

Befragung im Maschinenbau zur Produktidentifikation für den digitalen Produktpass mit Blockchain

Blockchain für Produktidentifikation

N. Künster, V. Hummel, D. Palm

ZUSAMMENFASSUNG Produktidentifikationssysteme gelten als zentrale Voraussetzung für den Aufbau übergreifender Infrastrukturen für die Umsetzung des digitalen Produktpasses (DPP). Zugleich erweist sich der Aufbau konsistenter Identifikationssysteme als anspruchsvoll. Die Blockchain wird insbesondere für fragmentierte, heterogene Lieferketten als zentrale Technologie diskutiert. Dieser Beitrag untersucht mit einer Online-Befragung unter Maschinenbauunternehmen in Baden-Württemberg die Herausforderungen von Produktidentifikationssystemen und leitet daraus mögliche Lösungspotenziale der Blockchain ab.

Blockchain for product identification

ABSTRACT Product identification systems are considered a key prerequisite for establishing comprehensive infrastructures for implementing the Digital Product Passport (DPP). At the same time, establishing consistent identification systems is a challenging task. The blockchain is discussed as a potential enabler for identification systems, particularly in fragmented, heterogeneous supply chains. Based on an online survey of mechanical engineering companies in Baden-Württemberg, this article examines the challenges of identification systems and derives possible solutions using blockchain.

STICHWÖRTER

Informationsmanagement, Digitalisierung, Nachhaltigkeit

1 Einleitung

Produktidentifikationssysteme sind eine zentrale Grundlage für Rückverfolgbarkeit in zunehmend komplexen, global verteilten Lieferketten und gelten damit als Schlüssel für kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfung. Ihr Ziel ist es, jedem relevanten Objekt vom Rohstoff über die Komponente bis zum Endprodukt eine eindeutige, über den gesamten Lebenszyklus nutzbare Identität zuzuweisen, je nach Use Case auf Ebene der Instanz, der Charge oder der Objektklasse [1]. Technisch setzen sie sich aus vier Bausteinen zusammen [2]:

1. Physische Marker am Objekt,
2. eindeutige Identifikatoren,
3. geeignete Sensorik zur automatischen Erfassung und
4. ein Datenspeicher, etwa eine Datenbank, in der lebenszyklusbezogene Informationen konsistent geführt werden.

Die physische Identifikation erfolgt überwiegend optisch, etwa mittels optischer Zeichenerkennung (OCR) oder Data-Matrix-Codes, oder elektromagnetisch, etwa über Radiofrequenzidentifikation (RFID), Near Field Communication (NFC), Bluetooth Low Energy (BLE) oder Ultra-Wideband (UWB). Die jeweiligen Technologien haben unterschiedliche Profile hinsichtlich Robustheit, Kosten und Integrationsaufwand [3].

In der Literatur wird zwischen künstlichen Markern (wie Barcodes, Data-Matrix-Codes, RFID/NFC-Tags) und natürlichen Markern unterschieden, die unverwechselbare, herstellungsbedingte Material- oder Oberflächenmerkmale nutzen und ein hohes Niveau an Fälschungssicherheit ermöglichen [4]. Im Zu-

sammenspiel mit digitalen Identitäten und geeigneten Zugriffskonzepten unterstützen solche Systeme eine verlässliche Authentifizierung, eine durchgängige Datenzuordnung sowie eine skalierbare Nachverfolgbarkeit über den gesamten Produktlebenszyklus.

Der digitale Produktpass (DPP) wird in aktuellen regulatorischen Initiativen der Europäischen Kommission als digitaler Informationscontainer verstanden, der strukturierte, lebenszyklusbezogene Produktdaten bereitstellt. Für den DPP bilden Produktidentifikationssysteme die Voraussetzung, um über alle Stufen der Wertschöpfung hinweg Daten zu einem konkreten Produkt und seinen Komponenten konsistent zu sammeln, eindeutig zuzuordnen und wiederzufinden [5]. Sie ermöglichen die eindeutige Zuordnung physischer Produkte zu einer digitalen Repräsentation über den gesamten Lebenszyklus und damit die Sammlung von Nachhaltigkeits-, Material- und Prozessinformationen auch über mehrere Lebenszyklen hinweg. Dies schafft die Grundlage für Wiederverwendung, Reparatur, Remanufacturing und Recycling. Gleichzeitig unterstützen Produktidentifikationssysteme die regulatorische Umsetzung des DPP im Rahmen von Ökodesignvorgaben und sektorspezifischen Pflichten, etwa im Kontext der Batterieverordnung, indem sie Transparenz, Rückverfolgbarkeit und Verantwortlichkeiten technisch absichern. Daher wird eine robuste Produktidentität in der Literatur als zentrale Voraussetzung für skalierbare kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfungssysteme und einen wirksamen DPP betrachtet.

Das Fehlen durchgängig interoperabler und zugleich wirtschaftlich tragfähiger Identifikationssysteme, welche physische

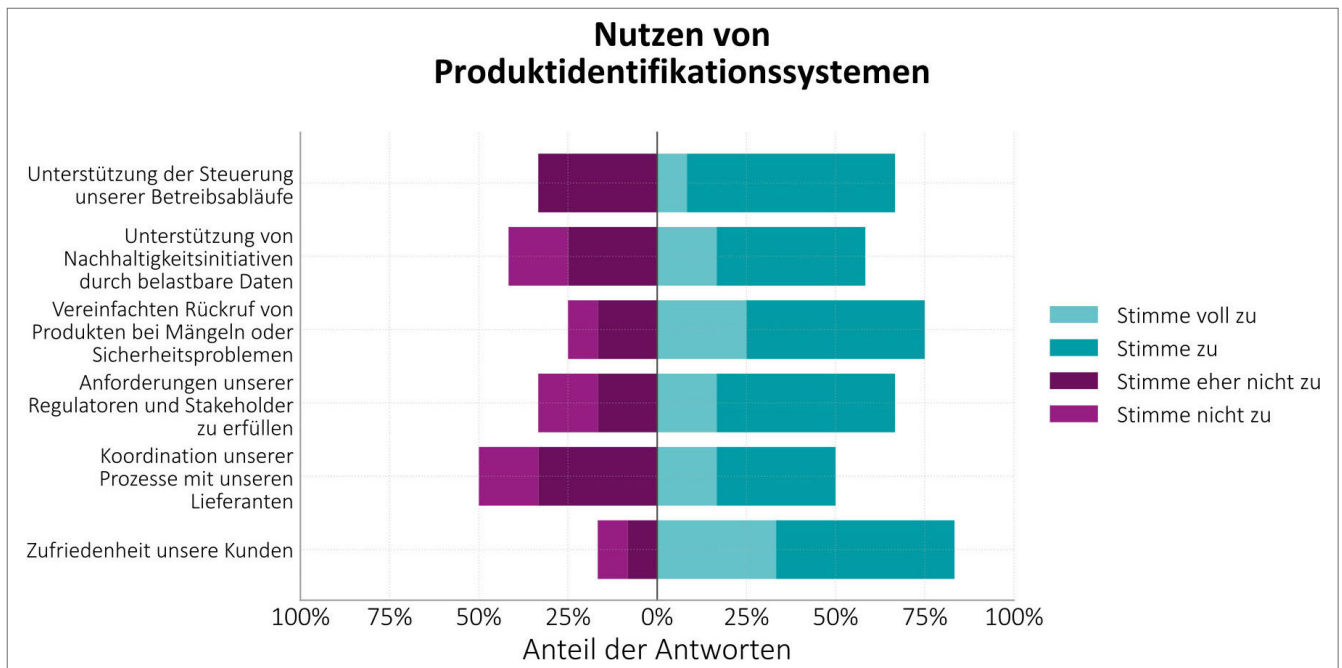


Bild 1 Wahrgenommene Nutzen von Produktidentifikationssystemen. Grafik: eigene Darstellung

Produkte über alle Lebenszyklusphasen hinweg eindeutig mit ihrer digitalen Repräsentanz verknüpfen, erschwert derzeit die Umsetzung des digitalen Produktpasses. Die Blockchain-Technologie wird in diesem Zusammenhang als potenzieller technischer Baustein diskutiert, da sie als unveränderbares, dezentrales Netzwerk zur Verknüpfung und Absicherung von Identitäten eingesetzt werden kann. Gleichzeitig bringen Lieferketten branchenspezifische Ausprägungen und Rahmenbedingungen mit sich, die beim Aufbau eines Identifikationssystems berücksichtigt werden müssen.

Vor diesem Hintergrund untersucht der vorliegende Beitrag die Herausforderungen beim Aufbau von Produktidentifikationssystemen am Beispiel des Maschinenbausektors in Baden-Württemberg und leitet darauf aufbauend die potenziellen Beiträge der Blockchain-Technologie für solche Systeme ab.

2 Herausforderungen beim Aufbau von Produktidentifikationssystemen

Zur Identifikation der Herausforderungen beim Aufbau von Produktidentifikationssystemen wurde eine Onlinebefragung unter Unternehmensvertreterinnen und Unternehmensvertretern in Leitungsfunktionen der Bereiche Produktion und IT im Maschinenbau in Baden-Württemberg durchgeführt. Es gab 12 Teilnehmer an der Befragung. Über einen standardisierten Fragebogen mit 17 geschlossenen Fragen wurden sowohl die aktuelle Ausgestaltung der Produktidentifikation als auch die Einschätzungen der Teilnehmenden zu Anforderungen und Hemmnissen im Zusammenhang mit Produktidentifikationssystemen erhoben.

Der Maschinenbau zeichnet sich typischerweise durch hohe technische Komplexität, vergleichsweise geringe Stückzahlen und stark dezentral organisierte Lieferketten aus. Vor diesem Hintergrund ist der Aufbau konsistenter Produktidentifikationssysteme in diesem Sektor besonders anspruchsvoll. Die Untersuchung in diesem Umfeld liefert Hinweise auf Herausforderungen und Grenzen der derzeit verfügbaren technologischen Lösungen.

Der DPP zielt darauf ab, durch erhöhte Datenverfügbarkeit und Sichtbarkeit zusätzlichen Nutzen für Unternehmen zu schaffen [6]. Die Ergebnisse der Befragung deuten darauf hin, dass die befragten Maschinenbauunternehmen diesen potenziellen Nutzen weitgehend nachvollziehen (**Bild 1**).

83 % der Teilnehmenden sehen einen direkten Beitrag zur Zufriedenheit der Kundinnen und Kunden, vor allem durch schnellere Servicefälle, präzisere Ersatzteilidentifikation und höhere Transparenz. 80 % nennen Produktsicherheit und effizientere Rückrufprozesse als wesentlichen Nutzen, 75 % die Unterstützung der internen Steuerung und 70 % die Erfüllung regulatorischer Anforderungen. 60 % erkennen Nutzen im Bereich Nachhaltigkeit. Demgegenüber wird der Nutzen für die Koordination mit Lieferanten zurückhaltender eingeschätzt, da ihn nur 50 % der Befragten nennen. Dies kann vor allem auf fehlende gemeinsame Standards und nicht harmonisierte Identifikationslogiken in den Lieferketten zurückgeführt werden, da Identitäten zumeist auf jeder Wertschöpfungsstufe neu vergeben werden müssen und zusätzlicher Aufwand entsteht.

Die Umsetzung von Produktidentifikationssystemen erfolgt im Kontext mehrerer Komplexitätsdimensionen, die Aufbau, Betrieb und Skalierung solcher Systeme maßgeblich beeinflussen. Auf Basis der Befragung lassen sich zwei zentrale Dimensionen unterscheiden:

1. **Produkte und Lieferketten:** Diese Dimension beschreibt die inhärente Komplexität der identifizierten Produkte und ihrer Lieferketten.
2. **Datenverwaltung und Schnittstellen:** Diese Dimension beschreibt die technische Komplexität der Aufgabe, Produktidentifikationssysteme in bestehende Organisations- und IT-Strukturen einzubetten.

Die Komplexität von Produkten und Lieferketten setzt sich aus einer strukturellen Komplexität und der Dynamik von Änderungen zusammen. Die strukturelle Komplexität bezieht sich einerseits auf die Produktstruktur mit allen identifizierten Komponenten und Strukturebenen, andererseits auf die Tiefe und

Bild 2 Komplexität der Produkte der Befragten.
Grafik: eigene Darstellung

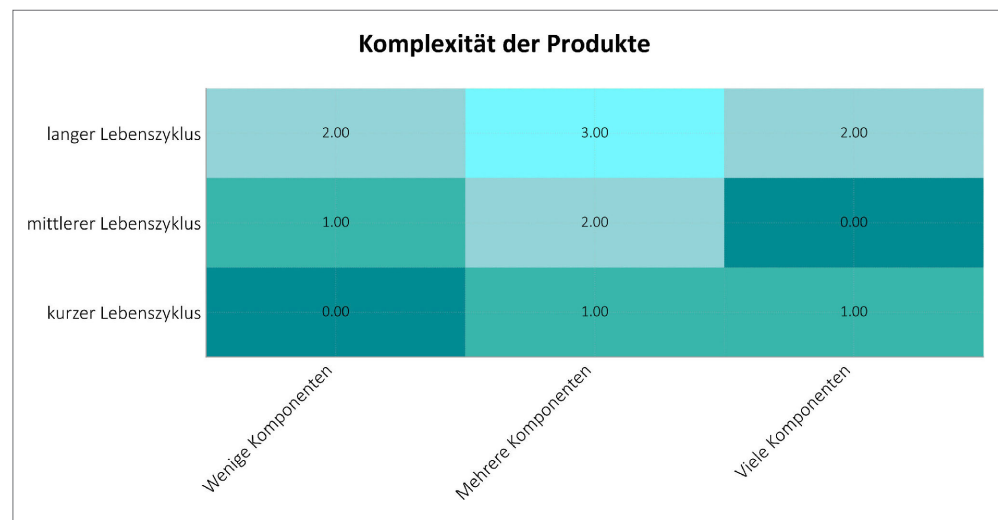
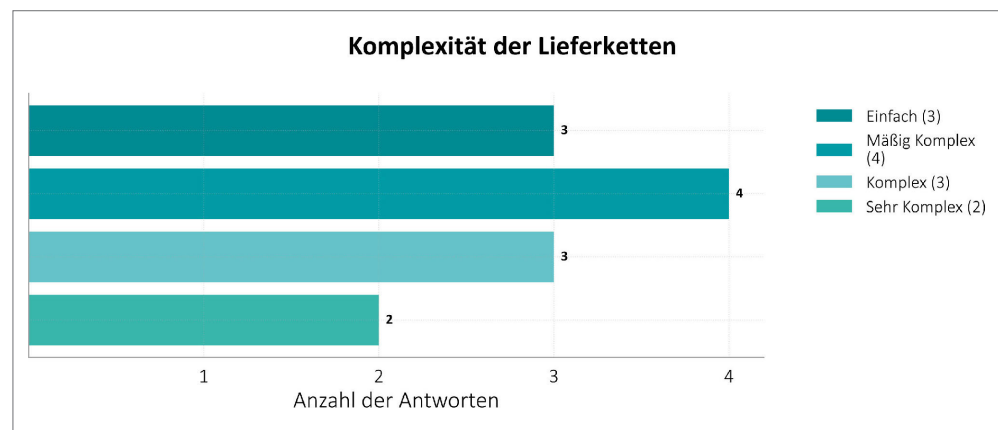


Bild 3 Komplexität der Lieferketten der Befragten.
Grafik: eigene Darstellung



Vernetzung der Lieferkette. Mit der Anzahl identifizierter Komponenten steigt der Umfang der im Produktidentifikationssystem zu verwaltenden Identitäten und Relationen. Werden Komponenten auf mehreren Strukturebenen identifiziert, müssen zusätzlich Abhängigkeiten im Sinne einer Stückliste abgebildet werden.

Die strukturelle Komplexität der Lieferketten wird durch die Anzahl und den Vernetzungsgrad der beteiligten Unternehmen geprägt. Viele Beteiligte erhöhen den Synchronisationsaufwand im Produktidentifikationssystem, da Identitäten über mehrere Wertschöpfungsstufen hinweg konsistent geführt werden müssen. Neben dieser Grundstruktur trägt die Dynamik in Produktprogrammen und Lieferketten zusätzlich zur Komplexität bei. Häufige Änderungen in Varianten, Stücklisten oder Lieferantenbeziehungen erhöhen den Aufwand für Pflege und Aktualisierung der Identifikationsdaten.

Die Komplexitätsdimension Datenverwaltung und Schnittstellen wird durch die bestehenden Strukturen in den beteiligten Unternehmen bestimmt. Der effiziente Einsatz von Produktidentifikationssystemen setzt eine enge Integration mit den betrieblichen IT-Systemen entlang der Lieferkette voraus, etwa mit Enterprise Resource Planning Systemen (ERP), Manufacturing Execution Systemen (MES) oder Warehouse Management Systemen (WMS). Je heterogener die Systemlandschaften, Datenmodelle und Schnittstellen sind, desto aufwendiger gestaltet sich die Einführung einheitlicher Identifikationslogiken. Dabei ist sowohl relevant, wo und in welcher Form Identifikationsdaten gespeichert, versioniert und verteilt werden, als auch, welche Identika-

tions- und Nachverfolgungsdaten in welcher Qualität und Aktualität tatsächlich vorliegen.

Im Sinne des Supply Chain Managements lässt sich Produktkomplexität entlang verschiedener Dimensionen beschreiben [7]. Für Produktidentifikationssysteme sind insbesondere die Lebenszyklusdauer eines Produkts sowie Anzahl und Struktur der verbauten Komponenten relevant. Eine lange Verweildauer im Markt erfordert die langfristige Speicherung und Verfügbarkeit von Identifikationsdaten. Eine hohe Anzahl von Komponenten vergrößert den Umfang des Identifikationssystems und erhöht die Zahl der abzubildenden Beziehungen zwischen den jeweiligen Identitäten. In der Befragung dominiert ein Szenario mit überwiegend langen Produktlebenszyklen (**Bild 2**).

Die Anzahl der Komponenten ist über die betrachteten Kategorien hinweg vergleichsweise gleichverteilt. Für Produktidentifikationssysteme bedeutet dies, dass unterschiedlich große Mengen an Identitäten über lange Zeiträume konsistent verwaltet, aktualisiert und den entsprechenden physischen Objekten zugeordnet werden müssen.

Die Komplexität der Lieferkette lässt sich im Wesentlichen durch die Anzahl der beteiligten Unternehmen und deren Vernetzungsgrad beschreiben. Für ein durchgängiges Produktidentifikationssystem ist entscheidend, dass alle relevanten Akteure einer Lieferkette eingebunden sind, damit keine Lücken in der Rückverfolgbarkeit entstehen. Mit zunehmender Komplexität der Lieferkette steigt damit sowohl die Anzahl der zu integrierenden

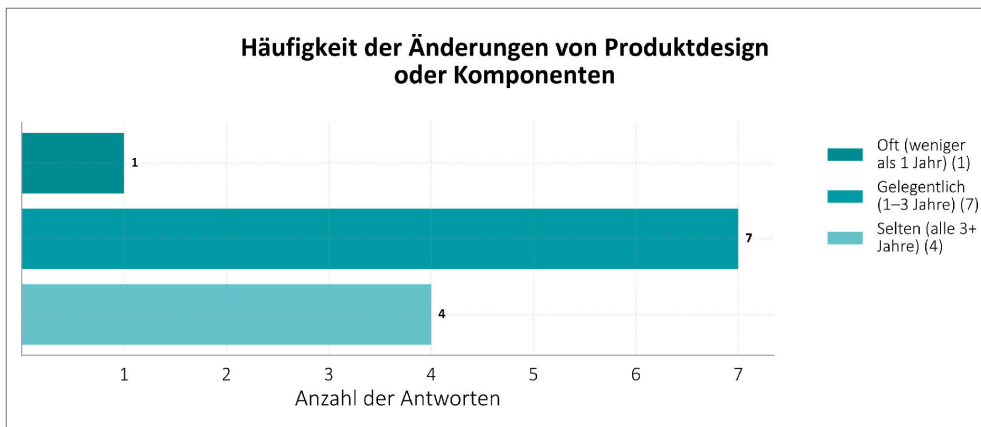


Bild 4 Änderungen im Produktdesign bei den Befragten.
Grafik: eigene Darstellung

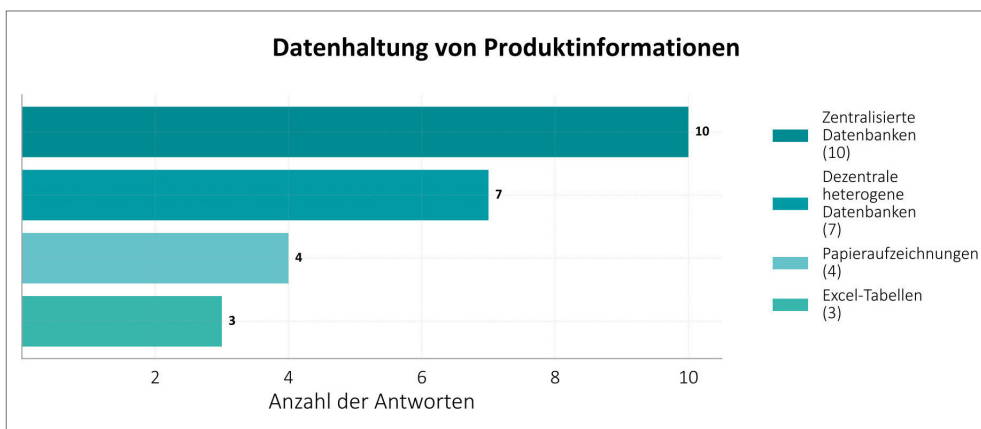


Bild 5 Datenhaltung von Produktinformationen bei den Befragten.
Grafik: eigene Darstellung

Teilnehmer als auch der Koordinationsaufwand für deren Zusammenarbeit.

In der Befragung sind über die teilnehmenden Unternehmen hinweg alle Komplexitätsstufen von Lieferketten in etwa gleich häufig vertreten (**Bild 3**). Es zeigt sich somit keine einheitliche Standardausgangslage. Produktidentifikationssysteme müssen daher so ausgelegt werden, dass sie unabhängig von spezifischen Lieferkettenstrukturen einsetzbar sind und unterschiedliche Ausprägungen von Netzwerkstrukturen unterstützen.

Änderungen an Produkten und Komponenten müssen sich in der Datenstruktur von Produktidentifikationssystemen widerspiegeln. In der Befragung geben fast 60 Prozent der Unternehmen an, dass sich die Produktzusammensetzung im Rhythmus von ein bis drei Jahren ändert (**Bild 4**). Dies erhöht den Bedarf an stringenter Versionierung und an Rückverfolgbarkeit über mehrere Revisionen hinweg. Besonders anspruchsvoll wird dies, wenn langlebige Produkte mit mehreren Revisionsständen parallel im Feld sind.

Damit Produktidentifikationssysteme zur zuverlässigen Verknüpfung physischer Produkte mit ihren digitalen Entsprechungen genutzt werden können, müssen sie in die bestehenden betrieblichen Informationssysteme der Unternehmen integriert werden. Eine wichtige Rolle spielt dabei, wie produktbezogene Daten im Unternehmen verwaltet werden. Über 80 % der Befragten gaben an, dass produktbezogene Daten grundsätzlich zentral gehalten werden, berichten aber zugleich von ergänzenden Abteilungssystemen und papierbasierten Aufzeichnungen (**Bild 5**).

Diese parallelen Strukturen gefährden die Datenkonsistenz und erhöhen die Komplexitätskosten von Produktidentifikations-

systemen, da zusätzlicher Synchronisationsaufwand zwischen den beteiligten Systemen entsteht.

3 Potenziale von Blockchain-Technologie für Produktidentifikationssysteme

Blockchain beschreibt eine dezentrale, manipulationsresistente Transaktionsdatenbank, in der Vorgänge in kryptographisch verketteten Datenblöcken dauerhaft gespeichert werden [8]. Transaktionen werden mittels Konsensmechanismen, wie Proof of Work (PoW) oder Proof of Stake (PoS), zwischen den teilnehmenden Knoten synchronisiert, sodass Konsistenz und Vertrauen ohne eine zentrale Autorität entstehen kann [9]. Neben vielfältigen Anwendungen im Kontext von Kryptowährungen wird die Blockchain-Technologie zunehmend auch für Fragestellungen des Supply Chain Managements diskutiert [10, 11]. Sie bietet die Möglichkeit, dass sich einander unbekannte oder nur begrenzt vertrauende Teilnehmer nach den Regeln festgelegter Protokolle Daten austauschen können, ohne dass gegenseitiges Vertrauen oder ein zentraler Koordinator zwingend vorausgesetzt werden müssen [12]. Vor diesem Hintergrund zeigt sich, dass wissenschaftliche Untersuchungen einen Schwerpunkt auf Anwendungen von Blockchain-Technologie im Bereich der Rückverfolgbarkeit legen [13]. Hier spielen die folgenden Eigenschaften der Technologie eine wichtige Rolle:

1. **Dezentralität:** Auf einer Blockchain werden Daten nicht zentral von einem einzelnen Teilnehmer verwaltet, sondern dezentral auf den Knoten aller Netzwerkteilnehmenden repliziert. Für Lieferketten bedeutet dies zum einen, dass kein Single Point of Failure existiert, dessen Ausfall zu einem Verlust der Daten

- führen würde [14]. Zum anderen wird die Teilnahme am Netzwerk erleichtert, da keine einzelne Instanz exklusiv über die Teilnahme und das Onboarding neuer Partner entscheidet.
2. Unveränderbarkeit: Aufgrund der kryptographischen, rekursiven Verkettung der Blöcke sind nachträgliche Änderungen an einmal bestätigten Daten auf der Blockchain praktisch nicht möglich. Für Lieferketten bedeutet dies, dass nachträgliche Manipulationen der auf der Blockchain gespeicherten Daten ausgeschlossen werden sollen und alle Transaktionen dauerhaft nachvollziehbar bleiben.
 3. Persistenz und Konsistenz: Die rekursive Verkettung der Blöcke und deren redundante Speicherung auf vielen Knoten stellen sicher, dass Daten auf der Blockchain nicht gelöscht werden oder unbemerkt verloren gehen. Damit stehen alle jemals auf einer Blockchain gespeicherten Lieferkettendaten zur Verfügung, solange es aktiv teilnehmende Knoten gibt. Durch die Validierung über Konsensmechanismen liegt zudem auf allen Knoten zu jedem Zeitpunkt ein konsistenter Datenbestand vor. Blockchain-Technologie bietet aufgrund ihrer Dezentralität, Persistenz und Unveränderbarkeit grundsätzlich die Möglichkeit, Koordinationsaufwände zu verringern und gleichzeitig die Konsistenz und Verfügbarkeit von Nachverfolgungsdaten sicherzustellen. Diese Eigenschaften sind auch für Produktidentifikationssysteme relevant.

Eine zentrale Anforderung moderner Produktidentifikationssysteme ist die langfristige Sicherstellung der Datenkonsistenz von Produktidentifikatoren. Konventionelle, zentralisierte Datenbankarchitekturen sind anfällig für Integritätsverletzungen, etwa durch Bedienfehler, Systemausfälle oder böswillige Manipulation. Dadurch kann die auditable Historie langlebiger Produkte beeinträchtigt werden, was sowohl regulatorische Konformität als auch Beweisführung in Produkthaftungsfällen erschwert. Blockchain-basierte Ansätze adressieren diese Schwächen durch eine dezentrale Netzwerkstruktur ohne Single Point of Failure und eine kryptografisch gesicherte, unveränderbare Speicherung von Transaktionen. Zeitgestempelte, manipulationsresistente Einträge auf einem Distributed Ledger schaffen eine vertrauenswürdige, redundante Datenbasis, welche die Nachweisbarkeit der Produktgeschichte über lange Nutzungs- und Archivierungszeiträume unterstützt.

Für eine breite Einsetzbarkeit und Interoperabilität müssen Produktidentifikationssysteme weitgehend unabhängig von proprietären IT-Infrastrukturen und organisatorischen Hierarchien der beteiligten Akteure in einer Lieferkette funktionieren. In der Praxis führen fragmentierte Datenhoheiten und technologische Silos häufig zu Medienbrüchen und redundanten Datenhaltungen, wodurch eine unternehmensübergreifende Kommunikation von Produktidentifikationsinformationen erschwert wird. Blockchain kann diese Einschränkungen teilweise überwinden, indem sie als gemeinsames, neutrales Vertrauensprotokoll fungiert. Datenhaltung und -validierung werden von einzelnen Unternehmenssystemen auf ein gemeinsames, kryptografisch gesichertes Hauptbuch verlagert. Regelbasierte Kollaboration mittels Smart Contracts erlaubt es, ein einheitliches Regelwerk für Datenformat, Prüfregeln und Zugriffsrechte zu etablieren. Dadurch entstehen netzwerkweite, lieferkettenagnostische Governance-Strukturen für Identifikationsdaten, ohne dass ein dominanter Intermediär oder aufwendige bilaterale Schnittstellen erforderlich sind.

In dynamischen Wertschöpfungsketten ist eine explizite und nachvollziehbare Versionierung von Produktidentifikationsdaten

notwendig, beispielsweise bei Änderungen von Komponenten, technischen Spezifikationen oder Zertifizierungen. Fehlt eine lückenlose, revisionssichere Historisierung einzelner Zustandsänderungen, können Rückrufmaßnahmen fehlerhaft adressiert werden und die zuverlässige Zuordnung von Identifikatoren zu spezifischen Produktkonfigurationen geht verloren. Blockchain-Systeme sind durch ihre sequenzielle Architektur gut geeignet, dieses Problem zu adressieren. Jede Änderung des Produktzustands oder seiner Metadaten wird als eigene Transaktion mit Zeitstempel im Ledger abgelegt. Die kryptografische Verkettung stellt sicher, dass alle früheren Versionen unverändert erhalten bleiben und ihre chronologische Abfolge auditierbar ist. Damit wird eine granulare Historisierung der Produktidentität über den gesamten Lebenszyklus ermöglicht.

Die Erzeugung robuster Produktidentifikationssysteme setzt die gesicherte Aggregation von Daten aus einer Vielzahl dezentraler Quellen voraus, etwa aus Fertigungsanlagen, Sensorik, Logistikzentren oder Serviceeinsätzen. Die Herausforderung besteht darin, die Integrität und Authentizität der eingebrachten Daten zu gewährleisten, ohne eine zentrale Instanz für die Vorvalidierung jeder Quelle zu benötigen. Die dezentrale Netzwerkstruktur und die Konsensmechanismen von Blockchain bieten hierfür einen alternativen Ansatz. Autorisierte Akteure können Daten direkt unter kryptografischer Signatur in das gemeinsame Ledger schreiben. Die Validierung der Einträge erfolgt kollektiv durch das Netzwerk. So entsteht ein gemeinschaftlich verifizierter Datenbestand, der die Integration heterogener, räumlich verteilter Datenquellen in ein konsistentes Produktidentifikationssystem unterstützt.

Schließlich erfordert die End-to-End-Traceability in mehrstufigen Lieferketten, von der Rohstoffgewinnung bis zur Nutzung und Rückführung, die Überwindung informatorischer Brüche zwischen Organisationen. Konventionelle Systeme scheitern oft daran, eine einheitliche, ununterbrochene Nachweiskette über alle Wertschöpfungsstufen abzubilden. Durch die persistente Erfassung und unveränderliche Verknüpfung kritischer Prozessereignisse mit einem Produktidentifikator kann eine Blockchain einen durchgehenden digitalen Traceability-Pfad etablieren. Informationsverluste an Schnittstellen werden reduziert und eine granulare, auditable Transparenz über den gesamten Produktlebenszyklus wird unterstützt, was die Erfüllung von Rückverfolgbarkeits und Rechenschaftspflichten erleichtert.

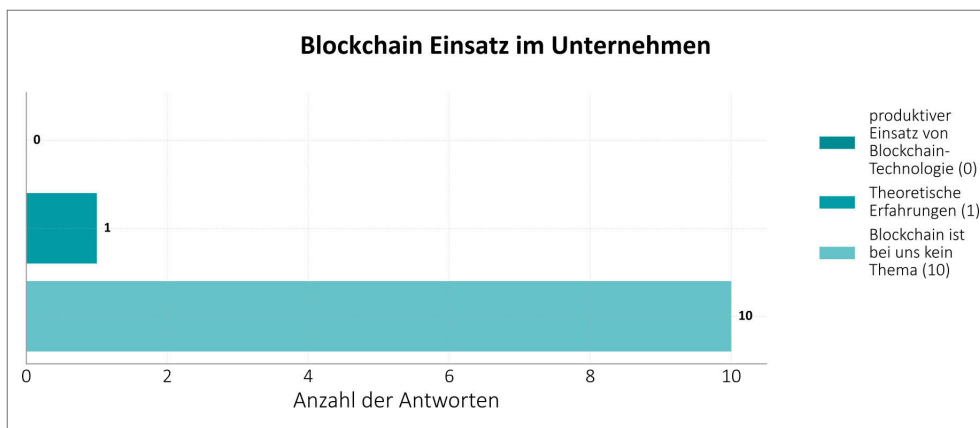
Trotz der klaren technologischen Passung ist der aktuelle Einsatz der Blockchain-Technologie (siehe **Tabelle**) unter den befragten Unternehmen als sehr gering einzustufen (**Bild 6**). Die überwiegende Mehrheit gibt an, dass Blockchain im Unternehmen zwar als relevantes Thema wahrgenommen wird, jedoch verfügt lediglich ein Unternehmen über erste theoretische Erfahrungen und kein Unternehmen berichtet von einem produktiven Einsatz der Technologie.

4 Fazit

Die vorliegende Untersuchung analysiert die zentralen Herausforderungen beim Aufbau konsistenter Produktidentifikationssysteme im Kontext des digitalen Produktpasses anhand einer empirischen Erhebung im Maschinenbausektor Baden-Württembergs und evaluiert die Lösungspotenziale der Blockchain-Technologie. Im Rahmen der Befragung wurden unterschiedliche Komplexitätsdimensionen beim Aufbau von Produktidentifikati-

Tabelle Zuordnung der Herausforderungen von Produktidentifikationssystemen zu Eigenschaften der Blockchain.

Herausforderung Produktidentifikationssysteme	Eigenschaften Blockchain
Konsistenz über lange Zeiträume	- Dezentrales Netzwerk ohne Single Point of Failure - Vernetzte Persistenz von Daten
Lieferkettenagnostische Auslegung	- Dezentrale Struktur - Regelbasierte Kollaboration
Versionierung von Identitäten	- Persistenz von Daten
Einbindung verteilter Datenquellen	- Dezentrale Netzwerkstruktur

**Bild 6** Blockchain-Einsatz in den Unternehmen der Befragten.

Grafik: eigene Darstellung

onssystemen betrachtet. Auf dieser Basis konnten die Sicherstellung der Konsistenz von Produktidentifikatoren über lange Zeiträume, die lieferkettenagnostische Auslegung von Systemen, die Versionierung von Identitäten sowie die Einbindung verteilter Datenquellen als zentrale Herausforderungen identifiziert werden.

Die identifizierten Herausforderungen korrespondieren unmittelbar mit inhärenten Eigenschaften der Blockchain-Technologie. Sie ist grundsätzlich geeignet, kritische Anforderungen an die Langzeitkonsistenz, die revisionssichere Versionierung, die Lieferkettenagnostik sowie die mehrstufige Nachverfolgbarkeit zu adressieren. Gleichzeitig zeigt die Befragung, dass derzeit kaum praktische Initiativen zum Einsatz von Blockchain-Technologie vorliegen. Dies kann zum einen in einer begrenzten Bekanntheit und teilweise noch unscharfen Wahrnehmung der Technologie begründet sein. Zum anderen spielen technische Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung von Blockchain-Anwendungen eine Rolle, insbesondere Fragen der Skalierbarkeit und das sogenannte Blockchain-Oracle-Problem [15]. Dieses beschreibt die Schwierigkeit, die Wahrheit und Konsistenz von Daten sicherzustellen, bevor diese in einer Blockchain persistent gespeichert werden [16].

Aufgrund der aus komplexen Lieferketten resultierenden Anforderungen sowie der technischen Einschränkungen der Blockchain erscheint ein Fokus weiterer Forschung auf hybriden Architekturansätzen sinnvoll. In solchen Architekturen sollte die Blockchain primär als dezentrales Vertrauensprotokoll und unveränderliches Register für kritische Identifikatoren und Zustandsübergänge, beispielsweise Eigentumswechsel oder Versionierungsereignisse, fungieren. Die Speicherung großer Volumina von Primärdaten, etwa Produktions- und Nutzungsdaten, verbleibt dagegen in performanten Off-Chain-Systemen. Die Verknüpfung erfolgt über kryptografische Hashes, die auf der Blockchain unveränderlich verankert werden. So kann die Integrität der Daten

sichergestellt werden, während zugleich die technische Machbarkeit und Skalierbarkeit der Gesamtlösung gewahrt bleibt.

FÖRDERHINWEIS

Finanziert durch die Baden-Württemberg Stiftung
im Rahmen des Projekts IDGreen als Teil des Programms
„Ideenwettbewerb Blockchain“

LITERATUR

- [1] GS1: GS1 Global Traceability Standard. GS1's framework for the design of interoperable traceability systems for supply chains. Stand: 2017. Internet: ref.gs1.org/standards/global-traceability/. Zugriff am 02.02.2026
- [2] McFarlane, D.; Sheffi, Y.: The Impact of Automatic Identification on Supply Chain Operations. *The International Journal of Logistics Management* 14 (2003) 1, pp. 1–17
- [3] Wilsky, P.; Franke, F.; Fischer, D. et al.: Technologiekombinationen zur Identifikation und Lokalisierung in der Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (2022) 11, S. 768–772
- [4] Hippenmeyer, H.; Moosmann, T.: *Automatische Identifikation für Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016
- [5] Künstler, N.; Dorka, F.; Hentsch, M. et al.: An Architecture for information consistent identification systems in circular value creation. *Procedia CIRP* 130 (2024), pp. 1617–1622
- [6] Adisorn, T.; Tholen, L.; Götz, T.: Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. *Energies* 14 (2021) 8, #2289
- [7] Aitken, J.; Childerhouse, P.; Towill, D.: The impact of product life cycle on supply chain strategy. *International Journal of Production Economics* 85 (2003) 2, pp. 127–140
- [8] Dietrich, F.; Louw, L.; Palm, D.: Blockchain-Based Traceability Architecture for Mapping Object-Related Supply Chain Events. *Sensors (Basel, Switzerland)* 23 (2023) 3, #1410 doi.org/10.3390/s23031410

- [9] Abeyratne, S. A.; Monfared, R.: Blockchain ready manufacturing supply chain using distributed ledger. *International Journal of Research in Engineering and Technology* 05 (2016) 09, pp. 1–10
- [10] Wang, Y.; Han, J. H.; Beynon-Davies, P.: Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal* 24 (2019) 1, pp. 62–84
- [11] Casino, F.; Dasaklis, T. K.; Patsakis, C.: A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics* 36 (2019), pp. 55–81
- [12] Tapscott, D.; Tapscott, A.: *Blockchain revolution: how the technology behind bitcoin is changing money, business, and the world*. New York: Portfolio / Penguin 2016
- [13] Dietrich, F.: *A Systematic Literature Review of Blockchain-Based Traceability Solutions*. Hannover: publish-Ing 2023
- [14] Yiu, N. C. K.: Toward Blockchain-Enabled Supply Chain Anti-Counterfeiting and Traceability. *Future Internet* 13 (2021) 4, #86
- [15] Künster, N.; Schmitt, F.; Palm, D.: Erfolgsfaktoren für Blockchain Anwendungen in modernen Lieferketten. *wt Werkstatttechnik online* 115 (2025) 01–02, S. 66–71. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [16] Ezzat, S. K.; Saleh, Y. N. M.; Abdel-Hamid, A. A.: Blockchain Oracles: State-of-the-Art and Research Directions. *IEEE Access* 10 (2022), pp. 67551–67572

Nils Künster, M.Sc. 
nils.kuenster@reutlingen-university.de

Prof. Dr. Vera Hummel 
 NXT Nachhaltigkeit und Technik
 Hochschule Reutlingen 
 Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.reutlingen-university.de

Prof. Dr. techn. Daniel Palm 
 NXT Nachhaltigkeit und Technik
 Hochschule Reutlingen
 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung 
 Nobelstr.12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)