Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–04–42

Objektidentifikation für zirkuläre Lieferketten

Nachverfolgbarkeit als zentrales Element zirkulärer Wertschöpfung

N. Künster, F. Dorka, M. Bücheler, D. Palm

ZUSAMMENFASSUNG Die Nachverfolgbarkeit von Objekten über deren gesamten Lebenszyklus hinweg, ist eine wichtige Voraussetzung für die effiziente Steuerung zirkulärer Wertschöpfung. Damit diese Nachverfolgbarkeit auch in komplexen und dynamischen Wertschöpfungsketten mit konsistenten Daten gewährleistet werden kann, ist eine durchgängige und eindeutige Identifikation von Objekten erforderlich. Dieser Beitrag stellt die Herausforderungen einer solchen Identifikation dar und Lösungsansätze vor.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Informationsmanagement, Nachhaltigkeit

Traceability as a key element of circular value creation – Identification of objects for circular supply chains

ABSTRACT The traceability of objects throughout their entire life cycle is an important prerequisite for the efficient management of circular value creation. To ensure this traceability with consistent data even in complex and dynamic value chains, consistent and unique identification of objects is necessary. This article outlines the challenges of such identification and presents possible solutions.

1 Einleitung

In einer globalisierten Wirtschaft, in der Lieferketten zunehmend komplex und fragmentiert werden, spielt die Nachverfolgbarkeit von Objekten (zum Beispiel Produkte sowie deren Einzelteile und Rohstoffe) eine wichtige Rolle für die Umsetzung von kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungssystemen. Nachverfolgbarkeit oder Traceability bezeichnet in Lieferketten die Möglichkeit, auf alle relevanten Lebenszyklus-Informationen eines Objekts zugreifen zu können [1]. Eine zentrale Voraussetzung bei der praktischen Umsetzung von Traceability-Systemen sind Identifikationssysteme, die den nachzuverfolgenden Objekten jeweils eine eindeutige Identität zuweisen [1, 2]. Dabei ist vom Anwendungsfall abhängig, ob Objekte auf Ebene der einzelnen Instanzen, der Charge oder der Objekt-Klasse identifiziert werden müssen [2]. In Anlehnung an *McFarlane* und *Sheffi* gibt es vier zentrale Komponenten von automatischen Identifikationssystemen in Lieferketten [3]:

1. Marker: Jedes Objekt muss eindeutige physische Identifikationsmerkmale aufweisen. Diese Identifikationsmerkmale müssen eindeutig mit dem Identifikator verknüpft werden.
2. Identifikator: Jedem betrachteten Objekt wird eine einzigartige Zeichenfolge zugewiesen, die das Objekt eindeutig identifizierbar macht.
3. Sensorik: Damit ein Identifikationssystem in einem industriellen Szenario eingesetzt werden kann, muss eine automatische Identifikation mit einem passenden Sensor möglich sein.
4. Datenbank: Um einen Mehrwert für die Nachverfolgbarkeit innerhalb von Lieferketten zu erreichen, müssen in einer oder mehreren geeigneten Datenbanken relevante Informationen zu dem identifizierten Objekt und seinem Lebenszyklus gespeichert werden.

Eine besondere Herausforderung für Identifikationssysteme ergibt sich aus der Erfordernis konsistenter Identitäten über ganze Lieferketten und Lebenszyklen hinweg.

Die Konsistenz innerhalb eines Identifikationssystems ist gegeben, wenn die Identifikationsmerkmale (Marker) und die daran geknüpften Identifikationsinformationen ein Objekt über dessen Lebenszyklus durchgängig und eindeutig identifizierbar machen. Moderne Lieferketten zeigen einen Trend zu mehr Dynamik und Vernetzung im Verhältnis der verschiedenen Stakeholder [4]. Daher ist kaum vorauszusehen, welcher Stakeholder ein Objekt entlang seines Lebenszyklus identifizieren muss. Es ergibt sich somit in vielen Lieferketten die Notwendigkeit von global einzigartigen Identifikatoren [2].

Die besondere Relevanz durchgängiger Traceability-Systeme für kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfungssysteme [5] bedingt zusätzliche Herausforderungen an Identifikationssysteme. In kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungssystemen werden keine linearen, sondern multi-direktionale Waren-, Infomations- und Geldflüsse organisiert. Daher bauen sich diese Wertschöpfungssysteme aus verteilten, aber stark vernetzten Partnernetzwerken auf [6].

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Unter Kreislaufwirtschaft versteht man ein regeneratives Wirtschaftssystem, das anstatt des klassischen „End-of-Life“ eine Weiter- und Wiedernutzung der Materialien priorisiert [7]. Die Abkehr von einem Entsorgen am Ende des Lebenszyklus kann durch „R-Strategien“ realisiert werden. Diese umfassen die nützliche Wiederverwertung von Materialien (Recover und Recycle), die Verlängerung von Lebenszyklen von Produkten und deren Einzelteilen (Repurpose, Remanufacture, Refurbish, Repair, Reuse), sowie eine intelligentere Nutzung und Produktion der Produkte (Reduce, Rethink, Refuse) [8]. Dabei kann es durch die Anwendung der R-Strategien zu Rekombinationen von Einzelteilen in neuen Produkten kommen, wodurch auf digitaler Ebene ein Datenaustausch und eine Datenhaltung über mehrere Lebenszyklen hinweg nötig wird [9]. Der Digital Product Passport (DPP) wird als wichtiges Werkzeug dieses Datenaustauschs gesehen [10] und soll relevante Daten für kreislaufwirtschaftliche Entscheidungen über mehrere Lebenszyklen bereitstellen und zwischen verschiedenen Stakeholdern innerhalb eines Wertschöpfungssystems Transparenz schaffen [11]. Das bedeutet, Identifikatoren von DPPs müssen über Lebenszyklen hinweg und auch im Einsatz in neuen Produkten konsistent bleiben.

Zur praktischen Umsetzung der DPPs sind standardisierte Datenmodelle nötig. Dabei wird in unterschiedlichen Konzepten die Asset Administration Shell (AAS) als Basis zur Umsetzung des DPP vorgeschlagen [11–13]. Die AAS sieht zwar die Notwendigkeit eindeutiger Identifikation vor, die Umsetzung und Konsistenz dieser Identifikation wird in der AAS jedoch nicht sichergestellt [14]. Daher untersucht dieser Beitrag die Fragestellung der Anforderungen an eine konsistente Identifikation sowie die daraus entstehenden Herausforderungen für Technologien zur Umsetzung der entsprechenden Identifikationssysteme vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft.

2 Konsistenz in Identifikationssystemen

Grundvoraussetzung eines Identifikationssystems ist die Verknüpfung von Identifikationsmerkmalen mit Identifikationsinformationen [15]. Um eine Konsistenz dieser Verknüpfung zu erreichen, stellen sich je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen an die Identifikationsmerkmale und an die Verwaltung der Identifikationsinformationen. Die Identifikationsmerkmale sind entweder natürliche Marker, die Objekte durch deren natürliche physische Eigenschaften oder Besonderheiten charakterisieren oder künstliche Marker, die Objekten beigefügt werden [16]. Die grundlegende und vom Anwendungsfall unabhängige Konsistenzanforderung sowohl an natürliche als auch künstliche Marker ist, dass die entsprechenden Identifikationsmerkmale erlauben, jedes Objekt eindeutig zu identifizieren und von anderen zu unterscheiden. Zudem muss der Marker eine gewisse Robustheit aufweisen, die die Identifikation eines Objekts über dessen gesamten Lebenszyklus gewährleistet. Dabei müssen Umwelteinflüsse, die während des Lebenszyklus zu Beschädigung, Zerstörung und Verlust des Markers führen können, für die Definition der Konsistenzanforderungen berücksichtigt werden.

Entsprechend der für ein Identifikationssystem zentralen Verknüpfung von Identifikationsmerkmalen, Identifikator und Identifikationsinformationen, stellen sich Konsistenzanforderungen nicht nur an den physischen Marker, sondern auch an die Verwaltung der digitalen Identitätsinformationen.

Einzigartigkeit des Identifikators: Identifikatoren werden durch Zeichenfolgen dargestellt [3]. Damit diese Zeichenfolgen in einem Identifikationssystem konsistent genutzt werden können, muss sichergestellt werden, dass die Zeichenfolgen der Identifikatoren einzigartig sind [16]. Das bedeutet, dass jede Zeichenfolge nur einmal vergeben werden darf. Verweisen mehrere Zeichenfolgen auf dasselbe Objekt, können die für die jeweiligen Objekte gesammelten Informationen nicht zugeordnet werden und die Konsistenz der Identitätsinformationen ist nicht gegeben. Diese Einzigartigkeit sicherzustellen, ist besonders vor dem Hintergrund globaler und dynamischer Lieferketten herausfordernd. Da diese Entwicklung ein Abgrenzen von örtlich oder branchenspezifisch abgeschlossenen Identifikationssystemen erschwert, muss die globale Einzigartigkeit eines Identifikators sichergestellt werden. Kreislaufwirtschaftliche Wertschöpfungsnetzwerke sind eine weitere Herausforderung im Sinne dieser Anforderungen. Einzelne Objekte können über mehrere Lebenszyklen genutzt werden. Dabei ist bei der ersten Zuordnung nicht klar, in welchen Produkten oder Branchen diese Objekte weitergenutzt werden. Dieser Umstand macht eine globale Eindeutigkeit erforderlich. Da Objekte in einer Kreislaufwirtschaft nicht aus dem Warenkreislauf entfernt werden, erscheint eine Wiederverwendung von einmal genutzten Identifikatoren nach einer gewissen Zeit schwierig umsetzbar. Bei der Auswahl des Schemas für den Identifikator muss diese Problematik daher Beachtung finden.

Verknüpfung von Identifikator und Identifikationsinformationen: Identifikationssysteme in Lieferketten ermöglichen eine eindeutige Verknüpfung von Objekten mit deren Lebenszyklusdaten. Die Konsistenz dieser Verknüpfung muss auch im zeitlichen Kontext abgesichert werden. Es muss also sichergestellt sein, dass der Identifikator und die mit ihm verknüpften Daten langfristig gespeichert und abrufbar sind.

3 Lösungsansätze für konsistente Identifikationssysteme

Für die Implementierung von Identifikationssystemen kommen eine Vielzahl von ID-Technologien in Betracht, wobei ID-Technologien eine spezifische Kombination aus Marker und Identifikator meint. Die im Traceability-Kontext gängigsten ID-Technologien nutzen für die Verbindung von Marker und Identifikator entweder ein elektromagnetisches oder optisches Verfahren (**Tabelle**) und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Eignung für konsistente Identifikationssysteme [17].

Elektromagnetische ID-Technologien nutzen meist indirekte künstliche Marker, auf denen der Identifikator gespeichert wird. Diese indirekten künstlichen Marker sind entweder passiv oder brauchen bei aktiver Ausführung eine Stromquelle und werden über eine elektromagnetische Datenübertragung ausgelesen [18]. Diese Marker können etwa als passive Radio Frequency Identification (RFID) [18, 19] oder Near Field Communication (NFC) [19–21] Tags aufgebracht werden, oder als aktive Marker, die Bluetooth Low Energy [22], Ultra Wide Band (UWB) [23] oder Global Positioning System (GPS) [19] zur Datenübertragung verwenden. Durch das indirekte Aufbringen muss hinsichtlich der Konsistenz beachtet werden, dass indirekte künstliche Marker anfällig für Beschädigung, Verlust und die falsche Zuordnung zu einem Objekt sind [19].

Optische ID-Technologien können künstliche oder natürliche Marker nutzen, wobei bei künstlichen Markern zusätzlich

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

zwischen indirekt und direkt aufgebrachten Markern unterschieden werden muss. So bieten Optical-Character-Recognition (OCR) [20]-Barcodes und eindimensionale (1D)-Barcodes [18, 20] nur eingeschränkte Konsistenz, wenn sie mit indirekten künstlichen Markern (zum Beispiel mit aufgeklebten Labeln) verwendet werden, da diese leicht beschädigt, verloren und falsch zugeordnet werden können. Eine Verbesserung der Konsistenz hinsichtlich Beschädigung und Verlust kann durch direkte Marker (wie etwa Lasergravur) erzielt werden [19]. Direkt aufgebrachte mehrdimensionale (2D+) Codes (zum Beispiel Data-Matrix-Codes oder QR-Codes) können die Konsistenz zusätzlich erhöhen, da die Identifikationsmerkmale redundant im Marker gespeichert werden und somit die Identität eines Objekts auch bei Teilbeschädigung des Markers ausgelesen werden kann [20].

Weiter erhöhen lässt sich die Konsistenz optischer ID-Technologien durch die Verwendung der einzigartigen Oberflächenstruktur eines Objekts als Marker. Die Oberflächenstruktur kann dafür mit einer Kamera an einem Ausschnitt eines Objekts als Fingerabdruck erfasst und in einer Datenbank als Hash-Wert abgelegt werden [21]. Wenn nun ein Objekt identifiziert werden soll, muss die entsprechende Fingerabdruckregion auf dem Objekt erneut gescannt und der erhaltene Hash-Wert mit denen in der Datenbank abgeglichen werden [22, 23]. Dies ermöglicht, Objekte markierungsfrei über ihren gesamten Lebenszyklus zu identifizieren. Die Identifikation kann selbst bei Objekten mit (teilweise) beschädigten oder weiter bearbeiteten Oberflächen gewährleistet werden [24, 25]. Bei stark veränderten (zum Beispiel korrodierten), glänzenden oder spiegelnden Oberflächen stößt die Fingerprint-Technologie jedoch an Grenzen [24]. Für solche Fälle kann die Identifikation optisch über in die Oberfläche des Objekts eingebrachte Mikro-/Nanopartikel und deren einzigartige zufällige Anordnung erfolgen [26–28].

Tabelle. Übersicht verschiedener ID-Technologien.

Kategorie	Unterkategorie	Quelle
Elektromagnetisch	Magnetkarte	[20]
	Chipkarte	[20]
	Radio Frequency Identification (RFID)	[28][18]
	Near Field Communication (NFC)	[28][18][29]
	Ultra Wide Band (UWB)	[30]
	Bluetooth Low Energy (BLE)	[31]
	Global Positioning System (GPS)	[28]
Optisch	Optical Character Recognition (OCR)	[20]
	Eindimensionale (1D) Barcodes	[20][18]
	Mehrdimensionale (2D+) Codes	[20][29]
	Fingerabdruck eines Objekts	[22][32]
	Mikro-/Nanopartikel	[33][26][27]

Auch bei der digitalen Komponente konsistenter Identifikationssysteme können technologisch verschiedene Ansätze genutzt werden. Dabei steht die digitale Absicherung der Identität und der mit ihr verbundenen Informationen über das Objekt im Mittelpunkt. Zu diesem Zweck können verschiedene Architekturen (**Bild**) zum Einsatz kommen:

1. Zentrale Architektur: In diesen Architekturen gibt es eine zentrale Instanz, die die Erstellung der Identitäten und die gleichzeitige Sicherstellung der Eindeutigkeit bestehender Identitäten übernimmt [2]:

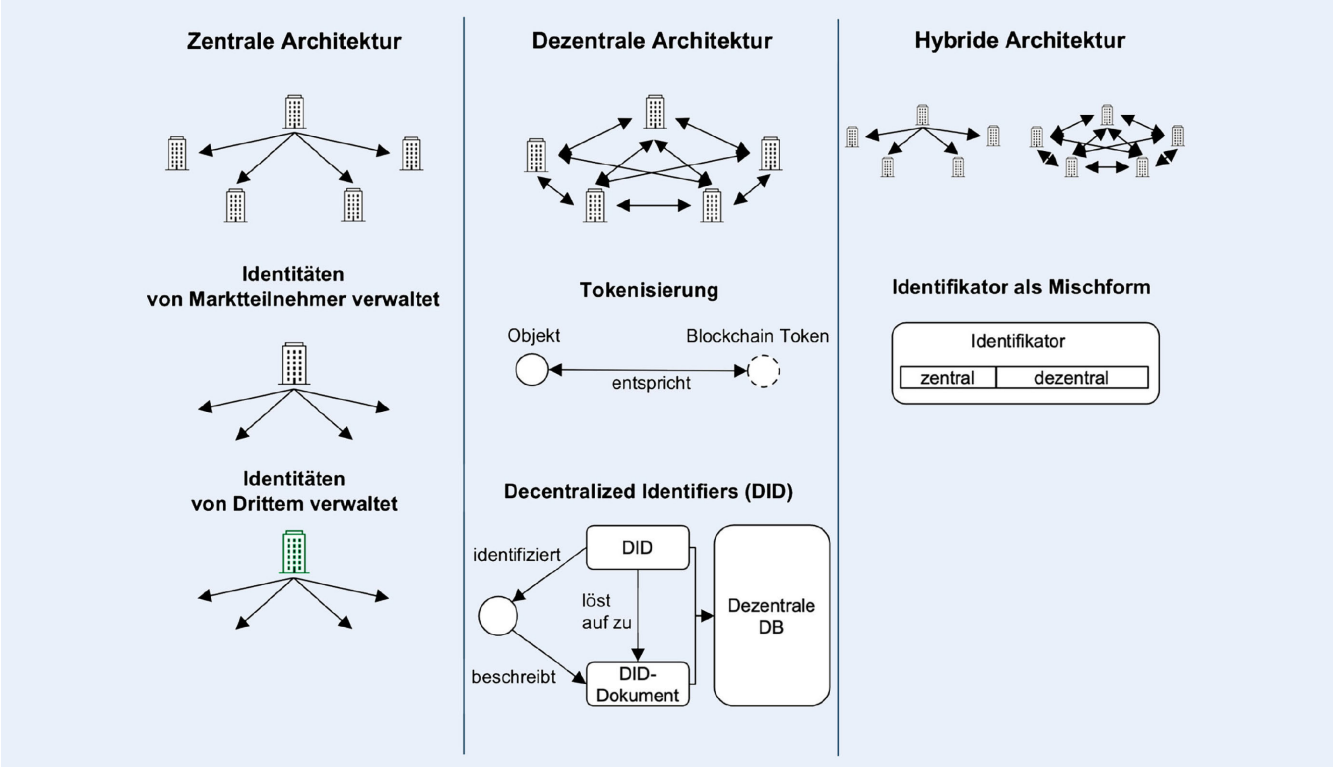

Bild. Architekturen für die digitale Absicherung von Identifikatoren. *Grafik: eigene Darstellung*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

   a. Zentral von einem Marktteilnehmer verwaltet: Einer der Marktteilnehmer übernimmt die Rolle und Aufgaben der zentralen Instanz.
   b. Zentral von einem Dritten verwaltet: Ein nicht direkt am Markt beteiligter Dritter übernimmt die Rolle und Aufgaben der zentralen Instanz. Ein Beispiel hierfür sind neben staatlichen Lösungen, Barcodes mit Global Trade Item Nummern (GTIN), die vom GS1-Netzwerk als Service vergeben werden [33].
2. Dezentrale Architektur: In diesen Architekturen werden Identitäten dezentral erstellt und deren Eindeutigkeit wird durch den Einsatz von Distributed Ledger Technology im Netzwerk abgesichert, ohne dass dabei eine zentrale Instanz beteiligt sein muss [34]:
   a. Dezentral durch Tokenisierung: Auf Blockchains können Token mit eindeutigen Identitäten als Non-fungible Tokens (NFT) erstellt werden [35]. Durch das Mapping einer solchen Identität auf das reale Produkt und das Datenmodell des Digital Product Passports werden einzigartige Identitäten dezentral sichergestellt.
   Die Problematik in kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungssystemen alle R-Strategien auf Blockchains abzubilden und zum Beispiel Demontageprozesse oder Wiederverwendungsszenarien von Komponenten oder Bauteilen abzubilden, konnte exemplarisch für die Ethereum-Blockchain gelöst werden [36]. Alle Ereignisse (Events) in Wertschöpfungsketten, die im Electronic Product Code Information Services (EPCIS)-Standard beschrieben sind [2], wie das Aggregieren oder Zerlegen von Objekten, lassen sich somit digital und konsistent abbilden.
   b. Dezentral über Decentralized Identifiers (DID): Das World Wide Web Consortium spezifiziert DIDs als verifizierbare, dezentrale digitale Identitäten [37]. Diese Architektur sieht dezentrale Identitäten (DIDs) sowie DID-Dokumente vor. Das DID-Dokument beschreibt das Objekt der Identität und kann durch Auflösen der DID eingesehen werden. DID und DID-Dokument werden häufig auf einem Distributed Ledger abgesichert. Diese Methode wurde schon im Zusammenhang mit dem Digital Product Passport vorgeschlagen [38].
3. Hybride Architektur: In diesen Architekturen bestehen Identitäten aus zentral und dezentral verwalteten Elementen. Ein Beispiel ist das URL-Schema für Webseiten. Dabei werden Domains zentral von den jeweiligen Stellen vergeben und die darauf folgenden Pfadangaben werden bei dem Aufbau der Seite dezentral festgelegt [39].

In zentral organisierten Architekturen kann die Erstellung, Zuweisung und Verwaltung aus einer Datenbank mit relativ geringem technischem Aufwand erfolgen, da hier nur der Lese- und Schreibzugriff auf eine Datenbank geregelt werden muss.

Die Anwendung in zirkulären Lieferketten bringt jedoch organisatorische Herausforderungen mit sich. So muss in der gesamten Lieferkette ein Akteur die Verwaltung der Identitäten und den damit verbunden Aufwand sowie Verantwortung übernehmen [40]. Eine Kompromittierung der zentralen Instanz, als „Single Point of Failure“, kann das gesamte System gefährden [41]. Gleichzeitig muss ein zentraler Akteur das Vertrauen aller anderen Teilnehmer in der Lieferkette genießen. Dabei spielen teilweise Vorbehalte gegenüber der Abhängigkeit von einem Partner eine Rolle [42].

Dezentrale Architekturen bieten einen technischen Ansatz, um den organisatorischen Herausforderungen von zentralen Architekturen zu begegnen. So gibt es in diesen Architekturen keinen „Single Point of Failure“ und der Aufwand sowie die Verantwortung für die Verwaltung der Identitäten wird auf alle Teilnehmer verteilt. Das Vertrauen in die Konsistenz der Identitäten basiert nicht auf Vertrauen in den Verwalter der zentralen Datenbank sondern auf der technischen Nachverfolgbarkeit und Transparenz der Daten und Transaktionen in der Datenbank [39]. Der Nachteil dezentraler Architekturen liegt im Implementierungsaufwand und den Transaktionskosten im System [41]. In hybriden Architekturen sollen Vorteile beider Ansätze durch eine Kombination beider Architekturtypen genutzt werden.

Zirkuläre Wertschöpfungssysteme organisieren sich in dezentralen, vernetzten Partnernetzwerken [6]. In solchen Netzwerken ohne zentralen Akteur mit ausreichender Marktmacht und miteinander unbekannten, wechselnden Partnern gestaltet sich die Organisation einer zentralen Instanz zur Verwaltung von Identitäten besonders schwer. Gleichzeitig birgt die Wiederverwertung von Objekten Herausforderungen für die digitale Identität. Durch die potenzielle Langlebigkeit von Objekten und deren Verwendung in verschiedenen Produkten muss eine Skalierbarkeit der Identitätenverwaltung sowie deren Portierbarkeit in andere Systeme sichergestellt werden. Dezentrale Digital-Ledger-Technologien bringen eine höhere technische Komplexität und Transaktionskosten mit sich und sind somit nur eingeschränkt skalierbar. Daher bietet sich eine Kombination beider Ansätze in einer hybriden Architektur an.

4 Fazit

Die Nachverfolgbarkeit von Objekten in komplexen, fragmentierten Lieferketten, vor in kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungsnetzwerken, erfordert Identifikationssysteme, die über den gesamten Lebenszyklus von Objekten hinweg konsistent bleiben. Dafür müssen die innerhalb des Identifikationssystems verwendeten Marker sowie die über Identifikatoren verknüpften digitalen Identifikationsinformationen Objekte durchgängig und eindeutig identifizierbar machen. Vor dem Hintergrund kreislaufwirtschaftlicher Wertschöpfungsnetzwerke, in denen Objekte mehrere Lebenszyklen in verschiedenen Produkten durchlaufen, ergeben sich deshalb sowohl physische als auch digitale Herausforderungen an die konsistente Verknüpfung von Markern, Identifikatoren und Identifikationsinformationen.

Technische Lösungsansätze zur Verknüpfung von Markern und Identifikatoren zeigen besonders in der Kombination aus natürlichen Markern und einer optischen Identifikation Konsistenzpotenzial. Bei der digitalen Verwaltung der Identitäten sind entsprechend der dezentralen Organisation von kreislaufwirtschaftlichen Wertschöpfungssystemen, dezentrale und hybride Architekturen geeignet, eine konsistente Identifikation zu gewährleisten.

Weitere Arbeiten müssen diese technologischen Ansätze als zusammenhängende Gesamtsysteme im praktischen Einsatz auf ihre Eignung als konsistente Identifikationssysteme untersuchen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Literatur

[1] Olsen, P.; Borit, M.: How to define traceability. Trends in Food Science & Technology 29 (2013) 2, pp. 142–150
[2] GS1:GS1 Global Traceability Standard. GS1's framework for the design of interoperable traceability systems for supply chains. Stand: 2017. Internet: www.gs1.org/standards/gs1-global-traceability-standard/current-standard. Zugriff am 26.04.2024
[3] 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
[4] Ivanov, D.; Dolgui, A.: Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. International Journal of Production Research 58 (2020) 10, pp. 2904–2915
[5] Santana, S.; Ribeiro, A.: Traceability Models and Traceability Systems to Accelerate the Transition to a Circular Economy: A Systematic Review. Sustainability 14 (2022) 9, #5469, doi.org/10.3390/su14095469
[6] Ellen Macarthur Foundation (ed.): Building a circular supply chain. Achieving resilient operations with the circular economy. Stand: 2023: Internet: ore.exeter.ac.uk/repository/bitstream/10871/134944/1/Building%20a%20circular%20supply%20chain.pdf. Zugriff am 26.04.2024
[7] Kirchherr, J.; Yang, N.-H. N.; Schulze-Spüntrup, F. et al.: Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. Resources, Conservation and Recycling 194 (2023), #107001
[8] Potting, J.; Hekkert, M. P.; Worrell, E. et al.: Circular economy: measuring innovation in the product chain. Planbureau voor de Leefomgeving, PBL publication number: 2544. The Hague: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency 2017
[9] Götz, T.; Berg, H.; Jansen, M. et al.: Digital product passport: The ticket to achieving a climate neutral and circular European economy? Stand: 2022: Internet: circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/cisl_digital_products_passport_report_v6.pdf. Zugriff am 26.04.2024
[10] Jensen, S. F.; Kristensen, J. H.; Adamsen, S. et al.: Digital product passports for a circular economy: Data needs for product life cycle decision-making. Sustainable Production and Consumption 37 (2023), pp. 242–255
[11] Adisorn, T.; Tholen, L.; Götz, T.: Towards a Digital Product Passport Fit for Contributing to a Circular Economy. Energies 14 (2021) 8, '2289; doi.org/10.3390/en14082289
[12] Plociennik, C.; Pourjafarian, M.; Nazeri, A. et al.: Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy. Procedia CIRP 105 (2022), pp. 122–127
[13] Pourjafarian, M.; Plociennik, C.; Rimaz, M. H. et al.: A Multi-Stakeholder Digital Product Passport Based on the Asset Administration Shell. 2023 IEEE 28th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Sinaia, Romania, 2023, pp. 1–8
[14] Kuenster, N.; Dietrich, F.; Palm, D.: Opportunities And Challenges Of The Asset Administration Shell For Holistic Traceability In Supply Chain Management. Hannover: publish-Ing 2023
[15] Ungen, M.; Louw, L.; Palm, D.: Multi-Sensor Identification Of Unmarked Piece Goods. Hannover: publish-Ing 2021
[16] Hippenmeyer, H.; Moosmann, T.: Automatische Identifikation für Industrie 4.0. Heidelberg: Springer Vieweg 2016
[17] 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
[18] Statler, S.: Barcodes, QR Codes, NFC, and RFID. In: Statler, S. (Hrsg.): Beacon Technologies. Berkeley, CA: Apress 2016, pp. 317–331
[19] Moss, C.; Chakrabarti, S.; Scott, D. W.: Parts quality management: Direct part marking of data matrix symbol for mission assurance. 2013 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2013, pp. 1–12
[20] Helmus, M.; Meins-Becker, A.; Laußat, L. et al.: Auto-ID-Systeme neben RFID. In: Helmus, M.; Meins-Becker, A.; Lauß, L. at et al. (Hrsg.): RFID in der Baulogistik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009, S. 199–220
[21] Wigger, B.; Koinzer, I.; Meissner, T. et al.: Robust and fast part traceability in a production chain exploiting inherent, individual surface patterns. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 63 (2020) #101925
[22] Wigger, B.: Inhärente Oberflächenstrukturen als Identifikationsmerkmal zur markierungsfreien Einzelteilverfolgung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2020
[23] Takahashi, T.; Kudo, Y.; Ishiyama, R.: Mass-produced parts traceability system based on automated scanning of "Fingerprint of Things". 2017 Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA), Nagoya, Japan, 2017, pp. 202–206
[24] Schmid-Schirling, T.; Förste, A.: Track4Quality – markierungsfreie Einzelteilverfolgung in anspruchsvoller Produktionsumgebung zur Prozessverbesserung und Qualitätssicherung : Schlussbericht zum Vorhaben : Projektlaufzeit: 01.12.2015–31.05.2018. Freiburg: Fraunhofer IPM, 2018
[25] Wigger, B.; Meissner, T.; Winkler, M. et al.: Label-/tag-free traceability of electronic PCB in SMD assembly based on individual inherent surface patterns. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 98 (2018) 9–12, pp. 3081–3090
[26] Ishiyama, R.; Kudo, Y.; Takahashi, T.: mIDoT: Micro identifier dot on things — A tiny, efficient alternative to barcodes, tags, or marking for industrial parts traceability. 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Taipei, 2016, pp. 781–786
[27] Kim, J.; Yun, J. M.; Jung, J. et al.: Anti-counterfeit nanoscale fingerprints based on randomly distributed nanowires. Nanotechnology 25 (2014) 15, #155303
[28] Babu, H.; Stork, W.; Rauhe, H.: Anti-counterfeiting using reflective micro structures – Based on random positioning of microstructures. 2010 OSA-IEEE-COS Advances in Optoelectronics and Micro/Nano-Optics (AOM 2010), Guangzhou, 2010, pp. 1–5
[29] Ali, R.; Liu, R.; He, Y. et al.: Systematic Review of Dynamic Multi-Object Identification and Localization: Techniques and Technologies. IEEE Access 9 (2021), pp. 122924–122950
[30] Steffen, R.; Preißinger, J.; Schöllermann, T. et al.: Near Field Communication (NFC) in an Automotive Environment. 2010 Second International Workshop on Near Field Communication, Monaco, Monaco, 2010, pp. 15–20
[31] Coppens, D.; Shahid, A.; Lemey, S. et al.: An Overview of UWB Standards and Organizations (IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions. IEEE Access 10 (2022), pp. 70219–70241
[32] Memon, S.; Memon, M. M.; Shaikh, F. K. et al.: Smart indoor positioning using BLE technology. 2017 4th IEEE International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), Salmabad, 2017, pp. 1–5
[33] GS1: EAN/GTIN & Barcode. Internet: www.gs1-germany.de/ean-gtin-barcode/. Zugriff am 26.04.2024
[34] Barteková, E.; Börkey, P.: Digitalisation for the transition to a resource efficient and circular economy. OECD Environment Working Papers (2022) #192, doi.org/10.1787/6f6d18e7-en
[35] Dietrich, F.; Kuenster, N.; Louw, L. et al.: Review of Blockchain-based Tokenization Solutions for Assets in Supply Chains. Hannover: publish-Ing 2022
[36] Dietrich, F.; Louw, L.; Palm, D.: Blockchain-Based Traceability Architecture for Mapping Object-Related Supply Chain Events. Sensors 23 (2023) 3, doi.org/10.3390/s23031410
[37] World Wide Web Consortium: Decentralized Identifiers (DIDs) v1.0. Stand: 19.07.2022. Internet: https://www.w3.org/TR/did-core/. Zugriff am 26.04.2024
[38] Berg, H.; Kulinna, R.; Stöcker, C. et al.: Overcoming Information Asymmetry in the Plastics Value Chain with Digital Product Passports. Wuppertal: Wuppertal Papers 2022
[39] Babakian, A.; Huston, G.; Braun, R. et al.: Internet Identifiers: A Survey of History, Challenges, and Future Perspectives. IEEE Access (2024), pp. 51919–51941, doi.org./10.1109/ACCESS.2024.3382115. p. 1, doi.org./10.1109/ACCESS.2024.3382115
[40] Gross, T.; MacCarthy, B. L.; Wildgoose, N.: Introduction to dynamics of manufacturing supply networks. Chaos 28 (2018) 9, #93111
[41] Puhl, P.; Roloff, M.; Märkel, C. et al.: Digitale Identitäten als Fundament des Web 3.0. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 503, Bad Honnef: WIK 2023. Internet: https://hdl.handle.net/10419/280932. Zugriff am 26.04.2024
[42] Pauer, A.; Nagel, L.; Fedkenhauser, T. et al.: Data exchange as a first step towards data economy. Stand: 2018: Internet: www.pwc.de/en/digitale-transformation/data-exchange-as-a-first-step-towards-data-economy.pdf. Zugriff am 29.04.2024

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Nils Künster, M.Sc.
nils.kuenster@reutlingen-university.de
Tel. +49 7121271 3164
Foto: ESB Business School

Frithjof Dorka, M.Sc.

Marco Bücheler, B.Sc.

Prof. Dr. techn. Daniel Palm

Hochschule Reutlingen
ESB Business School
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen
www.esb-business-school.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-04-42 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY