.) sind High Performance CPS-Komponenten bei der Anbindung an die Blockchain abhängig von einem Light Node, Damit geht ein vergleichbar geringer Aufwand zur Anbindung an die Blockchain einher. Durch Light Nodes ist die direkte Anbindung an die Blockchain möglich. Zusätzlich kann durch eine erhöhte Speicherkapazität die Eigenleistung zur Anbindung an die Blockchain erhöht werden, da hierdurch die Komponente selbst als Full Node dienen kann.

MIDDLE-CLASS CPS-KOMPONENTE:

Eine Middle-Class CPS-Komponente, wie beispielsweise das temp2net / Blockchain Device, wird eingesetzt, wenn ein Produktionsschritt oder eine Supply Chain an dieser Komponente abgebildet und validiert werden muss. Dazu stehen dieser Komponente eigene Eingabemöglichkeiten zur Verfügung, die eine Interaktion mit dem Benutzer erlauben. Aufgrund geringerer Hardwareanforderungen weisen sie einen guten Energieverbrauch auf, welche aufgrund ihrer Use Cases im mobilen Einsatz auch notwendig ist, da eine Aufladung am Ende des Tages nicht garantiert werden kann. Dies wirkt sich auf die Speicherkapazität aus, sodass in der Regel keine vollständige Blockchain auf dieser Komponente gespeichert werden kann. Ein weiterer Nachteil ergibt sich in der Verfügbarkeit. Um einen niedrigen Energieverbrauch bei mobilen Komponenten zu garantieren, kann die jeweilige Komponente nicht dauerhaft eingeschaltet sein, so dass die Verbindung zur Blockchain unterbrochen wird. Die Anbindung an eine Blockchain erfolgt wie zuvor über eine Light Node. Ebenso zeichnen sich stationäre Komponenten auch in dieser Klasse durch höhere Speicherkapazitäten, eine bessere Verfügbarkeit, sowie eine höhere Eigenleistung zur Anbindung an die Blockchain aus.

LOW PERFORMANCE CPS-KOMPONENTE:

Eine Low Performance CPS-Komponente unterscheidet sich in Hinblick auf Middle-Class CPS-Komponenten darin, dass wenig bis keine Nutzerinteraktionen möglich sind und sie daher meist nur für die Übertragung von Sensordaten genutzt wird. Hier sei als Beispiel der Sensing (oder Dragon) Puck genannt, welcher zum Tracking von unter anderem Feuchtigkeitsdaten genutzt werden kann. Aufgrund fehlender Möglichkeiten zur Nutzerinteraktion besteht ebenso ein geringerer Energieverbrauch. Die Bewertung zur Speicherkapazität auf dieser Komponente ergibt sich auf ähnliche Weise wie bei Middle-Class CPS-Komponenten. Dies bedeutet, dass maximal eine Light Node betrieben werden kann. In aller Regel sind die genutzten Prozessoren und Übertragungsformate jedoch so schwach und spezifisch für diese Komponente, dass auch eine Light Node nicht zielführend ist und eine zentrale Zwischeninstanz in Form von bspw. dem IoT Broker genutzt wird. Daher erreichen Middle-Class CPS-Komponenten

eine geringere Bewertung im Anbindungsaufwand, da sie ohne eine Anbindung an eine solche Zwischeninstanz gar keine Verbindung zur Blockchain herstellen können. Aufgrund des besseren Energieverbrauchs ist diese Komponente dennoch geeignet zur Anbindung an die Blockchain. Stationäre Komponenten dieser Klasse weisen eine bessere Speicherkapazität bei zugleich schlechterem Energieverbrauch auf. Zugleich ergibt sich dadurch ebenso eine bessere Verfügbarkeit.

Funktion						
Ausstattung	Mobilitätsgrad	Energieverbrauch	Speicherkapazität	Verfügbarkeit	Anbindungsaufwand	Eigenleistung BC
Low Performance	Stationär	○	○	○	○	○
Low Performance	Mobil	○	○	○	○	○
Middle-Class	Stationär	○	○	○	○	○
Middle-Class	Mobil	○	○	○	○	○
High Performance	Stationär	○	○	○	○	○
High Performance	Mobil	○	○	○	○	○

Tabelle 1: Bewertung der funktionalen Beschaffenheit aller vorgestellten CPS-Komponenten.

Möglichkeiten zur Anbindung von CPS an die Blockchain

Zur Anbindung von CPS an die Blockchain existieren verschiedene Möglichkeiten, die im weiteren Vorlauf vorgestellt werden.

Ein CPS lässt sich grundsätzlich direkt mit einem Blockchain-Netzwerk verknüpfen. Zur eindeutigen Identifikation dieses CPS ist ein eigenes Blockchain-Zertifikat erforderlich, welches auf dem CPS hinterlegt werden kann. Dadurch kann das CPS an das Blockchain-Netzwerk angeschlossen werden. Eine grafische Darstellung ist in Abbildung 5 dargestellt.

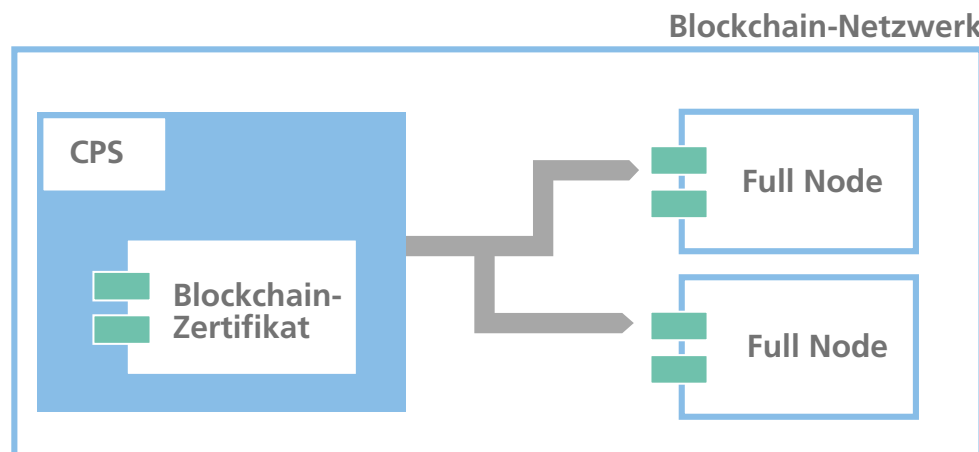


Abbildung 5: Direkte Anbindung eines CPS an die Blockchain

Für den Betrieb eines CPS nach Abbildung 5 als Light Node ist neben dem Blockchain Zertifikat die Implementierung eines Blockchain-Framework-spezifischen Kommunikationsverfahren notwendig. Das CPS muss außerdem hinreichende Hardwareressourcen für dieses Kommunikationsverfahren sowie für die Signatur entsprechender Transaktionen bereitstellen. Diese Hardwareanforderungen sind abhängig vom jeweils eingesetzten Blockchain-Framework.

Neben dem Einsatz eines CPS als Light Node besteht die Möglichkeit, das CPS als Full Node zu betreiben. Da ein Full Node alle Transaktionen, also die gesamte Blockchain, lokal speichert und außerdem am Konsensmechanismus teilnimmt, benötigt ein entsprechendes CPS im hohen Maße entsprechende Hardwareressourcen, insbesondere persistente Speicherkapazitäten. In der Praxis werden dedizierte Systeme für den Betrieb eines Full Nodes in einem Blockchain-Netzwerk eingesetzt, bspw. Server Hardware.

Für eine indirekte Verbindung eines CPS mit einem Blockchain-Netzwerk kann ein Broker verwendet werden, der die Identität des CPS mit einer Blockchain-Identität verknüpft. Für den Transfer von Daten vom CPS zum Broker wird ein Daten Transmitter benötigt, der die Sensordaten des CPS sowie dessen Identität aggregiert und übermittelt. Dabei ist zu beachten, dass die Kommunikation zwischen dem CPS und dem Broker abgesichert wird, um Manipulation auf dem Kommunikationsweg zum Broker zu verhindern. Die im Broker ankommenden Daten werden anschließend über einen Identity Matcher mit einer Blockchain-Identität verknüpft. Wie bereits in Abbildung 5 aufgezeigt, wird dazu ein Blockchain Zertifikat verwendet. Die Möglichkeit der Anbindung eines CPS an ein Blockchain-Netzwerk mittels Broker wird in Abbildung 6 aufgezeigt.

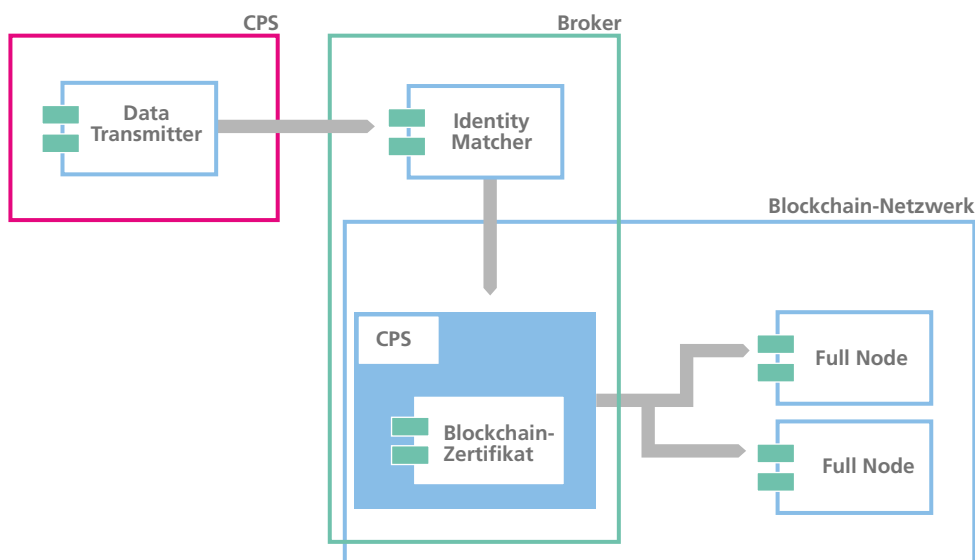


Abbildung 6:
Anbindung eines CPS
an die Blockchain
mittels Broker

Durch die Anbindung eines CPS an ein Blockchain-Netzwerk mittels Broker können Hardwareanforderungen an das CPS gesenkt werden, da lediglich Ressourcen für die Aggregation und Übermittlung von Daten vom CPS an den Broker benötigt werden. Diese Möglichkeit der Anbindung eines CPS eignet sich somit immer dann, wenn niedrige Energiebedarfe sowie geringe Produktionskosten des CPS angestrebt werden.

Gemäß der Kategorisierung von CPS nach Tabelle 1 ergibt sich die in Tabelle 2 aufgezeigte Einordnung von CPS in die aufgeführten Möglichkeiten zur Anbindung an ein Blockchain-Netzwerk.

CPS direkt als Full Node	CPS direkt als Light Node	CPS mittels Broker
High Performance (stationär)	Middle-Class (stationär)	Low Performance (stationär)
	Middle-Class (mobil)	Low Performance (mobil)
	High Performance (mobil)	

Tabelle 2: Einordnung der Kategorien an CPS zur Anbindung an ein Blockchain Netzwerk

Zusammenfassung & Ausblick

CPS erschließen das Prinzip der Selbstorganisation in Logistik und Produktion. Die größten Potenziale liegen im unternehmensübergreifenden Einsatz von CPS, indem Maschinen, Produkte, Computer und Sensoren Daten erheben, Entscheidungen innerhalb von Millisekunden treffen und damit autonom agierende Supply Chains realisiert werden können. Voraussetzungen für die Partizipation von Unternehmen an solchen Supply Chains sind Datensicherheit, Datenauthentizität und Datensouveränität und Transparenz. Die Verknüpfung von CPS mit der Blockchain-Technologie bildet hierfür einen zukunftsweisenden Lösungsansatz und wird in diesem Beitrag beschrieben. Es wird erörtert, wie unterschiedliche Kategorien von CPS an die Blockchain angebunden werden können und welche technischen Voraussetzungen mit den Anbindungsszenarien verbunden sind.

Es wird damit eine Hilfestellung für die Umsetzung eines Blockchain-gestützten Einsatzes von CPS in Supply Chains gegeben. Forschende bekommen einen Einblick in die aktuellen Überlegungen und Praktiker den notwendigen Umsetzungsimpuls. Die beschriebenen CPS-/Anbindungskombinationen gilt es nachfolgend weiter zu präzisieren und durch geeignete Testfälle für die Praxis zu verproben und nutzbar zu machen. Eine große Bedeutung kommt ferner Software- und Hardwarebausteinen zu, die zukünftig eine Durchdringung von Logistik und Produktion mit Blockchain-gestützten CPS ermöglichen. Eine rasche Verbreitung via Open Source, was eine Individualisierung von Lösungen begünstigt und gleichsam die Kompatibilität und Skalierung des Einsatzes in Netzwerken ermöglicht, erscheint erstrebenswert. Dieser Ansatz wird durch Blockchain Europe, dem Projekt zum Aufbau des Europäischen Blockchain-Instituts in NRW, verfolgt.

Literaturverzeichnis

- [1] Tseng, M. M., Hu, S. J. (2014): "Mass Customization". In: Laperrière, L., Reinhart, G., (Hg.): CIRP Encyclopedia of Production Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 836–843.
- [2] Brecher, C., Jeschke, S., Schuh, G., Aghassi, S., Arnoscht, J., Bauhoff, F. et al. (2011): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. In: Brecher, C. (Hg.): Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–81.
- [3] Monostori, L. (2014): Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. In: Procedia CIRP 17, S. 9–13.
- [4] Dedeoglu, V., Dorri, A., Jurdak, R., Michelin, R. A., Lunardi, R. C., Kanhere, S. S., Zorzo, A. (2020): A Journey in Applying Blockchain for Cyberphysical Systems. In: 2020 International Conference on COMmunication Systems & NETworkS (COMSNETS). IEEE, S. 383–390.
- [5] Rathore, H., Mohamed, A., Guizani, M. (2020): A Survey of Blockchain Enabled Cyber-Physical Systems. In: Sensors (Basel, Switzerland) 20 (1).
- [6] acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2011): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion. Unter Mitarbeit von Ariane Hellinger. Berlin: Springer (acatech Position).
- [7] Christidis, K., Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. IEEE Access Volume 4.
- [8] Egloff, P., Turnes, E. (2019). Blockchain für die Praxis: Kryptowährung, Smart Contracts, ICOs und Tokens, Zürich: Verlag SKV.
- [9] Fertig, T., Schützt, A. (2019). Blockchain für Entwickler: Grundlagen, Programmierung, Anwendung, Bonn: Rheinwerk Verlag.
- [10] Hinkeldeyn, J. (2019). Blockchain-Technologie in der Supply Chain: Einführung und Anwendungsbeispiele, Wiesbaden: Springer Vieweg.
- [11] Schütte, J., Fridgen, G., Prinz, W., Rose, T., Urbach, N., Hoeren, T., Guggenberger, N., Welzel, C., Holly, S., Schulte, A., Sprenger, P., Schwede, C., Weimert, B., Otto, B., Dalheimer, M., Wenzel, M., Kreutzer, M., Fritz, M., Leiner, U., Nouak, A. (2017): Blockchain und Smart Contracts: Technologien, Forschungsfragen und Anwendungen. Fraunhofer-Gesellschaft. https://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/de/documents/Fraunhofer-Positionspapier_Blockchain-und-Smart-Contracts.pdf

- [12] Adam, K. (2020). Blockchain-Technologie für Unternehmensprozesse: Sinnvolle Anwendung der neuen Technologie in Unternehmen, Berlin: Springer Gabler.
- [13] Hellwig, D., Karlic, G., Huchzermeier, A. (2021). Entwickeln Sie Ihre eigene Blockchain: Ein praktischer Leitfaden zur Distributed-Ledger-Technologie, Berlin: Springer Gabler.
- [14] Rosenberger, P. (2018). Bitcoin und Blockchain: Vom Scheitern einer Ideologie und dem Erfolg einer revolutionären Technik, Berlin: Springer Vieweg.
- [15] Sparer, D., Günther, M., Heyer, C. (2020). A Multi-Light-Node Blockchain Architecture. Fraunhofer Schriftenreihe: Future Challenges in Logistics and Supply Chain Management. https://www.silicon-economy.com/wp-content/uploads/Whitepaper_Blockchain_Europe.pdf
- [16] Lee, E. A. (2010): CPS foundations. In: Sapatnekar, S. (Hg.): Proceedings of the 47th Design Automation Conference on - DAC '10. the 47th Design Automation Conference. Anaheim, California, 13.06.2010 - 18.06.2010. New York, New York, USA: ACM Press, S. 737–742.
- [17] Lee, J., Azamfar, M., Singh, J. (2019): A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems. In: Manufacturing Letters 20, S. 34–39.
- [18] Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., Díaz, M. (2018): On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. In: Future Generation Computer Systems 88, S. 173–190.
- [19] Gong, X., Liu, E., Wang, R. (2020): "Blockchain-Based IoT Application Using Smart Contracts: Case Study of M2M Autonomous Trading". In: 5th International Conference on Computer and Communication Systems. ICCCS 2020: Shanghai, China, pp. 781–785.



blockchain
europe

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



flw Lehrstuhl für
Förder- und Lagerwesen

LFO
UNTERNEHMENSLOGISTIK

Fraunhofer
ISST