



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2023

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 21272 N

Blockchain für die Kreislaufwirtschaft: Konzeption und Evaluation Blockchain-basierter digitaler Zwillinge

Laufzeit:

01.11.2020 – 30.11.2022

Beteiligte Forschungsstelle(n):

TU Hamburg-Harburg
Institut für Logistik und Unternehmensführung

Kühne Logistics University
Hamburg

iuta.de

Schlussbericht vom 27.04.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21272 N

Thema

Blockchain für die Kreislaufwirtschaft: Konzeption und Evaluation Blockchain-basierter digitaler Zwillinge

Berichtszeitraum

01. Dez. 2020 bis 30. Nov. 2022

Forschungsvereinigung

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. - IUTA

Forschungseinrichtungen

Institut für Logistik und Unternehmensführung, Technische Universität Hamburg
Center for Sustainable Logistics and Supply Chains, Kühne Logistics University

Gefördert durch:

Forschungsthema

Lediglich 7,2 Prozent der weltweit genutzten Materialien werden in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt. Neben der steigenden Ressourcenknappheit wird auch anhand der globalen Erwärmung und zunehmenden Umweltverschmutzung deutlich, dass die derzeitige lineare Wirtschaftsweise verheerende Folgen nach sich zieht. Die Abkehr vom „take – make – dispose“ (produzieren – nutzen – entsorgen)-Gedanken und der Übergang zur Kreislaufwirtschaft sind folglich wichtiger denn je, um den genannten globalen Herausforderungen zu begegnen. (Circle Economy 2023)

Entsprechend wird das Konzept der Kreislaufwirtschaft international durch Politik, Wirtschaft und Gesellschaft unterstützt und vorangetrieben. Um nur einige Beispiele zu nennen, hat Deutschland 2012 das Kreislaufwirtschaftsgesetz eingeführt, das das Ziel hat, Wertstoffkreisläufe zu schließen und Abfälle umweltverträglich zu bewirtschaften (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2022a). Zudem hält der Circular Economy Action Plan der Europäischen Kommission Maßnahmen zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft fest (Europäische Kommission 2022).

Die Kreislaufwirtschaft zielt auf eine ganzheitliche, zirkuläre Wirtschaftsweise ab, bei der die Verwendung von Primärrohstoffen sowie Entstehung von Abfällen minimiert und alle verwendeten Materialien so lange wie möglich im Wirtschaftskreislauf geführt werden sollen. Produkte bzw. Materialien, die nicht biologisch abbaubar sind, sollen dabei durch Reparaturen, Wiederverwendung (Sharing und Reusing) sowie Wiederaufbereitung und – sofern dies nicht möglich ist – Recycling im Kreislauf zirkulieren. Zudem wird ein langlebiges und nachhaltiges Produktdesign angestrebt, welches das Reparieren und Recyceln erlaubt. (Circle Economy 2023; Ellen MacArthur Foundation 2015)

In der Praxis scheitert eine effektive Kreislaufführung von Produkten und Materialien vor allem an der unzureichenden Verfügbarkeit von Produktinformationen entlang der Supply Chain (Jäger-Roschko und Petersen 2022; Plociennik et al. 2022; Lawrenz et al. 2021; Walden et al. 2021; Fennemann et al. 2018). Besonders das Ende der Produktnutzung durch den Konsumenten ist hierbei ein kritischer Zeitpunkt, da damit im Regelfall der Großteil der Informationen zum Produkt verloren geht. Für eine effiziente Reparatur müssen zum Beispiel der Zugriff auf Anleitungen zur (De-)Montage des Produkts gewährleistet und Informationen zu dessen Einzel- und Ersatzteilen verfügbar sein. Für die Rückgewinnung von Rohstoffen wiederum ist es erforderlich, dass Materialzusammensetzung, Werkstoffe und möglicherweise enthaltene Schadstoffe bekannt sind. Ohne diese ursprünglich dem Hersteller bekannten Informationen wird die effektive Kreislaufführung erschwert (Lawrenz et al. 2021; Fennemann et al. 2018; Kurilova-Palisaitiene et al. 2015).

Einen möglichen Lösungsansatz, um Produktinformationen digital abspeichern, aktualisieren und abrufbar machen zu können, stellen digitale Zwillinge dar (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2022b; Preut et al. 2021). Als digitales Abbild eines physischen Objekts oder Produkts kann ein digitaler Zwilling beispielsweise die Herkunft und Zusammensetzung des Produkts detailliert nachvollziehbar machen. Dadurch kann ein vereinfachter Zugang zu relevanten Produktinformationen über den gesamten Lebenszyklus geschaffen werden. Die Konzeption eines digitalen Zwillinges ist jedoch nicht trivial. Darüber hinaus ist eine digitale Infrastruktur, die relevante Informationen unabhängig vom Hersteller und anderen

unternehmerischen Interessen zuverlässig, korrekt und dauerhaft zur Verfügung stellt, erforderlich. Für die technologische Umsetzung eines digitalen Zwillings könnte folglich die Blockchain-Technologie als eine Möglichkeit herangezogen werden (Chen und Huang 2021). Eine Blockchain stellt einen diskriminierungsfreien, strukturierten und dezentralen Datenspeicher bereit, der nicht von einer zentralen Entität bewirtschaftet wird (Hackius und Petersen 2017). Die Potenziale dieser Technologie konnten in den letzten Jahren nicht nur für den Informationsaustausch allgemein, sondern insbesondere auch für den Themenkomplex Nachhaltigkeit gezeigt werden (Omar et al. 2022; Jović et al. 2020). Gemeinsam schaffen beide Konzepte – der digitale Zwilling und die Blockchain – eine vertrauenswürdige und gleiche Datenbasis für alle beteiligten Akteure in der Kreislaufwirtschaft. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist dies interessant, da leicht Abhängigkeiten von größeren Plattformbetreibern entstehen können.

Ausgehend davon ist das Forschungsprojekt “Blockchain für die Kreislaufwirtschaft – Konzeption und Evaluation Blockchain-basierter digitaler Zwillinge” entstanden. Im Rahmen des Projekts war es das Ziel, digitale Zwillinge auf Basis der Blockchain-Technologie zu konzipieren und hinsichtlich des Nutzens für Supply Chains der Kreislaufwirtschaft zu evaluieren. Im Ergebnis sollen KMU fallbezogen bewerten können, wie Blockchain-basierte digitale Zwillinge aufzubauen sind und welche technischen Umfänge, welche ökonomischen und ökologischen Effekte und strategischen Implikationen eine Nutzung nach sich zieht. Folgende Forschungsfragen sollten beantwortet werden:

1. Welche Anwendungsfälle für Blockchain-basierte digitale Zwillinge in Supply Chains der Kreislaufwirtschaft existieren bereits und wie sind sie zu charakterisieren?
2. Wie müssen digitale Zwillinge auf Blockchain-Basis konzeptioniert sein, damit sie für KMU der Kreislaufwirtschaft einen Mehrwert bieten? Welche Produkte sind dafür geeignet?
3. Welche strategischen Auswirkungen hat der Einsatz digitaler Zwillinge für KMU in einer Supply Chain der Kreislaufwirtschaft?

In sieben eng miteinander verknüpften Arbeitspaketen werden im Folgenden schrittweise die Forschungsfragen beantwortet. Die Übersicht der Arbeitspakete ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete



Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Aktualisierung des Standes der Praxis und Forschung Supply Chains der KrW (Kreislaufwirtschaft)

Ziel des Arbeitspakets war es, den Stand der Praxis und Forschung aufzuarbeiten und mit Blick auf die Projektziele zu vertiefen. Dafür wurde ein umfassender Datensatz aus den wissenschaftlichen Datenbanken „Web of Science“, „Science Direct“ und „IEEEExplore“ analysiert. Über die Datenbanken hinaus wurden themenverwandte oder inhaltlich passende Veröffentlichungen ergänzt (sog. „snowballing“). Darüber hinaus wurden in der Praxis existierende Projekte identifiziert, diese werden entsprechend ihrer Anwendungsbereiche jeweils tabellarisch dargestellt.

Hinsichtlich des Projektziels sind vor allem Publikationen zum „digitalen Zwilling“ („digital twin“) relevant. Hierbei handelt es sich um ein digitales Abbild eines physischen Objekts oder Produkts. Digitale Zwillinge stellen einen geeigneten Lösungsansatz dar, um beispielsweise Informationen zu Produkten digital speichern, aktualisieren und verfügbar machen zu können. Nicht sichtbare Informationen über das Objekt bzw. Produkt, wie bspw. Materialzusammensetzungen, Bauanleitungen, o.ä., werden dabei in digitaler Form gespeichert und sind digital, und im Idealfall auch maschinell, verarbeitbar. Das physische Objekt wird mit einer geeigneten Identifikation gekennzeichnet, um eine Zuordnung zum digitalen Abbild zu erlauben. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz 2022b; Lege et al. 2022)

Blockchain wird in diesem Zusammenhang als eine mögliche Schlüsseltechnologie, insbesondere für die Kreislaufwirtschaft, angesehen (Böckel et al. 2021; Kouhizadeh et al. 2020). Ziel ist es, dabei vor allem die Informationsflüsse nicht nur über die Supply Chain, sondern für den gesamten Lebenszyklus hinweg zu erhalten. Hinsichtlich dieser digitalen Informationsflüsse und auf Kreislaufwirtschaft ausgerichteter Supply Chains zeigen sich in der Literatur sechs aktuelle Anwendungsbereiche, diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Der **unternehmensübergreifende Austausch von Informationen (1)** erfährt noch immer Hemmnisse aufgrund von Ängsten der Supply Chain-Akteure, ihren Wettbewerbsvorteil zu verlieren. Darüber hinaus findet kein effektiver Informationsaustausch statt, wenn Unternehmen keine direkte Handelsbeziehung haben (Wang et al. 2019). In der Literatur wird vermehrt auf den unzureichenden Informationsaustausch in der Kreislaufwirtschaft hingewiesen (Jäger-Roschko und Petersen 2022; Plociennik et al. 2022; Lawrenz et al. 2021; Walden et al. 2021). Nippraschk et al. (2022) und Lawrenz et al. (2021) stellen zudem mögliche Gründe dafür heraus und betonen die Bedeutung von Datenbanken oder Plattformen zum Informationsaustausch.

Blockchain-basierte Kommunikation kann den Barrieren entgegenwirken und bietet eine Möglichkeit, Informationen vereinfacht auszutauschen ohne dass diese später verändert werden können (Wang et al. 2019). Es verbleibt auch bei Blockchain-Lösungen die Möglichkeit, dass inkorrekte Daten aufgenommen werden. Es ist deshalb vorteilhaft, die Blockchain-Lösung mit IoT-Geräten zu kombinieren (Zhang et al. 2020; Kouhizadeh und Sarkis 2018). Dies erlaubt eine verbesserte Verifikation – und steuert auch gezieltem Streuen von falschen Daten gegen (Zhang et al. 2020; Kouhizadeh und Sarkis 2018). Der Informationsaustausch wird allerdings auch durch die Skalierbarkeit der Datenübertragungsmethoden beeinflusst; die Verfügbarkeit moderner Übertragungstechnologien (e.g., Verfügbarkeit der fünften Generation (5G) des Mobilfunks oder Glasfaseranschlüsse) können dieses Problem in Zukunft zumindest teilweise lindern. In Tabelle 1 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen diese Problematik zu adressieren.

Tabelle 1: Beispielprojekte für den unternehmensübergreifenden Austausch von Informationen

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Sustainblock	Circular Tree bietet mit seiner Plattform Sustainblock eine Möglichkeit, unternehmensübergreifend Materialinformationen zu teilen, um Transparenz und Nachverfolgbarkeit zu schaffen und dadurch eine optimale Verwertung von Materialien zu ermöglichen. Circular Tree: circulartree.com/projects/sustainblock
SundaHus	Als ein unabhängiges Service- und Beratungsunternehmen verfolgt SundaHus das Ziel, den Immobilienbau umweltfreundlich zu gestalten. Dazu bietet das Unternehmen ein webbasiertes System an, welches strukturierte Umweltdaten zu Baumaterialien den Beteiligten der Supply Chain zur Verfügung stellt. SundaHus: sundahus.se/press/#/news/reassessments-of-products-in-sundahus-material-data-427245
Recircula Solutions	Recircula Solutions nutzt IoT-fähige Sensoren in Mülltonnen und nutzt die gewonnenen Informationen mit Hilfe einer Software zur Routenoptimierung. Dies ermöglicht einen hohen Grad an Transparenz in der Abfallentsorgung und führt dadurch zu einem bedarfsorientierten Einsatz von Ressourcen. Recircula Solutions: recirculasolutions.com/smart-waste/
Chemometric Brain	Von Blendhub wird die Plattform Chemometric Brain angeboten, auf welchen Qualitätsstufen von Lebensmitteln ausgetauscht werden können, wodurch der Qualitätssicherungsprozess beschleunigt wird. Blendhub: blendhub.com/chemometric-brain/

In den Artikeln wird hinsichtlich des lebenszyklusübergreifenden Austausches von Informationen ein Augenmerk auf den Anwendungsfall **Reverse Logistics (2)** gelegt. Im Fokus steht dabei die Wiederverwendung oder -aufbereitung von Materialien und Rohstoffen (Böckel et al. 2021). Besonders am Lebensende der Produkte kann, laut den Autoren, eine transparente Aufzeichnung hilfreich sein (Sarkis et al. 2021; Hanafi et al. 2008). Beispielsweise kann Gefahrgut überwacht und so eine sichere Rückführung gewährleistet werden (Bekrar et al. 2021). Besonders interessant können in diesem Rahmen Anreizsysteme auf Basis von Blockchain-basierten Smart Contracts sein. Mit Hilfe dieser könnten sich auch kleine Zahlungen, bspw. für die korrekte Entsorgung oder Rückführung, automatisieren lassen (Bekrar et al. 2021; Kouhizadeh et al. 2019). In Tabelle 2 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen, diesen Anwendungsbereich zu adressieren. Ein Sonderfall dieser Reverse Logistics ist die **Aufbereitung von Schrott oder Elektroschrott (WEEE) (3)**. Digitale Zwillinge können die Stückliste (Bill of Materials) und Verweise auf Bauanleitungen eines WEEE-Produktes speichern und diese Informationen so an alle Akteure in der Supply Chain weitergeben. Prozesse können dadurch effizienter werden bzw. überhaupt erst wirtschaftlich und technisch sinnvoll werden (Pehlken und Baumann 2020; Rocca et al. 2020). In Tabelle 3 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen diesen Anwendungsbereich zu adressieren.

Tabelle 2: Beispielprojekte für den Anwendungsfall Reverse Logistics

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Live Love Recycle	Live Love Recycle ist eine App eines in Beirut ansässigen Startups, welche Individuen dabei unterstützt, in Ländern ohne Müllsammlungssysteme Müll zu sammeln und zu recyceln. Live Love Recycle: https://liveloverecycle.tilda.ws
Plastship	Plastship bildet eine Plattform, auf der Sekundärrohstoffe angeboten und vermittelt werden. Dabei werden detaillierte Materialinformationen, wie die Qualitätsstufe, Herkunft und Recyclingfähigkeit, angegeben, was eine gezielte Suche ermöglicht. plastship GmbH: plastship.com
RubiconConnect	RubiconConnect bietet eine Plattform für Unternehmen, um Abfallströme analysieren und nachvollziehen zu können. RUBICON: rubicon.com
Cirul8	Cirul8 ist eine Software-Suite, welche dabei hilft, das Abfallmanagement zu optimieren. Dabei schafft das Startup eine Plattform, auf welcher Informationen geteilt und Reporting-Prozesse automatisiert werden können. Cirul8: cirul8.world

Tabelle 3: Beispielprojekte für WEEE

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Circulor	Mit Circulor werden auf Basis von Daten aus der Blockchain Empfehlungen für die End-of-Life Aktivitäten ausgesprochen, um die bestmögliche Verwertung zu ermöglichen. Circulor: circulor.com
Recyda	Recyda hat sich das Ziel gesetzt, mit Hilfe von Daten und Software, Unternehmen entlang der Verpackungs-Supply Chain zu besserer Recyclefähigkeit zu verhelfen. Dabei werden Informationen zur Recyclingfähigkeit verschiedener Materialien gesammelt und transparent zur Verfügung gestellt. Recyda: recyda.com
Circularise	Circularise ist ein webbasiertes System, welches Materialdaten zu Produkten hinterlegt und Akteuren der Supply Chain zur Verfügung gestellt wird. Um den Wettbewerbsvorteil zu wahren, können Daten neben der freien Zugänglichkeit auch geschützt abgelegt werden. Die Software erlaubt dann, nur durch gezielte Fragen zu erfahren, ob bestimmte Gefahrenstoffe in dem Produkt enthalten sind. Circularise: circularise.com

Eine ähnliche Fragestellung wie beim WEEE gibt es im Rahmen **industrieller Symbiosen (4)**. Vorranging in Industrieparks werden dabei Abfallprodukte einer Herstellungsstätte als Ressource für andere Industrieprozesse verwendet (MIT Center for Transportation & Logistics (CTL) 2020). Idealerweise werden auch die Abfallprodukte dieses Folgeprozesses wieder weiter genutzt und

so ein effektiver Kreislauf gebildet (Yu et al. 2021). Die Informationslücke bezüglich möglicher Produktverfügbarkeiten, -qualitäten und -quellen ist dabei eine beständige Problemstellung und Barriere zur erfolgreichen Umsetzung (Henriques et al. 2021; Golev et al. 2015). Eine Onlineplattform könnte diese Informationslücke schließen und kann beispielsweise auf der Blockchain-Technologie basieren (Mastos et al. 2021; Kouhizadeh et al. 2020; Bakogianni et al. 2019). In Tabelle 4 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen diesen Anwendungsbereich zu adressieren.

Tabelle 4: Beispielprojekte für Industrielle Symbiosen

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Zero Brine Platform	Für die Verwertung von z.B. Solewasser in der Abwasser Industrie bietet Online Brine Platform ein System an, bei denen Nachfrage und Angebot vermittelt werden. Zero Brine: zerobrine.eu
Excess Materials Exchange	Excess Materials Exchange bietet ebenfalls die Möglichkeit Materialien zu vermitteln und mit Hilfe von Blockchain Technologie Vertrauen und Überprüfbarkeit zu ermöglichen. Excess Materials Exchange: xcessmaterialsexchange.com

Im Rahmen einer „**Sharing Economy**“ (5) werden unternehmensübergreifend Anlagen, Werkzeuge, Geräte oder Maschinen geteilt und unausgelastete Zeiträume so reduziert werden (Indorf 2020). Blockchain ist hier besonders geeignet, da diese ggf. direkt mit der Blockchain-Lösung interagieren und so Nutzungsdaten schreiben sowie Bezahlungen erhalten können. Zusätzlich kann eine Blockchain-Lösung vertrauensbildend wirken, da Transparenz (bspw. über Qualität, Nutzungsmenge, Kosten) geschaffen wird (Bekrar et al. 2021; Esmaeilian et al. 2020; Kouhizadeh et al. 2020; Kouhizadeh et al. 2019). In Tabelle 5 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen diesen Anwendungsbereich zu adressieren.

Tabelle 5: Beispielprojekte für Sharing Economy

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Van2Share	Van2Share ist eine Softwarelösung, welche es ermöglichen soll, seine gewerbliche Fahrzeugflotte flexibel mit anderen Unternehmen zu teilen, um die Auslastung zu erhöhen Van2Share: van2share.wire-dev.de
Floow2	Floow2 ist eine Softwarelösung, welche es ermöglichen soll, technische Ausrüstungsgegenstände, Personal und Fähigkeiten, gemeinsam zu nutzen. Die Plattform zielt dabei vor allem auf den unternehmensinternen Gebrauch ab. Floow2: floow2.com
Rheaply	Rheaply bietet einen Marktplatz für Assets. Ziel ist es, diese möglichst lange zu nutzen und einen besseren Überblick über die Auslastung und den möglichen Weiterverkauf zu erhalten. Zielgruppe dieses Projektes sind hauptsächlich Unternehmen und Verwalter von diesen Assets. Rheaply: rheaply.com

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
Too Good To Go, ResQ Club Oy, Olio	Diese Anbieter betreiben eine Plattform für den Weiterverkauf von Lebensmitteln an Konsumenten. Unternehmen (bspw. Restaurants, Supermärkte oder Bäcker) können so Lebensmittel abverkaufen, welche sonst zeitnah entsorgt werden müssten. Too Good To Go: toogoodtogo.de ResQ Club Oy: resq-club.com OLIO Exchange: olioex.com
Scooter/Bike/Car Sharing	Im Bereich des Individualverkehrs gibt es mittlerweile eine große Zahl von Anbietern, welche Verkehrsmittel, wie bspw. Fahrräder, Motorroller oder PKW vermieten. Es existieren dabei viele verschiedene Zeit- und/oder entfernungs-basierte Abrechnungsmodi sowie unterschiedliche Vorgehensweisen hinsichtlich der Rückgabe (stationsbasiert, „free-floating“ und Mischformen).

Die in diesen Prozessen generierten Daten erlauben **datengestützte Prognosen und Analysen auf Basis des digitalen Zwillings (6)** (Lu et al. 2020). Durch die Nutzung in Modellierungen und zur Verbesserung von Simulationen lassen sich so Optimierungspotenziale für die betroffenen Prozesse heben; dies hat nicht nur einen ökonomischen Nutzen, sondern erlaubt auch die Verbesserung der Zirkularität von Supply Chains über gesamte Produktlebenszyklen. Beispielhaft ist dies an BIM¹-Daten nachzuvollziehen: Hier werden von Architekturbüros Materialdaten für Gebäude hinterlegt, welche später ein optimiertes Recycling oder eine Wiederverwendung ermöglichen sollen (Akanbi et al. 2019). In Tabelle 6 werden einige aktuelle Beispielprojekte aufgezeigt, welche versuchen diesen Anwendungsbereich zu adressieren.

Tabelle 6: Beispielprojekte für datengestützte Prognosen und Analysen auf Basis des digitalen Zwillings

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
RAUPE	Recycling of Automotive Parts Evaluator (RAUPE) ist eine web-basiertes Softwareanwendung, welche Autobesitzern, Montagebetrieben und Werkstätten eine Entscheidungshilfe zur Weiterverwendung der Teile bereitstellen soll. Auf Basis der hinterlegten Daten zu dem Teil soll die Anwendung helfen zu entscheiden, ob das Ersatzteil weiterverwendet, aufbereitet oder recycelt werden sollte (Pehlken et al. 2019). Bis jetzt ist die Anwendung allerdings nur prototypisch verfügbar: https://uol.de/cascadeuse/raupe

¹ Building Information Modeling

Projektbezeichnung	Kurzbeschreibung
GE Research & Baker Hughes	<p>GE Research und Baker Hughes verwenden einen Digitalen Zwilling, um den Bau eines Turbogenerators für ein kasachisches Ölfeld zu optimieren. Durch das digitale Abbild des fertigen Produkts können Prozesse in der Supply Chain aufeinander abgestimmt und Kosten reduziert werden. Auch die Dauer von Prozessen reduziert sich. Das Projekt zeigt die Eignung von Digital Twins auch für hochgradig komplexe Produkte. Die Partner beschreiben das System in einer Online-Pressemittteilung: https://www.ge.com/news/reports/seeing-double-digital-twins-make-ge-baker-hughes-supply-chain-innovators</p>

Arbeitspaket 2: Aktualisierung des Standes der Praxis und Forschung zu Blockchain

Im Fokus des zweiten Arbeitspakets stand die Aufbereitung des Standes der Praxis und Forschung im Themenfeld Blockchain. Ziel war es außerdem, auch unabhängig von Blockchain zu überprüfen, ob ähnliche Umsetzungen digitaler Zwillinge aus verwandten Bereichen analog im Rahmen des Projekts genutzt und übertragen werden können. Darüber hinaus beinhaltete das zweite Arbeitspaket die Gegenüberstellung der infrage kommenden Blockchain-Implementierungen und alternativen kryptografischen Speichersystemen. In der Folge wird zunächst auf ähnliche Umsetzungen digitaler Zwillinge und anschließend auf Blockchain eingegangen.

Ähnliche Umsetzung digitaler Zwillinge

Die bedarfsgerechte Bereitstellung von Informationen über lange Nutzungszeiträume und über Nutzergruppen hinweg stellt auch in Wirtschafts- und Gesellschaftsbereichen abseits der Kreislaufwirtschaft eine Herausforderung dar, die zunehmend durch die Nutzung digitaler Zwillinge oder verwandter Konzepte adressiert wird. Eine Ausprägung dieses Trends stellen Unternehmen dar, welche die eigenen Produkte mit Identifikationsmerkmalen wie QR-Codes oder NFC-Tags versehen, um ihren Kunden beispielsweise über eine App Produktinformationen zur Verfügung zu stellen. Konkrete, als „Digitale Produktakte“ (Schmalz GmbH 2022) oder „Digitale Identität“ (Digital Connection 2019) bezeichnete Implementierungen dieses Konzepts zielen jedoch ausschließlich auf das Einsehen von Informationen ab, erlauben aber nicht das Fortschreiben oder Hinzufügen von Daten durch Nutzende oder weitere Marktteilnehmer. Die Übertragbarkeit solcher Implementierungen auf die Kreislaufwirtschaft ist somit begrenzt, da wichtige Features wie eine unternehmensübergreifende Bereitstellung und Nutzung von Produktinformationen und somit entsprechende Schnittstellen nicht oder nur sehr eingeschränkt vorgesehen sind.

Eine andere Ausprägung stellt das Konzept der elektronischen Krankenakte im Gesundheitswesen dar, welche die sichere digitale Bereitstellung medizinischer Daten ermöglichen soll. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Nutzer (Ärzte, Patienten, Apotheken, Krankenkassen, ...) ähneln die Anforderungen an die technische Infrastruktur in gewisser Weise denen der Kreislaufwirtschaft. Sie unterscheiden sich vor allem in der Sensibilität der Daten. Hier werden sowohl zentral verwaltete Cloud-Speicher (Bundesministerium für Gesundheit 2021) als auch verteilte Speicherlösungen (ELGA 2022) eingesetzt. In Estland werden nicht nur Gesundheitsdaten, sondern darüber hinaus staatliche Identifikationsmerkmale wie bspw. ID-Cards in einer Blockchain-basierten Datenbank (e-Estonia 2022) verschiedenen Nutzern zur Verfügung gestellt. In Deutschland existiert derzeit ein Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit der Charité (Forschungszentrum Informatik Karlsruhe 2022), welches den Einsatz der Blockchain-Technologie zur Bereitstellung von Gesundheitsdaten untersucht. Diese Entwicklungen sind gegebenenfalls auf digitale Zwillinge für die Kreislaufwirtschaft übertragbar und sollten weiter beobachtet werden.

Blockchain-Technologie

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Blockchain-Technologie und verwandte Systeme, ihre Eignung für digitale Zwillinge in der Kreislaufwirtschaft und verschiedene Implementierungen von Blockchain betrachtet.

Blockchain und verwandte Systeme

Initial entwickelt wurde die Blockchain Technologie im Rahmen des Bitcoin-Whitepapers (Nakamoto 2008). Die Blockchain ist eine Datenbank, welche dezentral, verifizierbar sowie unveränderbar ist (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik 2019, S. 2; Treiblmaier 2018, S. 547; Hackius und Petersen 2017). Die Netzwerkknoten innerhalb eines Peer-to-Peer-Netzwerks speichern Informationen in Datenblöcken. Diese Blöcke werden redundant im Netzwerk gespeichert und von allen Knoten im Rahmen eines Konsensalgorithmus validiert (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik 2019, S. 2; Tapscott und Tapscott 2016). Da ausschließlich auf Validität geprüfte Blöcke in die Blockchain eingegliedert werden und jeder Block eine kryptographische Referenz auf den vorherigen Block beinhaltet, ist eine Manipulation oder Veränderung der Blockchain nahezu unmöglich (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik 2019, 14f.; Hackius und Petersen 2017). Entscheidend ist an dieser Stelle die verteilte, redundante Prüfung durch die Teilnehmer. Diese Prüfung bedeutet, dass die Teilnehmer sich nicht auf einen zentralen Betreiber des Systems verlassen müssen. Das System wird im Gegenteil direkt durch die Teilnehmer betrieben. Auf diese Weise entsteht ein dezentrales System (Swan 2015). Ein weiterer entscheidender Bestandteil der Blockchain ist die Authentifizierung der Teilnehmer durch eine Public-Private-Key-Infrastruktur (Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik 2019, 157f.). Jeder Transaktion in der Blockchain-Datenbank ist ein Absender (public key) zugeordnet, der die Transaktion signieren muss (private key). Diese Signaturen können aufgrund ihrer technischen Natur im Netzwerk verifiziert werden, ohne dass der tatsächliche Eigentümer der Schlüssel bekannt ist (Tapscott und Tapscott 2016).

Die Blockchain-Technologie kann in einer Vielzahl von Kontexten Anwendung finden. Ein erster Anwendungsfall spiegelt sich im Tracking und Tracing bzw. der Nachverfolgung von Produkten wieder (Batwa und Norrman 2020; Kim und Laskowski 2018). Dies wird insbesondere dadurch gewährleistet, dass die Transaktionen im Netzwerk für alle teilnehmenden Unternehmen transparent einsehbar sind (Wang et al. 2019). Die Nachverfolgung von Lebensmitteln (Baralla et al. 2021; Caro et al. 2018) und Pharmaprodukten (Musamih et al. 2021; Bocek et al. 2017) wird bereits in ersten Systemen umgesetzt.

Entscheidend für den Einsatz der Technologie ist allerdings letztlich nicht die Frage, ob die Blockchain für den jeweiligen Zweck (nur) geeignet ist, sondern ob die Blockchain tatsächlich die beste Lösung für das vorliegende Problem darstellt. Tabelle 7 zeigt die relevanten Eigenschaften von Blockchain und konkurrierenden Technologien, die ebenfalls zur Speicherung von Daten in Computernetzwerken verwendet werden können. Konkret verglichen werden öffentliche und private Blockchains mit dem InterPlanetary File System (IPFS), Cloud-Speichern und traditionellen On-Premise-Systemen. Dargestellt wird dort für jede Technologie, wer die Technologie anbietet, wie Zugriffsbeschränkungen verwaltet werden, wo die Daten tatsächlich gespeichert werden, wer die Kosten trägt, und inwiefern die Informationen langfristig verfügbar sind.

Tabelle 7: Gegenüberstellung von Blockchain und konkurrierenden Technologien

Eigenschaft	Technologie				
	On-Premise	Cloud	IPFS	Blockchain Public	Blockchain Private
Anbieter	Quell-Unternehmen	Spezialisierter Anbieter	keiner	keiner	Abhängig von der Konfiguration
Zugriffsbeschränkung	Zentral verwaltet	Zentral verwaltet	Keine	Keine	Zentral verwaltet
Datenspeicher	Zentral	Verteilt	Verteilt	Verteilt	Verteilt
Kostenträger	Quell-Unternehmen	Quell-Unternehmen	Knotenbetreiber, für ihren Knoten	Knotenbetreiber, für ihren Knoten	Abhängig von der Konfiguration
Langfristige Verfügbarkeit	Abhängig vom Quell-Unternehmen	Abhängig vom Quell-Unternehmen	Solange eine Partei die Daten speichert	Solange das Netzwerk Teilnehmer hat	Abhängig von der Konfiguration

On-Premise- und Cloud-Systeme sind im Kontext von Blockchain die strukturell einfachsten der verschiedenen Angebote. Bei On-Premise-Systemen speichert ein Unternehmen die anfallenden Informationen auf einem eigenen Server. Das Unternehmen wird in der Tabelle als Quell-Unternehmen bezeichnet. Dieses Unternehmen regelt den Zugang zu den Informationen, trägt die Kosten und entscheidet darüber, wie lange die Informationen gespeichert werden. Eine Speicherung in klassischen Cloudsystemen unterscheidet sich bereits deutlich von diesem Modell. Das Quell-Unternehmen tritt hier nur noch als Auftraggeber auf; die Speicherung erfolgt durch einen Anbieter, der den Zugang zu den Informationen regelt. Die Informationen werden häufig verteilt an verschiedenen Orten gespeichert. Die Speicherung ist in diesem Kontext eine Dienstleistung und wird fortgesetzt, solange das beauftragende Unternehmen die Kosten trägt (Chowdhury et al. 2018).

IPFS greift den Gedanken der räumlich verteilten Speicherung von Informationen auf und verteilt diese auch über Organisationsgrenzen hinweg. Informationen sind grundsätzlich für alle interessierten Parteien verfügbar. Diese Parteien können ebenfalls Teil des IPFS-Netzwerks werden und die Informationen anderen zur Verfügung stellen (IPFS 2022). Die langfristige Verfügbarkeit ist damit nicht mehr von einzelnen Parteien oder deren Finanzierung abhängig, sondern von der Existenz von mindestens einer beliebigen Institution, die die jeweiligen Informationen speichert und die entsprechenden Kosten trägt. Ein zuständiger Verwalter des Gesamtsystems existiert nicht (Ober 2018).

Bei Blockchain-Systemen handelt es sich ähnlich wie bei IPFS um verteilte Systeme ohne Zugriffsbeschränkungen. Ein konkreter Anbieter existiert nicht. Im Unterschied zu IPFS werden hier allerdings alle Informationen von allen Teilnehmern gespeichert und die langfristige Verfügbarkeit von Informationen so verbessert. Solche Blockchain-Systeme werden als öffentliche („public“) Blockchains bezeichnet. Im Gegensatz dazu existieren auch sogenannte private Blockchains. Private Blockchains werden von einem Anbieter oder einem irgendwie gearteten Netzwerk von Partnern verwaltet. Die Partner regeln den Zugriff auf die Blockchain und verteilen Kosten und

Aufgaben auf die Betreiber der Netzwerkknoten (Viriyasitavat und Hoonsopon 2019; Chowdhury et al. 2018).

Eignung der Blockchain für digitale Zwillinge in der Kreislaufwirtschaft

Das Blink-Projekt untersucht speziell digitale Zwillinge auf Basis von Blockchain, weil die Blockchain sich für diesen Zweck besser eignet als andere Technologien. Aufgabe eines digitalen Zwillings in der Kreislaufwirtschaft ist letztendlich die Bereitstellung von Informationen in einer Bedarfssituation. Der Mehrwert eines Digitalen Zwillings entsteht aus der Bereitstellung der richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt, im gesamten Lebenszyklus des jeweiligen Produkts. Mögliche Zugriffsbeschränkungen und die langfristige Verfügbarkeit von Informationen (insbesondere im Kontext von langen Nutzungszeiträumen) sind deswegen von besonderer Bedeutung.

Entscheidend hierfür ist der Speicherort der Informationen und die Zugriffsbeschränkungen für alle Stakeholder. Diese Informationen werden über einen längeren Zeitraum hinweg von verschiedenen Stakeholdern für verschiedene Zwecke benötigt. Die Motivation der Stakeholder kann sich im Zeitverlauf ändern. Bei der Kreation des Produkts ist zunächst nur der Hersteller beteiligt, der ein möglichst attraktives Produkt für den Endkunden herstellen möchte; Reparaturbetriebe und Recycler treten erst später mit dem Produkt in Kontakt. Dabei können sich auch die Interessenlagen der Stakeholder verändern. Der Verkauf eines Neuprodukts ist für einen Hersteller zunächst interessant. Ist das Produkt kaputt, steht für viele Hersteller der Verkauf eines Neuprodukts im Vordergrund. Die Ermöglichung einer Reparatur ist dann nicht mehr im Interesse des Herstellers. Vor diesem Hintergrund sollte weder die Speicherung noch die Verwaltung von Zugriffsrechten von den wechselhaften Interessen einer einzelnen Partei abhängig sein. Die verteilte Speicherung im Rahmen einer Blockchain bietet hier klare Vorteile gegenüber anderen Lösungen. Einzig IPFS bietet ebenfalls eine verteilte Speicherung bei verschiedenen Parteien; die Datenverfügbarkeit ist bei Blockchains allerdings höher.

Implementierungen der Blockchain-Technologie

Speziell im Bereich Blockchain ist eine detailliertere Analyse der Technologie erforderlich. Aufgrund der relativen Neuartigkeit der Technologie bestehen gravierende Unterschiede zwischen den verschiedenen Implementierungen, die bei etablierten Technologien nicht in diesem Maße existieren. Die Unterscheidung zwischen öffentlichen und privaten Systemen in Tabelle 7 wird dieser Tatsache nur in begrenztem Maße gerecht. In Tabelle 8 werden deswegen verschiedene Blockchain-Implementierungen gegenübergestellt. Verglichen werden dabei die möglichen Zugangsbeschränkungen, zusätzliche Datenschutzfunktionen, die Unterstützung von Smart Contracts und die allgemeine Verbreitung des Systems.

Die verbreitete Nutzung unterscheidet sich an dieser Stelle von den anderen Eigenschaften, da sie keine immanente Eigenschaft der Blockchain-Implementierung beschreibt, sondern die Verwendung des Systems durch dritte Parteien. Diese Tatsache ist aus zwei Gründen relevant, um die Dezentralität eines Blockchain-Systems sicherzustellen. Erstens ist nur bei einer weit verbreiteten Implementierung davon auszugehen, dass mehrere verschiedene Partner entsprechend erfahrenes Personal auf dem Arbeitsmarkt anwerben können. Ist dies nicht möglich, besteht die Gefahr, dass einzelne Parteien aufgrund ihres technischen Wissensvorsprungs letztendlich eine technische Kontrolle über das System ausüben. Zweitens erfordert der Fokus auf langfristigen Betrieb von DT-Systemen in der Kreislaufwirtschaft (der für möglichst lange Produktlebenszyklen auch möglichst lang sein sollte) auch eine kontinuierliche Weiterentwicklung oder zumindest War-

tung der (potenziell) zugrundeliegenden Blockchain-Implementierung. Eine entsprechend langfristige Vorhersage ist bei einer neuen Technologie wie Blockchain schwierig (Reimers et al. 2021). Die untenstehenden Bewertungen folgen den Ergebnissen von Twenhöven et al. (2023, forthcoming).

Tabelle 8: Gegenüberstellung verschiedener Blockchain-Implementierungen

Eigenschaft	Blockchain-Implementierung				
	Bitcoin	Ethereum	Corda	HL Fabric	HL Sawtooth
Zugangsbeschränkungen	Öffentlich	Beide	Privat	Privat	Privat
Zusätzlicher Datenschutz	Keine	Keine	Ja	Ja	Ja
Smart-Contract-Unterstützung	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja
Verbreitete Nutzung	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein

Bitcoin beschreibt die öffentliche Blockchain-Implementierung, die der Bitcoin-Cryptowährung zugrundeliegt. Aufgrund der Verbreitung dieser Währung hat die Implementierung allerdings eine große Verbreitung. Sie wird vereinzelt auch für andere Zwecke eingesetzt, unterstützt allerdings weder zusätzliche Datenschutz-Features noch Smart Contracts. Für viele Zwecke ist die Implementierung deswegen nicht geeignet.

Ethereum kann als Nachfolger dieses Systems verstanden werden. Ethereum bezeichnete zunächst ebenfalls eine öffentliche Blockchain, die Smart Contracts als neue technische Möglichkeit geschaffen hat. Aufgrund der damit einhergehenden Vielseitigkeit wird Ethereum häufig auch als privates Blockchain-System eingesetzt. Ethereum selbst bietet keinen Schutz von Daten (außerhalb der Möglichkeit zum Betrieb als private Blockchain); auf Ethereum aufsetzende Frameworks ermöglichen dies allerdings teilweise (Marr 2018).

Im Gegensatz zu diesen beiden Systemen ist Corda eine rein private Blockchain speziell für Unternehmensnetzwerke unabhängig von Cryptowährungen. Corda bietet entsprechende Funktionalitäten, wird allerdings eher selten benutzt (Newton 2018). Einen ähnlichen Hintergrund haben Fabric und Sawtooth, zwei Blockchain-Systeme, die Teil der Hyperledger-Initiative der Linux Foundation sind. Beide wurden für Enterprise-Anwendungen entwickelt und unterstützen entsprechende Privatsphäre-Features und Smart Contracts (Bowman et al. 2018). Fabric ist das deutlich verbreitetere System; Sawtooth unterstützt dagegen einen flexiblen Wechsel des Consensus-Mechanismus (Olson et al. 2018).

Diese Ergebnisse werden primär im Rahmen von Arbeitspaket 5 bei der Auswahl eines geeigneten technischen Systems verwendet.

Arbeitspaket 3: Analyse und Kategorisierung geeigneter Produkte und Kreislaufwirtschafts-Ausprägungen

Ziel des Arbeitspakets war die Ableitung eines morphologischen Kastens, der es erlaubt, Produkteigenschaften als Kriterien mit verschiedenen Ausprägungen darzustellen und verschiedene Arten von Produkten den Kreislaufausprägungen zuordnen zu können. Je nach Produkt und dessen Komplexität variieren auch die Art und Anzahl der Informationen, die über einen digitalen Zwilling bereitgestellt werden. Mit diesem morphologischen Kasten kann eine Grundlage für das Entscheidungswerkzeug in Arbeitspaket 7 gebildet werden. Darüber hinaus sollten geeignete Produkte für digitale Zwillinge ermittelt werden. Die Herleitung des morphologischen Kastens erfolgte in drei Schritten: Zunächst wurden in der Literatur geeignete Quellen identifiziert und relevante Kriterien abgeleitet. Anschließend wurden diese innerhalb der Forschungsgruppe gespiegelt. In einem dritten Schritt wurden Experten aus der Praxis befragt, um die Verständlichkeit und praktische Nutzbarkeit der entwickelten Darstellung sicherzustellen.

Im Rahmen der Literaturrecherche wurde deutlich, dass bislang keine geeigneten Kategorisierungen für Produkte existieren, welche die Entscheidung, wie am Ende der Produktnutzungszeit mit Produkten weiter verfahren werden kann, unterstützen können. Ein Ansatz für denkbare Kriterien wird durch Rose et al. (1998) gegeben. Neben der Anzahl an Materialien und Komponenten sowie der funktionalen Komplexität werden auch Faktoren wie das Vorhandensein von Rücknahme- und Recyclingstellen sowie der Zugang zu Komponenten und Ersatzteilen genannt. Pozo Arcos et al. (2018) haben sich zudem mit Produktdesigneigenschaften, welche eine Kreislaufführung von Produkten ermöglichen soll, auseinandergesetzt und betonen, dass insbesondere die Geometrie von Produkten und damit zusammenhängend die Verbindungarten zwischen Komponenten in diesem Kontext relevant seien. Parajuly und Wenzel (2017) fokussieren sich auf elektrische und elektronische Geräte und nehmen eine Einteilung in intrinsische sowie extrinsische Produktattribute vor. Zu den intrinsischen gehören dabei die Funktionalität, Materialkomposition sowie Designeigenschaften, während zu den extrinsischen Attributen die erwartete Lebensdauer des Produkts sowie mögliche Wiederverkaufswerte gezählt werden. Im Kontext des Recyclings von Plastikmüll klassifizieren Faraca und Astrup (2019) nach der Polymerart und -zusammensetzung, Qualität, Farbe sowie Verunreinigungen von Plastik. Nachdem einzelne Produkteigenschaften aus der Literatur aufgegriffen und innerhalb der Forschungsgruppe diskutiert sowie ergänzt wurden, sind zudem sechs Experten zur entwickelten Produktkategorisierung im Rahmen von Workshops befragt worden. Das Sample (siehe Tabelle 9) umfasst dabei Gesprächspartner aus Unternehmen, welche im Bereich Abfallentsorgung, für die Technologieentwicklung im Hinblick auf Recyclingprozesse sowie für Reparaturen von Elektronikgeräten tätig sind. Darüber hinaus wurde im Rahmen der Logistik Management Konferenz 2021 weiteres Feedback eingeholt. Auf die Produktkategorisierung wird im Folgenden näher eingegangen.

Tabelle 9: Sample der Expertenworkshops für Arbeitspaket 3

#	Unternehmen	Position
1	Technologiedienstleister	Managing Director
2	Abfalldienstleister	stellv. Leiterin Zentralbereich Anlagentechnik
3	Instandhalter/Reparateur	Geschäftsführung
4	Abfalldienstleister	Geschäftsführung
5	Abfalldienstleister	Leitung Vertrieb / Business Development
6	Logistikdienstleister	Geschäftsführung

Morphologischer Kasten

Um entscheiden zu können, wie mit Produkten am Ende der Produktnutzungszeit weiter verfahren werden kann, wurde ein Kriterienkatalog in Form eines morphologischen Kastens entwickelt. Dies soll es ermöglichen, auf Informationen zu schließen, welche der digitale Zwilling des Produkts idealerweise abbilden sollte, um eine Kreislaufführung zu ermöglichen. Darüber hinaus dient der morphologische Kasten dazu, Produkte hinsichtlich ihrer Anforderungen an die jeweiligen Materialkreisläufe einzuordnen.

Der entwickelte morphologische Kasten wird gruppen- und zeilenweise dargestellt – für jedes Kriterium sind entsprechend mögliche zugehörige Ausprägungen aufgeführt, welche auf die zu bewertenden Produkte zutreffen können. In Tabelle 10 wird der Kriterienkatalog vollständig aufgezeigt. Im Folgenden werden die einzelnen Gruppen und die entsprechenden Kriterien erklärt.

Tabelle 10: Morphologischer Kasten

Gruppe	Kriterien	Ausprägungen					
Basisinformationen	Auflistung der einzelnen Bestandteile vorhanden	nein	Module	Einzelteile			
	Dokumente	nicht öffentlich	Montage	Reparatur	Demontage	Entsorgung	
	Gebrauchthandel	nicht geeignet	nicht bekannt	Flohmarktartig	Drittanbieter	Hersteller	
	Reparatur	nicht erforderlich	nicht möglich	Drittanbieter	Hersteller		
	Gefahrgut	nein	ja				
	Gewährleistung / Garantie	keine	gesetzliche	zusätzliche			
	Rückgabestellen zu Ende Nutzungsdauer	keine speziellen	Hersteller	Partnerunternehmen			
Material & Funktion	Materialien	1	>1				
	Materialzusammensetzung (Bill of Material) Batterien / Akkus	unbekannt / nicht öffentlich	bekannt / öffentlich	enthalten			
	Betriebsstoffe	keine Betriebsstoffe	Schmiermittel	Betriebsöle	Kraftstoffe		
	Enthält Rezyklat	nein	ja				
	Farben	1	>1				
	Fügeverfahren sind dokumentiert	nein / nicht öffentlich	auf Modulebene	auf Einzelteilenebene			
	Funktionsmechanismen	keine vorhanden	Mechanisch	Hydraulisch	elektronisch/elektrisch		

Gruppe	Kriterien	Ausprägungen				
Wartung & Upgrade	Enthält vorher genutzte Bestandteile (z.B. refurbished)	nein	Einzelteile	Module		
	Ersatzteilverfügbarkeit	keine	aus Altgeräten (refurbished)	Nachbau (Drittanbieter)	neu (Drittanbieter)	neu (Hersteller)
	Ersetzbarkeit von Einzelteilen	nein	Ersatzteil (mit Beschädigung anderer Module/Einzelteile)	Ersatzteil	Alternative mit anderer Funktionalität	serienübergreifend
	Ersetzbarkeit von Modulen	nein	Ersatzteil (mit Beschädigung anderer Module/Einzelteile)	Ersatzteil	Alternative mit anderer Funktionalität	serienübergreifend
	Verschleißbestandteile	keine	nicht spezifizierbar	spezifizierbar		
	Wartungsintervalle	keine Wartung möglich	keine Wartung notwendig	feste Intervalle	entspr. Abnutzungsgrad	

Kriteriengruppe 1: Basisinformationen

Dieser Kriteriengruppe wurden sieben Kriterien zugeordnet, welche dazu dienen, die Produkte hinsichtlich der Verfügbarkeit grundlegender Informationen zu beschreiben. Einige dieser Kriterien werden im Folgenden beispielhaft näher erläutert. Die Informationen sind größtenteils für Endnutzer interessant, da diese so einen geeigneten Weiterverwendungsweg wählen können. Das erste Kriterium lautet „**Auflistung der einzelnen Bestandteile vorhanden**“. Die zu wählenden Ausprägungen geben an, ob diese nicht, auf Modul- oder auf Einzelteil-Ebene vorhanden ist und erlaubt die Beschreibung des Produktes hinsichtlich einer vorhandenen Bestandteilliste. Detailliertere Bestandteillisten dienen im späteren digitalen Zwilling einer Zuordnung von Materialien und Austausch Kriterien bzw. -möglichkeiten.

Im Hinblick auf die Verlängerung der Produktlebenszeit ist ein wichtiges Kriterium das der **Reparatur**. Dabei mag es Produkte geben, für welche eine Reparatur nicht erforderlich ist, wie für eine Käseverpackung. Eine weitere Ausprägung des Kriteriums bezieht sich darauf, dass eine Reparatur für einige Produkte, wie z.B. Glühbirnen, nicht möglich ist. Des Weiteren können Reparaturangebote durch Drittanbieter oder den Hersteller zur Verfügung gestellt werden, was die weiteren beiden Ausprägungen des Kriteriums zum Ausdruck bringen.

Ein weiteres Kriterium bezieht sich auf die Zugänglichkeit von **Dokumenten**. Dabei ist zu erfassen, ob diese öffentlich einsehbar sind und wenn ja, ob es sich um Montage-, Demontage-, Reparatur- oder Entsorgungsdokumente handelt. Die Ausprägungen des Kriteriums „Gebrauchthandel“ lassen darauf schließen, inwiefern das Produkt für die Weiternutzung geeignet ist oder ob ein Gebrauchtwarenmarkt bekannt ist und angeboten wird, z.B. in Form eines Flohmarkts, durch einen Drittanbieter oder den Hersteller.

Kriteriengruppe 2: Material & Funktion

Die zweite Kriteriengruppe befasst sich mit den Produkteigenschaften bzw. Materialien und Funktionen. Um Produkte besser im Kreislauf halten zu können, können insbesondere Informationen zur Anzahl sowie Art der enthaltenen Materialien hilfreich sein. Dementsprechend sind die Kriterien „**Materialien**“ (ein oder mehrere Materialien) sowie „**Materialzusammensetzung (Bill of Material)**“ (unbekannt / nicht öffentlich oder bekannt / öffentlich) im Kriterienkatalog enthalten.

Das Kriterium „**Batterien / Akkus**“ mit den Ausprägungen „nicht enthalten“ und „enthalten“ ist besonders für die Entsorgung des Produkts bzw. einzelner Komponenten von Bedeutung, da Batterien und Akkus gesondert entsorgt werden müssen. Ob Betriebsstoffe im Produkt enthalten sind, wird durch das Kriterium „**Betriebsstoffe**“ erfragt. Im Falle enthaltener Betriebsstoffe wird hier zwischen Schmiermitteln, Betriebsölen sowie Kraftstoffen unterschieden, was bspw. für den Recyclingprozess entscheidend sein könnte, da Produkte unter Umständen dadurch „kontaminiert“ sind und gereinigt werden müssen.

Kriteriengruppe 3: Wartung & Upgrade

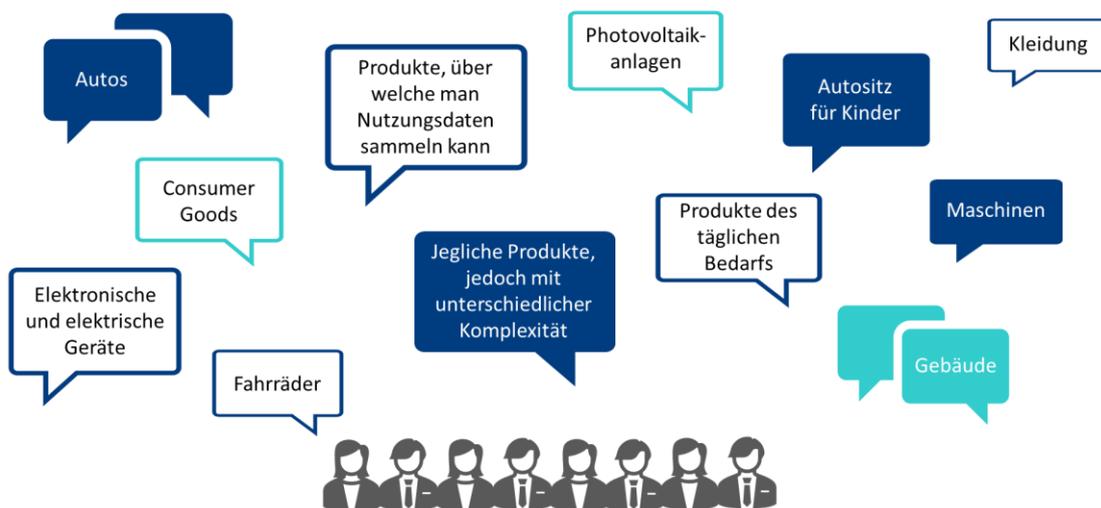
In dieser Kriteriengruppe geht es primär um mögliche Produkthanpassungen bzw. -aufbereitungen und erforderliche Maßnahmen im Sinne einer Wartung. Um Produkte weiterverwenden und somit die Lebensdauer verlängern zu können, ist das Kriterium „**Ersatzteilverfügbarkeit**“ von besonderer Bedeutung. Sofern Ersatzteile existieren, können diese verschiedener Herkunft sein: Zum einen, können Ersatzteile aus Altgeräten entnommen werden und sind damit refurbished. Zum anderen können sie jedoch auch aus einem Nachbau des Produkts stammen oder als Neuteile von Drittanbietern oder Herstellern angeboten werden.

Zudem ist im Rahmen der **Ersetzbarkeit von Einzelteilen und Modulen** zu klären, ob Ersatzteile ohne Beschädigung anderer Teile oder Module des Produkts eingesetzt werden können, das Einzelteil oder Modul durch eine Alternative mit anderer Funktionalität (z.B. Kameramodul mit anderer Megapixelzahl für ein Handy) eingetauscht oder ein Ersatzteil aus einer anderen Serie des Produkts verbaut werden kann. Ob und wenn ja, wie häufig das Produkt gewartet werden kann bzw. muss, wird durch das Kriterium „**Wartungsintervalle**“ bestimmt. Ist eine Wartung notwendig, so wird nach festen Wartungsintervallen oder einer Wartung je nach Abnutzung des Produkts unterschieden.

Geeignete Produkte für digitale Zwillinge

Über die Kategorisierung von Produkteigenschaften hinaus war es Teil dieses Arbeitspakets herauszufinden, für welche Produkte oder Produktkategorien sich digitale Zwillinge besonders eignen. Dazu wurden im Rahmen der Logistik Management Konferenz eine Kurzumfrage gemacht und anschließend über die Antworten diskutiert (Abbildung 2). Im Ergebnis zeigte sich, dass es letztlich kaum Produkte gibt, für welche ein digitaler Zwilling nicht geeignet wäre, um benötigte Informationen bereitzustellen. Insbesondere zeigte sich jedoch, dass für Produkte, welche einen hohen Wert besitzen sowie langlebig und sehr komplex sind, ein digitaler Zwilling besonders wichtig und sinnvoll sein könnte. Im Speziellen bei hochwertigen Produkten sind Konsumenten potenziell eher daran interessiert, Teile reparieren zu lassen, auszutauschen, zu verkaufen oder einem geeigneten Recycling zuzuführen, um ggf. auch den Materialwert zu erhalten. Bei komplexen und langlebigen Produkten ist ein digitaler Zwilling insofern interessant, als dass darüber kontinuierlich und unabhängig von der Existenz des Herstellers alle relevanten Produktinformationen digital zur Verfügung gestellt werden können. Je komplexer zudem ein Produkt ist, desto mehr Informationen sind potenziell auch im digitalen Zwilling zu hinterlegen, die ggf. physisch nicht (mehr) vorhanden sind. Letztendlich ist jedoch festzuhalten, dass je nach Produktkomplexität und Kreislaufausprägung andere Informationen und Informationsumfänge im digitalen Zwilling abgebildet werden und es nicht „die eine“ Lösung bzw. „den einen“ digitalen Zwilling gibt.

Abbildung 2: Stimmen aus der Praxis: Produkte, für welche ein digitaler Zwilling besonders nützlich sein könnte



Arbeitspaket 4: Untersuchung informatorischer und funktionaler Anforderungen an digitale Zwillinge

Ziel des Arbeitspakets war es, einen Katalog von Anforderungen für digitale Produktzwillinge zu erstellen sowie mögliche Implementierungshemmnisse zu identifizieren. Zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an digitale Zwillinge wurden die Bedürfnisse verschiedener Nutzergruppen in Form eines User Story Mappings analysiert und anschließend daraus resultierende Anforderungen abgeleitet.

Die ursprünglich geplante Entwicklung der User Stories in Fokusgruppen wurde mit Rücksicht auf die Corona-Pandemie durch die Entwicklung im Rahmen von Online-Workshops ersetzt. Dadurch konnten potenziell riskante Kontakte zwischen den Teilnehmenden vermieden werden. Außerdem wurden der zweite Projektbegleitende Ausschuss am 30. November 2021 und durchgeführte Interviews als Informationsquellen genutzt. Die Aufnahme der Anforderungen aus Anwendersicht fand im Rahmen der Interviews sowie Workshops mit Experten der Kreislaufwirtschaft aus den Bereichen Produktion, Einzelhandel, Wiederverwendung, Recycling und Abfallwirtschaft, Instandhaltung, Nachhaltigkeitsberatung, Technologiedienstleistung und Forschung statt und hat die spezifische Gestaltung des User Story Mappings begleitet. Damit konnte sichergestellt werden, dass die ermittelten Anforderungen den tatsächlichen Bedürfnissen der verschiedenen Stakeholder der Kreislaufwirtschaft bestmöglich entsprechen. Zudem sind mögliche Implementierungshemmnisse in Bezug auf das Teilen von Informationen mithilfe eines digitalen Zwillings untersucht worden. Die folgende Tabelle 11 zeigt alle Experten, die speziell für das Arbeitspaket 4 an Workshops teilgenommen haben; Experten, die lediglich am Projektbegleitenden Ausschuss oder an den Interviews im Zusammenhang mit Arbeitspaket 6 teilgenommen haben, werden an dieser Stelle nicht erneut genannt.

Tabelle 11: Sample der Expertenworkshops für Arbeitspaket 4

#	Unternehmen	Position
1	Transport- und Logistikdienstleister	IT Business Analyst
2	Produzent	Fahrzeugprojektmanager Werk Leipzig
3	Technologiedienstleister	Geschäftsführer
4	Technologiedienstleister	Forschungs- und Entwicklungsingenieur
5	Technologiedienstleister	Kein Titel angegeben

Methode

Ursprünglich kommt das User Story Mapping aus dem agilen Projektmanagement und findet in angepasster Form Anwendung im Rahmen des Arbeitspakets 4. Im Fokus stehen dabei die verschiedenen Anwender und ihre konkrete Interessenlage, nicht die technische Ausgestaltung des Systems. Ausgehend von den Eindrücken und Erfahrungen der Stakeholder werden Anforderungen an ein Produkt erzeugt und als „Big Picture“ zusammengefasst. Das User Story Mapping versteht die Entwicklung der User Stories als kontinuierlichen Prozess mit stetiger Einbindung der zukünftigen Nutzer.

Damit die Anforderungen aus Anwendersicht mittels User Story Mapping passend ermittelt werden können, baut die Methode auf folgenden Grundfragen auf:

- Wer: Wer sind die Anwender?
- Was: Was machen die Anwender?
- Warum: Was möchten diese damit bezwecken?

Mittels der oben genannten Fragen kann der Kerninhalt der Anforderungen ermittelt und auf die wichtigsten Eigenschaften reduziert werden. Damit die ermittelten Anforderungen nicht unreflektiert und ohne gemeinsames Verständnis der anderen beteiligten Stakeholder erfasst werden, erfolgt die Erarbeitung im Regelfall über User Story Workshops. Im Rahmen dieser Workshops können sowohl einzelne Inhalte erarbeitet und diskutiert als auch angepasst werden, damit die beteiligten Stakeholder ein gemeinsames, einheitliches Verständnis der Anforderungen an digitale Produktzwillinge aufbauen. Zur besseren Verständlichkeit werden technische Details vorerst ausgespart (Patton 2015).

Um diesen interaktiven Prozess weiter zu unterstützen, ist die erzeugte User Story Map kein einmalig zu erstellendes Dokument, sondern ein lebendiges Arbeitspapier, welches es kontinuierlich anzupassen gilt. Neue Erkenntnisse oder Wirkzusammenhänge müssen aktiv eingepflegt werden. In Ergänzung zu diesem gemeinsamen Verständnis werden in einem weiteren Schritt technische Akzeptanzkriterien für die einzelnen User Stories entwickelt und Anforderungen an das Gesamtsystem dokumentiert.

Die Methode des User Story Mapping wurde ausgewählt, da sie es ermöglicht, die Interaktion verschiedener Nutzer mit dem System anhand konkreter Anwendungsfälle zu betrachten und so eine nutzerzentrierte Beschreibung der Systemanforderungen zu erreichen. Diese nutzerzentrierte Beschreibung ermöglicht es, eine integrierte Perspektive einzunehmen und so ein umfangreiches Verständnis der Anforderungen an digitale Produktzwillinge zu erhalten.

Methodisches Vorgehen im Projekt

Bezüglich der agilen Methodik ist zu beachten, dass die späteren Nutzer der entwickelten Software die User Stories mit den Entwicklern zusammen erarbeiten. Im Kontext des Forschungsprojekts soll allerdings nur ein Demonstrator entwickelt werden und kein fertiges System, das tatsächlich verwendet wird. Der Erarbeitung der User Stories im Projekt erfolgt naturgemäß durch die Forschungsstellen. Durch die Zusammenarbeit der beiden Forschungsstellen und die Triangulation mit anderen Forschenden kann eine hohe Qualität der User Stories erreicht werden; die späteren Nutzer stehen allerdings nicht im Mittelpunkt. Ziel des Vorgehens im Projekt war es deswegen, diese Stakeholder möglichst oft im Rahmen von Veranstaltungen oder Workshops einzubeziehen. Insbesondere wurden deswegen auch über mehrere Monate hinweg Interviews mit Unternehmen geführt, um Anforderungen an und Implikationen von Digitalen Zwillingen zu erheben und diskutieren. Durch diese Integration mit dem später folgenden Arbeitspaket 6 konnten zusätzliche Kontaktpunkte zwischen den Forschungsstellen und KMU geschaffen und der agilen Vorgehensweise Rechnung getragen werden. Details zum Interviewsample sowie den im Rahmen der Interviews gestellten Fragen folgen in Arbeitspaket 6.

Erste Erkenntnisse für Arbeitspaket 4 wurden im Rahmen des zweiten Projektbegleitenden Ausschusses am 30.11.2021 gewonnen, daraus erste Entwürfe der User Stories generiert und diese im Rahmen von drei Workshops weiterentwickelt. Außerdem wurden Gespräche mit anderen Forschenden der TUHH durchgeführt.

Das Feedback aus den Workshops und Gesprächen ist insgesamt vielschichtig und bezieht sich auf Detailspekte der User Stories. Eine vollständige Darstellung aller Iterationen der User Stories und aller Kommentare in den Workshops ist aufgrund des Gesamtumfangs im Rahmen dieses Berichts weder möglich noch zielführend. Der folgende Abschnitt beleuchtet dementsprechend nur die initiale Erhebung im Projektbegleitenden Ausschuss exemplarisch im Detail. Die folgenden Abschnitte zeigen dann die finale übergeordnete Struktur der User Stories und die finalen User Stories selbst. Auf die Entwicklungsgeschichte der User Stories wird dabei an geeigneten Punkten eingegangen. Zum Abschluss werden die verbleibenden Anforderungen vorgestellt.

Initiale Erhebung im Projektbegleitenden Ausschuss

Als Basis für die Entwicklung von User Stories wurden zunächst die Teilnehmer des zweiten Projektbegleitenden Ausschusses mithilfe eines Online-Tools befragt. Dabei wurde zunächst eine offene Frage zu den erforderlichen Funktionalitäten gestellt. Der Fokus lag dabei sowohl auf den Informationen, die aus dem digitalen Zwilling ausgelesen werden können, als auch auf diesem Ausleseprozess, der zum einen automatisiert, zum anderen aber auch im Nutzerinterface ansprechend gestaltet werden soll.

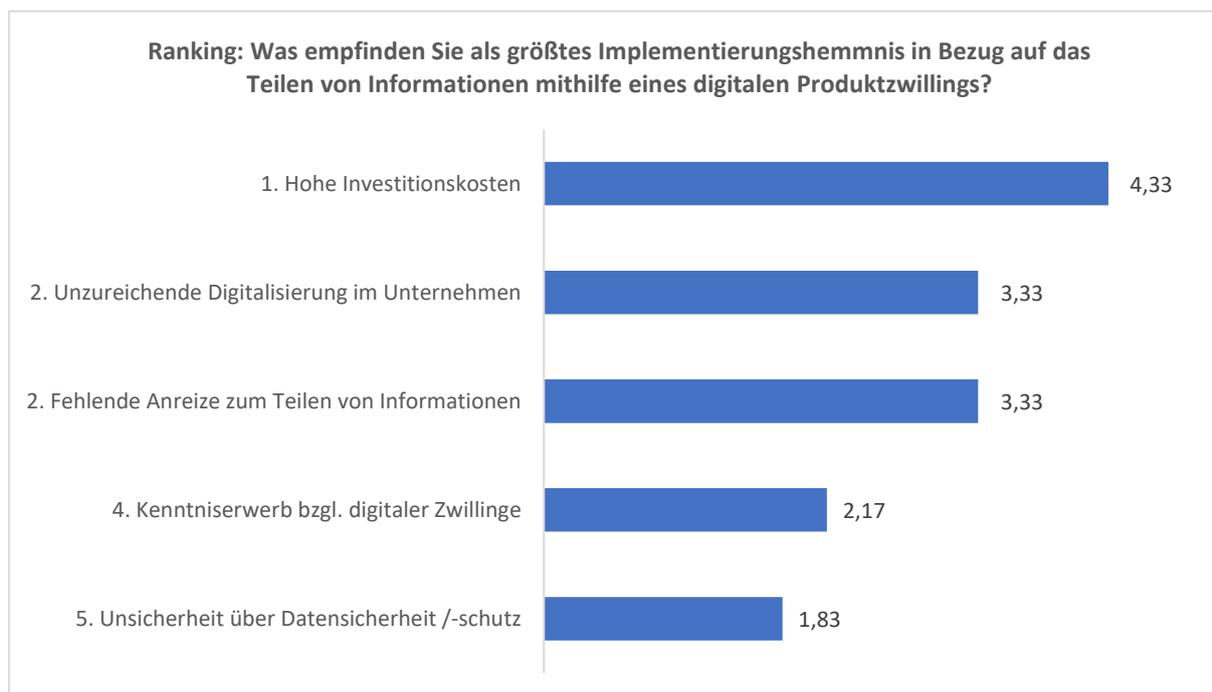
Dabei wurden die folgenden Punkte genannt:

- Prüfung der Materialkomposition
- Sortenreines Recycling ermöglicht
- Links zum physischen Produkt ist möglichst permanent, z.B. QR-Code auf dem Produkt
- Automatisierte Verarbeitung möglich
- Definierte Taxonomie
- Einfache Datenabfrage
- Jegliche Änderung muss nachvollziehbar sein
- Ansprechendes, einfaches Layout und eindeutige Verständlichkeit
- Komplexität des Produkts korrekt abbilden
- Nachvollziehbarkeit
- Beste Recycling-Prozesskette
- Vollständigkeit
- Hohe Datenqualität
- Stetige Verfügbarkeit
- Schnelles Interface
- Einfache Nutzbarkeit

Neben Anforderungen an digitale Produktzwillinge konnten zudem im Rahmen der Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses am 30. November 2021 Implementierungshemmnisse in Bezug auf das Teilen von Informationen mithilfe eines digitalen Zwillings erhoben werden (Abbildung 3). Dabei wurden fünf mögliche Implementierungshemmnisse seitens des Forscherteams vorgegeben, welche von den Teilnehmenden im Rahmen eines Rankings sortiert werden sollten. Die Zahlenwerte zeigen die von den Teilnehmern durchschnittlich vergebenen Punkte – wenn alle Teilnehmer einer Antwort die höchste Bedeutung beigemessen hätten, hätte diese den Wert 5. Als größtes Hemmnis wurden hohe Investitionen bestimmt. Aufgrund fehlender Erfahrungswerte konnten die Stakeholder in diesem Bereich aktuell weder die Anschaffungskosten noch die laufenden Kosten des digitalen Zwillings einschätzen. Als weitere Hemmnisse folgen die Bedenken über unzureichende Digitalisierung im Unternehmen und die

fehlenden Anreize zum überbetrieblichen Teilen von Informationen. Wie in vielen Szenarien der Unternehmenentwicklung im Rahmen der Industrie 4.0 müssen gewisse digitale bzw. technologische Grundvoraussetzungen erfüllt sein, damit eine Implementierung erfolgreich durchgeführt und der digitale Zwilling langfristig effektiv genutzt werden kann. Das Vertrauen in die anderen Stakeholder, mit denen Informationen ausgetauscht werden, ist eine weitere Voraussetzung. Nur durch ein hohes Maß an Vertrauen und dementsprechende unbefangene Übermittlung von Produktinformationen über die gesamte Wertschöpfungskette kann ein digitaler Zwilling funktionieren.

Abbildung 3: Umfrageergebnisse zur Bedeutung von Implementierungshemmnissen für digitale Zwillinge im zweiten Projektbegleitenden Ausschuss



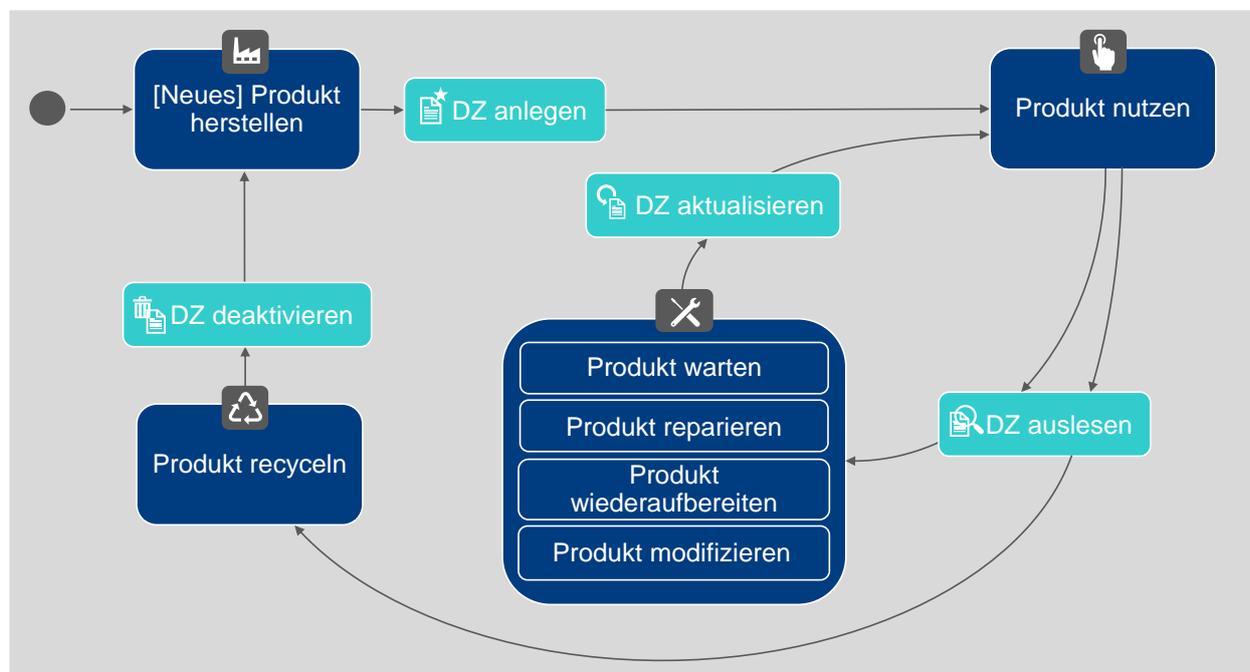
Ebenfalls an zweiter Stelle wird die Einschätzung eingeordnet, dass Prozessbeteiligte keinen ausreichenden Vorteil in der Verwendung eines digitalen Zwillings und des Austauschs von Informationen sehen und somit die Attraktivität des digitalen Zwillings sinkt, da es an Anreizen zu dessen Nutzung mangelt. Auch der Kenntniserwerb bezüglich des digitalen Zwillings wird von den Stakeholder als relevantes Hemmnis eingestuft. Da digitale Zwillinge derzeit noch nicht in der Praxis genutzt werden, ist es erforderlich, bspw. an Schulungen für den Umgang digitalen Zwilling teilzunehmen und neue Kenntnisse zu erwerben. Als letztes Implementierungshindernis wurden Bedenken über Datensicherheit und -schutz im Rahmen der Interviews geäußert. Da bei vielen Stakeholdern Unklarheit darüber herrscht, welche Informationen konkret geteilt werden müssen, gehen sie zunächst vom problematischsten Fall – dem Teilen sensibler und wettbewerbsrelevanter Produktinformationen – aus, welche es vor unbefugten Zugriffen zu schützen gilt. Demzufolge würde ein Austausch bzw. die Weitergabe dieser Daten im Rahmen des digitalen Produktzwillings ein potenzielles Risiko für die Stakeholder darstellen. Wichtig ist folglich die Aufklärung und die Festlegung von Standards für benötigte und zu teilende Produktinformationen.

Übergeordnete Struktur der User Stories

An welchen Stellen im Produktlebenszyklus ein digitaler Zwilling eingesetzt werden kann und sollte und wo er die Kreislaufwirtschaft unterstützen kann, zeigt der modellhafte Entwurf des Lebenszyklus eines digitalen Zwillings (siehe Abbildung 4), welcher durch das Projektteam erstellt und anschließend mit den Workshopteilnehmern gespiegelt wurde.

Parallel zur Herstellung eines Produkts beginnend werden die erforderlichen Informationen zum Produkt im erforderlichen Detailgrad im digitalen Zwilling hinterlegt. Daraufhin kann der digitale Zwilling im Laufe der Nutzungszeit bei Bedarf sowohl ausgelesen als auch bearbeitet und mit weiteren Informationen befüllt werden. Das ist zumeist dann der Fall, wenn am Produkt Änderungen vorgenommen werden, zum Beispiel in Form einer Wartung, Reparatur, Wiederaufbereitung oder Modifikation eines Produkts. Dadurch wird eine eindeutige Produkthistorie geschaffen, die es ermöglicht, über den digitalen Zwilling nachzuvollziehen, welche Änderung wann an welcher Komponente des Produkts realisiert wurde.

Abbildung 4: Lebenszyklus eines digitalen Zwillings (DZ)



Beispielhaft können diese Zusammenhänge an einem Schreibtischstuhl beleuchtet werden. Mit der Herstellung wird auch ein digitaler Zwilling angelegt. Kommt es im Laufe der Produktnutzung beispielsweise zu einer Beschädigung einer Komponente, kann über die im digitalen Zwilling hinterlegten Informationen ermittelt werden, was für ein Ersatzteil benötigt wird und wie dieses einzubauen ist. Daraufhin wird der Tausch der ersetzten Komponente im digitalen Zwilling dokumentiert. Wünschenswert wäre es, dass jedes relevante Unternehmen und ggf. sogar die Produktnutzer selbst den digitalen Zwilling aktualisieren können.

Sobald das Produkt nach Ende der Nutzungszeit recycelt wird und somit nicht mehr in seiner ursprünglichen Form vorhanden ist, wird der digitale Zwilling nicht mehr aktiv benötigt und kann in einem letzten Schritt deaktiviert werden. Um Rückschlüsse auf die Herkunft bzw. Zusammensetzung von in Neuprodukte einfließenden Rezyklaten ziehen zu können, muss der Datensatz allerdings erhalten bleiben. Neue Digitale Zwillinge erfordern deswegen eine Referenz auf vorangehende Zwillinge. (Lege et al. 2022, S. 562)

Vor dem Hintergrund des Lebenszyklus eines digitalen Zwillinges und um die Anforderungen im Rahmen des User Story Mapping einzuordnen, wurde eine User Story Map in Form einer Matrix erstellt (siehe Abbildung 5). Im Rahmen der Erstellung wurden die einzelnen Stufen und Bereiche eines Wertschöpfungsnetzwerks mit dem Lebenszyklus eines digitalen Produktzwillings in Verbindung gebracht.

Abbildung 5: Leere User Story Map

Aktivitäten		Digitalen Zwilling erstellen			Daten aus digitalem Zwilling auslesen	Daten in digitalem Zwilling verändern	
Schritte		Digitalen Zwilling anlegen	Mit Produkt(en) verknüpfen	Produkt vereinzeln	Daten auslesen	Daten aktualisieren	Deaktivieren
User Stories	Herstellung						
	Distribution						
	Nutzung						
	MRO&R						
	Recycling						

Die einzelnen Wertschöpfungsstufen in der linken Spalte orientieren sich an den Schritten, die ein Produkt im Laufe des Lebenszyklus durchläuft bzw. im Rahmen der Kreislaufwirtschaft bestenfalls durchlaufen sollte und umfassen die Herstellung, Distribution, Nutzung, sowie Maintenance, Repair, Overhaul und Remanufacturing (MRO&R) und das Recycling. Diese Wertschöpfungsstufen dienen für den weiteren Entwicklungsprozess als Rollen von Personen, die das System verwenden. Der Schritt „Herstellung“ in der Wertschöpfungskette wird in der äquivalenten Rolle „Hersteller“ Teil der User Stories. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass ein Unternehmen im Laufe des Produktlebenszyklus mehrere Rollen einnehmen kann. So kann ein Hersteller beispielsweise auch als MRO&R auftreten. Da der „Hersteller“ das Produkt und den digitalen Zwilling in dieser Situation dann auch aus der MRO&R-Perspektive betrachtet, sind die in der Folge dargestellten User Stories in diesem Fall uneingeschränkt weiter gültig. Wenn ein Stakeholder einen großen Anteil dieser Rollen einnimmt, stellt das allerdings den Zweck des digitalen Zwillinges insgesamt in Frage – als Werkzeug für den Austausch von Informationen kann der digitale Zwilling nur dann sinnvoll sein, wenn Informationen zwischen verschiedenen Stakeholdern ausgetauscht werden. Das kann allerdings auch den internen Austausch von Informationen zwischen verschiedenen Teilen eines Unternehmens meinen.

Die User Story Map lässt sich in drei übergeordnete Aktivitäten in Bezug auf den digitalen Zwilling einteilen, welche weiterhin untergliedert werden können. Im Rahmen der Einführungsphase beginnt der Lebenszyklus eines digitalen Zwillinges mit der Aktivität „Digitalen Zwilling erstellen“, welche in die Schritte „Digitalen Zwilling anlegen“, „mit Produkten verknüpfen“ und „Produkt vereinzeln“ aufgeteilt wird. Danach folgt die Aktivität „Daten aus digitalem Zwilling auslesen“. Zum Ende des Lebenszyklus folgt die Aktivität „Daten in digitalem Zwilling verändern“, welche in „Daten aktualisieren“ und „Deaktivieren“ untergliedert wird.

User Stories

Die User Story Map wurde im Lauf des Entwicklungsprozesses mit konkreten User Stories gefüllt. Abbildung 6 zeigt, dass der Hersteller eines Produkts alle sechs Lebenszyklusphasen berührt und somit eine zentrale Rolle einnimmt. Die User Stories werden in den folgenden drei Abschnitten entsprechend der drei Kategorien ganz oben in der Abbildung genauer dargestellt.

Abbildung 6: User Story Map mit User Stories

Aktivitäten		Digitalen Zwilling erstellen			Daten aus digitalem Zwilling auslesen	Daten in digitalem Zwilling verändern	
Schritte		Digitalen Zwilling anlegen	Mit Produkt(en) verknüpfen	Produkt vereinzeln	Daten auslesen	Daten aktualisieren	Deaktivieren
User Stories	Herstellung	Als Hersteller von Produkten möchte ich digitale Zwillinge für Produkte oder Produktklassen anlegen, damit Eigenschaften für andere einsehbar sein können.	Als Hersteller möchte ich eine physische Markierung an einem Produkt/einer Produktklasse anbringen, um eine Verknüpfung mit dem digitalen Zwilling zu schaffen.	Als Hersteller möchte ich ein Einzelprodukt aus einer Produktklasse herauslösen, damit die Eigenschaften des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	Als Hersteller möchte ich während des gesamten Lebenszyklus Lesezugriff auf den digitalen Zwilling behalten, um Daten über die Nutzung meiner Produkte zu sammeln.	Als Hersteller möchte ich die Produktdaten auf dem digitalen Zwilling bearbeiten und ergänzen können.	Als Hersteller möchte ich einen digitalen Zwilling als „ungültig“ markieren, wenn das Produkt nicht länger existiert.
	Distribution				Als Distributor möchte ich Produktdaten einsehen, um diese den Kunden zur Verfügung zu stellen.		
	Nutzung			Als Nutzer möchte ich einen digitalen Zwilling für ein einzelnes Produkt erstellen, damit Änderungen des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	Als Nutzer möchte ich Informationen über das Produkt einsehen, um dieses nach Möglichkeit einem geeigneten Recycling zuzuführen.	Als Nutzer möchte ich Änderungen am Produkt dokumentieren.	
	MRO&R			Als MRO&R möchte ich einen digitalen Zwilling für ein einzelnes Produkt erstellen, damit Reparaturen des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	Als MRO&R möchte ich Informationen über das Produkt einsehen, um eine Wartung bzw. Reparatur überhaupt erst zu ermöglichen.	Als MRO&R möchte ich Änderungen des Produkts dokumentieren.	
	Recycling				Als Recycler möchte ich Informationen über das Produkt auslesen, um es ideal recyceln zu können.		Als Recycler möchte ich dokumentieren, dass ein bestimmtes Produkt recyclet wurde.

1. Digitalen Zwilling erstellen

Wie bereits dargelegt, beginnt der Lebenszyklus eines digitalen Zwillings mit seiner Erstellung. Eine geeignete Datenstruktur wird angelegt, mit Informationen befüllt und permanent abgespeichert. Gewünscht wird hier eine flexible Datenstruktur, in der verschiedenste Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften beschrieben werden können. Trotz dieser Flexibilität sollen (insbesondere nicht-technische) Nutzer mit vorgefertigten Templates und einfachen Interfaces unterstützt werden. Häufig in den Workshops und Interviews angesprochen wurden außerdem die nötigen niedrigen Kosten für das Anlegen eines digitalen Zwillings, insbesondere im Kontext von Produkten mit geringem Wert.

User Story 1.1	Digitalen Zwilling anlegen
Als Hersteller möchte ich einen digitalen Zwilling für eine Produkte oder Produktklassen anlegen, damit Eigenschaften für andere einsehbar sein können.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Geringe Kosten für Produkte mit großer Stückzahl/geringem Wert pro Produkt - Anlage eigener Felder oder Nutzung von Templates möglich - Kopieren von Daten von bestehenden digitalen Zwillingen im Interface möglich - Insgesamt: flexible Möglichkeiten, aber auch Templates zur Vereinfachung - Für alle digitalen Zwillinge sollte ein Status („recycelt/zerlegt“) als Datenfeld vorhanden sein - Übersichtliche Darstellung für nicht-technische Nutzer - Einstellen, wer welche Informationen sehen darf - Einfügen von Dokumenten

Die folgende User Story 1.2 beschreibt die Markierung des Produkts mit einem eindeutigen Verweis auf einen digitalen Zwilling, um das Produkt und den Zwilling tatsächlich zu verbinden. Auch, wenn dies nicht im Umfang des Projekts behandelt worden ist, muss das jeweilige Produkt einen Code oder Tag, wie beispielsweise einen RFID-Tag, QR-Code oder Barcode, besitzen oder eine einfach auszulesende, standardisierte und eindeutige Markierung erhalten, die bestenfalls gleichzeitig robust gegenüber einer Beschädigung ist. Abhängig von der Art des Produkts kann auch die Fälschungssicherheit der Markierung relevant sein. Wichtig ist an dieser Stelle in Abhängigkeit vom konkreten Anwendungsfall die Markierung einzelner Produkte mit einer einzigartigen Markierung, oder die Markierung ganzer Produktchargen mit einer auf allen baugleichen Produkten identischen Markierung.

User Story 1.2	Mit Produkt(en) verknüpfen
Als Hersteller möchte ich eine physische Markierung an einem Produkt/einer Produktklasse anbringen, um eine Verknüpfung mit dem digitalen Zwilling zu schaffen.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Eindeutige Blockchain-ID zum Anbringen an den Produkten erforderlich; wird bei Erstellung (1.1/1.2) ausgegeben - Möglichkeit zur Speicherung einer Kennung einer anderweitigen Markierung bzw. einer Seriennummer - Vereinzelung von Produkten einer Produktklasse durch Produzenten muss möglich sein, um produktspezifische Markierungen hinterlegen zu können

Die folgenden drei User Stories beschreiben die Vereinzelung eines Produkts, das ursprünglich Teil einer Charge von identischen Produkten war und durch bestimmte Vorgänge zu einem einzigartigen Produkt geworden ist. Sie unterscheiden sich primär durch die abweichende Intention des handelnden Stakeholders und hängen oft eng mit der darauffolgenden Bearbeitung des digitalen Zwillings zusammen. Der Hersteller zielt in User Story 1.3 primär darauf ab, die Eigenschaften eines ab Werk einzigartigen Produkts zu dokumentieren.

User Story 1.3	Produkt vereinzeln als Hersteller
Als Hersteller möchte ich ein Einzelprodukt aus einer Produktklasse herauslösen, damit die Eigenschaften des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Kern ist Erstellung eines Einzelprodukts aus einer Produktklasse - Für Einzelprodukte oder Produkte mit Einzelmarkierung ab Werk

Für den Nutzer steht in User Story 1.4 dagegen die Dokumentation von Änderungen des Produkts im Laufe des Produktlebens im Vordergrund.

User Story 1.4	Produkt vereinzeln als Nutzer
Als Nutzer möchte ich einen digitalen Zwilling für ein einzelnes Produkt erstellen, damit Änderungen des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Kern ist Erstellung eines Einzelprodukts aus einer Produktklasse - Für Reparaturen durch Nutzer oder Informationen über Nutzung

Zu guter Letzt verwendet ein MRO&R-Unternehmen die Vereinzelnung vor allem, um durchgeführte Reparaturen zu dokumentieren.

User Story 1.5	Produkt vereinzeln als MRO&R-Unternehmen
Als MRO&R-Unternehmen möchte ich einen digitalen Zwilling für ein einzelnes Produkt erstellen, damit Reparaturen des spezifischen Produkts dokumentiert werden können.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Kern ist Erstellung eines Einzelprodukts aus einer Produktklasse - Dokumentation von Reparaturen

2. Daten aus dem digitalen Zwilling auslesen

Die User Stories in dieser Kategorie sind insgesamt ähnlich. Sie alle zielen auf das Auslesen von Daten im digitalen Zwilling ab, beschreiben allerdings jeweils die Perspektive einer anderen Partei und unterscheiden sich so vor allem in der Zielsetzung bzw. in den Akzeptanzkriterien.

Die erste User Story 2.1 betrachtet das Auslesen aus der Sicht des Produktherstellers. Die Eigenschaften des Produkts sind dem Hersteller bereits bekannt, sodass es in aller Regel um Informationen geht, die erst im Rahmen der Produktnutzung entstanden sind. Der Hersteller möchte beispielsweise erfahren, wie intensiv ein Produkt genutzt wird, oder an welchen Komponenten durch welche Parteien Veränderungen vorgenommen werden. Im Unterschied zu anderen Stakeholdern kann der Hersteller dabei aber nicht (mehr) mit dem spezifischen Produkt interagieren, auf den sich der digitale Zwilling bezieht. Der Fokus liegt hier auf der Gewinnung von Informationen für das Marketing eines bestehenden Produkts oder dessen zukünftige Weiterentwicklung.

User Story 2.1	Daten auslesen als Hersteller
Als Hersteller möchte ich während des gesamten Lebenszyklus Lesezugriff auf den digitalen Zwilling behalten, um Daten über die Nutzung meiner Produkte zu sammeln.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Datenschutz-Befindlichkeiten auf Nutzerseite - Auslesbarkeit mithilfe einer eindeutigen Nummer

Die folgende User Story 2.2 stellt dagegen den Nutzer in den Vordergrund. Der Nutzer soll unabhängig von seiner konkreten Absicht (Kauf, Weiterverkauf, Reparatur, ...) mit allen Informationen über das Produkt versorgt werden. Diese Verfügbarkeit von Informationen soll insbesondere auch die Zufriedenheit des Nutzers mit dem Produkt insgesamt steigern und das Produkt damit schon im Vorhinein attraktiver machen. Zudem soll es ermöglichen, das Produkt nach Ende der Nutzungszeit einem geeigneten Recycling zuzuführen.

User Story 2.2	Daten auslesen als Nutzer
Als Nutzer möchte ich Informationen über das Produkt einsehen, um dieses nach Möglichkeit einem geeigneten Recycling zuzuführen.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Verwendbarkeit unabhängig von der Intention des Nutzers (Information bei Kauf, Reparatur, Information vor Weiterverkauf, ...), flexible Nutzung jederzeit

Der Distributor erhält Einsicht in die Produktdaten, um diese potenziellen Käufern zur Verfügung stellen zu können. Er benötigt dafür Einsicht in alle Daten, die auch für den Kunden relevant sind. Die User Story 2.3 beschreibt im Kern die mittelbare Umsetzung der User Story 2.2. durch den Distributor. Der Distributor spielt hier eine wichtige Rolle, weil die Verwendung eines digitalen Zwillings und die damit verbundene verbesserte Kreislauffähigkeit des Produkts ein Kaufargument für den Nutzer sein kann. Um dem Nutzer diese Produkteigenschaft schon vor dem Kauf möglichst wirksam demonstrieren zu können, sollte der Distributor ebenfalls Zugang zum digitalen Zwilling erhalten.

User Story 2.3	Daten auslesen als Distributor
Als Distributor möchte ich Produktdaten einsehen, um diese den Kunden zur Verfügung zu stellen.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Gleicher Zugang wie Nutzer selbst

Der MRO&R möchte Informationen für einen speziellen Zweck aus dem digitalen Zwilling aufrufen. Ziel ist hier die Vereinfachung oder Ermöglichung von Maintenance, Repair, Overhaul und Remanufacturing des Produkts. Dabei spielen potenziell sowohl spezifische Materialien und Komponenten als auch Anleitungen, Handbücher und vorangegangene MRO&R-Aktivitäten eine Rolle.

User Story 2.4	Daten auslesen als MRO&R
Als MRO&R möchte ich Informationen über das Produkt einsehen, um eine Wartung bzw. Reparatur zu ermöglichen.	
Akzeptanzkriterien	- Meint sowohl spezifische Materialien und Komponenten als auch Anleitungen und Handbücher und vergangene Reparaturen

Zu guter Letzt zielt User Story 2.5 auf den Recycler ab. Im Fokus steht hier die Zusammensetzung des Produkts in Bezug auf Materialien und potenziell auch Komponenten und Baugruppen.

User Story 2.5	Daten auslesen als Recycler
Als Recycler möchte ich Informationen über das Produkt auslesen, um es ideal recyceln zu können.	
Akzeptanzkriterien	- Fokus auf Materialien und ggf. Baugruppen

3. Daten in digitalem Zwilling verändern

Die dritte und letzte Kategorie beschreibt die Veränderung von Daten im digitalen Zwilling. Der erste relevante Stakeholder an dieser Stelle ist der Hersteller, der vor allem die Informationen bearbeitet, die er bei Erstellung des digitalen Zwillings bereitgestellt hat. Diese waren möglicherweise nicht korrekt oder unvollständig. Denkbar wäre auch die Dokumentation von Produkt-Rückrufen.

User Story 3.1	Daten aktualisieren als Hersteller (Produkt bearbeiten)
Als Hersteller möchte ich die ich die Produktdaten auf dem digitalen Zwilling bearbeiten und ergänzen können.	
Akzeptanzkriterien	- Für alle einsehbar - Bestehende Felder bearbeiten und neue Felder hinzufügen

Der Hersteller benötigt außerdem die Berechtigung, den digitalen Zwilling insgesamt zu deaktivieren. Zweck kann hier die Deaktivierung fälschlicherweise angelegter digitaler Zwillinge oder die Deaktivierung von Seriennummern, die für Fälschungen verwendet werden, sein. Wichtig ist an dieser Stelle, dass Daten niemals gelöscht werden – der Zwilling wird lediglich als deaktiviert markiert. Damit soll die Löschung unbequemer Informationen oder die versehentliche Datenvernichtung verhindert werden.

User Story 3.2	Daten aktualisieren als Hersteller (Produkt deaktivieren)
Als Hersteller möchte ich einen digitalen Zwilling als „ungültig“ markieren, wenn das Produkt nicht länger existiert.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Löschung von Daten, nur Steigerung von Übersichtlichkeit - Motivation ist irrtümliches Anlegen des digitalen Zwillings - Deaktivierung von Seriennummern des digitalen Zwillings, die in Bezug zu Fälschungen stehen - Falls ein Recycling beim Hersteller stattfindet, ist der Hersteller gleichzeitig Recycler - Entlastung der Datenbank durch Deaktivierung

Auch für Nutzer der Produkte ist die Aktualisierung von Daten von Interesse. Die Nutzer dokumentieren Veränderungen am Produkt, die im Laufe des Produktlebens entstanden sind, wie beispielsweise selbst durchgeführte Reparaturen oder Informationen über die Intensität der Nutzung (wie z.B. der Kilometerstand beim Auto). Wichtig ist dabei, dass Nutzer nur Einzelprodukte bearbeiten können, denn ganze Klassen von Produkten stehen nur in Ausnahmefällen dem gleichen Nutzer zur Verfügung.

User Story 3.3	Daten aktualisieren als Nutzer
Als Nutzer möchte ich Änderungen am Produkt dokumentieren.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Für alle einsehbar - Bestehende Felder bearbeiten und neue Felder hinzufügen - Änderungen am Produkt können auch Informationen über Nutzung sein (z.B. Kilometerstand eines Autos) - Nur für Einzelprodukte, nicht für Produktklassen

Ähnlich wie der Nutzer bearbeitet auch der MRO&R-Unternehmen die Daten zu einzelnen Produkten, vor allem um Reparaturen und dergleichen zu dokumentieren. An dieser Stelle ist möglicherweise eine Autorisierung durch den Nutzer erforderlich, damit MRO&R-Unternehmen nicht beliebige Produkte bearbeiten können. Je nach Ausgestaltung dieses Systems in der Praxis ist dies möglicherweise auch erforderlich, um ein Spam-Problem zu verhindern.

User Story 3.4	Daten aktualisieren als MRO&R-Unternehmen
Als MRO&R-Unternehmen möchte ich Änderungen des Produkts dokumentieren.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Für alle einsehbar - Ggf. Autorisierung vom Nutzer erforderlich - Bestehende Felder bearbeiten und neue Felder hinzufügen - Nur für Einzelprodukte, nicht für Chargen

Zum Ende des Lebenszyklus eines Produkts möchte auch der Recycler die Möglichkeit haben, den digitalen Zwilling zu deaktivieren. Hier wird ähnlich wie beim Hersteller explizit keine Löschung des digitalen Zwillings vorgenommen, damit die Daten archiviert erhalten bleiben, um bei

Bedarf später darauf zurückgreifen zu können. Das stellt auch sicher, dass die Seriennummern recycelter Produkte nicht zur Legitimierung von Fälschungen verwendet werden können, und dass zukünftige digitale Zwillinge für Produkte, die aus recycelten Materialien hergestellt werden, auf die vorangehenden Zwillinge referenzieren können.

User Story 3.5	Daten aktualisieren als Recycler
Als Recycler möchte ich dokumentieren, dass ein bestimmtes Produkt recycelt wurde.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Keine Löschung von Daten, nur Steigerung von Übersichtlichkeit - Markierung recycelter DT wichtig, damit ein Betrüger die Seriennummer eines recycelten Produkt nicht verwenden kann, um Fälschungen zu legitimieren

Verbleibende Anforderungen

Zusätzlich zu den oben genannten Anforderungen an die Funktionalität des digitalen Zwillinges gibt es Anforderungen an das System. Dazu zählt eine User Story zur Nutzerverwaltung sowie bestimmte Eigenschaften des Gesamtsystems, die keiner speziellen User Story zugeordnet werden können.

Die untenstehende User Story 4 formalisiert die Erwartung der Nutzer an die Verwaltung des Systems, entsprechend ihrer Aktivitäten als Hersteller, Distributor oder dergleichen im System hinterlegt zu werden, um entsprechend handlungsfähig zu sein. Im Kontext langer Lebensdauern von Produkten müssen entsprechende Rollen auch lange nach Herstellung eines Produkts noch verwaltet werden können. Insbesondere die Rolle eines Recyclers sollte sich dabei direkt auf eine Vielzahl von Produkten beziehen und nicht für jedes Produkt einzeln festgelegt werden.

User Story 4	Nutzerverwaltung
Als Stakeholder möchte ich die Berechtigungen entsprechend meiner Rolle erhalten, um das System verwenden zu können.	
Akzeptanzkriterien	<ul style="list-style-type: none"> - Lesen: Alle - Schreiben: Hersteller, Nutzer, MRO&R, Recycler - Aktive Nutzerverwaltung ist entscheidend für Verfügbarkeit des Systems (für neue MRO&R/Recycler/...) - Wenn ein neuer Recycler zehn Jahre nach Schaffung des Produkts die Rolle Recycler erhalten möchte, muss er die Rolle noch erhalten können - Rollen sind nicht produktspezifisch; ein Recycler ist immer ein Recycler für alle Produkte

Anhand der aufgenommenen Anforderungen der beteiligten Akteur von der Herstellung bis zum Recycling konnten zusammengefasst sowohl Funktionalitäten als auch technische Merkmale/Ausgestaltungen an einen praxistauglichen digitalen Produktzwilling abgeleitet werden, welche im Folgenden näher beschrieben werden:

Der digitale Zwilling insgesamt muss standardisiert und übersichtlich sein, damit eine einfache Nutzung für alle Stakeholder ermöglicht wird. Es müssen Vorlagen und Möglichkeiten für Kopien von digitalen Zwillingen vorhanden sein, damit weitere Produkte einfach angelegt werden können. Zudem müssen der komplette Prozess dauerhaft transparent und die Änderungen in Form einer Produkthistorie einsehbar sein, um ggf. Fehleingaben und Missbrauch nachvollziehen und vermeiden zu können. Besonders für Produkte mit hohen Stückzahlen und geringen Werten in der Massenproduktion müssen zusätzlich geringe Kosten über den kompletten Lebenszyklus garantiert werden, da andernfalls keine rentable Nutzung des digitalen Zwillings realisiert werden kann. Zuletzt wurde die permanente und gegen Beschädigungen geschützte Markierung der Produkte gefordert, damit langfristig benötigte Informationen zu Produkten darüber abgerufen werden können. Gerade Produkte mit einem langen Lebenszyklus oder einer starken physischen Belastung während der Nutzung erfordern dies besonders.

Die technische Ausgestaltung stellt weniger Anforderungen an die physischen Eigenschaften, sondern mehr an die Konzipierung des Zwillings und dessen Identifikation, Speicherung, Sicherung und Verwaltung. Hinsichtlich Zugangsbeschränkungen muss der Zwilling eine Möglichkeit bieten, den unterschiedlichen Stakeholdern variable Lese- und Schreibberechtigungen zuzuteilen, damit sensible Daten nur autorisierten Stakeholdern zur Verfügung stehen. Die Identifikation muss über eindeutige Identifikationsnummern erfolgen. Zudem sollte die Möglichkeit bestehen, weitere interne Artikelnummern zu hinterlegen, damit eine nahtlose Anbindung an das eigene ERP-System gewährleistet wird. Wie bereits im Rahmen der Funktionalität beschrieben, sollte die stetige und automatisierte Datenverfügbarkeit und -verarbeitung eine Produkthistorie enthalten, welche den Stakeholdern ermöglicht, einen Verlauf der Produktversionen und durchgeführten Änderungen langfristig nachzuvollziehen und diese Informationen sinnvoll zu verwerten und ggf. daraus weitere Aspekte abzuleiten. Final wird ein neutraler Betreiber bzw. Verwalter des digitalen Zwillings benötigt, der diesen betreibt und somit Interessenkonflikten und einseitiger Nutzung vorbeugt. Die im Rahmen des Projekts angedachte Verwendung einer Blockchain stellt ein solches neutrales Informationsmedium bereit; eine weitergehende Verwaltung (wie beispielsweise die Pflicht zum Hinterlegen bestimmter Datenpunkte in bestimmten Formaten oder die Zuweisung von Rollen an einzelne Nutzer) ist allerdings dennoch erforderlich.

Arbeitspaket 5: Konzeption digitaler Zwillinge auf Basis der Blockchain und exemplarische Implementierung

Ziel des Arbeitspaket 5 war die Konzeption digitaler Zwillinge basierend auf der Blockchain-Technologie und deren exemplarische Implementierung. Die folgenden Abschnitte diskutieren in diesem Kontext zunächst den Bezug zu den Ergebnissen der bisherigen Arbeitspakete und Design Decisions, und zeigen daraufhin das entwickelte System aufgeteilt nach Blockchain-Komponente (Smart Contract) und Interface.

Auswahl einer spezifischen Blockchain-Technologie

Im Rahmen des Arbeitspakets 2 wurden Blockchains und alternative Systeme verglichen, um deren Eignung für digitale Zwillinge bewerten zu können. In einem zweiten Schritt wurden außerdem verschiedene Blockchain-Implementierungen gegenübergestellt. Entscheidend für die Bewertung aller dieser Technologien ist deren Eignung, im Rahmen eines digitalen Zwillings Informationen bereitzustellen.

Ähnliche Überlegungen leiten die Auswahl einer geeigneten Blockchain-Implementierung. Aus den in Arbeitspaket 2 dargestellten Gründen sollten primär intensiv genutzte Implementierungen verwendet werden. Von besonderer Bedeutung sind dabei Funktionalitäten zur Zugangskontrolle zu spezifischen Informationen. Diese stellen grundsätzlich Hindernisse für den Abruf von Informationen dar; wie in Arbeitspaket 4 dargelegt sind solche Beschränkungen allerdings erforderlich, damit bestimmte Informationen überhaupt bereitgestellt werden. Die optimale Kombination von Verfügbarkeit und Beschränkung ist nicht ohne Weiteres möglich; allgemein obliegt die Bereitstellungsentscheidung immer dem Besitzer der jeweiligen Informationen. Die Systemarchitektur kann hierfür nur den Rahmen vorgeben. Auch die existierenden Erfahrungen mit den verschiedenen Implementierungen sind relevant, um die effektive Bearbeitung des Arbeitspakets sicherzustellen. Der Demonstrator basiert deswegen auf der Ethereum-Implementierung von Blockchain.

Bezug zu bisherigen Ergebnissen und Design Decisions

Der Demonstrator basiert auf den Ergebnissen der vorangehenden Arbeitspakete und insbesondere den Anforderungen aus dem Arbeitspaket 4. Der Demonstrator weicht allerdings bewusst auch von diesen Anforderungen ab. Im Folgenden wird auf die Zielsetzung des Demonstrators und die daraus folgenden Design Decisions eingegangen.

Der Demonstrator soll die technische Möglichkeit zur Umsetzung eines Blockchain-basierten digitalen Zwillings prüfen und greifbar machen sowie als Basis für die weitere Arbeit dienen. Vereinzelt werden dabei im Rahmen des „Learning by Doing“ bei der Entwicklung Erkenntnisse gewonnen. Der Demonstrator unterscheidet sich damit explizit von einem potenziell einsetzbaren und verkaufsfähigen System. Die Entwicklung eines solchen Systems war nicht Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts; die Anforderungen im Rahmen des Arbeitspakets 4 zielten dagegen auf größtmögliche Vollständigkeit und Bezug zur Praxis ab.

Der erste wesentliche Unterschied liegt in der fachlichen Abgrenzung des Demonstrators („Scope“). Der Demonstrator ist ein technisches System, das für den Praxiseinsatz um eine Organisationsstruktur ergänzt werden muss. Die Zuweisung der technischen Rollen zu Stakeholdern, die diese Rollen in der Praxis einnehmen, und der Betrieb des technischen Systems können nicht durch das System selbst sichergestellt werden, sondern bedürfen einer darüberhinausgehenden Struktur, die im Rahmen dieses Arbeitspakets nicht weiter beleuchtet wird.

Bezüglich des Umgangs mit den Daten aus dem digitalen Zwilling ist darauf hinzuweisen, dass eine automatisierte Auswertung von Daten explizit gewünscht wird. Dahinter steht der Wunsch, dass andere technische Systeme direkt auf die Blockchain zugreifen, ohne dass jeder Arbeitsschritt durch einen Mitarbeiter in einem Nutzerinterface durchgeführt wird. In diesem Kontext muss beim Demonstrator zwischen dem Blockchain-Backend und dem Nutzerinterface unterschieden werden. Andere Anwendungen können direkt auf die Blockchain zugreifen und alle Aktionen durchführen, die nicht auf dieser Ebene verhindert werden. Beschränkungen im Interface sind deswegen nicht geeignet, um bestimmte Eigenschaften des Gesamtsystems sicherzustellen. Das entwickelte Interface ist deswegen nur eine von vielen Anwendungen, die das System verwenden können. In diesem Sinne ist das Interface als Beispiel für andere Anwendungen zu verstehen. Die akkurate Darstellung der technischen Daten ist für den Demonstrator deswegen ebenso von Bedeutung wie ein ansprechendes Design. Eine Anbindung an Firmensysteme ist im Rahmen des Forschungsprojekts nicht vorgesehen und dementsprechend nicht erfolgt.

Der Demonstrator beinhaltet ein Berechtigungssystem für Schreibrechte, nicht aber für Leserechte. Die verteilte Natur der Blockchain-Technologie macht Daten an möglichst vielen Stellen kontinuierlich verfügbar und ist genau deswegen als technische Basis für den digitalen Zwilling geeignet. Eine Beschränkung des Datenzugangs würde die Komplexität des Systems stark erhöhen und die Verfügbarkeit der Informationen gleichzeitig deutlich verringern. Die Machbarkeit erscheint zudem auf organisatorischer (nicht aber auf technischer) Ebene sehr zweifelhaft. Wenn Informationen beispielsweise den Nutzern eines Produkts zur Verfügung stehen sollen, nicht aber konkurrierenden Herstellern, müsste für jeden berechtigten Nutzer sichergestellt werden, dass dieser in keinem Zusammenhang zu konkurrierenden Herstellern steht. Das erscheint nicht praktikabel und ist für die Validierung der Blockchain-Technologie nicht zweckdienlich. Der Demonstrator fokussiert sich dementsprechend auf die Beschränkung von Schreibrechten.

Eine weitere Design Decision stellt die Markierung des physischen Produkts dar. Diese ist von entscheidender Bedeutung, um den digitalen Zwilling mit dem Produkt zu verknüpfen und nutzbar zu machen. Die Markierung erfolgt üblicherweise ab Werk durch den Hersteller. Wenn ein digitaler Zwilling sich auf mehrere baugleiche physische Produkte bezieht und ein Produkt nachträglich vereinzelt werden soll, ist auch eine erneute Markierung des vereinzelteten Produkts erforderlich. Da die genaue praktische Umsetzung dieser „Umwidmung“ noch unklar ist, unterstützt der Demonstrator nur die Markierung (und damit Vereinzeltung) ab Werk durch den Hersteller. Der Demonstrator erzeugt für diese Markierung eine eindeutige Blockchain-ID; mögliche andere Markierungen können als Eigenschaft des Produkts hinterlegt werden. Wenn abweichende Markierungssysteme verwendet werden, muss die Eindeutigkeit der Markierungen unbedingt sichergestellt werden. Die Blockchain kann dies unterstützen, jedoch nur bei den Blockchain-basierten Markierungen tatsächlich sicherstellen.

Der Demonstrator erlaubt die Speicherung von einzelnen Datenpunkten in beliebig komplexen Datenstrukturen und unterstreicht damit die Eignung der Blockchain-Technologie für digitale Zwillinge sehr komplexer Produkte. Ein Test mit sehr großen Datenmengen oder mit Dateien ist im Rahmen des Projekts deswegen nicht erforderlich und auch nicht erfolgt.

Referenzen von einem digitalen Zwilling auf andere digitale Zwillinge sind durch die Blockchain-ID problemlos möglich. Entsprechende Referenzen werden nicht auf der Systemebene des gesamten Zwillings hinterlegt, sondern auf Ebene bestimmter Eigenschaften oder Komponenten. Damit sollen unspezifische Angaben erschwert werden.

Blockchain-Komponente (Smart Contract)

Als Backend für den digitalen Zwilling fungiert eine Datenstruktur auf der Blockchain. Sie speichert zum einen die Daten, regelt vor allem aber die Berechtigungen zur Bearbeitung dieser Daten. Diese Datenstruktur wird als Smart Contract bezeichnet. Es handelt sich dabei allerdings nicht um einen Vertrag im herkömmlichen Sinne.

Abbildung 7: Auszug aus Smart-Contract-Code

```
pragma solidity >=0.5.0 <0.9.0;

//import required libraries and contracts
import "../node_modules/@openzeppelin/contracts/token/ERC721/ERC721.sol";
import "../node_modules/@openzeppelin/contracts/utils/math/SafeMath.sol";
import "../DigitalTwinAccessControl.sol";

contract DigitalTwin is DigitalTwinAccessControl, ERC721 {
    using SafeMath for uint256;

    // events for all actions on the product
    event LogNewProduct(uint256 indexed tokenId, string productName);
    event LogUpdateProduct(uint256 indexed tokenId, string productName, string material);
    event LogDeleteProduct(address from, uint256 indexed tokenId, uint256 productNumber);
    event LogTransferProduct(address from, address to, uint256 tokenId);

    constructor() ERC721("DigitalTwin", "DT") { }

    //Struct with properties of the Product
    struct Product {
        uint256 tokenId;
        uint256 previousTokenId;
        address tokenOwner;
        uint256 productNumber; //corresponding row number in array
        string productName;
        string material;
    }

    // Numerical length of an item id will be 10000000000000000000
    uint idLength = 10 ** 18;

    /*** STORAGE ***/

    //Mapping from tokenIDs to Product
    mapping (uint256 => Product) private products;

    //unordered list of tokenIDs that actually exist
    uint256[] private tokenIds;

    //Guarantees msg.sender is owner of the given product token
    //uint256 _tokenId of the product to validate its ownership belongs to msg.sender
    modifier onlyTokenOwner(uint256 _tokenId) {
        //check if tokenId is valid
        require(_tokenId > 0, "TokenId is not valid");
        //check if tokenId exists
        require(products[_tokenId].tokenId == _tokenId, "TokenId does not exist");
        //check if sender equals tokenOwner
        require(products[_tokenId].tokenOwner == msg.sender, "TokenOwner is not sender");
        _;
    }
}
```

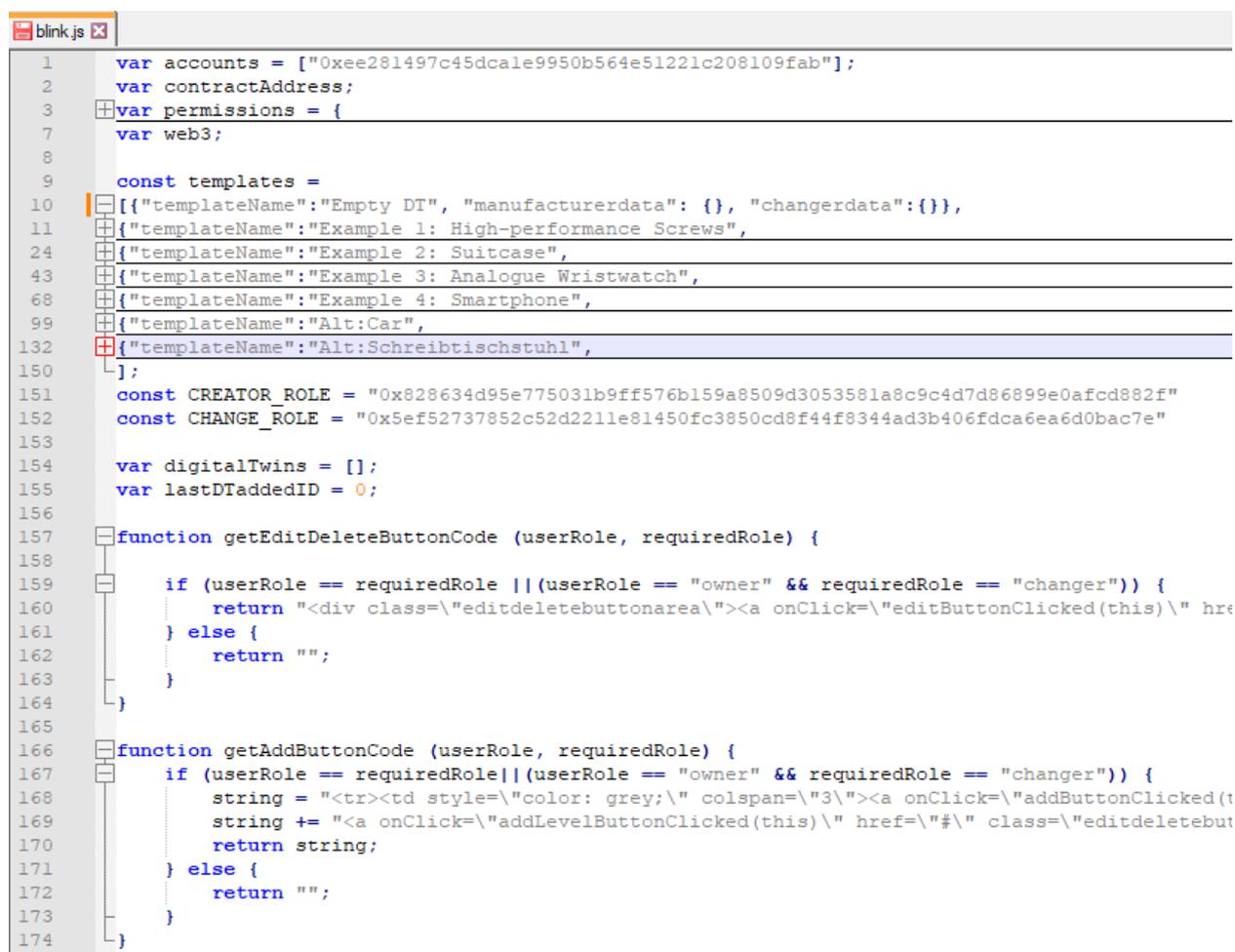
Der Smart Contract basiert auf etablierten Standards für Solidity-Contracts; zu nennen sind hier insbesondere die SafeMath-Library und der ERC-721-Standard, der auch für Non-Fungible Tokens (NFTs) verwendet wird. Da Smart Contracts nach ihrer Entstehung nicht mehr verändert werden können, soll durch den Rückgriff auf derartige Standards die Wahrscheinlichkeit für technische Fehler reduziert werden, die den digitalen Zwilling unattraktiv machen könnten. Der Smart Contract wurde nur auf Testnetzwerken oder lokal gehosteten Entwicklungsumgebungen eingesetzt. Das eigentliche Ethereum-Hauptnetzwerk und die damit verbundene gleichnamige Cryptowährung wurden im Rahmen des Projekts nicht verwendet.

Abbildung 7 zeigt der Vollständigkeit halber einen Auszug aus dem deutlich umfangreicheren Smart-Contract-Code. Auf eine detaillierte Erklärung der technischen Funktionsweise wird an dieser Stelle verzichtet. Die nachfolgende Beschreibung des Nutzerinterfaces verdeutlicht die Funktionsweise des Smart Contracts, da das Interface und der Smart Contract letztlich die gleichen Funktionalitäten bieten.

Interface-Komponente

Die Interface-Komponente des Demonstrators basiert auf HTML/Javascript und interagiert über MetaMask mit dem Smart Contract und dem Blockchain-Backend. Zu Demonstrationszwecken wurde zusätzlich ein Interface entwickelt, das auch ohne andere Komponenten funktionstüchtig ist und deswegen einfacher zu handhaben ist. Auch hier wird nur ein Ausschnitt aus dem Programmcode gezeigt (Abbildung 8); in den folgenden Absätzen werden das grafische Interface und seine Funktionalität detailliert beschrieben.

Abbildung 8: Ausschnitt aus dem Javascript-Code für das Interface zur Illustration



```

1  var accounts = ["0xee281497c45dca9950b564e51221c208109fab"];
2  var contractAddress;
3  var permissions = {
7  var web3;
8
9  const templates =
10 [{"templateName": "Empty DT", "manufacturerdata": {}, "changerdata": {}},
11 {"templateName": "Example 1: High-performance Screws",
24 {"templateName": "Example 2: Suitcase",
43 {"templateName": "Example 3: Analogue Wristwatch",
68 {"templateName": "Example 4: Smartphone",
99 {"templateName": "Alt:Car",
132 {"templateName": "Alt:Schreibtischstuhl",
150   ]};
151 const CREATOR_ROLE = "0x828634d95e775031b9ff576b159a8509d3053581a8c9c4d7d86899e0afcd882f"
152 const CHANGE_ROLE = "0x5ef52737852c52d2211e81450fc3850cd8f44f8344ad3b406fdca6ea6d0bac7e"
153
154 var digitalTwins = [];
155 var lastDTaddedID = 0;
156
157 function getEditDeleteButtonCode (userRole, requiredRole) {
158
159     if (userRole == requiredRole || (userRole == "owner" && requiredRole == "changer")) {
160         return "<div class=\"editdeletebuttonarea\"><a onClick=\"editButtonClicked(this)\" href=
161     } else {
162         return "";
163     }
164 }
165
166 function getAddButtonCode (userRole, requiredRole) {
167     if (userRole == requiredRole || (userRole == "owner" && requiredRole == "changer")) {
168         string = "<tr><td style=\"color: grey;\" colspan=\"3\"><a onClick=\"addButtonClicked(t
169         string += "<a onClick=\"addLevelButtonClicked(this)\" href=\"#\" class=\"editdeletebut
170         return string;
171     } else {
172         return "";
173     }
174 }

```

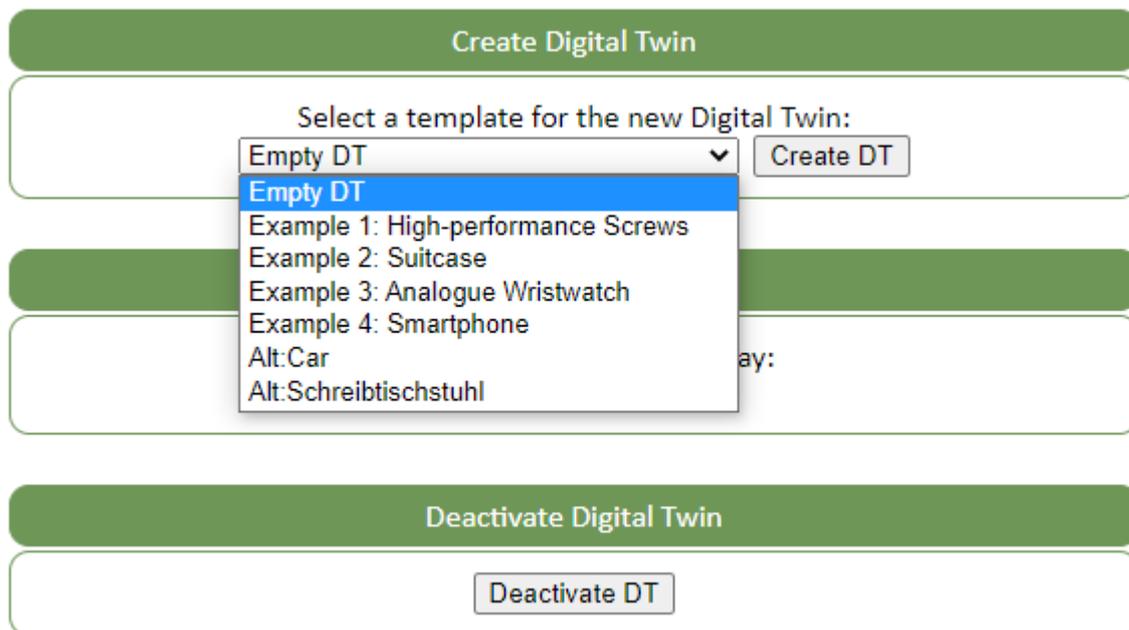
Das Interface (Abbildung 9) besteht aus drei wesentlichen Bereichen. Oben rechts wird die aktuelle Rolle des Nutzers angezeigt. Das Werkzeug erlaubt einen flexiblen Wechsel zwischen verschiedenen Rollen, um die unterschiedlichen Möglichkeiten für die jeweiligen Parteien aufzuzeigen. Kern des Demonstrators sind die Bereiche unterhalb des Logos; links können verschiedene Aktionen durchgeführt werden und rechts werden die Daten im digitalen Zwilling angezeigt. In der Folge werden die verschiedenen Funktionen dargestellt, die im Laufe des Lebenszyklus des digitalen Zwillings ausgeführt werden können.

Abbildung 9: Demonstrator mit leerem Interface



Der erste Schritt ist dabei die Erstellung des digitalen Zwillings. Dafür sind entsprechend der Anforderungen verschiedene Templates hinterlegt, die das Anlegen für den Nutzer vereinfachen sollen. Ein komplett leerer digitaler Zwilling kann ebenfalls angelegt werden; in jedem Falle muss der digitale Zwilling in der Folge dann mit Informationen befüllt werden.

Abbildung 10: Erstellung eines digitalen Zwillings auf Template-Basis im Demonstrator



Der Demonstrator unterstützt auch das Anlegen mehrerer digitaler Zwillinge gleichzeitig. Im vorliegenden Beispiel (Abbildung 11) wurden je ein digitaler Zwilling für einen Reisekoffer und ein Smartphone angelegt. Durch Auswahl im Drop-down-Menü können die verschiedenen Zwillinge angezeigt und zwischen den Zwillingen gewechselt werden.

Abbildung 11: Auswahl eines digitalen Zwillings zur Anzeige

Create Digital Twin

Select a template for the new Digital Twin:

Example 4: Smartphone ▼

Create DT

Select Digital Twin

Select a Digital Twin to display:

Primowa: 1 ▼

Primowa: 1

myPhone: 2

Deactivate Digital Twin

Deactivate DT

Der ausgewählte digitale Zwilling bzw. die enthaltenen Daten werden dann im rechten Bereich angezeigt. Unterschieden wird an dieser Stelle zwischen Informationen, die vom Hersteller stammen und nur von diesem bearbeitet werden können, sowie Informationen, die auch von Reparateuren verändert werden können. Abbildung 12 zeigt außerdem das Rollenmanagement – da der digitale Zwilling aus der Perspektive eines Reparateurs betrachtet wird, kann nur der zweite Teil des Datensatzes bearbeitet oder ergänzt werden.

Abbildung 12: Datenansicht im Demonstrator

Manufacturer: 0xee281497c45dca1e9950b564e51221c208109fab Select

Current Role: Repair Shop: 0xa379f78cb173950fea8d416519bb6dbc256211cd ✔ Select

Other: 0x0B8fb16e39f07b0694b9fE81b76bb3f86Bc81ebc Select



Create Digital Twin

Select a template for the new Digital Twin:

Example 4: Smartphone ▼

Create DT

Select Digital Twin

Select a Digital Twin to display:

myPhone: 2 ▼

Deactivate Digital Twin

Deactivate DT

View Digital Twin Data

Data provided exclusively by the Manufacturer:

name: myPhone

model: 13L

maker: Guugel

IMEI: 872032H882N

plug: USB-C

torch: LED

camera: single: 12.2 MP, f/1.7, 27mm (wide), 1/2.55", 1.4µm, dual pixel PDAF, OIS
video: 4K@30fps, 1080p@30/60/120fps; gyro-EIS

manufacturingYear: 2020

Data provided by Manufacturer and/or Repairers:

display: Edit Del

original: true Edit Del

type: OLED, HDR Edit Del

diagonalSize: 5.81in Edit Del

areaSize: 83.2cm² Edit Del

resolution: 1080x2340px Edit Del

Add Element/Level

battery: Edit Del

type: Li-Po Edit Del

originalCapacity: 3000mAh Edit Del

remainingCapacity: 2547mAh Edit Del

removable: non-removable Edit Del

Add Element/Level

totalUsageHours: 357 Edit Del

Add Element/Level

Save Changes

Die Daten und Datenfelder im digitalen Zwilling können mit den entsprechenden Schaltflächen bearbeitet, gelöscht oder ergänzt werden. Abbildung 13 zeigt die Bearbeitung des digitalen Zwillings. Zu beachten ist an dieser Stelle, dass die vergangenen Versionen des digitalen Zwillings auf der Blockchain bestehen bleiben und weiterhin eingesehen werden können. Eine Bearbeitung schafft eine neue, dann aktuellste Version der Datenstruktur. Im Interesse der Übersichtlichkeit wird auf die gleichzeitige Darstellung der verschiedenen Versionen im Demonstrator verzichtet.

Abbildung 13: Bearbeitung von Daten im digitalen Zwilling

View Digital Twin Data

Data provided exclusively by the Manufacturer:

```

name:          myPhone
model:         13L
maker:         Guugel
IMEI:          872032HB82N
plug:          USB-C
torch:         LED
camera:

                single: 12.2 MP, f/1.7, 27mm (wide), 1/2.55", 1.4µm, dual pixel PDAF, OIS
                video: 4K@30fps, 1080p@30/60/120fps; gyro-EIS

manufacturingYear: 2020
    
```

Data provided by Manufacturer and/or Repairers:

```

display:          Edit Del
    original:      true          Edit Del
    type:          OLED, HDR    Edit Del
    diagonalSize:  5.81in       Edit Del
    areaSize:      83.2cm2      Edit Del
    resolution:    1080x2340px  Edit Del
    Add Element/Level

battery:          Edit Del
    type:          Li-Po        Edit Del
    originalCapacity: 3000mAh   Edit Del
    remainingCapacity: 2547mAh Edit Del
    removable:     non-removable Edit Del
    Add Element/Level

totalUsageHours: 357          Edit Del
Add Element/Level
    
```

Save Changes

Zusätzlich zur Bearbeitung der Inhalte des digitalen Zwillings kann am Ende des Lebenszyklus auch die Deaktivierung des digitalen Zwillings erforderlich sein. Dafür ist im linken Bereich des Demonstrators ein Button vorgesehen. Die enthaltenen Daten werden dann versteckt (Abbildung 14).

Entsprechend der Anforderungen werden die Daten in einem deaktivierten digitalen Zwilling nicht gelöscht, sondern stehen bei Bedarf weiter zur Verfügung. Auch eine Bearbeitung der Daten ist (entsprechend des Rollenmodells) weiterhin möglich. Im Beispiel von Abbildung 15 wurde der Hersteller als Rolle ausgewählt, deswegen können alle Daten bearbeitet werden.

Abbildung 14: Inaktiver digitaler Zwilling im Demonstrator



Abbildung 15: Daten im deaktivierten digitalen Zwilling



Insgesamt hat der Demonstrator aufgezeigt, dass ein Blockchain-basierter digitaler Zwilling umgesetzt werden kann. Die Bedeutung der organisatorischen Struktur um das technische Konstrukt ist allerdings ebenso relevant – der Demonstrator weist die Rollen lediglich fixen technischen Adressen zu. Die korrekte Zuweisung an reale Unternehmen ist allerdings nicht Teil des Demonstrators. Eng verknüpft ist diese Frage mit der Verfügbarkeit von Informationen. Die Blockchain macht Daten langfristig für alle Stakeholder verfügbar. Aus Sicht der Kreislaufwirtschaft ist dies ausgesprochen positiv zu bewerten; an anderer Stelle kann dies allerdings auch zu Problemen führen. Einmal hinterlegte Daten können zwar bearbeitet werden, sind aber als Teil der vergangenen Versionen des digitalen Zwillings permanent einsehbar.

Arbeitspaket 6: Ableitung strategischer Implikationen gemeinsam mit KMU

Das Teilen von Informationen mithilfe digitaler Zwillinge hat strategische Implikationen für das jeweils involvierte Unternehmen. Neben positiven Effekten kann das Bereitstellen von Produktinformationen unter Umständen auch negative Folgen haben. Wie sich insbesondere in Arbeitspaket 3 gezeigt hat, gibt es zudem nicht nur „den einen“ digitalen Zwilling, welcher für alle Produkte geeignet ist. Vielmehr muss abhängig von der Komplexität und Art des Produkts entschieden werden, welche Informationen von den jeweiligen Stakeholdern in der Kreislaufwirtschaft benötigt werden und bereitgestellt werden sollten.

Ziel des sechsten Arbeitspakets war es, die strategischen Folgen der Bereitstellung von Informationen zu identifizieren und darauf aufbauend verschiedene Ausprägungen digitaler Zwillinge zu beurteilen. Dabei dienten Interviews zur Erhebung der Daten. Darüber hinaus wurden im Rahmen eines Workshops vorbereitend auf Arbeitspaket 7 verschiedene Informationsumfänge für digitale Zwillinge abgeleitet. Zudem war es Teil des Arbeitspakets, die Vor- und Nachteile des Informationsaustauschs mit Kennzahlen zu stützen, um die Folgen der strategischen Entscheidungen für Unternehmen greifbar zu machen. Im Folgenden wird zunächst genauer auf die Interviewstudie eingegangen, bevor die Ergebnisse vorgestellt werden.

Interviewstudie

Um die Sichtweise unterschiedlicher Unternehmen ergründen und eine empirische Fundierung schaffen zu können, wurden im Rahmen des Projekts 21 semi-strukturierte leitfadengestützte Interviews geführt, wobei bei Interview 20 zwei Interviewpartner am Gespräch teilgenommen haben. Diese Form der Befragung ermöglicht eine offene Gesprächsgestaltung, bei der ein Leitfaden die Ausrichtung und Struktur der Gespräche sicherstellt. Die in den Interviews diskutierten Themenbereiche sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Grobstruktur der Interviews

Themenbereich	Detailthemen
Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Überblick über Unternehmen, Funktion und Aufgabe
A: Informationsbereitstellung in der Kreislaufwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Wahrnehmung des Austauschs produktbezogener Informationen in der Kreislaufwirtschaft • Umgang mit fehlenden Produktinformationen
B: Auswirkungen der Informationsbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Barrieren / Risiken sowie Chancen / Vorteile der Informationsbereitstellung • Bereitschaft zum Teilen von Informationen
C: Technologisches Umfeld und digitaler Produktzwilling	<ul style="list-style-type: none"> • Einfluss technologischer Entwicklungen auf den Informationsaustausch in der Kreislaufwirtschaft • Nähere Betrachtung digitaler Produktzwillinge
Abschluss	<ul style="list-style-type: none"> • Frage nach weiteren offenen Themenbereichen und Ansprechpartnern

Im Anschluss an einen Überblick über das jeweilige Unternehmen sowie die Funktion und Aufgabe der Befragten sind die Interviewpartner in Teil A grundsätzlich zu ihrer Sichtweise bzgl. des Informationsaustauschs in der Kreislaufwirtschaft bzw. zum Status Quo befragt worden, um in die Thematik einzuführen. In einem weiteren Schritt sind konkret die Herausforderungen bzw. Barrieren sowie die Chancen und Vorteile der Bereitstellung von Informationen in der Kreislaufwirtschaft angesprochen wurden. Einhergehend ist auch die Bereitschaft von Unternehmen zum Informationsaustausch beleuchtet worden. In Themenbereich C wurden Fragen hinsichtlich digitaler Produktwillinge und der Anforderungen an diese gestellt. Anzumerken ist, dass in den Interviews über den Themenbereich C auch Inhalte aus Arbeitspaket 4 adressiert wurden. Zum Abschluss der Interviews sind offene Themen geklärt worden.

In den Interviews wurden Experten und Expertinnen der Kreislaufwirtschaft aus den Bereichen Produktion, Einzelhandel, Wiederverwendung, Recycling und Abfallwirtschaft, Instandhaltung, Nachhaltigkeitsberatung, Technologiedienstleistung und Forschung befragt (siehe Tabelle 13). Die Interviewpartner wurden dabei über Kontakte aus dem Projektbegleitenden Ausschuss, über Social-Media Plattformen wie Xing oder LinkedIn sowie durch Empfehlungen und Online-Recherchen akquiriert. Aufgrund der Covid-19-Pandemielage sind alle Interviews per Videokonferenz durchgeführt worden, sodass auch überregional Unternehmen befragt werden konnten.

Tabelle 13: Befragte Unternehmen der Interviewstudie

#	Unternehmen	Position
1	Technologiedienstleister	Geschäftsführer
2	Abfalldienstleister	Nachhaltigkeitsmanagerin & Leitung Marketing
3	Einzelhändler	Manager Materialien & Kreislauffähigkeit
4	Produzent	Senior Manager Circularity Assessment & Validation
5	Produzent	Coordinator Product Sustainability
6	Außeruniversitäre Forschungseinrichtung	Stellv. Abteilungsleiter und Co-Leiter Digitale Transformation / Kreislaufwirtschaft
7	Nachhaltigkeitsberatung	Sustainability Strategy Expertin
8	Nachhaltigkeitsberatung	Sustainability Managerin
9	Technologiedienstleister	Projekt- und Community-Managerin
10	Abfalldienstleister	Projektmanager
11	Technologiedienstleister	Geschäftsführer
12	Abfalldienstleister	Leiter Logistik
13	Nachhaltigkeitsberatung	Team Lead Sustainability Services
14	Produzent	Sustainability Specialist
15	Weiterverwendung	Head of Sustainability

#	Unternehmen	Position
16	Produzent	Environmental Strategy and Human Rights Manager
17	Instandhalter/Reparateur	Program Manager
18	Weiterverwendung	Geschäftsführer
19	Nachhaltigkeitsberatung	CEO und Lead Coach
20	Abfalldienstleister	Stellv. Leitung Anlagentechnik und Vorarbeiter E-Schrott-Zerlegung
21	Instandhalter/Reparateur	Geschäftsführer

Ergebnisse der Interviewstudie: Implikationen des Informationsaustauschs

Im Rahmen der Interviews hat sich bestätigt, dass die Experten den Austausch von Produktinformationen (unter Einsatz digitaler Zwillinge) in der Kreislaufwirtschaft aus diversen Gründen als sinnvoll erachten, gleichzeitig jedoch auch verschiedene Herausforderungen damit verbunden sind. In den folgenden Absätzen werden zunächst positive und anschließend negative Implikationen näher beleuchtet. Der Fokus soll dabei auf Herstellern, MROR-Unternehmen sowie Recyclern liegen, da sich der Informationsaustausch unter Einsatz digitaler Zwillinge auf diese Stakeholder am stärksten auswirkt. Entsprechend ausgestattete Produkte haben auch Auswirkungen auf Konsumenten; das Forschungsprojekt zielt allerdings explizit auf die Unternehmen ab, die die Produkte bereitstellen.

Einer der genannten Vorteile bzw. Chancen, die der Informationsaustausch bietet, ist die geschaffene Transparenz über Produkte, deren Eigenschaften und Zustand. Darüber hinaus kann das Verfügbarmachen benötigter Informationen, wie (De-)Montage- und Reparaturanleitungen oder Informationen zu Ersatzteilen, das Demontieren bzw. Zerlegen und damit das Reparieren und Wiederaufbereiten von Produkten erleichtern oder gar erst ermöglichen. Reparateure erhielten derzeit *„teilweise gar keine Ersatzteile, teilweise gar keine Unterlagen und teilweise auch vom Hersteller außerhalb der Gewährleistung oder Garantie auch keinerlei Support, [...] sprich hier ist Reparatur halt einfach nicht vorgesehen“* (Interviewpartner 21). Stünden diese Informationen bereit, so würde dies die Effizienz bspw. bei Reparaturen oder Wartungen steigern, damit viel Zeit und Geld sparen und das Verlängern des Produktlebens ermöglichen. Interviewpartner 21 fasst zusammen: *„Es würde Reparaturen vereinfachen. Ich könnte effizienter reparieren“* (Interviewpartner 21).

Auch im Bereich des Recyclings bieten sich durch den Informationsaustausch Vorteile. Durch den Erhalt zusätzlicher recyclingrelevanter Informationen, bspw. zur Materialzusammensetzung, können laut der Befragten Abfallfraktionen (z.B. Verpackungen, Elektroaltgeräte, Batterien) gezielter sortenrein getrennt und damit Rohstoffe hochwertiger recycelt sowie die Recyclingrate generell gesteigert werden. Folglich eröffnet sich nicht nur ein ökologischer Mehrwert, sondern auch ein wirtschaftlicher Vorteil: *„Wenn jetzt die ersten Datensätze reinkommen und der Recycler feststellt, damit kann ich ja [...] aussortieren. Und hoppla, sieh an, mein Regranulat ist plötzlich deutlich besser, finde ich gut. Und dann wird der diese Regranulate zu besseren Preisen in weitere Märkte verkaufen können.“* (Interviewpartner 4). Die bessere Rezyklatqualität führt potenziell zu

mehr Verkäufen und kommt in der Folge auch Herstellern zugute, die hochwertige Sekundärrohstoffe für ihre Produkte verwenden möchten.

Ein weiterer Aspekt ist die Sicherstellung der Recyclingfähigkeit von Produkten. Der intensive Austausch zwischen Herstellern und Recyclern spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle. Aus Sicht der Interviewpartner könnten Recycler bereits in der Phase der Produktentwicklung wertvollen Input leisten oder im Rahmen des Recyclings eines bestehenden Produkts dem Hersteller rückwirkend Feedback zur Recyclingfähigkeit oder Optimierungspotenzialen bzgl. des Produkts geben: Vorteilhaft wäre es, wenn *„Recyclingunternehmen diese Art von Informationen strukturiert zu einem Hersteller zurückschicken, damit der entsprechend sein Produktdesign optimieren kann“* (Interviewpartnerin 17). Somit wird Herstellern dazu verholfen, nachhaltigere Produkte entwickeln und gleichzeitig würden auch Recycler von mehr recyclingfähigen Produkten profitieren.

Darüber hinaus profitieren Hersteller auch in anderer Weise vom Informationsaustausch. Aktuell stünden *„ganz viele Unternehmen auch vor der Herausforderung, dass die gar nicht genau wissen, wie lange ihre Produkte zum Beispiel halten. Und ich glaube, es ist total spannend, wenn es halt mehr Daten und Informationen gibt, wie Produkte konkret genutzt werden und [...] wie sie zurückfließen“* (Interviewpartnerin 15). Über digitale Zwillinge könnten laut der Interviewpartner Nutzungsinformationen bereitgestellt werden. Hersteller könnten darüber nicht nur ihre Produkte entsprechend der Nutzungsweise anpassen und optimieren, sondern ggf. auch neue Servicemodelle entwickeln. Ein weiterer genannter Aspekt ist, dass sich das Image von Herstellern, welche z.B. Reparateuren benötigte Informationen bereitstellen, verbessert, was wiederum das Kaufinteresse seitens der Konsumenten anregen bzw. sich in der Gewinnung neuer Kunden, welche viel Wert auf die Reparierbarkeit, Recyclingfähigkeit oder Rückverfolgbarkeit von Produkten und Materialien legen, widerspiegeln kann. Stellen Hersteller zudem Informationen zu Ersatzteilen und deren Verfügbarkeit bereit, so ist davon auszugehen, dass sich auch der Bedarf an Ersatzteilen erhöhen wird.

Neben den genannten Vorteilen sind auch Barrieren und Ängste mit dem Austausch von Informationen verbunden. Auf Herstellerseite besteht die Sorge, dass auch Konkurrenten oder Zulieferer Zugang zu Informationen und damit ggf. auch Einblicke in die Prozesse und Strukturen des Herstellers erhalten. Dieses Wissen könnten die Informationsempfänger schlimmstenfalls zum Nachteil der Hersteller einsetzen. Das Teilen von Informationen kann demnach ein strategisches Risiko mit sich bringen. Zu klären ist, *„wie weit geht man zum Beispiel ins Detail, um Produktinformationen zu teilen. Das ist ja auch eine Sache, wo man Patente schützen muss, oder wo man dann halt wirklich schauen muss, dass man den Wettbewerbern nicht zu viele Informationen gibt“* (Interviewpartnerin 5).

Aus Angst vor dem Verlust von Wettbewerbsvorteilen sind somit viele Unternehmen, die potenziell benötigte Informationen bereitstellen können, nicht gewillt, diese zu liefern. Unsicherheiten über die tatsächlich zu teilenden Informationen und Konsequenzen spielen dabei eine große Rolle: *„Welche Informationen sind gefragt, was muss ich eigentlich berichten? Und solange das nicht klar ist, rechnen alle mit dem Schlimmsten und mit dem Detailliertesten, aber eigentlich braucht man das gar nicht so genau“* (Interviewpartner 11). Unklarheit in Verbindung mit großer Vorsicht schränkt das Teilen von Informationen deswegen deutlich ein. Dabei handelt es sich auch um ein strukturelles Problem – aufgrund der weitestgehend unabhängigen Prozesse der Herstellung und des Recyclings kann nicht davon ausgegangen werden, dass bei Herstellung

vollständig bekannt ist, welche Informationen für andere Stakeholder in späteren Schritten erforderlich sind. Vorteilhaft wäre es, wenn Hersteller sich frühzeitig mit anderen Stakeholdern vernetzen, damit diese ihre Informationsbedarfe spezifizieren und aufgeklärt wird, welche Informationen konkret benötigt werden.

Einige Interviewpartner betonten, dass insgesamt *„ein kollaboratives Denken, bei dem man die anderen nicht als Wettbewerber sieht, sondern sozusagen als, ne? Wir könnten uns zusammenschließen, um eine Hebelwirkung zu haben“* (Interviewpartnerin 19) sei. Durch das Zusammenarbeiten und den Austausch unter den Akteuren könnten Unternehmen voneinander lernen und Synergieeffekte geschaffen werden. Eine wichtige Grundvoraussetzung dafür ist jedoch die Steigerung des Vertrauens der Akteure zueinander. Der Informationsfluss vom Hersteller zu anderen Stakeholdern vermittelt offenbar häufig den falschen Eindruck, dass die Vorteile digitaler Zwillinge zu großen Teilen nicht beim Hersteller liegen. Von einem Austausch mit Recyclern und Reparateuren profitieren allerdings auch die Hersteller, die ihr Produkt damit verbessern können. Wichtig ist, dass ein gemeinsames Bewusstsein für mehr Nachhaltigkeit, aber insbesondere auch die Bereitschaft zur Kooperation als Grundlage für den Austausch von Produktinformationen vorhanden sein müssen, um den Weg für eine verbesserte Kreislaufwirtschaft zu ebnen (Lege et al. 2022).

Davon abgesehen ist es zum aktuellen Zeitpunkt für viele Unternehmen schwer abschätzbar, mit welchen Kosten beim Informationsaustausch tatsächlich zu rechnen ist. Neben einmaligen Investitionen für das Aufsetzen eines digitalen Zwillings und damit zusammenhängender Technologien sind auch langfristig Kosten für dessen Betrieb und Aktualisierung erforderlich – *„da muss viel Geld in die Hand genommen werden“* (Interviewpartner 4). Auf der anderen Seite sind technologische Neuerungen im Zuge von Digitalisierungsaktivitäten jedoch auch mit großen Chancen für Unternehmen verbunden. Unabhängig von der technischen Machbarkeit digitaler Zwillinge, sind Anreize und Strukturen zu schaffen, um sicherzustellen, dass vorhandene Informationen ausgetauscht und zielgerichtet im Sinne einer Kreislaufwirtschaft verwendet werden.

Wie die Forschungsergebnisse zeigen, ist es für eine Kreislaufwirtschaft unerlässlich, dass benötigte Informationen nicht zurückgehalten und die Chancen, aber auch Risiken des Informationsaustauschs abgewogen und richtig eingeschätzt werden. Digitale Zwillinge können hier einen entscheidenden Beitrag leisten, indem sie den Zugang zu Produktinformationen in der Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Im besten Fall begleiten sie das Produkt dabei während des gesamten Produktlebenszyklus.

Die Kreislaufwirtschaft ist an dieser Stelle nicht als einmalige Umstellung zu sehen, sondern als kontinuierliche und nachhaltige Veränderung des bestehenden Systems. Ein Nachsteuern wird häufig nötig sein – beispielsweise ist aufgrund der weitestgehend unabhängigen Prozesse der Herstellung und des Recyclings nicht davon auszugehen, dass bei Herstellung vollständig bekannt ist, welche Informationen in späteren Schritten erforderlich sind. Wichtig ist, darüber aufzuklären, welche Informationen im Detail benötigt werden. Damit die Akteure diese Informationen im eigenen Unternehmen erheben und anschließend auch mit anderen Akteuren in der Kreislaufwirtschaft austauschen können, ist das Festlegen technischer Standards empfehlenswert. (Lege et al. 2022)

Zusammenfassend gibt Tabelle 14 einen Überblick über die wichtigsten strategischen Implikationen durch den Austausch von Produktinformationen unter Stakeholdern der Kreislaufwirtschaft.

Tabelle 14: Vor- und Nachteile des Informationsaustauschs für die Stakeholder der Kreislaufwirtschaft

Stakeholder	Vorteile	Nachteile
Hersteller	<ul style="list-style-type: none"> • Imageverbesserung • Gewinnung neuer Kunden • Mehrverkauf von Ersatzteilen • Potenzial zur Produktverbesserung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit- und Arbeitsaufwand • Investitionskosten für digitale Zwillinge • Ggf. weniger Neuproduktverkauf • Verlust von Datenhoheit
MROR-Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> • Erleichterung / Ermöglichen des fachgerechten Demontierens und Reparierens • Effizienzsteigerungen • Mehr Reparaturen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit- und Arbeitsaufwand • Investitionskosten für digitale Zwillinge
Recycler	<ul style="list-style-type: none"> • Erleichterung sortenreiner Trennung von Abfallfraktionen • Steigerung der Recyclingrate • Hochwertigeres Recycling möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Zeit- und Arbeitsaufwand • Investitionskosten für digitale Zwillinge

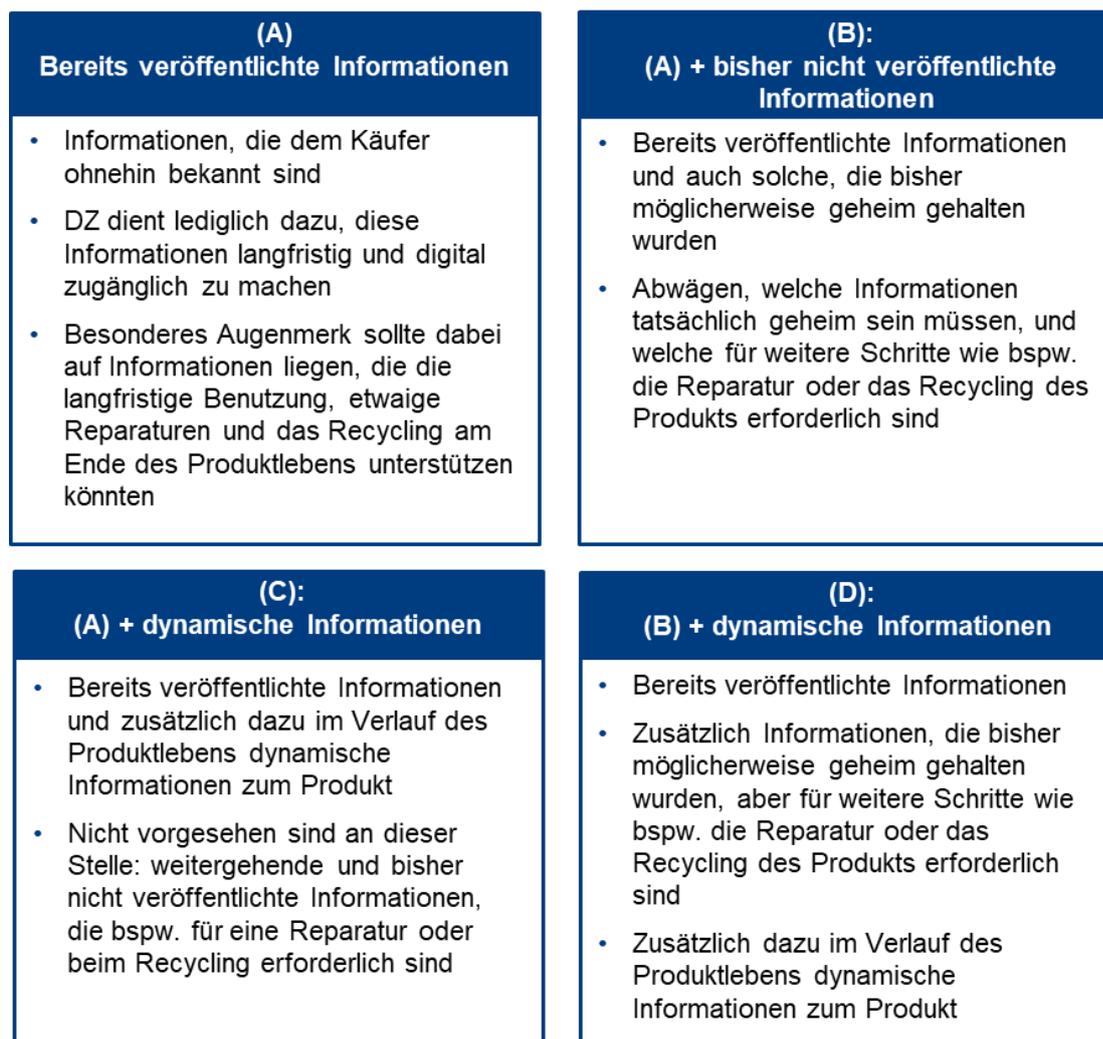
Ergänzend zur Erhebung strategischer Folgen bzw. Vor- und Nachteile des Informationsaustauschs unter Einsatz digitaler Zwillinge beinhaltet dieses Arbeitspaket auch die Zuordnung von Kennzahlen zu den Vor- und Nachteilen, um diese greifbar und messbar zu machen. Dabei ist zu erwähnen, dass nicht alle Vor- und Nachteile durch Kennzahlen quantifiziert werden können. Der Vorteil einer Imageverbesserung lässt sich bspw. schwer messen. Über Kennzahlen wie den Image-Wert, der darauf basiert, wie viele Kunden ein Produkt weiterempfehlen würden, ist schwer nachzuvollziehen, ob das Image sich insbesondere durch mehr bereitgestellte Informationen verändert hat. Darüber hinaus lässt sich bspw. auch das Potenzial zur Produktverbesserung – genau wie die Imageverbesserung – nicht in Kennzahlen übertragen. Die Gewinnung neuer Kunden als weiteren potenziellen Vorteil kann man über Kennzahlen wie den Neukundenanteil oder die Kundenstruktur (den prozentualen Anteil von Kunden, welche ein Produkt, welches z.B. über einen digitalen Zwilling verfügt, gekauft haben) messen. Der Mehrverkauf von Ersatzteilen lässt sich über den Absatz von und Umsatz mit Ersatzteilen quantifizieren.

Den Nachteil des erhöhten Zeit- und Arbeitsaufwands im Zusammenhang mit dem Einsatz digitaler Zwillinge lässt sich z.B. über die Personalaufwandsquote oder die Mehrarbeitsquote beschreiben. Die Kosten zur Investition in den Betrieb des digitalen Zwillinges können über das Investitionsvolumen quantifiziert werden. Denkbar wäre es auch, die Amortisationszeit zu ermitteln. Um zu sehen, ob weniger Neuprodukte verkauft worden sind, könnten erneut Absatz und Umsatz oder auch die Umschlaghäufigkeit herangezogen werden. Der Verlust der Datenhoheit als weiterer potenzieller Nachteil für Hersteller lässt sich nicht über Kennzahlen abbilden.

Ableiten von Entscheidungspfaden

Wie zuvor beschrieben stehen Akteure der Kreislaufwirtschaft dem Teilen von Informationen unterschiedlich gegenüber. Davon abhängig muss sich auch der Umfang der über einen digitalen Zwilling bereitgestellten Informationen unterscheiden. Je nach Produkt und Bereitschaft eines Akteurs zum Teilen von Informationen können vier verschiedene Informationsumfänge bzw. Ausprägungen digitaler Zwillinge unterschieden werden (siehe Abbildung 16), die zu Entscheidungspfaden für das Entscheidungswerkzeug (Arbeitspaket 7) weiterentwickelt wurden. Die Ausprägungen sowie Entscheidungspfade sind im Rahmen eines zweitägigen Workshops gemeinsam mit einem Unternehmen herausgearbeitet worden. Dabei wurde sich einzelner Elemente der im Bewilligungsbescheid angegebenen Methode des Design Thinkings bedient. Insbesondere die Design Thinking-Phasen der Problemdefinition und Beobachtung sowie die gemeinsame Ideenentwicklung sind hier hervorzuheben und bildeten eine wichtige Basis bei der Erarbeitung der verschiedenen Ausprägungen. Die Entscheidungspfade sind im Anschluss an den Workshop durch das Forscherteam erneut weiterentwickelt worden und daraufhin im Rahmen eines weiteren Workshops mit Praxisvertretern (zusammen mit dem entwickelten Entscheidungswerkzeug, siehe Arbeitspaket 7) validiert worden. Im Folgenden werden die vier verschiedenen Informationsumfänge bzw. Ausprägungen des digitalen Zwillings näher vorgestellt. Dabei wurde sich auf den Hersteller fokussiert, da dieser die Informationen initial im digitalen Zwilling hinterlegen muss.

Abbildung 16: Verschiedene Ausprägungen digitaler Zwillinge



Digitaler Zwilling mit bereits veröffentlichten Informationen

In einem solchen digitalen Zwilling werden nur bereits veröffentlichte Informationen gespeichert, die dem Käufer ohnehin bekannt sind (wie beispielsweise eine Auflistung von Komponenten). Der digitale Zwilling dient dazu, diese Informationen digital und kontinuierlich zugänglich zu machen, beispielsweise wenn die ursprüngliche Verpackung und dazugehörige Unterlagen nicht mehr zur Verfügung stehen. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf Informationen liegen, die die langfristige Benutzung, etwaige Reparaturen und das Recycling am Ende des Produktlebens unterstützen könnten.

Der digitale Zwilling bezieht sich in diesem Fall auf eine Charge oder einen Typ baugleicher Produkte (oder ein Produkt, bei dem es sich um ein Einzelstück handelt). Alle Produkte, die Teil dieser Charge oder dieses Typs sind, haben identische Eigenschaften, sodass ein einzelner digitaler Zwilling für viele Produkte verwendet werden kann. Im Vergleich zu vielen, separaten digitalen Zwillingen können dabei Kosten eingespart werden. Informationen, die sich auf ein spezifisches Produkt einer Charge beziehen, können damit allerdings nicht gespeichert werden. Das beinhaltet auch die allermeisten Informationen, die erst im Laufe des Produktlebens entstehen.

Digitaler Zwilling mit bereits veröffentlichten und bisher nicht veröffentlichten Informationen

In einem solchen digitalen Zwilling werden nicht nur bereits veröffentlichte Informationen gespeichert, die dem Käufer ohnehin bekannt sind, sondern auch bisher nicht veröffentlichte Informationen. Dies ist besonders dann relevant, wenn für die Kreislaufführung des Produkts weitere Informationen benötigt werden und der Hersteller auch bereit ist, diese zu teilen. Es kann sich dabei z.B. um Ersatzteillisten oder Rezyklatanteile im Produkt handeln, die bislang nicht kommuniziert worden sind. Derartige Informationen können jedoch im weiteren Verlauf helfen, das Produktleben zu verlängern.

In diesem Kontext können auch Informationen wie der Name von Zulieferern einzelner Komponenten oder die genaue Zusammensetzung von Materialien relevant sein, die Hersteller ggf. nicht preisgeben möchten. Diese Geheimhaltung hat grundsätzlich Vorrang vor dem Informationsinteresse anderer Stakeholder – hier sollte allerdings sorgfältig abgewogen werden, welche Informationen tatsächlich geheim sein müssen, und welche Informationen für weitere Schritte wie beispielsweise die Reparatur oder das Recycling des Produkts erforderlich sind.

Wie im Typ zuvor bezieht sich der digitale Zwilling in diesem Fall auf eine Charge oder einen Typ baugleicher Produkte (oder ein Produkt, bei dem es sich um ein Einzelstück handelt).

Digitaler Zwilling mit bereits veröffentlichten und dynamischen Informationen

Zusätzlich zu bereits veröffentlichten Informationen sollten bei diesem Typ im Verlauf des Produktlebens dynamische Informationen zum Produkt hinterlegt werden.

Damit sind Informationen gemeint, die nicht ab Werk feststehen, sondern erst im Laufe des Produktlebens entstehen. Dabei kann es sich um eine Dokumentation der Eigentümerschaft, Informationen zur Produktnutzung, etwaige vorgenommene Änderungen am Produkt (z.B. eine Reparatur oder ein Austausch von Komponenten) oder auch um CO₂-Emissionen im Transport handeln.

In diesem Kontext wird ein digitaler Zwilling für jedes einzelne Produkt angelegt. Die Produkte sind ab Werk zwar (möglicherweise) identisch, werden aber im Laufe ihres Lebens modifiziert

oder zumindest mit anderen Informationen assoziiert (wie beispielsweise Reparaturen durch Nutzer), sodass ein separater digitaler Zwilling für jedes einzelne Produkt erforderlich ist. Deswegen sollte jedes einzelne Produkt bereits ab Werk einen individuellen digitalen Zwilling und eine individuelle Markierung erhalten, damit im weiteren Verlauf produktspezifische Informationen eingetragen werden können.

Digitaler Zwilling mit bereits veröffentlichten, bisher nicht veröffentlichten und dynamischen Informationen

In diesem digitalen Zwilling werden bereits veröffentlichte sowie bisher nicht veröffentlichte Informationen über das Produkt gespeichert. Zusätzlich dazu sollen im Verlauf des Produktlebens dynamische Informationen zum Produkt im digitalen Zwilling hinterlegt werden. Dieser digitale Zwilling hat im Vergleich zu den drei anderen Typen den größten Informationsumfang.

Auch hier wird ein digitaler Zwilling für jedes einzelne Produkt angelegt, da der digitale Zwilling durch die dynamischen Informationen individuell ist.

Insgesamt lässt sich schlussfolgern, dass je nach Bereitschaft der Akteure, Informationen zu teilen und auszutauschen, auch die Inhalte und der Umfang der Informationen im digitalen Zwilling variieren. Zudem hängen die Informationen vom jeweiligen Produkt und dessen Komplexität ab. Im folgenden Arbeitspaket werden die hier vorgestellten Ausprägungen des digitalen Zwillings in Form einer webbasierten Entscheidungshilfe aufgegriffen.

Arbeitspaket 7: Entwicklung einer Entscheidungshilfe als webbasierter Demonstrator mit Leitfaden und beispielhaftem Vorgehen

Ziel des Arbeitspakets 7 war die Entwicklung eines webbasierten Demonstrators, der Unternehmen bei der Bewertung eines digitalen Zwillings unterstützt. Dieser Demonstrator und der zugeordnete Leitfaden mit beispielhaftem Vorgehen sind unter www.blink-projekt.info/entscheidungs-werkzeug abrufbar. Die parallele Betrachtung der Internetseite kann die Inhalte dieses Kapitels greifbarer machen. Die folgenden beiden Abschnitte beschreiben zunächst das allgemeine Vorgehen und anschließend die Inhalte der Entscheidungshilfe selbst. Der Begriff „Entscheidungshilfe“ wurde aufgrund von entsprechendem Feedback im Projekt durch „Entscheidungswerkzeug“ ersetzt. Im Folgenden wird ebenfalls der Begriff Entscheidungswerkzeug verwendet.

Vorgehen

Das Entscheidungswerkzeug wurde zunächst durch die beteiligten Forschungsstellen aufgesetzt und auf Basis der vorangehenden Arbeitspakete, insbesondere Arbeitspaket 6, mit Inhalten befüllt. Die Entwicklung und Anpassung der Inhalte fanden dabei iterativ im Wechselspiel der beteiligten Forschungsstellen und verschiedener Mitarbeiter statt. Die Entscheidungspfade wurden zunächst zu einem Entscheidungsbaum weiterentwickelt. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, dass Redundanzen vermieden werden und die Einzelentscheidungen logisch aufeinander aufbauen.

Außerdem wurde das Entscheidungswerkzeug schon während der Entwicklung im Rahmen einer Transfermaßnahme diskutiert und nach der Fertigstellung bei einem dedizierten Workshop am mit externen Parteien validiert (siehe Tabelle 15). Das Werkzeug wurde in diesem Zusammenhang von den Teilnehmenden direkt getestet und sehr positiv wahrgenommen. Es wurde jedoch der Wunsch geäußert, das Entscheidungswerkzeug und die theoretischen Inhalte durch anschauliche Beispiele und Grafiken verständlicher zu machen.

Tabelle 15: Sample des Expertenworkshops für Arbeitspaket 7

#	Unternehmen	Position
1	Transport- und Logistikdienstleister	IT Systems Analyst
2	Transportdienstleister	Geschäftsführer

Entscheidungswerkzeug

Das Entscheidungswerkzeug ist wie eingangs beschrieben auf der Website des Projekts abrufbar. Zusätzlich zum Entscheidungswerkzeug befinden sich auf dieser Internetseite auch ein kurzer Einleitungstext und ein Leitfaden mit beispielhaftem Vorgehen. Sowohl Einleitung als auch Leitfaden dienen dazu, die sinnvolle Benutzung des Werkzeugs zu ermöglichen und mögliche Rückfragen direkt zu beantworten, ohne dass eine Kontaktaufnahme zu den Forschungsstellen erforderlich wird. Abbildung 17 zeigt den Einleitungstext. Der Leitfaden mit beispielhaftem Vorgehen wird an dieser Stelle nicht explizit näher betrachtet, da die nachfolgende textuelle Beschreibung des Entscheidungswerkzeugs an den Leitfaden angelehnt ist. Dementsprechend zeigen die folgenden Abschnitte die drei Phasen auf, die das Entscheidungswerkzeug umfasst sowie das Ergebnis nach vollständigem Durchlaufen des Werkzeugs.

Abbildung 17: Einführung zum Entscheidungswerkzeug

Entscheidungswerkzeug

Dieses Entscheidungswerkzeug soll Sie als Hersteller eines Produkts dabei unterstützen, strategische Entscheidungen über die Einführung von sogenannten Digitalen Zwillingen zu fällen. Ein Digitaler Zwilling ist ein digitales Abbild eines physischen Objekts, das Informationen über physische Objekte bereitstellen kann. Das Objekt wird dabei in irgendeiner Form eindeutig markiert (beispielsweise mit einem QR-Code), um auf den Digitalen Zwilling zu verweisen.

Motivation für die Einführung eines Digitalen Zwillinges ist die Kreislaufwirtschaft. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Produkte nicht nach der (initialen) Nutzung auf einer Mülldeponie zu entsorgen, sondern die Produkte stattdessen weiterzuverwenden oder zu verwerten. Das kann eine längere Verwendung durch den initialen Nutzer bedeuten, aber auch die Weitergabe an andere Nutzer, eine Reparatur, eine Wiederaufbereitung oder das Recycling von Komponenten oder Rohstoffen. Ein Hemmnis für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist die mangelnde Verfügbarkeit produktbezogener Informationen – die genaue Zusammensetzung des Produkts ist bei der Herstellung selbstverständlich bekannt, wird aber sehr häufig nicht weitergegeben, sodass diese Informationen beispielsweise bei Reparaturen oder beim Recycling oft nicht mehr vorliegen.

Einen geeigneten Lösungsansatz, um Produktinformationen dauerhaft und digital abspeichern, aktualisieren und abrufen zu können, stellen Digitale Zwillinge dar. Ein Digitaler Zwilling umfasst bestenfalls für die Reparatur, die Wiederverwendung, die Aufbereitung und das Recycling relevante Produktinformationen. Diese beziehen sich beispielsweise auf Materialien, Komponenten, chemische Inhaltsstoffe sowie Ersatzteile. Inwiefern Digitale Zwillinge auch in Ihrem Anwendungszusammenhang sinnvoll sind, können Sie mit diesem Entscheidungswerkzeug herausfinden.

Falls Sie Unterstützung beim Ausfüllen dieses Werkzeugs benötigen, empfiehlt sich die Betrachtung des untenstehenden Leitfadens und des enthaltenen beispielhaften Vorgehens.

Zum Download des Leitfadens klicken sie bitte hier:

[Leitfaden.pdf](#)

Phase 1

Die erste Phase des Entscheidungswerkzeugs fokussiert die Rahmenbedingungen der Nutzung und stellt sicher, dass das Werkzeug idealerweise nur vom intendierten Empfänger und im geeigneten Kontext verwendet wird. Wie in Abbildung 18 zu sehen ist, wird zunächst nach dem Interesse an der Informationsweitergabe als Enabler der Kreislaufwirtschaft gefragt. Da es sich bei digitalen Zwillingen um eine Möglichkeit zum Austausch von Informationen handelt, können digitale Zwillinge ihren Zweck nur erfüllen, wenn die Bereitschaft zum Informationsaustausch vorhanden ist.

Abbildung 18: Übersicht über Fragen in Phase 1

Phase 1: Rahmenbedingungen

Die erste von drei Phasen im Entscheidungswerkzeug beschäftigt sich mit den Rahmenbedingungen. Hierbei soll festgestellt werden, ob sich das Produkt grundsätzlich für einen Digitalen Zwilling (DZ) eignet.

Möchten Sie durch die Weitergabe von Informationen zu einem Produkt die Kreislaufwirtschaft unterstützen?

Ja Nein

Sind Sie der Hersteller des Produkts?

Ja Nein

Können Sie Zeit und Geld in DZ investieren?

Ja Nein

Nach Beantwortung der ersten Frage wird zusätzlich die zweite Frage eingeblendet. Dieses Prinzip findet bei allen folgenden Fragen Anwendung, um das Entscheidungswerkzeug möglichst übersichtlich zu machen. Speziell in der zweiten Frage steht die Rolle des Nutzers im Mittelpunkt, da sich das Werkzeug primär an Hersteller richtet. Nur der Hersteller hat Einblick in die mit der

Herstellung verbundenen Informationen und Prozesse und kann das Produkt markieren, um eine Verknüpfung von physischem Produkt und digitalem Zwilling herzustellen. Abschließend müssen außerdem die Möglichkeit und der Wille vorhanden sein, Zeit und Geld in einen digitalen Zwilling zu investieren.

Phase 2

Die zweite Phase schließt im Entscheidungswerkzeug nahtlos an die erste Phase an und soll feststellen, wie der digitale Zwilling ausgestaltet werden soll. Abbildung 19 zeigt einen möglichen Pfad beim Durchlaufen des Werkzeugs. Kern dieser Phase ist die Frage, welche Art Informationen über das spezifische Produkt geteilt werden sollen. Als Einleitung wird deswegen zunächst gefragt, ob die grundsätzliche Bereitschaft zum Teilen von Informationen besteht, da dies eine Voraussetzung für digitale Zwillinge ist. Bei Beantwortung mit „Nein“ wird eine entsprechende Erklärung eingeblendet.

Die folgenden Fragen zielen auf den tatsächlichen Inhalt des digitalen Zwillings ab. An erster Stelle stehen dabei Veränderungen am Produkt im Laufe der Nutzung. Spielen diese keine Rolle, wird der digitale Zwilling initial durch den Hersteller mit Informationen befüllt und muss im Laufe der Nutzung nicht aktualisiert werden, was das technische Konstrukt deutlich vereinfacht. Ist die Dokumentation von Veränderungen am Produkt oder Nutzungsdaten dagegen von Interesse, muss eine verlässliche Datenquelle bestehen, die diese Informationen digital hinterlegt. Das kann ein konkreter Akteur wie beispielsweise ein Reparateur sein, aber auch einer oder mehrere Sensoren, die die Produktinformationen auslesen.

Abbildung 19: Übersicht über Fragen in Phase 2

Phase 2: Ausgestaltung des DZ

Das gewählte Produkt eignet sich grundsätzlich für einen DZ - in der Folge werden jetzt Ihre Rolle und die Vor- und Nachteile diskutiert.

Sind Sie grundsätzlich dazu bereit, Informationen über das Produkt mit anderen Stakeholdern zu teilen?

Ja Nein

Verändert sich Ihr Produkt im Laufe der Nutzung (möglicherweise) deutlich?

Ja Nein

Gibt es einen Stakeholder oder eine andere Datenquelle (beispielsweise ein Sensor), der diese dynamischen Informationen in das System eintragen kann?

Ja Nein

Wären Sie bereit, mehr Informationen als bisher über Ihr Produkt veröffentlichen?

Ja Nein

Zum Abschluss wird erfragt, ob mehr Informationen als bisher über das Produkt veröffentlicht werden sollen. Die zugrundeliegende Annahme ist an dieser Stelle, dass ein Hersteller in jedem Fall bestimmte Informationen über sein Produkt veröffentlicht bzw. veröffentlichen muss. Ein digitaler Zwilling fungiert mindestens als Speicherort für diese Informationen, kann aber auch zusätzliche Informationen beinhalten.

Wenn die Fragen der zweiten Phase vollständig beantwortet worden sind, wird das Ergebnis wie in Abbildung 20 dargestellt eingeblendet. Das Ergebnis besteht zunächst aus einem kurzen tabellarischen Überblick über die vier möglichen Ausprägungen von digitalen Zwillingen, die sich aus den vorangehenden Fragen ergeben. Anschließend wird die im jeweiligen Fall relevante Ausprägung im Detail beschrieben. Sowohl die Tabelle als auch die Beschreibung basieren auf den Erkenntnissen des Arbeitspakets 6 (vgl. hierzu insbesondere auch Abbildung 16).

Die Anforderungen an digitale Zwillinge (Arbeitspaket 4) sehen eine nachträgliche Vereinzelung von Produkten aus Produktklassen vor. Dieser Gedanke wird im Entscheidungswerkzeug wieder aufgegriffen. Für die Vereinzelung ist eine eindeutige Markierung aller Produkte der Klasse nötig, die im Idealfall schon durch den Hersteller erfolgen sollte. Im Interesse möglichst auf den jeweiligen Fall zugeschnittener Zwillinge gibt das Entscheidungswerkzeug (Arbeitspaket 7) entsprechende Empfehlungen, sodass eine nachträgliche Vereinzelung im Entscheidungswerkzeug nicht vorgesehen ist. Hier besteht allerdings kein Widerspruch zwischen den Arbeitspaketen, sondern lediglich eine andere Perspektive auf Basis anderer Zielsetzungen. Die Anforderungen zielen auf einen digitalen Zwilling ab, der flexibel verwendet werden kann, während das Werkzeug schon bei der Erstellung des digitalen Zwillings eine möglichst sinnvolle Struktur herbeiführen soll.

Abbildung 20: Beschreibung des ausgewählten digitalen Zwillings im Entscheidungswerkzeug

Übersicht über alle Typen
 Die untenstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die 4 Typen von digitalen Zwillingen und die jeweils enthaltenen Informationen. Im Text im Anschluss an die Grafik wird ihr konkreter Typ dann näher beschrieben.

Informationstypen	4 Kategorien			
Bereits veröffentlicht	x	x	x	x
Nicht veröffentlicht		x		x
Dynamische Informationen			x	x

DZ mit bereits veröffentlichten, nicht veröffentlichten und dynamischen Informationen
 Sie sollen in Ihrem DZ bereits veröffentlichte sowie nicht veröffentlichte Informationen über das Produkt speichern. Zusätzlich dazu sollen im Verlauf des Produktlebens dynamische Informationen zum Produkt im DZ hinterlegt werden.

Zunächst einmal geht es dabei um bereits veröffentlichte Informationen, die dem Käufer ohnehin bekannt sind. Der DZ dient lediglich dazu, diese Informationen auch nachhaltig und digital zugänglich zu machen, beispielsweise wenn die ursprüngliche Verpackung und dazugehörige Unterlagen nicht mehr zur Verfügung stehen. Besonders Augenmerk sollte dabei auf Informationen liegen, die die langfristige Benutzung, etwaige Reparaturen und das Recycling am Ende des Produktlebens unterstützen könnten.

In diesem Kontext können auch Informationen wie der Name von Zulieferern einzelner Komponenten oder die genaue Zusammensetzung von Materialien relevant sein, die Sie als Hersteller möglicherweise geheim halten möchten. Diese Geheimhaltung hat grundsätzlich Vorrang vor dem Informationsinteresse anderer Stakeholder - hier sollte allerdings sorgfältig abgegengen werden, welche Informationen tatsächlich geheim sein müssen, und welche Informationen für weitere Schritte wie beispielsweise die Reparatur oder das Recycling des Produkts erforderlich sind.

Außerdem werden dynamische Informationen gespeichert. Damit sind Informationen gemeint, die nicht ab Werk feststehen, sondern erst im Laufe des Produktlebens entstehen. Dabei kann es sich um eine Dokumentation der Eigentümerschaft, Informationen zur Produktnutzung, etwaige vorgenommene Änderungen am Produkt (z.B. eine Reparatur oder ein Austausch von Komponenten) oder auch um CO₂-Emissionen im Transport handeln.

In Ihrem Fall wird ein DZ für jedes einzelne Produkt angelegt. Die Produkte sind ab Werk zwar (möglicherweise) identisch, werden aber im Laufe ihres Lebens modifiziert oder zumindest mit anderen Informationen assoziiert (wie beispielsweise Reparaturen durch Nutzer), sodass ein separater DZ für jedes einzelne Produkt erforderlich ist. Deswegen sollte jedes einzelne Produkt bereits ab Werk einen individuellen DZ und die eine individuelle Markierung erhalten, damit im weiteren Verlauf produktspezifische Informationen eingetragen werden können.

Phase 3

Die dritte und letzte Phase des Entscheidungswerkzeugs (Abbildung 21) nimmt die Frage in den Fokus, ob ein digitaler Zwilling im vorliegenden konkreten Einzelfall umgesetzt werden sollte. Dabei werden zunächst die Vorteile eines digitalen Zwillings aufgezeigt, um festzustellen, ob mindestens einer dieser Vorteile für das betreffende Unternehmen relevant ist. Wenn das der Fall ist, werden zusätzlich die Nachteile gezeigt. Sofern die Vorteile die Nachteile insgesamt überwiegen, ist die Umsetzung eines digitalen Zwillings sinnvoll und das Ergebnis wird angezeigt.

Wenn eine der Fragen negativ beantwortet wird, sollte von einer Umsetzung zunächst Abstand genommen werden. Bei dieser Entscheidung zu berücksichtigen ist jedoch, dass digitale Zwillinge

oder ein verwandtes Konstrukt wie beispielsweise ein Produktpass sogar gesetzlich vorgeschrieben werden könnten.

Das Werkzeug ist an dieser Stelle bewusst einfach gestaltet, denn unternehmerische Entscheidungen sind immer von zahlreichen, produkt- und unternehmensspezifischen Faktoren abhängig, die im Rahmen eines solches Entscheidungswerkzeugs nicht vollumfänglich beleuchtet werden können. Das Werkzeug unterstützt die Entscheidung, kann eine unternehmerische Risikoabwägung aber nicht ersetzen. Wie in Arbeitspaket 6 angesprochen könnten in einigen Fällen Kennzahlen als weitere Hilfe herangezogen werden. Da sich einige der Vor- und Nachteile jedoch nicht anhand von Kennzahlen messen lassen (siehe dazu Erläuterungen in Arbeitspaket 6), wurde im Entscheidungswerkzeug bewusst auf das Aufführen von Kennzahlen verzichtet.

Abbildung 21: Übersicht über Fragen in Phase 3

Phase 3: Entscheidung für oder gegen die Umsetzung eines DZ

Nachdem ein geeigneter DZ ausgewählt wurde, wird in der Folge geprüft, inwiefern eine Umsetzung des DZ in Ihrem Fall sinnvoll ist.

Vorteile

Der Austausch von Produktinformationen unter Einsatz eines DZs kann eine Vielzahl an Vorteilen mit sich bringen. Eine Auswahl an Vorteilen für Hersteller ist im Folgenden aufgelistet:

- Imageverbesserung durch mehr Transparenz über das Produkt
- Gewinnung neuer Kunden durch den Nachweis über bspw. die Nachhaltigkeit der Produkte
- Mehrverkauf von Ersatzteilen
- Potenzial zur Produktverbesserung (z.B. durch Nutzungsinformationen)

Ist mindestens einer der obigen Vorteile für Sie relevant?

Ja

Nein

Nachteile

Der Austausch von Produktinformationen unter Einsatz eines DZs kann neben Vorteilen auch Nachteile für Hersteller mit sich bringen:

- Zeit- und Arbeitsaufwand
- Einmalige Investition in die Realisierung von DZs
- Langfristige Investitionen in den DZ-Betrieb
- Ggf. weniger Neuproduktverkauf durch längere Nutzbarkeit existierender Produkte
- Verlust von Datenhoheit

Sind die hier gezeigten Vorteile für Ihr Unternehmen größer als die Nachteile?

Ja

Nein

Die Umsetzung eines DZs ist für Sie sinnvoll

Sie sollten einen DZ für Ihr Produkt umsetzen. Wie dieser DZ inhaltlich aussehen kann, haben Sie bereits in der 2. Phase dieses Entscheidungswerkzeugs festgelegt. Ein Beispiel für genau diese Form von DZ finden Sie in der folgenden Box. Um andere Beispiele einzusehen, ändern Sie bitte Ihre Antworten in Phase 2.

Ergebnis

Wenn die drei Phasen des Werkzeugs durchlaufen wurden, wird im Ergebnis zur Umsetzung des in Phase 2 identifizierten digitalen Zwillings geraten, oder davon abgeraten. Die konkrete Ausgestaltung wurde bereits am Ende von Phase 2 beschrieben; im positiven Fall wird nun zusätzlich ein Beispiel eingeblendet (Abbildung 22). Im vorliegenden Fall wurden alle Fragen positiv beantwortet, sodass ein komplexes Produkt mit vielen Informationen vorliegt. Als Beispiel dient hier ein Smartphone. Außerdem wird ein Screenshot des Demonstrators gezeigt, in dem das Beispielprodukt exemplarisch eingepflegt wurde.

Abbildung 22: Smartphone als Beispiel am Ende von Phase 3

Beispiel für DZ mit bereits veröffentlichten, nicht veröffentlichten und dynamischen Informationen - Smartphone

Smartphones sind in der modernen Gesellschaft ein stark verbreitetes Alltagsprodukt. Smartphones zeichnen sich durch einen hohen Wert und eine sehr große technische Komplexität aus. Sie werden oft allerdings nur für wenige Jahre verwendet und können nur teilweise und mit großem Aufwand recycelt werden.

Die Herstellung der Hard- und Software für Smartphones ist sehr aufwändig und nur für große Konzerne wirtschaftlich möglich, die dennoch in einem intensiven Wettbewerb zueinander stehen. Dementsprechend besteht ein großer Anreiz, spezifische technische Innovationen nicht zu dokumentieren, sondern möglichst lange geheim zu halten. Häufig beschädigte Komponenten, wie der Bildschirm, können zwar mit größerem finanziellem Aufwand getauscht werden; viele andere Komponenten sind jedoch dagegen nicht wirtschaftlich zu ersetzen. Genaue Baupläne, konkrete Anleitungen und Beschreibungen der Komponenten könnten die Reparatur auch für freie Werkstätten oder Privatpersonen vereinfachen oder erst ermöglichen. Ein DZ müsste im Kontext der Kreislaufwirtschaft deswegen zusätzliche Informationen beinhalten, die bisher geheim gehalten bzw. nicht veröffentlicht wurden.

Im Gebrauchtmärkte spielt der Zustand der Geräte eine große Rolle. Dazu gehören zum einen mögliche Reparaturen und die Qualität der verwendeten Ersatzteile, zum anderen aber auch der Zustand von Komponenten, deren Leistungsfähigkeit im Laufe der Zeit abnimmt. Zu nennen ist hier insbesondere die verbleibende Kapazität der Batterie. Das Smartphone unterscheidet sich an dieser Stelle durch eine entscheidende Eigenschaft von vielen anderen Produkten – das Gerät selbst kann seinen Zustand durch entsprechende Sensorik feststellen, sodass entsprechende Informationen zum Produktzustand und zur Nutzung im DZ hinterlegt werden können. Dies macht das Smartphone für Gebrauchtmärkte attraktiver.

Bei Smartphones werden allerdings auch die Grenzen des DZ zur Ermöglichung von beispielsweise Reparaturen deutlich. Die Reparierbarkeit eines Smartphones scheitert oft nicht nur an fehlenden Informationen, sondern auch an der Konstruktion des Geräts, wie beispielsweise der sehr häufigen Verwendung von Klebeverbindungen, die nur mit größerem Aufwand wieder gelöst werden können. Die Kreislauffähigkeit der Produkte muss hier schon bei der Konstruktion berücksichtigt werden.

Auf dem untenstehenden Bild sehen Sie einen beispielhaften DZ für ein solches Smartphone:

Manufacturer: Dwee281497c456c1e9950b564e51221c208109fab Select

Current Role: Repair Shop: Dwe379f78cb173950fea8d416519bb6db256211cd Select

Other: Dwe088fb16e39f07b0694b9f81b76bb3f868c81abc Select

B.I.N.K.
Büchlein für die Kreislaufwirtschaft

Create Digital Twin

Select a template for the new Digital Twin:
Empty DT

Select Digital Twin

Select a Digital Twin to display:
myPhone 4

View Digital Twin Data

Data provided exclusively by the Manufacturer:

name:	iPhone	Edit Del
model:	11	Edit Del
maker:	Apple	Edit Del
imei:	872852-8828	Edit Del
plug:	USB-C	Edit Del
torch:	LED	Edit Del
camera:		Edit Del

single: 12.2 MP, f/1.7, 27mm (wide), 1/2.55", 1.4µm, dual pixel
 video: 4K@30fps, 1080@30/60/120fps; gyro-EIS
 Add Element/Level

manufacturingYear: 2020
 Add Element/Level

Data provided by Manufacturer and/or Repairers:

display:

original:	true	Edit Del
type:	OLED, HDR	Edit Del
diagonalSize:	5.82in	Edit Del
areaSize:	89.2cm²	Edit Del
resolution:	1080x2340px	Edit Del

Add Element/Level

battery:

type:	Li-Po	Edit Del
originalCapacity:	3000mAh	Edit Del
remainingCapacity:	2547mAh	Edit Del
removable:	non-removable	Edit Del

Add Element/Level

totalUsageHours: 357
 Add Element/Level

In Abhängigkeit von der Auswahl in Phase 2 werden auch abweichende Beispiele angezeigt. Tabelle 16 zeigt eine Übersicht über diese Beispiele.

Tabelle 16: Übersicht über Beispiele in der Entscheidungshilfe

Informationstypen	Bereits veröffentlichte Informationen	... + bisher nicht veröffentlichte Informationen
Statisch	Hochleistungsschrauben	Hochwertiger Reisekoffer
Statisch und dynamisch	Analoge Armbanduhr	Smartphone

Insgesamt besteht für interessierte Unternehmen mit dem Entscheidungswerkzeug eine Möglichkeit, sich strukturiert mit dem Themenkomplex digitaler Zwillinge im Kontext der Kreislaufwirtschaft auseinanderzusetzen und schlussendlich zu einer Entscheidung zu gelangen. Im Projekt hat sich gezeigt, dass der Informationsaustausch durch den Einsatz digitaler Zwillinge eine Vielzahl potenzieller ökonomischer und vor allem ökologischer Vorteile mit sich bringt, jedoch im Einzelfall abgewogen werden muss, ob ein digitaler Zwilling z.B. mit den vorhandenen finanziellen Mitteln tragfähig ist.

Arbeitspaket 0: Projektmanagement, Dokumentation und Ergebnistransfer

Das Arbeitspaket 0 umfasst das Projektmanagement, die Planung und Dokumentation der besuchten Veranstaltungen sowie den Transfer der Projektergebnisse. Die Ergebnisse dieses Arbeitspakets sind dementsprechend die Projektplanung und -organisation, der Zwischenbericht, die wissenschaftlichen und praxisorientierten Veröffentlichungen sowie die Projektwebsite.

Durch den verzögerten Projektstart um vier Monate (geplanter Projektstart 01. Dezember 2020, tatsächlicher Projektstart: 01. April 2021) hat sich nicht nur die Bearbeitung aller Arbeitspakete verschoben, sondern auch die Durchführung der projektbegleitenden Ausschusssitzungen sowie der Workshops und Interviews zeitlich nach hinten verlagert. Angesichts der während des gesamten Projektzeitraums andauernden Covid-19-Pandemie konnten diese lediglich online durchgeführt werden. Der organisatorische Aufwand im Projektmanagement stieg dadurch zusätzlich an. Gleichzeitig konnten jedoch durch das Online-Format auch überregional Unternehmen an den Ausschusssitzungen, Workshops und Interviews teilnehmen. Die Aktualität und hohe Relevanz des Projektthemas haben sich dabei positiv auf die Anzahl teilnehmender und aktiv mitwirkender Unternehmen ausgewirkt.

Im Rahmen des Projektmanagements wurde zudem eine Projekthomepage erstellt, welche kontinuierlich gepflegt und aktualisiert worden ist. Neben der Beschreibung des Projekts sind dort auch Blogbeiträge zu Zwischenergebnissen sowie das Entscheidungswerkzeug veröffentlicht worden. Der weitere Ergebnistransfer wurde durch die Covid-19-Pandemie erschwert: Das Angebot extern organisierter Veranstaltungen und Konferenzen ist stark gesunken. Viele Konferenzen wurden abgesagt oder beschränkten sich auf virtuelle Formate, bei denen das Projektteam (Teil-)Ergebnisse online präsentierte.

Neben der Präsentation der Projektergebnisse auf Veranstaltungen wurden die folgenden Veröffentlichungen erstellt:

Lege, Beverly; Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Circular Economy and Information Sharing – The Role of Logistics. In: *LogiSYM 2023* (4), S. 15-18.

Lege, Beverly; Twenhöven, Thomas; Kersten, Wolfgang (2022): Digitale Zwillinge für die Kreislaufwirtschaft. In: *Müll und Abfall* 54 (10), S. 560–565.

Grafe, Beverly; Hackius, Niels; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2021): One Fits All? Devising Product Attributes for Circular Supply Chain Strategies. In: *Proceedings of the 12th Logistics Management Conference (LM)*. S. 52–53.

Darüber hinaus sind zwei weitere Veröffentlichungen bei hochkarätigen Zeitschriften geplant. Der Veröffentlichungszeitpunkt ist aufgrund der langwierigen Review-Prozesse noch nicht absehbar.

Lege, Beverly; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Sharing is Caring? How Product Information Sharing Can Support the Circular Economy [Arbeitstitel].

Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Ludwig, André (2023): TTF of Blockchain – An investigation in SC&L [Unpublished Manuscript].

Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Im Folgenden werden die geplanten Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete mit den tatsächlich erreichten Ergebnissen verglichen sowie eine Bewertung vorgenommen, ob eine entsprechende Übereinstimmung festgestellt werden kann (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Durchgeführte Arbeiten und Erreichte Ergebnisse

Arbeitspaket	Ziel	Erreichte Ergebnisse	Bewertung
AP 1: Aktualisierung des Standes der Praxis und Forschung Supply Chains der KrW (Kreislaufwirtschaft)	Einordnung in den aktuellen Kontext von Wissenschaft und Praxis	Die zum Projektbeginn aktuelle Literatur wurde aufgearbeitet. Dabei wurden insgesamt 6 Anwendungsbereiche für digitale Zwillinge identifiziert und beschrieben. Im Rahmen der Beschreibung der Anwendungsbereiche sind Beispielprojekte aufgeführt worden, die die Anwendungsfälle belegen.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 2: Aktualisierung des Standes der Praxis und Forschung zu Blockchain	Einordnung in den aktuellen Kontext von Wissenschaft und Praxis	Bestehende Ansätze zu digitalen Zwillingen sowie die Blockchain-Technologie und verwandte Systeme wurden analysiert. Die Eigenschaften, Vorteile und Anwendungskontexte von Blockchain wurden beschrieben. Infrage kommende Blockchain-Implementierungen wurden gegenübergestellt.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 3: Analyse und Kategorisierung geeigneter Produkte und Kreislaufwirtschafts-Ausprägungen	Entwicklung einer Produkt-Kreislaufausprägungsmatrix	Ein morphologischer Kasten wurde erarbeitet. Dieser wurde mehrfach von Experten hinterfragt und Feedback eingearbeitet. Geeignete Produkte wurden im Rahmen der Expertengespräche und der Logistik Management Konferenz abgefragt.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 4: Untersuchung informatorischer und funktionaler Anforderungen an digitale Zwillinge	Entwicklung eines Anforderungskatalogs für die digitalen Zwillinge	Mithilfe eines User Story Mappings wurden diverse Anforderungen entwickelt, validiert und als User Stories dokumentiert.	Das Ziel wurde erreicht.

Arbeitspaket	Ziel	Erreichte Ergebnisse	Bewertung
AP 5: Konzeption digitaler Zwillinge auf Basis der Blockchain und exemplarische Implementierung	Entwurf und Implementierung eines exemplarischen digitalen Zwillings	Ein exemplarischer Zwilling basierend auf einem Blockchain-Backend (Smart Contract) und einem Nutzerinterface wurde entwickelt.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 6: Ableitung strategischer Implikationen gemeinsam mit KMU	Bewertung verschiedener Ausprägungen der Digitalen Zwillinge in der Kreislaufwirtschaft	Die Implikationen von digitalen Zwillingen wurden im Rahmen einer Interviewstudie mit KMU abgeleitet und in Form von Entscheidungspfaden dokumentiert.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 7: Entwicklung einer Entscheidungshilfe als webbasierter Demonstrator mit Leitfaden und beispielhaftem Vorgehen	Unterstützung der Unternehmen bei der Bewertung der Vorteilhaftigkeit eines Digitalen Zwillings	Ein entsprechendes Entscheidungswerkzeug wurde entwickelt, validiert und steht auf der Projektwebsite für interessierte Unternehmen zur Verfügung.	Das Ziel wurde erreicht.
AP 0: Projektmanagement, Dokumentation und Ergebnistransfer	Sicherstellung des Projekterfolgs und der effektiven Ergebnisverbreitung	Das Projekt wurde organisiert und strukturiert. Es wurden diverse Vorträge, Veranstaltungen und Treffen abgehalten sowie die Ergebnisse durch Publikationen verbreitet.	Das Ziel wurde erreicht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl die geplanten Teilziele als auch das Gesamtziel des Forschungsprojekts vollständig erreicht wurden.

Verwendung der Zuwendungen

Die rückwirkende Mitteilung des Projektstarts und die angespannte Situation bei der Anwerbung von qualifiziertem Personal und die Covid-19-Pandemie bedingte die geringere Verwendung von Projektmitteln und Personenmonaten gegenüber dem Projektplan 2020 und 2021. Im Projektjahr 2022 konnte dies durch eine kostenneutrale Verlängerung kompensiert werden.

Im Einzelnen wurden in der FE1 (TUHH) und der FE2 (KLU) die folgenden Personenmonate benötigt:

- wissenschaftlich-technisches Personal in 2020:
FE1: 0 Personenmonate
FE2: 0 Personenmonate
- wissenschaftlich-technisches Personal in 2021:
FE1: 9 Personenmonate
FE2: 7 Personenmonate
- wissenschaftlich-technisches Personal in 2022:
FE1: 11 Personenmonate
FE2: 14 Personenmonate

In Summe: TUHH: 20 Personenmonate; KLU: 21 Personenmonate
Geräte wurden nicht beschafft.

Leistungen Dritter wurden nicht in Anspruch genommen.

Aufgrund der Pandemie und der insgesamt angespannten Personalsituation wurde geplantes A3-Personal in FE2 kurzfristig durch eine wissenschaftliche Mitarbeiterin (A1-Personal) ersetzt, um die Projektziele im Zeit- und Budgetrahmen zu erreichen. Dadurch summiert sich die Anzahl der Personenmonate für wissenschaftlich-technisches Personal der FE2 auf 21.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Entwicklung in Richtung einer Kreislaufwirtschaft ist unerlässlich, da die gegenwärtige lineare Wirtschaftsstruktur den Planeten durch die Entnahme von Rohstoffen und die Ablagerung von Abfällen übermäßig belastet. Um Produkte und die enthaltenen Komponenten und Rohstoffe möglichst langfristig verwenden zu können, sind komplexe Lieferketten erforderlich. Insbesondere einzelne KMU verfügen allerdings nicht über die Ressourcen, die für den Aufbau solcher Lieferketten erforderlich sind. KMU können allerdings Teil eines Netzwerks von Unternehmen sein, das Produkte im Rahmen ihrer gesamten Lebensdauer begleitet. Der dafür nötige Austausch von produktbezogenen Informationen stellt dabei eine große Herausforderung dar. Digitale Zwillinge können solche Lieferketten über die Grenzen einzelner Unternehmen hinweg möglich machen, indem sie die nötigen Informationen verfügbar machen und halten. Im Projekt sollte ein Entscheidungswerkzeug entwickelt werden, das Unternehmen bei der Entscheidung über den Einsatz solcher Digitaler Zwillinge unterstützt.

Zunächst wurde dafür in den Arbeitspaketen (AP) 1 und 2 eine Übersicht über den Stand der Forschung und Praxis zu den Themenbereichen Kreislaufwirtschaft und Blockchain erstellt. Auf dieser Basis wurden im AP 3 verschiedene Produkte bzw. erforderliche Informationen kategorisiert. Anschließend wurden in den AP 4 und 5 Anforderungen an digitale Zwillinge gesammelt und ein entsprechender Blockchain-basierter Demonstrator entwickelt, der die Möglichkeiten der Technologie nachweist und greifbar macht. Das AP 6 greift diesen Gedanken auf und leitet die Implikationen des Informationsaustauschs unter Einsatz eines digitalen Zwillings ab. Das Entscheidungswerkzeug greift im Rahmen des AP 7 auf all diese Vorarbeiten zurück und zeigt exemplarisch verschiedene Produkte, entsprechende Ausprägungen digitaler Zwillinge und deren Implikationen auf.

Für die Entwicklung dieser Ergebnisse und deren Aggregation im Rahmen des AP7 wurden mehrere wissenschaftliche Mitarbeiter beschäftigt. Diese wurden an geeigneter Stelle durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Die geleistete Arbeit entspricht der im Rahmen des Projekts beantragten und bewilligten Arbeit und war deswegen für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

Das Projekt hat im Verlauf der Corona-Pandemie stattgefunden. Veranstaltungen konnten deswegen nicht auf die gewohnte und bei der Beantragung erwartete Art stattfinden. Projektbegleitende Ausschüsse, Vorträge, Interviews und Workshops wurden in der Regel online durchgeführt, um die Gesundheit der Projektmitarbeiter und externen Gäste nicht zu gefährden. Auch rein interne Treffen zwischen den beteiligten Forschungsstellen mussten in der Regel online durchgeführt werden. Trotz dieser mitunter schwierigen Rahmenbedingungen konnten die Arbeiten im Rahmen des Projekts erfolgreich durchgeführt werden.

Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Forschungsergebnisse stellen eine Einordnung der Möglichkeiten zum Einsatz eines digitalen Zwillings in der Kreislaufwirtschaft dar. Der innovative Beitrag des Projekts liegt dabei in zwei Bereichen. Erstens wurde die technische Machbarkeit untersucht, indem Anforderungen erhoben und ein entsprechender prototypischer Blockchain-basierter digitaler Zwilling entwickelt wurden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse erhöhen den Reifegrad der Technologie insgesamt. Die Interviewstudie und Workshops haben gezeigt, dass die Einführung eines digitalen Zwillings auf Basis der Blockchain-Technologie für den Informationsaustausch in einer Kreislaufwirtschaft förderlich sein kann.

Zweitens wurden bei der prototypischen Entwicklung, aber auch bei Workshops und Interviews die Rahmenbedingungen für und die Konsequenz des Einsatzes der Technologie im Allgemeinen und im Besonderen für und durch KMU aufgezeigt. Die identifizierten möglichen Ausprägungen eines digitalen Zwillings bieten für Unternehmen eine Grundlage, um zu evaluieren, wie sie sich einem bevorstehenden Projekt nähern könnten. Zu beachten ist dabei die genaue Art der gespeicherten Daten sowie die Bereitschaft für Transparenz, insbesondere in Abgrenzung zum Bedürfnis für Geheimhaltung sensibler Daten, und die Bedeutung des Produktherstellers für die Umsetzung eines digitalen Zwillings des jeweiligen Produkts. Diese Erkenntnisse stellen deswegen nicht nur einen Beitrag zum Stand der Forschung dar, sondern sind auch für die Praxis relevant.

Das entwickelte Entscheidungswerkzeug gibt KMU somit die Gelegenheit, erste Orientierung zu digitalen Zwillingen zu erhalten und sich strukturiert mit Möglichkeiten einer Umsetzung im Kontext der Kreislaufwirtschaft auseinanderzusetzen. Das Werkzeug bietet eine Entscheidungshilfe zur Einführung digitaler Zwillinge für die Praxis an. Ein derartiges Entscheidungswerkzeug hat bisher nicht existiert und leistet somit einen wichtigen Beitrag für KMU auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft.

Die Projektergebnisse wurden und werden sowohl den am Projekt beteiligten Unternehmen als auch über die entwickelte Projektwebsite allen interessierten Unternehmen (auch über den Projektausschuss hinaus) zur Verfügung gestellt.

Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen

Die meisten der heutzutage produzierten Produkte werden für eine lineare Wertschöpfungskette gefertigt. Das bedeutet, dass die Produkte nach Ihrem Gebrauch zumeist verbrannt oder deponiert werden, wodurch wertvolle Ressourcen zu Abfall werden (McKinsey & Company 2018). Neue Geschäftsmodelle können Unternehmen dabei helfen, die Ressourcen wiederzuverwenden und somit verhindern, dass verwendbare Ressourcen zu Abfall werden. Auch in der Wissenschaft wird eindringlich die Notwendigkeit einer Kreislaufwirtschaft und eines Informationsaustauschs unter beteiligten Akteuren ausgezeigt. Viele Großkonzerne wie Philips oder Unilever haben bereits Projekte gestartet und haben diese aktiv in den Betrieb eingebunden. Neben den Bemühungen von Großkonzernen, die Kreislaufwirtschaft effektiver ins Tagesgeschäft einzubinden, führen die EU und China Gesetzgebungen ein, um die Kreislaufwirtschaft in ihrer Wirtschaft zu stärken (McDowall et al. 2017). Entgegen diesen Einstellungen und Bemühungen gibt es erste Marktteilnehmer, wie in Arbeitspaket 2 beschrieben, die sich mit dem Thema des digitalen Zwillings auseinandersetzen.

Für KMU ist die Einführung der Kreislaufwirtschaft dagegen schwierig. Der Ressourcenkreislauf erfordert lange und komplexe Wertschöpfungsketten, die für einzelne KMU nicht wirtschaftlich umsetzbar sind. Nur Netzwerke von KMU können die Kreislaufwirtschaft umsetzen; dafür sind allerdings neuartige Systeme für den Austausch von produktbezogenen Informationen erforderlich. Hier setzt das vorliegende Forschungsprojekt an. Die Forschungsergebnisse und vor allem deren Zusammenfassung im Rahmen des Entscheidungswerkzeugs können digitale Zwillinge als Möglichkeit zum Informationsaustausch für KMU zugänglich machen und entsprechende Entscheidungen unterstützen. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse nach Projektende eine Basis für weitere Aktivitäten in der Praxis bilden werden.

Da bei der Konzeption des Forschungsvorhabens besonderer Wert auf eine möglichst direkte Anwendbarkeit in der Praxis gelegt wurde, wurde der Ansatz eines webbasierten Wissenswerkzeugs zur Ergebniszusammenfassung gewählt. Dieses besteht aus einem Entscheidungswerkzeug, das Unternehmen dabei unterstützt, sich beim Thema eines digitalen Zwillings in der Kreislaufwirtschaft zu orientieren. Ziel war es, das Thema des digitalen Zwillings einfach aufzubereiten, damit Unternehmen sich für ein Vorgehen entscheiden können. Mithilfe des dreiteiligen Entscheidungsprozesses, bestehend aus Rahmenbedingungen, Ausgestaltung des digitalen Zwillings und Entscheidung für oder gegen die Umsetzung eines digitalen Zwillings, können Unternehmen an das Thema herangeführt werden, ohne sich in aufwendige Methoden einzuarbeiten. Durch den Abbau dieser bekannten Barriere zwischen Forschungsprojekten und Praxis wird die Verbreitung in der Praxis zusätzlich unterstützt.

Der umfassende Transfer in die Wirtschaft leistet hierzu einen wesentlichen Beitrag. Unternehmen werden sich aufgrund der einfachen Anwendbarkeit durch das Entscheidungswerkzeug und der damit verbundenen Übersicht über die Projektergebnisse einfach in das Thema einfinden können. Aufgrund der praktischen Relevanz der Fragestellung ist mit der Anwendung der Entscheidungshilfe für bis zu 3-5 Jahre nach Projektende zu rechnen. Eine definierte Herangehensweise an das Thema des digitalen Zwillings in der Kreislaufwirtschaft ist für diverse Branchen unabhängig einsetzbar. Somit kann mittel- bis langfristig ein wirtschaftlicher Erfolg in einer Vielzahl von KMU erwartet werden.

Voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Der digitale Zwilling kann einen entscheidenden Beitrag zur Erhaltung und Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit insbesondere von KMU leisten. Doch aufgrund der hohen Kosten und des großen Risikos von Entscheidungen zur Investition in die dafür nötige Technologie scheuen Unternehmen diese Investitionen in entsprechendem Maße.

Das im Forschungsprojekt entwickelte webbasierte Entscheidungswerkzeug bietet eine Möglichkeit, Orientierung im Themenbereich des digitalen Zwillings für die Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Darauf aufbauend können Unternehmen frühzeitig Handlungsmaßnahmen für sich identifizieren und berücksichtigen. Mithilfe der Abkürzung des Prozesses zur Generierung von Informationen und der Unterstützung im Entscheidungsprozess können ein ökonomischeres Kosten-Nutzen-Verhältnis und ein kalkulierbareres Risiko erzielt werden.

Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der Ergebnisse nach Projektende

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes stellen ein effektives und effizientes Entscheidungswerkzeug zur Verfügung, um Entscheidungen von Unternehmen bezüglich eines digitalen Zwillings in der Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Die Forschungsergebnisse können für den schnellen Einsatz in der Industrie genutzt werden.

Wirtschaftliche / technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die betrachteten Umsetzungsmöglichkeiten eines digitalen Zwillings haben gezeigt, dass die Implementierung des Entscheidungswerkzeugs weitreichende Orientierung für Unternehmen mit sich bringt (Arbeitspakete 6 und 7). Durch die Aufbereitung der Forschungsergebnisse im Abschlussbericht sowie die Darstellung des Entscheidungswerkzeugs sollen weitere Unternehmen für die Notwendigkeit des Übergangs zur Kreislaufwirtschaft und das Ergreifen entsprechender Maßnahmen begeistert werden. Es ist gewünscht, dass die Nutzer auch nach Projektende das Entscheidungswerkzeug verwenden und aktiv Fragen zur Weiterentwicklung einreichen. Aufgrund des kontinuierlichen Bedarfs an Orientierung im Bereich der Kreislaufwirtschaft ist mit der Anwendung des Entscheidungswerkzeugs bis zu 3-5 Jahre nach Projektende zu rechnen.

Einschätzung der Finanzierbarkeit einer anschließenden industriellen Umsetzung

Die im Projekt identifizierten Möglichkeiten zur Ausgestaltung eines digitalen Zwillings wurden mit Experten aus der Praxis gemeinsam (weiter-)entwickelt und validiert. Anschließend erfolgte eine Übertragung der Projektergebnisse in ein Entscheidungswerkzeug. Die Anwendungsorientierung und Praxistauglichkeit konnten durch die kontinuierliche Einbeziehung von Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses sichergestellt und über eine Validierung bestätigt werden.

Die Verwendung des Entscheidungswerkzeugs ermöglicht Unternehmen und insbesondere KMU eine aufwandsarme Orientierung im Bereich von digitalen Zwillingen in der Kreislaufwirtschaft. Durch die webbasierte Aufbereitung sind für die erste Orientierung keinerlei Investitionen in Personal oder Wissensgenerierung notwendig. Investitionen für die Verwendung der Projektergebnisse sind für die Unternehmen nicht erforderlich.

Transfermaßnahmen und Veröffentlichungen

Tabelle 18: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Fortschreibung
<i>Erstellung einer Internetpräsenz für das Projekt</i>	Gewinn zusätzlicher Unternehmenskontakte, zentrale Bereitstellung von Informationen zum Projekt, Veröffentlichung von (Teil-)Ergebnissen	Internetpräsenz unter eigenständiger Domain (z. B. circularblockchain.de)	Die Internetseite ist unter https://blink-projekt.info/ einzusehen und wurde mit den wichtigsten Ergebnissen der Arbeitspakete ausgebaut
<i>Erstellung eines Blogs zum Projekt und zusätzlich Platzierung und Verlinkung zu Blogbeiträgen</i>	Veröffentlichung von (Teil-)Ergebnissen, Gewinn zusätzlicher Unternehmenskontakte, Stärkung der Sichtbarkeit des Projekts	Nutzung der Plattform „Medium.com“ zur Erstellung eines international zugänglichen Blogs, ggf. Gastbeiträge in themenbezogenen Blogs, Verlinkung von einschlägigen Beiträgen mit Bezug Kreislaufwirtschaft oder Blockchain; parallel Publikation auf der Internetpräsenz	Der Blog ist unter https://blink-project.medium.com/ einzusehen. Weitere Blogbeiträge sind auf der Projektwebseite einzusehen. Insgesamt wurden 10 Blog-Beiträge, davon 5 Medium-Posts, veröffentlicht.
<i>Vorstellung des Projektes auf praxisorientierten Veranstaltungen durch Vorträge und ggf. Poster</i>	Veröffentlichung von (Teil-)Ergebnissen, Gewinn zusätzlicher Unternehmenskontakte, Stärkung der Sichtbarkeit des Projekts	Gründung einer Gruppe auf meetup.com mit Sitz in Hamburg; Besuch von Veranstaltungen ähnlicher Interessensgruppen, bspw. DISTRI-BUTE Hamburg oder Innovationsforum Hamburg	<p>Aufgrund der weiterhin andauernden Pandemie wurde auf die Gründung einer MeetUp-Gruppe verzichtet.</p> <p>Das Projekt wurde jedoch auf folgenden Veranstaltungen präsentiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Supply Chain Symposium Industry 4.0 am 28.05.2021 (digital)</i> ▪ <i>12. Logistik Management Konferenz am 15.09.2021 (digital)</i> ▪ <i>Connecting the blocks – Economic Mission Blockchain Germany (10.02.2022)</i> ▪ <i>BVL-Regionalgruppenveranstaltung am 22.03.2022 (digital)</i>

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Fortschreibung
<i>Einbeziehung relevanter Multiplikatoren (Geschäftsstelle Umwelt-Partnerschaft Hamburg, Innovationskontaktstelle Hamburg, Industrieverband Hamburg, Verein Cradle to Cradle, Regionalgruppe Hamburg)</i>	Weitere Verbreitung der Forschungsergebnisse sowie Ansprache von weiteren interessierten Unternehmen, Stärkung der Sichtbarkeit des Projekts	Ansprache im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitspakete und gemeinsame Verbreitung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>POMS 32nd Annual Conference am 25.04.2022 (digital)</i> ▪ <i>Vorstellung beim VDMA am 09.09.2022 (digital)</i> ▪ <i>Veranstaltung des Mittelstand Digital Zentrums (MDZ) Hamburg am 20.09.2022 (digital)</i> <p>Im Rahmen von AP 5 und AP 7 (TUHH) Das Projekt wurde im Rahmen einer Veranstaltung der BVL-Regionalgruppe Hamburg vorgestellt. Die Geschäftsstelle Umwelt-Partnerschaft Hamburg bzw. BUKEA Hamburg hat an der vierten Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses teilgenommen.</p>
<i>Gemeinsame Veranstaltungen mit dem Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Hamburg</i>	Weitere Verbreitung der Forschungsergebnisse, Ansprache von weiteren interessierten Unternehmen sowie ggf. Anstoß von Implementierungsprojekten im Rahmen des Kompetenzzentrums	Einbindung in passende Veranstaltungen im Rahmen der Angebote für den norddeutschen Raum	Am 20.09.2022 wurde ein Vortrag im Rahmen einer Veranstaltung des Mittelstand-Digital Zentrums Hamburg (MDZ, ehemals Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Hamburg) gehalten. Am 24.10.2022 wurde ein Workshop mit dem MDZ durchgeführt.

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Fortschreibung
<i>Verfassen von praxisnahen Zeitschriftenbeiträgen</i>	Praxisorientierte Bereitstellung von (Teil-)Ergebnissen für interessierte Praktiker, Aufzeigen möglicher Implikationen der Ergebnisse	Praxisnahe Zeitschriften mit entsprechender Ausrichtung, (bspw. Industrie 4.0 Management, ZWF, Müll und Abfall) und in Newslettern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lege, Beverly; Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Circular Economy and Information Sharing – The Role of Logistics. In: LogiSYM 2023 (4), S. 15-18. ▪ Lege, Beverly; Twenhoeven, Thomas; Kersten, Wolfgang (2022): Digitale Zwillinge für die Kreislaufwirtschaft. Müll und Abfall - Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft. 54. (10), S. 560-565. DOI: 10.37307/j.1863-9763.2022.10
<i>Verfassen von wissenschaftlichen Beiträgen</i>	Verbreitung von (Teil-)Ergebnissen innerhalb der Wissenschaft, nach Möglichkeit Open Access	Veröffentlichung bei der Hamburg International Conference of Logistics, über SSRN sowie in ausgewählten Journals, bspw. IEEE Access, Ledger, ICESBA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grafe, Beverly; Hackius, Niels; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2021): One Fits All? Devising Product Attributes for Circular Supply Chain Strategies (Extended Abstract). In: Proceedings of the 12th Logistics Management Conference (LM), S. 52-53. ▪ Geplant: Lege, Beverly; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Sharing is Caring? How Product Information Sharing Can Support the Circular Economy [Arbeitstitel]

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Fortschreibung
<i>Beiträge in Social Networks</i>	Verbreitung der Projektergebnisse innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft, Stimulation von Diskussionen	Über Researchgate.de, Twitter sowie auf der Internetseite des Projektes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Ludwig, André (2023): TTF of Blockchain – An investigation in SC&L [Unpublished Manuscript]. <p>Das Projekt wurde auf Researchgate aufgesetzt: https://www.researchgate.net/project/Blockchain-for-the-Circular-Economy-Exploration-of-Blockchain-based-digital-twins</p> <p>(Teil-)Ergebnisse wurden auf der Internetseite des Projekts https://blink-projekt.info/ veröffentlicht. Twitter hat sich nicht als geeignet erwiesen.</p>
<i>Vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses</i>	Spiegelung der Ergebnisse mit dem PA.	Im Rahmen von Workshop-Sitzungen in den Forschungsstellen	<p>Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses haben an den folgenden Terminen stattgefunden:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 13.04.2021 - 30.11.2021 - 23.06.2022 - 23.11.2022 <p>Aufgrund der Pandemielage wurde für alle Termine das Format einer digitalen Veranstaltung gewählt, was aufgrund entfallender Reiseaktivitäten den Kreis für weitere Interessierte aus ganz Deutschland öffnete.</p>

Tabelle 19: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Fortschreibung
<i>Pflege und Weiterentwicklung des webbasierten Vorgehens</i>	Weiterverfolgung der vorgestellten Handlungsoptionen und Methoden	Während des Projekts erstellter webbasierter Demonstrator wird weiter betreut.	Derzeit bis 2 Jahre nach Projektende geplant.
<i>Pflege der Internetpräsenz des Projekts</i>	Verbreitung der Projektergebnisse für Praktiker und Wissenschaftler	Während des Projekts gewählte Domain wird weiter betreut	Derzeit bis 3 Jahre nach Projektende geplant.
<i>Integration in die Lehre</i>	Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse bei zukünftigen Führungskräften aus verschiedenen Studiengängen	Vorlesungen und Seminare zum Produktions- und Supply-Chain-Management in den entsprechenden Programmen der TUHH und KLU	Im Rahmen des Projektabschlusses geplant: soll 2023 in die Vorlesungen „Organisation und Prozessmanagement“ sowie „Supply Chain Management“ einfließen.
<i>Verbreitung der Projektergebnisse in wissenschaftlichen und praxisnahen Veröffentlichungen</i>	Umfassende Veröffentlichung der öffentlich zugänglichen Ergebnisse und entsprechende Nutzungsanregung	Praxisnahe Zeitschriften mit entsprechender Ausrichtung oder in ausgewählten wissenschaftlichen Journals, nach Möglichkeit Open Access	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lege, Beverly; Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Circular Economy and Information Sharing – The Role of Logistics. In: LogiSYM 2023 (4), S. 15-18. ▪ Geplant: Lege, Beverly; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2023): Sharing is Caring? How Product Information Sharing Can Support the Circular Economy [Arbeitstitel] ▪ Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Ludwig, André (2023): TTF of Blockchain – An investigation in SC&L [Unpublished Manuscript].
<i>Veröffentlichung und Verbreitung des Schlussberichtes</i>	Möglichst großflächige Verbreitung der im Schlussbericht dargelegten Methoden und Ergebnisse	Gemeinsam mit der Forschungsvereinigung IUTA über Newsletter und die Bereitstellung auf der IUTA Homepage, Bereitstellung auf der Projektinternetseite sowie auf der Internetseite der TUHH und KLU	Im Rahmen des Projektabschlusses.

Durchführende Forschungsstellen

Das **Institut für Logistik und Unternehmensführung (LogU) an der Technischen Universität Hamburg (TUHH)** unter der Leitung von Professor Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten fokussiert im Rahmen seiner Forschung besonders die Digitalisierung in Produktion, Logistik und Supply Chain Management sowie das Nachhaltigkeitsmanagement in Verbindung mit Innovationsmethoden. Aktuell betreut das LogU mehrere Projekte zur Umsetzung von Digitalisierung in KMU. Darüber hinaus ist das LogU Konsortialpartner des Mittelstand-Digital Zentrums Hamburg. Sowohl im Jahr 2017 als auch 2020 beschäftigte sich das LogU in einer groß angelegten Studie mit den Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management. Sowohl das Thema Data Analytics als auch Nachhaltigkeit standen dabei im Fokus der Betrachtung. In den vergangenen drei Jahren veröffentlichte das LogU zudem umfangreich durchgeführte wissenschaftliche Analysen zur Entwicklung von Nachhaltigkeits-Kennzahlen. Das Institut ist u. a. in der Kommission Produktionswirtschaft des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft, in der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation vertreten und hat zahlreiche durch das BMWi geförderte Projekte der industriellen Gemeinschaftsforschung (AiF) sowie Projekte des BMVi erfolgreich realisiert.

Forschungsstelle Technische Universität Hamburg
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Institutsleiter Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
Projektleiter Prof. Dr. Dr. h. c. Wolfgang Kersten
Anschrift Am Schwarzenberg-Campus 4, 21073 Hamburg
Tel.: +49 40 42878-3525, E-Mail: logu@tuhh.de

Das **Center for Sustainable Logistics and Supply Chains (CSLS) der Kühne Logistics University (KLU)** in Hamburg forscht und lehrt unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. Moritz Petersen zum Thema nachhaltige Lieferketten. Zwei Arbeitsschwerpunkte sind dabei die Kreislaufwirtschaft und Möglichkeiten zu ihrer graduellen Umsetzung sowie die Anwendung der Blockchain-Technologie zur Verbesserung des Informationsflusses in Lieferketten. Prof. Petersen und sein Team verfügen über Projekterfahrungen in europäischen und nationalen Förderprogrammen wie Horizon2020 oder der Industriellen Gemeinschaftsforschung. Weiterhin beraten sie Unternehmen verschiedener Branchen und Größen zum Thema Dekarbonisierung. Darüber hinaus lehrt und forscht auch Professor Dr. Alan McKinnon – ein Pionier im Forschungsgebiet der nachhaltigen Logistik – am CSLS der KLU.

Forschungsstelle Kühne Logistics University
Center for Sustainable Logistics and Supply Chains (CSLS)
Leiter der FS Prof. Dr. Christian Barrot
Projektleiter Prof. Dr. Moritz Petersen
Anschrift Großer Grasbrook 17, 20457 Hamburg
Tel.: +49 40 328707-100, E-Mail: moritz.petersen@the-klu.org

Literaturverzeichnis

Akanbi, Lukman A.; Oyedele, Lukumon O.; Omoteso, Kamil; Bilal, Muhammad; Akinade, Olugbenga O.; Ajayi, Anuoluwapo O. et al. (2019): Disassembly and deconstruction analytics system (D-DAS) for construction in a circular economy. In: *Journal of Cleaner Production* 223, S. 386–396. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.172.

Bakogianni, Despina; Skourtanioti, Evangelia; Meimaris, Dimitris; Xevgenos, Dimitris; Loizidou, Maria (2019): Online Brine Platform: a Tool for Enabling Industrial Symbiosis in Saline Wastewater Management Domain. In: 2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). Santorini Island, Greece, 29.05.2019 - 31.05.2019: IEEE, S. 430–435.

Baralla, Gavina; Pinna, Andrea; Tonelli, Roberto; Marchesi, Michele; Ibba, Simona (2021): Ensuring transparency and traceability of food local products: A blockchain application to a Smart Tourism Region. In: *Concurrency Computat Pract Exper* 33 (1). DOI: 10.1002/cpe.5857.

Batwa, Abbas; Norrman, Andreas (2020): A Framework for Exploring Blockchain Technology in Supply Chain Management. In: *OSCM: An Int. Journal*, S. 294–306. DOI: 10.31387/oscm0420271.

Bekrar, Abdelghani; Ait El Cadi, Abdessamad; Todosijevic, Raca; Sarkis, Joseph (2021): Digitalizing the Closing-of-the-Loop for Supply Chains: A Transportation and Blockchain Perspective. In: *Sustainability* 13 (5), S. 2895. DOI: 10.3390/su13052895.

Bocek, Thomas; Rodrigues, Bruno B.; Strasser, Tim; Stiller, Burkhard (2017): Blockchains everywhere - a use-case of blockchains in the pharma supply-chain. In: 2017 IFIP/IEEE Symposium on Integrated Network and Service Management (IM). Lisbon, Portugal, 08.05.2017 - 12.05.2017: IEEE, S. 772–777.

Böckel, Alexa; Nuzum, Anne-Katrin; Weissbrod, Ilka (2021): Blockchain for the Circular Economy: Analysis of the Research-Practice Gap. In: *Sustainable Production and Consumption* 25, S. 525–539. DOI: 10.1016/j.spc.2020.12.006.

Bowman, Mic; Miele, Andrea; Steiner, Michael; Vavala, Bruno (2018): Private Data Objects: an Overview. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1807.05686v2>, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Bundesministerium für Gesundheit (2021): Die elektronische Patientenakte (ePA). Online verfügbar unter <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/elektronische-patientenakte.html>, zuletzt geprüft am 24.03.2022.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022a): Kreislaufwirtschaftsgesetz. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2022b): Umweltpolitische Digitalagenda: Digitaler Produktpass. Online verfügbar unter <https://www.bmuv.de/faqs/qa-umweltpolitische-digitalagenda>, zuletzt geprüft am 14.02.2023.

Caro, Miguel Pincheira; Ali, Muhammad Salek; Vecchio, Massimo; Giuffreda, Raffaele (2018): Blockchain-based traceability in Agri-Food supply chain management: A practical implementation. In: 2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany). 2018 IoT

Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany). Tuscany, 08.05.2018 - 09.05.2018: IEEE, S. 1–4.

Chen, Ziyue; Huang, Lizhen (2021): Digital twins for information-sharing in remanufacturing supply chain: A review. In: *Energy* 220 (119712), S. 1–8.

Chowdhury, Mohammad Javed Morshed; Colman, Alan; Kabir, Muhammad Ashad; Han, Jun; Sarda, Paul (2018): Blockchain Versus Database: A Critical Analysis. In: 2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/ 12th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/BigDataSE).. New York, NY, USA, 8/1/2018 - 8/3/2018: IEEE, S. 1348–1353.

Circle Economy (2023): The circularity gap report 2023. Online verfügbar unter <https://www.circularity-gap.world/2023#download>, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Digital Connection (2019): Mammut digitalisiert seine Produkte mit NFC. Online verfügbar unter <https://www.digitalconnection.de/connected-customer/mammut-digitalisiert-seine-produkte-mit-nfc/>, zuletzt geprüft am 24.03.2022.

e-Estonia (2022): KSI Blockchain. Online verfügbar unter <https://e-estonia.com/solutions/cyber-security/ksi-blockchain/>, zuletzt geprüft am 23.12.2022.

ELGA (2022): Elektronische Gesundheitsakte - Technischer Aufbau im Überblick. Online verfügbar unter <https://www.elga.gv.at/technischer-hintergrund/technischer-aufbau-im-ueberblick/>, zuletzt geprüft am 23.12.2022.

Ellen MacArthur Foundation (2015): Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter https://emf.thirdlight.com/file/24/_A-BkCs_h7gfln_Am1g_JKe2t9/Towards%20a%20circular%20economy%3A%20Business%20rationale%20for%20an%20accelerated%20transition.pdf, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Esmailian, Behzad; Sarkis, Joe; Lewis, Kemper; Behdad, Sara (2020): Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. In: *Resources, Conservation and Recycling* 163, S. 105064. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105064.

Europäische Kommission (2022): Circular economy action plan. Online verfügbar unter https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_de, zuletzt geprüft am 15.02.2023.

Faraca, Giorgia; Astrup, Thomas (2019): Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. In: *Waste management (New York, N. Y.)* 95, S. 388–398. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.06.038.

Fennemann, Verena; Hohaus, Christian; Kopka, Jan-Philip (2018): Circular Economy Logistics: Für Eine Kreislaufwirtschaft 4.0.

Forschungszentrum Informatik Karlsruhe (2022): Forschungsprojekt Blog3 - Blockchain-basiertes Gesundheitsdatenmanagement für gesamtheitliche Gesundheitsprofile. Online verfügbar unter <https://www.blog3.de>, zuletzt geprüft am 03.03.2022.

Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik (2019): Chancen und Herausforderungen von DLT (Blockchain) in Mobilität und Logistik. Online verfügbar unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/blockchain-gutachten.pdf?__blob=publication-File, zuletzt geprüft am 29.03.2021.

Golev, Artem; Corder, Glen D.; Giurco, Damien P. (2015): Barriers to Industrial Symbiosis: Insights from the Use of a Maturity Grid. In: *Journal of Industrial Ecology* 19 (1), S. 141–153. DOI: 10.1111/jiec.12159.

Hackius, Niels; Petersen, Moritz (2017): Blockchain in Logistics and Supply Chain: Trick or Treat? In: Wolfgang Kersten, Thorsten Blecker und Christian M. Ringle (Hg.): *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL) 2017*, Bd. 23: ebuli, S. 3–18.

Hanafı, Jessica; Kara, Sami; Kaebernıck, Hartmut (2008): Reverse logistics strategies for end-of-life products. In: *Int Jrrnl Logistics Management* 19 (3), S. 367–388. DOI: 10.1108/09574090810919206.

Henriques, Juan; Ferrão, Paulo; Castro, Rui; Azevedo, João (2021): Industrial Symbiosis: A Sectoral Analysis on Enablers and Barriers. In: *Sustainability* 13 (4), S. 1723. DOI: 10.3390/su13041723.

Indorf, Marius (2020): Entwicklung einer Methode zur kooperativen Nutzung von Fertigungskapazitäten. Technische Universität Hamburg.

IPFS (Hg.) (2022): How IPFS works. Online verfügbar unter <https://docs.ipfs.io/concepts/how-ipfs-works/>, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Jäger-Roschko, Moritz; Petersen, Moritz (2022): Advancing the circular economy through information sharing: A systematic literature review. In: *Journal of Cleaner Production* 369, S. 133210. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133210.

Jović, Marija; Tijan, Edvard; Žgaljić, Dražen; Aksentijević, Saša (2020): Improving Maritime Transport Sustainability Using Blockchain-Based Information Exchange. In: *Sustainability* 12 (21), S. 1–19. DOI: 10.3390/su12218866.

Kim, Henry M.; Laskowski, Marek (2018): Toward an ontology-driven blockchain design for supply-chain provenance. In: *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management* 25 (1), S. 18–27.

Kouhizadeh, Mahtab; Sarkis, Joseph (2018): Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains. In: *Sustainability* 10 (10), S. 3652. DOI: 10.3390/su10103652.

Kouhizadeh, Mahtab; Sarkis, Joseph; Zhu, Qingyun Serena (2019): At the Nexus of Blockchain Technology, the Circular Economy, and Product Deletion. In: *Applied Sciences* 9 (8), S. 1712. DOI: 10.3390/app9081712.

Kouhizadeh, Mahtab; Zhu, Qingyun Serena; Sarkis, Joseph (2020): Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. In: *Production Planning & Control* 31 (11-12), S. 950–966. DOI: 10.1080/09537287.2019.1695925.

Kurilova-Palisaitiene, Jelena; Lindkvist, Louise; Sundin, Erik (2015): Towards Facilitating Circular Product Life-Cycle Information Flow via Remanufacturing. In: *22128271* 29, S. 780–785.

Lawrenz, Sebastian; Nippraschk, Mathias; Wallat, Phillip; Rausch, Andreas; Goldmann, Daniel; Lohrengel, Armin (2021): Is it all about Information? The Role of the Information Gap between Stakeholders in the Context of the Circular Economy. In: *22128271* 98, S. 364–369. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.118.

Lege, Beverly; Twenhöven, Thomas; Kersten, Wolfgang (2022): Digitale Zwillinge für die Kreislaufwirtschaft. In: *Müll und Abfall* 54 (10), S. 560–565.

Lu, Yuqian; Liu, Chao; Wang, Kevin I-Kai; Huang, Huiyue; Xu, Xun (2020): Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 61, S. 101837. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101837.

Marr, Bernard (2018): Blockchain: A Very Short History Of Ethereum Everyone Should Read. Forbes. Online verfügbar unter <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2018/02/02/blockchain-a-very-short-history-of-ethereum-everyone-should-read/?sh=197bb4521e89>, zuletzt geprüft am 12.02.2022.

Mastos, Theofilos D.; Nizamis, Alexandros; Terzi, Sofia; Gkortzis, Dimitrios; Papadopoulos, Angelos; Tsagkalidis, Nikolaos et al. (2021): Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. In: *Journal of Cleaner Production* 300, S. 126886. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126886.

McDowall, Will; Geng, Yong; Huang, Beijia; Barteková, Eva; Bleischwitz, Raimund; Türkeli, Serdar et al. (2017): Circular Economy Policies in China and Europe. In: *Journal of Industrial Ecology* 21 (3), S. 651–661. DOI: 10.1111/jiec.12597.

McKinsey & Company (2018): How plastics waste recycling could transform the chemical industry. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/how-plastics-waste-recycling-could-transform-the-chemical-industry>.

MIT Center for Transportation & Logistics (CTL) (Hg.) (2020): Closing the loop. Toward Circularity in the Supply Chain. Roundtable Report. Boulder, CO.

Musamih, Ahmad; Salah, Khaled; Jayaraman, Raja; Arshad, Junaid; Debe, Mazin; Al-Hammadi, Yousof; Ellahham, Samer (2021): A Blockchain-Based Approach for Drug Traceability in Healthcare Supply Chain. In: *IEEE Access* 9, S. 9728–9743. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3049920.

Nakamoto, Satoshi (2008): Bitcoin. Online verfügbar unter <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.

Newton, Daniel (2018): What is Corda? Corda. Corda. Online verfügbar unter <https://www.corda.net/blog/what-is-corda/>.

Nippraschk, Mathias; Lawrenz, Sebastian; Klode, Simon (2022): The impact of Information Flow in the Circular Economy of Lithium-Ion- Batteries and how to measure it. In: *22128271* 105, S. 495–500. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.082.

Ober, Matt (2018): The IPFS Cloud. Node by Node, We Get Better and Better. Online verfügbar unter <https://medium.com/pinata/the-ipfs-cloud-352ecaa3ba76>, zuletzt geprüft am 21.01.2022.

Olson, Kelly; Bowman, Mic; Mitchell, James; Amundson, Shawn; Middleton, Dan; Montgomery, Cian (2018): Sawtooth: An Introduction. Hyperledger. Online verfügbar unter https://www.hyperledger.org/wp-content/uploads/2018/01/Hyperledger_Sawtooth_WhitePaper.pdf, zuletzt geprüft am 2022.

Omar, Ilhaam A.; Debe, Mazin; Jayaraman, Raja; Salah, Khaled; Omar, Mohammad; Arshad, Junaid (2022): Blockchain-based Supply Chain Traceability for COVID-19 personal protective equipment. In: *Computers & industrial engineering* 167 (107995), S. 1–11. DOI: 10.1016/j.cie.2022.107995.

Parajuly, Keshav; Wenzel, Henrik (2017): Product Family Approach in E-Waste Management: A Conceptual Framework for Circular Economy. In: *Sustainability* 9 (5), S. 768. DOI: 10.3390/su9050768.

Patton, Jeff (2015): User Story Mapping – Die Technik für besseres Nutzerverständnis in der agilen Produktentwicklung: O'Reilly Verlag.

Pehlken, Alexandra; Baumann, Sabine (2020): Urban Mining: Applying Digital Twins for Sustainable Product Cascade Use. In: 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). Cardiff, United Kingdom, 15.06.2020 - 17.06.2020: IEEE, S. 1–7.

Pehlken, Alexandra; Koch, Björn; Kalverkamp, Matthias (2019): Assessment of Reusability of Used Car Part Components with Support of Decision Tool RAUPE. In: Alexandra Pehlken, Matthias Kalverkamp und Rikka Wittstock (Hg.): *Cascade Use in Technologies 2018*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 75–82.

Plociennik, Christiane; Pourjafarian, Monireh; Nazeri, Ali; Windholz, Waldemar; Knetsch, Svenja; Rickert, Julian et al. (2022): Towards a Digital Lifecycle Passport for the Circular Economy. In: *22128271* 105, S. 122–127. DOI: 10.1016/j.procir.2022.02.021.

Pozo Arcos, Beatriz; Balkenende, A. Ruud; Bakker, Conny A.; Sundin, Erik (2018): PRODUCT DESIGN FOR A CIRCULAR ECONOMY: FUNCTIONAL RECOVERY ON FOCUS. In: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference. 15th International Design Conference, May, 21-24, 2018: Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Croatia; The Design Society, Glasgow, UK (Design Conference Proceedings), S. 2727–2738.

Preut, Anna; Kopka, Jan-Philip; Clausen, Uwe (2021): Digital Twins for the Circular Economy. In: *Sustainability* 13 (18), S. 10467. DOI: 10.3390/su131810467.

Reimers, Sven; Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Kersten, Wolfgang (2021): The Roles of Small and Medium-Sized Enterprises in Blockchain Adoption. In: Udo Buscher, Rainer Lasch und Jörn Schönberger (Hg.): *Logistics Management*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Logistics), S. 3–14.

Rocca, Roberto; Rosa, Paolo; Sassanelli, Claudio; Fumagalli, Luca; Terzi, Sergio (2020): Industry 4.0 solutions supporting Circular Economy. In: 2020 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC). Cardiff, United Kingdom, 15.06.2020 - 17.06.2020: IEEE, S. 1–8.

Rose, C. M.; Ishii, K.; Masui, K. (1998): How product characteristics determine end-of-life strategies. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. ISEE - 1998 (Cat. No.98CH36145). Oak Brook, IL, USA, 4-6 May 1998: IEEE, S. 322–327.

Sarkis, Joseph; Kouhizadeh, Mahtab; Zhu, Qingyun Serena (2021): Digitalization and the greening of supply chains. In: *IMDS* 121 (1), S. 65–85. DOI: 10.1108/IMDS-08-2020-0450.

Schmalz GmbH 2022: Digitale Produktakte - Umfassender Service übers Smartphone. Online verfügbar unter <https://www.schmalz.com/de/ueber/aktuelles/presse/n/digitale-produktakte---umfassender-service-uebers-smartphone/>, zuletzt geprüft am 24.03.2022.

Swan, Melanie (2015): *Blockchain. Blueprint for a new economy*. First edition. Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Sebastopol, Tokyo: O'Reilly.

Tapscott, Don; Tapscott, Alex (2016): Blockchain revolution. How the technology behind Bitcoin is changing money, business and the world. New York, New York: Portfolio/Penguin.

Treiblmaier, Horst (2018): The impact of the blockchain on the supply chain: a theory-based research framework and a call for action. In: *SCM* 23 (6), S. 545–559. DOI: 10.1108/SCM-01-2018-0029.

Twenhöven, Thomas; Petersen, Moritz; Ludwig, André (2023): TTF of Blockchain — An investigation in SC&L [Unpublished Manuscript].

Viriyasitavat, Wattana; Hoonsopon, Danupol (2019): Blockchain characteristics and consensus in modern business processes. In: *Journal of Industrial Information Integration* 13, S. 32–39. DOI: 10.1016/j.jii.2018.07.004.

Walden, Joerg; Steinbrecher, Angelika; Marinkovic, Maroye (2021): Digital Product Passports as Enabler of the Circular Economy. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (11), S. 1717–1727. DOI: 10.1002/cite.202100121.

Wang, Yingli; Singgih, Meita; Wang, Jingyao; Rit, Mihaela (2019): Making sense of blockchain technology: How will it transform supply chains? In: *International Journal of Production Economics* 211, S. 221–236. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.02.002.

Yu, Yifei; Yazan, Devrim Murat; Bhochohibhoya, Silu; Volker, Leentje (2021): Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. In: *Journal of Cleaner Production* 293, S. 126083. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126083.

Zhang, Abraham; Zhong, Ray Y.; Farooque, Muhammad; Kang, Kai; Venkatesh, V. G. (2020): Blockchain-based life cycle assessment: An implementation framework and system architecture. In: *Resources, Conservation and Recycling* 152, S. 104512. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104512.