

Digital Twin-Konzeption in der Automobilindustrie: Einsatzpotenziale der Blockchain-Technologie

Dominik T. Heber
University of Twente,
Daimler AG
Dominik.Heber@Daimler.com

Florian Michelbach
Daimler AG
Florian.Michelbach@Daimler.com

Frank S. Morelli
Hochschule Pforzheim
Frank.Morelli@HS-
Pforzheim.de

Marco W. Groll
University of Twente,
Daimler AG
M.W.Groll@UTwente.nl

ABSTRACT

Digital Twins stehen stellvertretend für innovative IT-Konzepte, die gegenwärtig im Sinne der digitalen Transformation Branchen wie den Automobilbau revolutionieren. Ihr jeweiliges Ziel liegt in der vollständigen Abbildung aller relevanten Charakteristika eines Produkts und damit in einem verbesserten Produktdatenmanagement (PDM). Aus dynamischer Perspektive sind beim Management des Produktlebenszyklus (PLM) verschiedene Phasen zu differenzieren. Bereits bei der Elektrik/Elektronik (E/E)-Entwicklung im Fahrzeugbau muss eine Vielzahl an Informationen zwischen unterschiedlichen (internen und externen) Parteien ausgetauscht und dokumentiert werden. Im Mittelpunkt dieses Artikels steht die Frage, ob die Blockchain-Technologie sich eignet, zugehörige Aktivitäten effizient zu unterstützen bzw. einen Mehrwert gegenüber den klassischen Vorgehensweisen im PDM/PLM zu bieten. Die Evaluierung basiert auf einer qualitativ-methodischen Herangehensweise.

SCHLÜSSELWÖRTER

Digital Twin, Blockchain, PDM/PLM, Automotive

PROBLEMSTELLUNG

Aktuell befindet sich die Automobilbranche im tiefgreifenden Wandel. Dieser ist teilweise verursacht durch die Erwartungshaltung von Kunden, dass sie mithilfe ihres Smartphones ihr Fahrzeug öffnen und durch den Abruf zugehöriger Daten auch kontrollieren können. Des Weiteren sieht man, ebenfalls von Kunden initiiert, besonders in Großstädten den Trend weg vom Kauf eines eigenen Fahrzeugs hin zum Carsharing als weiteren Pull-Faktor aus Sicht der Automobilbranche. Dem stehen die Push-Faktoren der Automobilhersteller gegenüber: Beispielhaft ist hier das autonome Fahren mit all seinen Assistenzsystemen zu erwähnen. Die meisten großen Original Equipment Manufacturers (OEMs) verfolgen eine Strategie hin zum autonomen Fahren, da die Technik hierzu reifer wird und dies neue Geschäftsfelder, wie z.B. Robotertaxis, erschließt. Die Umsetzung des (teilweise) elektrischen Fahrens beruht einerseits auf effizienterer Batterie- und Antriebstechnologie, andererseits auf gesetzlichen Anforderungen.

Die Kombination aus Push- und Pull-Faktoren führt zu neuen technologischen Lösungen innerhalb eines Automobils im Umfeld der Elektrik/Elektronik (E/E), d.h. Aktorik, Sensorik, Steuergeräten und Software, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden. Diese E/E-Lösungen müssen im Auto verbaut werden und erhöhen dabei die Komplexität der E/E-Architektur des Fahrzeugs. Da mehr und mehr Funktionalitäten softwarebasiert umgesetzt werden und Software sich leichter ändern lässt, steigen sowohl die Volatilität als auch die Gesamtvarianz des Aufbauzustandes eines Fahrzeugs immens (Trippner et al. 2015). So hat z.B. ein F-35 Kampfflugzeug 9 Millionen Zeilen Code, wohingegen ein modernes Fahrzeug 100 Millionen Zeilen Code besitzt

(Halvorson 2016). Die Verfünfachung der Bussysteme in einer Mercedes S-Klasse zwischen den Jahren 1995 und 2013 sowie eine mehr als Verdopplung der Steuergeräteanzahl verdeutlichen die gestiegene Bedeutung aber auch Komplexität der E/E. Dass diese Komplexität in der E/E-Architektur, speziell mit Bezug zur Software, noch nicht durchgängig beherrscht wird, zeigt eine Statistik aus den USA: Hier wird über eine ca. 700% Zunahme von Fahrzeugrückrufen mit Softwarebezug und eine Zunahme von ca. 500% der betroffenen Fahrzeuge zwischen den Jahren 2011 bzw. 2012 und 2015 berichtet (Dobrian 2016). Auch das Kraftfahrt-Bundesamt verzeichnet eine Zunahme um 67% der Rückrufe von 2009 bis 2014 (KBA 2015). Um zukünftig Fahrzeugsoftware automatisiert und im Feld aktualisieren zu können, bedarf es der Kenntnis eines zu jedem Zeitpunkt des Lebenszyklus aktuellen Aufbauzustandes eines Fahrzeuges, d.h. welche Hard- und Software in welcher Version aktuell im Fahrzeug vorhanden ist. Boschert und Rosen (2016) beleuchten zudem die Notwendigkeit, dass man auch Gesamtfahrzeugsysteme jederzeit (neu-)simulieren können muss, um Optimierungsbedarfe abzuleiten. Sowohl zur Kenntnis des Aufbauzustandes als auch zur Simulationsunterstützung über den Lebenszyklus hinweg eignet sich aus Sicht der Autoren der Einsatz eines Digital Twins. Das zugehörige Konzept wird im Folgenden näher vorgestellt.

Die gestiegene Komplexität der E/E-Architektur muss von der Entwicklung an bis hin zum After Sales in den IT-Systemen der Automobilhersteller adressiert und verwaltet werden. Entsprechend gibt es dort eine Vielzahl an domänenspezifischen Autoren- und Verwaltungswerkzeuge sowie -datenbanken. Im Fall von BMW sind es z.B. ca. 1000 Autorenwerkzeuge, ca. 40 Team Data Management (TDM) Systeme und ca. 10 Produktdatenmanagementsysteme (PDM) allein in der Produktentwicklung (Trippner et al. 2015). Diese IT-

Landschaft ist häufig von großer Heterogenität in Datenmodellen, Schnittstellen, Prozessen und Organisationseinheiten geprägt (Trippner et al. 2015). Dies schränkt die Nachvollziehbarkeit einzelner Informationsartefakte sowohl in der Entwicklung als auch über den gesamten Lebenszyklus hinweg oft stark ein.

Erschwerend kommt hinzu, dass die internationale Verflechtung der OEMs mit ihren Lieferanten und Entwicklungsdienstleistern stark zugenommen hat. Somit besteht ein erhöhter Abstimmungsbedarf besonders im Entwicklungsnetzwerk (Katzenbach 2015). Hierbei haben wiederum verschiedene Entwicklungspartner unterschiedliche, domänenspezifische Werkzeuge mit uneinheitlichen Datentypen und -schnittstellen, sodass Änderungen an Entwicklungsartefakten über verschiedene Systeme hinweg proklamiert und umgesetzt werden müssen (Katzenbach 2015).

Der vorliegende Artikel basiert auf verschiedenen Vorarbeiten: Groll und Heber (2016) zeigen einen konzeptionellen Ansatz zur Verlinkung von Metadaten mit Fokus auf Model-based Systems Engineering (MBSE) und PDM anhand eines übergreifenden PLM-Backbones. Heber und Groll (2017) motivieren die Verknüpfung von Metadaten des MBSE mit dem PDM mithilfe der Blockchain mit der Vision hiermit einen Beitrag zur Durchgängigkeit für einen Digital Twin zu

leisten. Heber und Groll (2018) fokussieren wiederum auf ein zugrundeliegendes Datenmodell für die Verknüpfung des MBSE und PDM und beleuchten, welche Metadaten für den Austausch relevant sind, ohne Betrachtung des Digital Twins. Abbildung 1 (Heber und Groll 2018) weist exemplarisch die heterogene IT-Landschaft einzelner Domänen entlang des Lebenszyklus und des V-Modells der Produktentwicklung im Zusammenspiel zwischen OEMs und Entwicklungspartnern aus.

Ziel der vorliegenden konzeptionell-explorativen Arbeit ist es,

1. zentrale Eigenschaften für die Nachvollziehbarkeit von Informationsartefakten innerhalb der verteilten automobilen E/E-Entwicklung in deren aktuellen IT-Landschaft zu identifizieren und zu validieren (Status Quo).
2. relevante Kriterien aus Produktdaten- und Product Lifecycle Management-Sicht und spezifisch für einen Digital Twin sowohl zu ermitteln als auch zu überprüfen.
3. die Blockchain Technologie anhand o.g. Kriterien als Lösungstechnologie für eine bessere Nachvollziehbarkeit zu evaluieren.
4. ein Intended Support Model (vgl. Blessing und Chakrabarti 2009) als Vergleich der Erfüllungsgrade o.g. Kriterien im Status Quo und mithilfe der Blockchain Technologie zu erstellen.

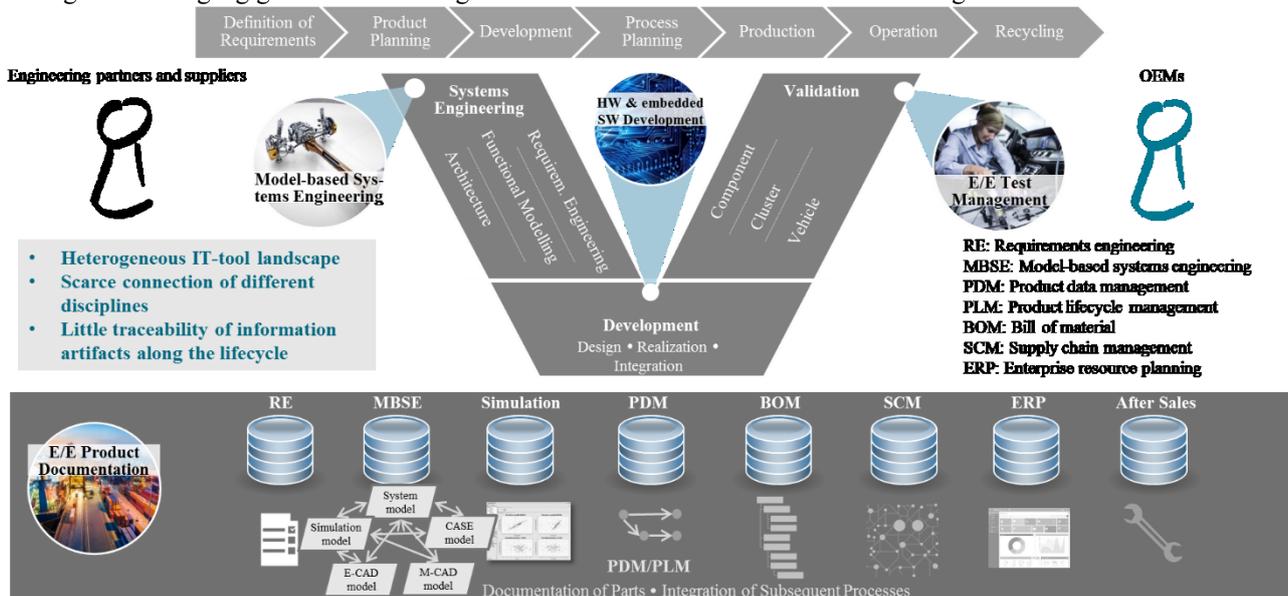


Abbildung 1: Problemraum - aktuelle Entwicklungssituation in Entwicklungskooperationen gem. des V-Modells mit einer heterogenen IT-Landschaft, organisationalen Brüchen und Brüchen der Werkzeugketten zwischen einzelnen Disziplinen und daraus resultierender geringer Nachvollziehbarkeit von Informationsartefakten über den Lebenszyklus hinweg (Heber und Groll 2018).

PRODUKTDATENMANAGEMENT IM WANDEL Produktdatenmanagement und Product Lifecycle Management

Der technologische und organisationale Wandel hatte bereits in der Vergangenheit Auswirkungen auf die zugrundeliegende IT-Landschaft innerhalb der Automobilbranche. Bereits Mitte der 1980er Jahre waren die ersten PDM-Systeme dort verfügbar. Damals lag der

Fokus vermehrt auf dem Dokumentenmanagement in Computer Aided Design (CAD) und Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen. Der typische Einsatzbereich des PDM war allerdings beschränkt auf abteilungsspezifische Entwicklungs- und Konstruktionstätigkeiten: PDM beschrieb das Management des Produkt- und Prozessmodells mit der Zielsetzung, eindeutige und reproduzierbare

Produktkonfigurationen zu entwickeln (Eigner und Stelzer 2009, S. 34). Wichtige Grundfunktionen eines PDM-Systems sind demnach die Verwaltung bestehender Stamm- und Strukturdaten, die in Projekten neu generierten zugehörigen Informationen sowie ein Workflow-Management für Versionierungen, ein Freigabe- und Änderungsmanagement, Archivierung und die Integration anderer Systeme mithilfe von Schnittstellen (Eigner und Stelzer 2009).

Die stringente Implementierung eines durchgängigen Produkt- und Prozessmanagements repräsentiert das Konfigurationsmanagement. Hierbei sind alle Aktivitäten darauf ausgerichtet, dass der Aufbauzustand zu jedem Zeitpunkt des Lebenslaufs eines Produktes bekannt ist sowie die Historie bzw. welche Maßnahmen hierzu führten. Eine Identifikation des aktuellen Aufbauzustandes ist anhand der sog. Gültigkeit möglich: Diese kann über ein Datum, einen Änderungsindex oder eine Seriennummer abgebildet werden (Eigner und Stelzer 2009). Gem. Stark (2016) ist das PDM auch heute noch häufiger in der Produktplanung und Entwicklung anzutreffen (vgl. Abbildung 1).

Das Product Lifecycle Management (PLM) entstand aufgrund rechtlicher Anforderungen an die Nachvollziehbarkeit der Produktänderungen. Allen zugehörigen Definitionen inhärent sind der breitere Einsatz des PLM im Vergleich zum PDM und die höhere Integrationstiefe über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg mit Anbindung an ein ERP-System (Eigner und Stelzer 2009).

PLM-Systeme ermöglichen ein übergreifendes PDM in Form eines durchgängigen Konfigurationsmanagements von disziplinübergreifenden Metadaten (Groll und Heber 2016). Sie erweisen sich dadurch als Bindeglied bzw. PLM Backbone zwischen den Autoren- und TDM-Systemen einerseits sowie der ERP Software andererseits.

In einem vierstufigen Architekturkonzept sind auf der untersten Ebene die Autorenwerkzeuge angesiedelt. Die häufig dort aufzufindenden nativen Datenformate werden im TDM verwaltet. Durch die Trennung von Produktlinien, organisatorischen Einheiten und Disziplinen reduziert sich die Gesamtkomplexität (Eigner und Stelzer 2009). Es bestehen verschiedene Ansätze, wo die Konstruktionsstückliste und die Fertigungsstückliste zu lokalisieren sind und welche Funktionen demnach das PLM und das ERP übernehmen sollen (Eigner et al. 2014, Eigner und Stelzer 2009).

Wichtig für die Entwicklungsphase ist, dass das PLM Backbone eine integrative Aufgabe einnimmt. Diese sollte vom Anforderungsmanagement über Model-based Systems Engineering (MBSE), mechanisches und elektronisches CAD (M- bzw. E-CAD), Computer Aided Software Engineering (CASE) bis hin zu Verifikation und Test reichen (Eigner et al. 2014). Diese vollumfängliche Integration von disziplinübergreifenden Metadaten in einem PLM Backbone ist in der Praxis bisher allerdings nicht oder nur teilweise gegeben. Dies gilt besonders für die spezifische Nachvollziehbarkeit von Informationsartefakten auf Einzelfahrzeugebene.

Aufgrund der hohen Volatilität der Software existiert z.B. im After Sales Bereich eine Vielzahl an unterschiedlichen Aufbauzuständen. So lässt sich u.a. Software ad hoc nachladen („Flashing over the Air“ (FOTA)), um Kunden Individualisierungsmöglichkeiten am Fahrzeug zu bieten oder um Fehler zu beheben. Dies erhöht die Varianz der zu handhabenden Fahrzeugkonfigurationen.

Ziel ist es, eine fehlerfreie Funktionalität des Fahrzeugs zu gewährleisten. Hierzu muss zu jedem Zeitpunkt bekannt sein, in welchem Aufbauzustand, bzw. in welcher Konfiguration sich ein Fahrzeug befindet. Nur dadurch lässt sich ein korrektes, kompatibles Aufspielen von Software gewährleisten. Hierbei müssen Parameter wie die Performanz eines Steuergeräts, z.B. CPU-Leistung, Speicherplatz und RAM, sowie die Interaktionen im System via Kommunikationsbusse bekannt sein und ggf. neu simuliert werden.

Digital Twin

Unter einem Digital Twin versteht man allgemein die umfassende physikalische und funktionale Beschreibung einer Komponente, eines Produkts oder Systems, das als physische Instanz vorliegt und ein digitales Abbild („Zwilling“) in IT-Backbone-Systemen hat. Darin enthalten sind alle relevanten Informationen, die für aktuelle oder zukünftige Lebenszyklusphasen nützlich sein könnten (Boschert und Rosen 2016). Das Konzept des Digital Twins (digitalen Zwillings) wird nachfolgend als ein Repräsentationssonderfall des PDM/PLM betrachtet.

Boschert und Rosen (2016) unterscheiden zwischen dem *Digital Thread* und dem *Digital Twin*: Der Digital Thread hat seinen Schwerpunkt in der Datenakquisitionsphase, also der Entwicklung, als „roter Faden“ an Entwicklungsartefakten mithilfe technischer Konzepte. Der Digital Twin hingegen fokussiert auf den After Sales und unterstützt diese Phase mit Bereitstellung bereits vorhandener Simulationsmodelle (Boschert und Rosen 2016). Für Simulationszwecke sollte der Digital Twin vorab als eigene Struktur definiert werden und benötigt eine eigene Architektur. Ferner sind Daten, die in der Entwicklung und im After Sales anfallen zu integrieren. Zielsetzung ist es, das Systemverhalten besser zu verstehen und Leistungsbewertungen vornehmen zu können. Qualitätsüberlegungen sollen aus der Entwicklungs- direkt in die Operationsphase einfließen. Der Digital Twin stellt hierzu Schnittstellen für verschiedene Modelle und Daten in unterschiedlicher Granularität zur Verfügung und hält diese konsistent (Boschert und Rosen 2016). So würde man sich die Neudefinition von Simulationsmodellen für den After Sales ersparen, da aufgrund der heterogenen IT-Landschaft oft Simulationsmodelle aus der Entwicklung nicht im After Sales verfügbar sind (vgl. Abbildung 1). Bitzer et al. (2017) beschreiben den Digital Twin als digitalisiertes Abbild eines physisch existenten Produkts, das als administrative Hülle dient, um Felddaten zu erfassen oder Firmware zu aktualisieren. Aus einem sog. 150%-Modell im PLM, das Modell aller möglichen

Konfigurationsvarianten eines Produkts, wird bei der Produktion ein 100%-Modell abgeleitet. Dies lässt sich wiederum als Grundlage für das Abbild einer physischen Instanz verwenden.

Grievies und Vickers (2017) unterscheiden zwischen einem prototypischen Digital Twin, welcher alle Informationen (z.B. CAD-Modell oder Stückliste) enthält, um aus dieser virtuellen Version ein physisches Abbild zu erstellen. Zum anderen wird eine konkrete virtuelle Instanz des physisch bereits existierenden Produkts als Digital Twin beschrieben, wobei Sensordaten und Änderungen am Produkt im After Sales eine große Rolle spielen.

Das Konzept des Digital Twin wird in dieser Ausarbeitung erweitert: In Abbildung 2 befinden sich unten die einzelnen domänenspezifischen IT-Systeme über den Lebenszyklus hinweg. Die Metadatenschicht ist vergleichbar mit dem PLM Backbone und hält ausschließlich lebenszyklus-, konfigurationsrelevante und nicht alle domänenspezifischen Daten vor. Hierbei wird ausschließlich der *Dokumentationszwilling* abgelegt. Dieser soll nur die notwendigen Metadaten eines jeweiligen Fahrzeugs verwalten, selbige aber über den ganzen Lebenszyklus allen Domänen zur Verfügung stellen. Primäre Zielsetzung dabei ist es, eine durchgängige Nachvollziehbarkeit für ein Produkt in allen Phasen zu gewährleisten. Hierbei muss unterschieden werden, in welcher Lebenszyklusphase sich das Fahrzeug befindet:

- Von der Anforderungsdefinition bis hin zum Produktionsbeginn werden nur sog. 150%-Modelle einer Fahrzeugbaureihenausführungsart entwickelt, d.h. alle möglichen Varianten (z.B. USA- oder China-Variante) einer Baureihe Cabrios (Ausführungsart). Dies wird hier als „Baureihen/Ausführungsart (BR/AA)“-Digital Twin bezeichnet.

- Ab Produktionsbeginn erfolgt die Ableitung einer digitalen Repräsentation der konkreten, physisch vorhandenen Fahrzeugvariante vom BR/AA-Digital Twin. Aus der zugehörigen Verknüpfung ergibt sich der 1:1 Digital Twin.

Ein durchgängiges, monolithisches Modell bzw. Konstrukt mit sämtlichen relevanten Daten umzusetzen, erweist sich aus Sicht der Autoren nicht als sinnvoll. Bereits heute existieren digitale Zwillinge in Form von disziplinspezifischen, anwendungsfallbasierten Simulationsmodellen und Datenaggregationen in einzelnen Lebenszyklusphasen. Entsprechend wird als Ansatz empfohlen, die bereits bestehenden digitalen Repräsentationen miteinander über den gesamten Lebenszyklus zu verknüpfen, zunächst in Form eines BR/AA-Digital Twins und später mithilfe eines 1:1 Digital Twins (vgl. Abbildung 2).

Aktuell gibt es bereits Ansätze für eine funktionale Beschreibung von Fahrzeugen mittels Simulationsmodellen des MBSE (FPT: Functional Prototype). Da es sich bei Leitungssätzen in Fahrzeugen meist um Unikate handelt, wird momentan an einem zugehörigen Digital Twin (Harness Twin) geforscht. Zur Kostenersparnis gibt es in der Entwicklung bereits seit längerer Zeit digitale Prototypen und geometrische Abbilder eines Fahrzeugs zur Produktionsplanung (Digital Prototype, Geometric Twin). Virtuelle Realitätszwillinge werden zur Produktveranschaulichung genutzt (VR Twin). Das FOTA befindet sich noch in den Anfängen und stellt bedeutende Anforderungen an einen Digital Twin (FOTA Twin). Der Einsatz von Sensordaten aus dem After Sales zur Optimierung von Systemen, Leistung und Qualität repräsentiert ein großes Nutzenpotenzial (Boschert und Rosen 2016).

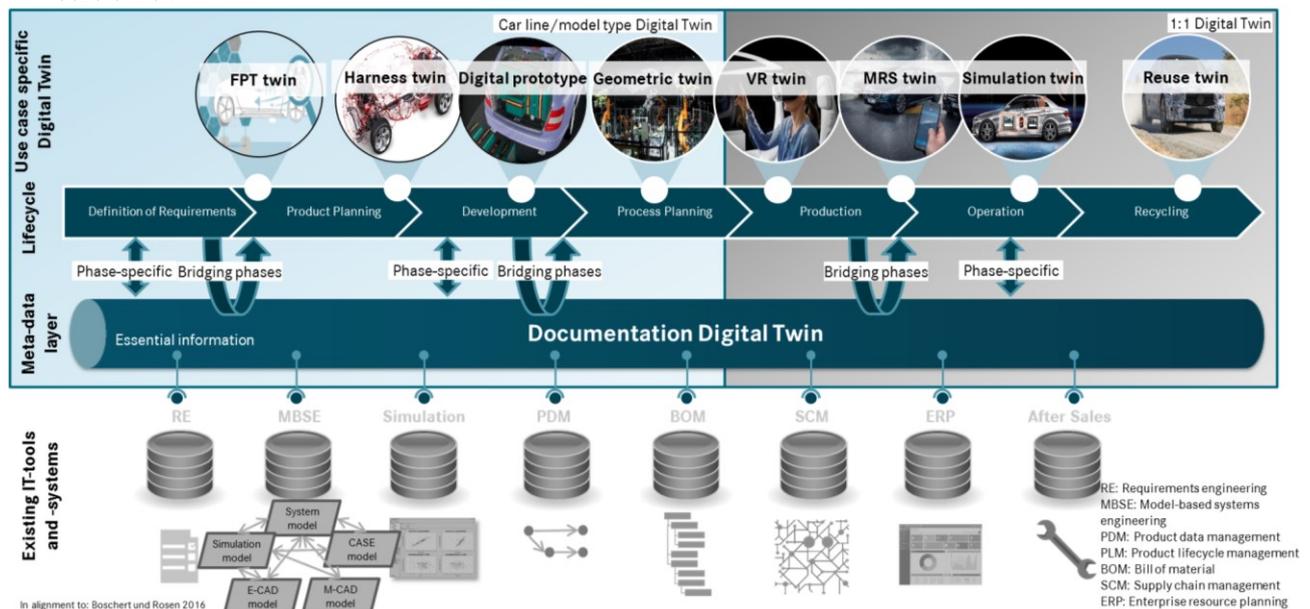


Abbildung 2: Digital Twin - der Dokumentationszwilling eines Fahrzeugs überbrückt heterogene IT-Systeme anhand Metadatenverwaltung und ermöglicht somit die Verknüpfung anwendungsfallspezifischer Digital Twins (in Anlehnung an Boschert und Rosen (2016)).

Am Lebenszyklusende lässt sich ein Digital Twin zur Wiederverwendung (Reuse Twin) einsetzen. Dieser lässt z.B. Rückschlüsse auf ein verbessertes Recycling aber auch auf einen Optimierungsbedarf für neue Baureihen zu. Die phasen- und anwendungsfallsspezifischen Digital Twins lassen sich anhand des Dokumentationszwillings miteinander verknüpfen, der die Nachvollziehbarkeit in der internen IT-Landschaft gewährleistet. Der After Sales Bereich kann so z.B. im Falle des FOTA auf bereits vorhandene Simulationsmodelle der Steuergeräte, Systeme und E/E-Architektur aus der Entwicklung zurückgreifen. Da der Lifecycle-übergreifende Dokumentationszwillings in der Automobilbranche noch nicht existiert, werden im Weiteren spezielle, Digital Twin-spezifische Kriterien des PDM/PLMs im Hinblick auf ihre Nachvollziehbarkeit analysiert.

BLOCKCHAIN ALS UNTERSUCHUNGSGEGENSTAND

Typische Blockchain-Anwendungsgebiete

Im Jahr 2008 veröffentlichte eine Person bzw. eine Gruppe unter dem Pseudonym *Satoshi Nakamoto* ein White Paper über Bitcoin, ein Peer-to-Peer elektronisches Bezahlsystem (Nakamoto 2008). Kurze Zeit später wurde der Code für die erste sogenannte Bitcoin-Blockchain geliefert. Die Namensgebung rührt daher, dass Transaktionen zu Blöcken zusammengefasst und diese eindeutig nachweisbar anhand von Hashwerten zu einer fortlaufenden Kette verknüpft werden.

Ursprüngliches Ziel von Bitcoin war es, ineffiziente Banken, die als Intermediäre für Finanztransaktionen fungieren, abzuschaffen. Dieser Entwicklung folgend wurden viele weitere Kryptowährungen (z.B. Ethereum, Ripple und Bitcoin Cash) initiiert, die teils auf der Blockchain-Technologie basieren, deren Limitationen teils abbildern oder neue technologische Ansätze verfolgen. Entsprechende Technologien finden zwischenzeitlich auch außerhalb des Finanzbereichs Anwendung.

Typisch sind Fälle, bei denen eine Disintermediation zur Effizienzsteigerung und zur direkten Verknüpfung von Transaktionsteilnehmern stattfindet. Auch das Internet of Things (IoT) weist Blockchain-Anwendungsfälle in der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation auf (Bashir 2018). Ferner stehen Szenarien, in denen ein „Kassenbuch“ erforderlich ist, im Fokus. Beispielhaft sei das Grundbuch eines Notars genannt. Metadaten über Produkte mit einer Herkunftsgeschichte können ebenso auf der Blockchain abgelegt und zur Nachvollziehbarkeit genutzt werden. Im Rahmen der dezentralen Identifikationsverwaltung existiert z.B. ein prototypisches Dokumentenmanagement-System für Schiffscontainer auf Basis der Blockchain. Ferner lassen sich Smart Contracts, d.h. kleine, eigenständig ausführbare *if-then*-Beziehungen, direkt auf der Blockchain ausführen oder mit ihr assoziieren. Ihnen ist eine hohe Bedeutung zuzuschreiben, da man hierdurch Transaktionen zu automatisieren vermag (Morabito 2017). So könnte bspw. ein Leasingfahrzeug nicht mehr anspringen (= *then*), falls die Leasingrate nicht via Smart

Contract registriert und auf der Blockchain abgelegt wurde (= *if*).

Blockchain-Charakteristika

Der Blockchain-Technologie wird bei bestimmten Anwendungsfällen eine disruptive Auswirkung vorausgesagt. Die meisten Eigenschaften beruhen jedoch auf bereits zuvor erfundenen und genutzten Technologien oder Methoden (Narayanan und Clark 2017): So gab es u. a. bereits das Merkle-Tree-Verfahren zur verkürzten Hashwertbildung (Irreversibilität), den Proof-of-Work als Vorschlag für Anti-Spam-Lösungen (Konsens- und Antibetrugsmechanismus) sowie Public-Private-Key-Verfahren (Anonymität). Der besondere Wert der Blockchain-Technologie besteht in der spezifischen Zusammenfügung der zugrundeliegenden Komponenten (Narayanan und Clark 2017). Nachfolgend sollen die drei wichtigsten Eigenschaften, Dezentralität, Öffentlichkeit und Irreversibilität, erläutert werden:

- **Dezentralität:** Zentrale Datenbanken sind beim Zugriff mehrerer Partner lediglich dann vorteilhaft, wenn man der Partei, welche die Datenhoheit besitzt, vertraut. Fällt diese allerdings aus, kann kein User mehr auf die Daten zugreifen. Ferner ist die vertikale Skalierbarkeit bei einer zentralen Datenbank nicht gegeben und entsprechend Grenzen des Leistungsausbaus gesetzt (Schicker 2017). Beim dezentralen Peer-to-Peer-Netzwerk werden alle Daten redundant von allen Netzwerkteilnehmern (Peers) vorgehalten. Dies schützt vor Manipulation im Falle mangelnden Vertrauens. Ferner müssen Transaktionen nicht von einer Drittpartei bestätigt werden (Bashir 2018). Diese Validierung geschieht vielmehr anhand eines Konsensmechanismus. Beispielsweise wird beim Proof-of-Work im Bitcoin-Fall mit Hilfe leistungsstarker Computer („Miner“) ein passender Hashwert gesucht. Die Eigenschaft der Dezentralität erweist sich dort als sinnvoll, wo viele Entwicklungspartner ad hoc zusammenarbeiten wollen. So könnte bspw. ein kleines Start-up Software zu einem Steuergerät beisteuern und dem Blockchain-Entwicklungsnetzwerk beitreten. Es sähe dann den aktuellen Entwicklungsstand, ohne dass Zugriffe auf bestehende IT-Backbone-Systeme gewährt werden müssen. Ebenso ist ein Szenario mit gleichwertigen Entwicklungspartnern denkbar, die sich gegenseitig keinen Zugriff auf ihre IT-Systeme geben. In diesem Fall ließe sich die Blockchain dann als dokumentarische Verknüpfung proprietärer IT-Systeme nutzen. Der immanente Konsensmechanismus der Blockchain-Technologie, welcher sich unterschiedlich ausgestalten lässt (vgl. Morabito 2017, Bashir 2018), könnte im Entwicklungsbereich einen generischen bis hin zu einem automatisierten Freigabeprozess abbilden, in dem alle Peers über freigegebene Stände informiert werden.

- *Öffentlichkeit*: Ein Nachrichtenaustausch zwischen zwei Peers enthält Informationen über die öffentliche Empfänger-Adresse, den Wert der Transaktion und die Signatur des öffentlichen Schlüssels des Senders, um die Echtheit und Gültigkeit zu bestätigen (Morabito 2017). Entsprechende Transaktionen werden im gesamten Netzwerk anhand eines Flooding-Protokolls („Gossip“-Protokolls) verteilt und sind somit für alle Peers sichtbar. Es erfolgt eine Validierung und anschließende Zusammenfassung der Transaktionen in Blöcken, die wiederum nach dem Proof-of-Work im Netzwerk verteilt werden (Bashir 2018). Hierdurch lässt sich die komplette Transaktionshistorie von Beginn an einsehen und nachvollziehen. Dies schafft Transparenz und macht einen Intermediär obsolet. Anonymität bzw. Pseudonymität ist in diesem Kontext allerdings nicht mehr vollständig gegeben, da die öffentlichen Schlüssel bekannt sind: Mittlerweile existieren Techniken (Transaktions-, Adress- und Entitätengrafen), die selbst bei je Transaktion wechselnden Identitäten (Schlüsselpaare) Rückschlüsse auf den Ursprung zulassen (Bashir 2018). Diese Transparenz macht in der Automobilentwicklung nur beschränkt Sinn, da nicht jeder Wettbewerber vertrauliche Entwicklungsdaten sehen darf. Dennoch kann ein restringierter Zugriff auf Entwicklungsdaten durch die an der Entwicklung beteiligten Partner einen Mehrwert generieren. So lassen sich z.B. Entwicklungsänderungen für alle ad hoc sichtbar machen (Heber und Groll 2017). Hierbei ist zu unterscheiden, ob es sich um eine komplett öffentliche Blockchain im klassischen Sinne handelt oder um eine Konsortial-Blockchain, wobei man den Zutritt verwalten kann. So bietet z.B. Hyperledger Fabric als Konsortial-Blockchain die Möglichkeit sog. „Channels“ zu bilden, zu denen einzeln Zugriff gewährt werden kann, sodass Daten nicht komplett öffentlich sind.
- *Irreversibilität*: Diese Eigenschaft trägt ebenso zur Transparenz und zur Vertrauensbildung bei. Als Technologie liegt das Merkle-Tree-Verfahren zur Generierung von Zeitstempeln zugrunde, das bereits in den 90er Jahren wissenschaftlich untersucht wurde. Jeder Block in der Blockchain enthält mehrere Transaktionen, Metadaten und den Hashwert des Vorgängerblocks. Über die Gesamtdaten des Blocks wird erneut ein Hashwert gebildet, der wiederum als Eingabe für den nächsten Block dient. Der Vorteil solcher verknüpfter, zeitgestempelter Informationsartefakte ist, dass die Änderung eines jeglichen Artefakts eine Neuberechnung aller darauffolgenden Artefakte oder Blöcke und der darin enthaltenen Transaktionen nach sich ziehen würde, damit eine Änderung nicht auffällt (Narayanan und Clark 2017). Einfache Hashwerte sind zwar relativ leicht zu berechnen, jedoch steht im Blockchain-Fall die

dezentrale Verteilung der Transaktionshistorie dieser Manipulation entgegen: Ändert lediglich ein Peer die Transaktionshistorie, dann haben trotzdem alle anderen Parteien noch die unveränderte Historie bei sich abgelegt. Ohne Mehrheitskonsens lassen sich keine Änderungen vornehmen. Der Schwierigkeitsgrad des Mining-Rätsels, d.h. die Länge des zu errechnenden Hashwertes, wird variabel an die im Netzwerk vorhandene Rechenleistung angepasst. Hiermit lässt sich gewährleisten, dass nur ca. alle zehn Minuten ein neuer Block kreiert werden kann. Dies fungiert als technologische Hürde, damit man mit mehr Rechenleistung nicht das gesamte Netzwerk kompromittieren kann. Theoretisch wäre es zwar möglich, mit Hilfe hoher Rechenleistung Blöcke neu zu berechnen und somit Transaktionen zu fälschen oder zu doppelten. Da in diesem Fall aber das Vertrauen der Partner in die Blockchain verloren ginge, wäre die Manipulation wertlos. Entsprechend besteht für alle beteiligten Peers der Anreiz nicht zu betrügen, womit die Integrität des Netzwerks gewahrt bleibt (Bashir 2018). Auch beim unbeabsichtigten Vorliegen verschiedener aktueller Stände der Blockchain, sog. Forks, gibt es entsprechende Vorkehrungen. Dies tritt z.B. beim (fast) gleichzeitigen Veröffentlichen neuer Blöcke oder aufgrund von Netzwerklatenz auf. Die Transparenz und Integrität ist hierbei nicht gefährdet, da Transaktionen aus dem Block, der sich in der „absterbenden“ Verzweigung befindet, nicht verloren gehen. Die zugehörige Berechnung wird vielmehr für den nachfolgenden Block wiederverwendet. Diese Verzweigung „lebt“ weiter und an diese wird wiederum ein neuer Block angehängt. Entsprechend lässt sich dieser von den meisten Peers anhand eines vordefinierten Regelsatzes bestätigen (Bashir 2018). Somit ist Irreversibilität zu jedem Zeitpunkt gegeben. Die Eigenschaft der Irreversibilität ist dort relevant, wo man aus rechtlichen, vertraglichen oder dokumentarischen Gründen eine Rückverfolgbarkeit benötigt. Im vorliegenden Betrachtungsspektrum wäre z.B. die irreversible Entwicklungshistorie eines Steuergeräts von rechtlichem Interesse, da manche Gesetzgebung dies für die Produkthaftung vorsieht. Zudem lässt sich durch eine nicht korrumpierbare Dokumentation vertragliche Sicherheit schaffen. Wie in Abbildung 2 dargestellt, bietet die Irreversibilität auch dokumentarische Anreize hinsichtlich Durchgängigkeit und Nachvollziehbarkeit in einer heterogenen IT-Landschaft bei jedem einzelnen Peer. Für die Entwicklungshistorie könnte die Blockchain beispielsweise im jeweiligen PLM-Backbone einen zugehörigen Beitrag zum Digital Twin leisten.

DESKRIPTIVE ANALYSE

Methodik

Für eine flexible, transparente und verknüpfte Produktdokumentation müssen Informationen so aktuell wie möglich kontextspezifisch an der Stelle zur Verfügung stehen, an der sie benötigt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall sollen Auswirkungen auf die Durchgängigkeit der Dokumentation, insbesondere in der EE-Produktentwicklung, mit Hilfe eines qualitativen Rahmens operationalisierbar und bewertbar gemacht werden.

Als Voraussetzung ist zu klären, aus welchen wesentlichen Bestandteilen sich die Durchgängigkeit zusammensetzt und welche Einflüsse im Kontext der Entwicklung komplexer Produkte existieren. Das Ergebnis der zugehörigen Untersuchung basiert auf einer Analyse der einschlägigen Literatur zum PDM und zu PLM-Konzepten mit Schwerpunkt auf der Automobilindustrie und auf Branchen mit ähnlich komplexen Produkten. Zu den verwendeten Literaturdatenbanken zählen Springer und IEEE Xplore. Zugrunde gelegt sind ferner ausschließlich wissenschaftliche Artikel (Journals, Monographien und Sammelbände), deren Veröffentlichung im Jahr 2008 oder später erfolgt ist.

Für die Recherche wurden vorab Suchbegriffe festgelegt und im nachfolgenden Schritt gefundene Titel, Abstracts und Schlüsselwörter auf weitere verwertbare Quellen hin untersucht. Dabei fanden die Methodiken der Backward-/Forward-Induction Anwendung:

- In der Backward-Induction wird die zitierte Literatur innerhalb eines untersuchten Dokuments auf ihre Verwertbarkeit hin untersucht.
- Bei der Forward-Induction analysiert man, in welchen Quellen das gefundene Dokument zitiert wird.

Mit dieser Vorgehensweise sind insgesamt 44 Literaturquellen ermittelt worden. Im nächsten Schritt erfolgte eine Suche nach Textpassagen, die den Datenaustausch oder die Datenbereitstellung zwischen verschiedenen PDM-Systemen und/oder zwischen verschiedenen Parteien über den Produktlebenszyklus hinweg thematisieren. Gearbeitet wurde u.a. mit Schlüsselwörtern wie „Kollaboration“, „Zulieferer“, „Schnittstellen“ oder „Performance“.

Als relevante Ergebniskategorien für die Beeinflussung der Durchgängigkeit sind technische, organisatorische und datenbezogene Gruppen gebildet worden. Auf der Ebene der Einzelkriterien wurde erfasst, wie oft ein einmal identifizierter Aspekt auch in anderen Quellen auffindbar war. Insgesamt sind 66 vorläufige Kriterien identifiziert worden. Zur Ausgestaltung eines finalen Sets an Kriterien wurde mit Hilfe eine Evaluierung die Anzahl reduziert. Grund für die Streichungen war, dass einige der Kriterien Überschneidungen mit anderen hatten bzw. redundant waren. Ein zu hoher Abstraktionsgrad bzw. fehlende Operationalisierbarkeit führten ebenfalls zum Ausschluss. Bei manchen Kriterien war die Wirkungsrichtung auf das Untersuchungsziel einer höheren Durchgängigkeit nicht

klar identifizierbar. Die für das nachfolgende Scoring/Benchmarking verbliebenen Kriterien wurden nach drei Teilfaktoren evaluiert:

- Teilfaktor I bewertet das betrachtete Kriterium danach, in welchem Kontext es identifiziert werden kann und nimmt eine Zuordnung zu Kategorien vor. Beispielsweise werden mit Kategorie A1 Kriterien bewertet, die in einem praxisnahen oder sogar automobilspezifischen Kontext in Bezug auf ein PLM-System aufgeführt sind. Bei A2 liefert die Quelle, in der sich das Kriterium befindet, verwertbare Aussagen in einem nicht automobilspezifischen Kontext. Die Einstufung A3 steht für Kriterien, innerhalb deren Kontext Sollzustände innerhalb eines PLM-Konzepts beschrieben werden. Entsprechend diesen Kategorien wurden Punktwerte von zehn, fünf oder eins zugeteilt.
- Teilfaktor II berücksichtigt die Kriterien anhand der Aktualität der Quelle, in der sie aufgefunden wurden. Die neuesten Quellen aus dem Jahr 2017 wurden mit der höchsten Punktezahl (zehn) bewertet. Danach wurde in absteigender Folge für jedes Jahr ein Punkt weniger vergeben, sodass der älteste berücksichtigte Jahrgang 2008 den geringsten Punktwert (eins) ergab.
- Teilfaktor III gewichtet die Häufigkeit, mit der ein Kriterium in den einzelnen Literaturquellen aufgefunden wurde. Hierzu wurden die jeweiligen Punktwerte aus den Teilfaktoren I und II mit der Häufigkeit der jeweiligen Kriterien in den Literaturquellen multipliziert. Aus den drei Teilfaktoren ergibt sich die in Abbildung 3 dargestellte Formel. Die erste Klammer innerhalb der Formel bezieht sich auf die Punktevergabe aus dem Teilfaktor I „Kontext“ multipliziert mit der Häufigkeit. Der zweite Teil der Formel (in Rot dargestellt) berücksichtigt die Aktualität der jeweiligen Fundstelle des Kriteriums, multipliziert mit dessen Häufigkeit. Der Scoringwert eines Kriteriums ergibt sich dann aus der Addition dieser beiden Bestandteile. Die Kriterien mit den vierzehn höchsten Scoringwerten wurden in das finale Untersuchungssset aufgenommen.

Da auch relevante Kriterien im Umfeld des Digitalen Zwillings ermittelt wurden, erfolgte weiterhin die Aufnahme von sechs dieser Kriterien in das finale Set. Beweggrund war das geringere Auftreten des Digital Twin Konzepts in der untersuchten Literatur.

Tabelle 1 charakterisiert die insgesamt 20 identifizierten Kriterien. Diese wurden im Rahmen einer Nutzwertanalyse über eine Expertenbefragung mit anschließenden Experteninterviews unter Berücksichtigung des Forschungsstands aus der Literatur validiert. Die Kriterien 15-20 stellen die Digital Twin spezifischen Kriterien dar.

Innerhalb der Nutzwertanalyse gibt die Gewichtung wieder, inwieweit die einzelnen Kriterien unabhängig des Technologieeinsatzes einen Beitrag zur Durchgängigkeit der Produktdokumentation leisten.

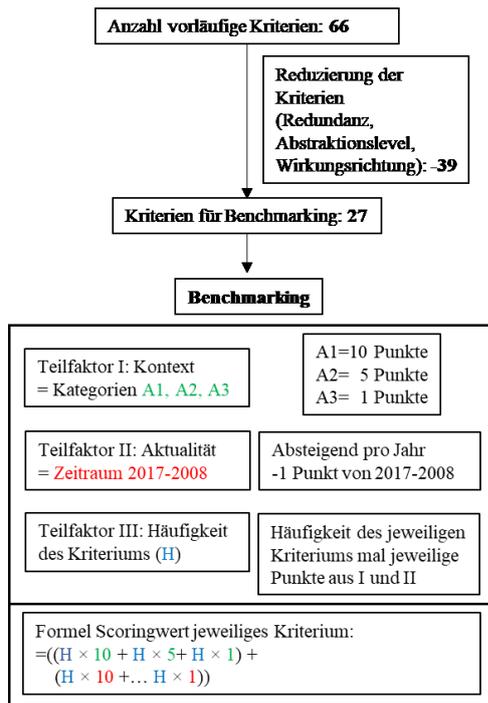


Abbildung 3: Scoringverfahren zur Ermittlung der Top 20-Kriterien

Der Erfüllungsgrad fungiert als Indikator, inwieweit die Kriterien erfüllt werden. Zusammen ergeben sich hieraus die Nutzwerte und damit der Beitrag der jeweiligen Kriterien zur Durchgängigkeit der

Produktdokumentation bei der untersuchten Blockchain-Technologie.

Ziel dieses Ansatzes ist es, einen Kriterien-basierten Vergleich des Erfüllungsgrads zwischen der gegenwärtigen Situation und dem potenziellen Blockchain-Einsatz zu ermöglichen. Im konkreten Untersuchungsbereich haben sich entsprechend unterschiedliche Nutzwerte ergeben.

Eine Expertenbefragung zur Ermittlung der Kriteriengewichtung wurde mittels eines Online-Befragungstools erstellt. Insgesamt nahmen 45 von 144 adressierten Experten aus dem PDM-/PLM-Umfeld an der Umfrage teil. Den Befragten stand zur Bewertung der Durchgängigkeit der Produktdokumentation im Hinblick auf die Kriteriengewichtung eine Skala von 1 (kein Beitrag) bis 5 (hoher Beitrag) zur Verfügung.

Validierung

Es hat sich gezeigt, dass eine eindeutige Rangfolge der qualitativen Kriterien nicht festlegbar ist: Bei der Umrechnung der Ergebnisse ergab sich nahezu eine Gleichverteilung im Hinblick auf die Gewichtung.

Ferner muss die Eignung der Blockchain-Technologie in der EE-Produktdokumentation differenziert betrachtet werden: Bezüglich der Erfüllungsgrade zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Kriterien.

Detaillierte Ergebnisse der Nutzwertanalyse lassen sich innerhalb eines Intended Support Modells nachvollziehen.

Nr.	Kriterium	Kurzbeschreibung
1	Hohe Integrationstiefe mit externen Stakeholdern	Durchgängigkeit mit Hilfe von standardisierten Schnittstellen (z.B. durch einheitliche Datenaustauschformate mit Drittparteien)
2	Hoher Grad an Flexibilität der (PLM-/PDM-)Systeme	Anpassungsmöglichkeiten von PDM/PLM-Systemen (z.B. durch Modularisierung)
3	Redundanzfreiheit bei der Dokumentation	Zentrale Dokumentenhaltung (und ggf. Verknüpfung über Links)
4	Hoher Grad an sequenziellem Datenaustausch	Datenintegrität durch Sperren einer Datei für andere Benutzer im Falle einer Bearbeitung (Check-in- und Check-out-Fähigkeit)
5	Hohe Verfügbarkeit der Dokumente und Modelle	Übergeordnete Datenzugänglichkeit, z.B. durch Verknüpfung zum System- und Simulationsmodell bei nachgelagerten Prozessen
6	Hoher Grad an Interoperabilität von Daten	Regelmäßiger, automatisierter Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Systemen
7	Redundanzfreiheit der Daten innerhalb eines Systems	Wiederverwendbarkeit und optimale "Verblockung" von Daten, z.B. von einer Fahrzeugkomponente
8	Hoher Grad an Standardisierung des Informationsaustauschs	Festgelegte Workflows zwischen unterschiedlichen Parteien, z.B. zwischen Bauteilverantwortlichen und Freigabemanager
9	Transparente Produktänderungen	Sichtbarkeit geplanter oder umgesetzter (Komponenten-)Änderungen für alle Adressaten
10	Einheitlichkeit bei der GUI-Gestaltung	Ähnlicher Aufbau bei Bedienlogik und Struktur je Nutzergruppe
11	Hohe (PLM-/PDM-)Release-Häufigkeit	Schnelle Umsetzung neuer Anforderungen im (PLM-/PDM-)System
12	Hoher Zugriffsumfang für externe Partner	Möglichkeit zur umfangreichen Rechte-/Rollenvergabe für Drittparteien
13	Darstellbarkeit der Produktänderungshistorie	Rückverfolgbarkeit von Zugriffs-, Freigabe- und Änderungsschritten in geeigneter Granularität
14	Rollenspezifische Produktsichten	Plattform-basierte Produktsichten je Nutzergruppe
15	Hohe Anzahl an Digital Twins	Spezifische Digital Twins in Entwicklung, Produktion und After Sales
16	Geringe Anzahl an Dokumentationslücken	Möglichst direkte, verlustfreie Weitergabe von Informationen
17	Niedrige Detaillierungstiefe von Digital Twins	Use Case-spezifische Anzeige der Produktstruktur
18	Kurzer Aktualisierungszyklus von Metadaten und Nutzdaten	Schnelle Sichtbarkeit abgeschlossener Änderungen an HW- und SW-Komponenten im Digital Twin
19	Vollständigkeit der Produktdokumentation	Frühzeitige Dokumentation und Rückverfolgbarkeit im Digital Twin
20	Hohe Synchronisationsgeschwindigkeit	Hohe Bandbreite zur Datenaktualisierung in unterschiedlichen PDM-Systemen

Tabelle 1: Finales Set der Untersuchungskriterien

Intended Support Modell Blockchain Use Case

Nachfolgend wird ein mögliches Business Szenario beschrieben, in dem ein Einsatz der Blockchain in der Automobilentwicklung realistisch ist. Dieses ist in Abbildung 4 dargestellt. Ein Pool an Zulieferern und Kooperationspartnern kann dazu beitragen, spezifische, vom Kunden gewünschte Funktionen effizienter zu realisieren. Gerade Angebote und Ideen kleiner, innovativer Start-ups lassen sich unter Einsatz der Blockchain leichter in den Entwicklungsprozess einbinden, da das standardisierte Framework der Blockchain leicht integriert werden kann, das Aufsetzen neuer Knoten immer gleich vorstättgeht und somit eine effiziente Alternative zur Schnittstellenprogrammierung besteht. Für eine effiziente Zusammenarbeit mit den im Pool enthaltenen Unternehmen sind Vertrauen und Transparenz zwischen den Partnern nötig. Dies lässt sich durch die bereits erläuterten Eigenschaften, Öffentlichkeit, Dezentralität und Irreversibilität, der Blockchain im Unternehmen ermöglichen. Bei einer Zusammenarbeit zwischen zwei Automobilherstellern stellt die Blockchain einen neutralen Kommunikationskanal dar, in dem Informationen ausgetauscht werden können, ohne dass eine der Parteien die Datenhoheit über die Informationen hat. Da mit der Blockchain keine großen Mengen an Nutzdaten, sondern vielmehr Metadaten, ausgetauscht werden, lässt sich als geeignete granulare Ebene die BR/AA identifizieren. Im Rahmen dieser Betrachtungsebene werden im beschriebenen Use Case Informationen über Steuergeräte betrachtet. Dazu gehören Hardware und Software sowie Schnittstellen. Metadaten zu Updates bezüglich der Bestandteile des Steuergeräts lassen sich im Szenario nun von verschiedenen kleineren und größeren Zulieferern über die Blockchain einstellen. Abgebildet werden die hierzu gehörenden Informationen wie Version, Architektur, eine kurze Beschreibung und eine eindeutige Identifikationsnummer. Diese Metadaten sind mit den Nutzdaten entsprechender PDM-Systeme verknüpft. Über die Historie der Blockchain können sich alle Zulieferer z.B. darüber informieren, auf welchem aktuellen Softwarestand sich ein Steuergerät bzw. eine Funktion darauf befinden. Da nicht jede Partei von einer Änderung betroffen ist und von dieser unterrichtet werden soll, ist die Einrichtung von „Channels“ innerhalb der Blockchain sinnvoll. Dies lässt sich z.B. bei einer Konsortial-Blockchain im Falle von Hyperledger anbieten: Wird hierbei ein Softwareartefakt, z.B. eine neue Funktion, von einem Zulieferer A angeboten, durchläuft dieses einen Konsensusprozess, bevor es von den anderen Parteien entweder abgelehnt oder freigegeben wird. An diesem Konsensusprozess sind all die Parteien beteiligt, die im entsprechend zugeordneten Channel z.B. für ein System enthalten sind. Dieser Konsensusprozess lässt sich auf verschiedene Arten ausgestalten. Z.B. kann ein 100%-Zustimmungsmodus angewandt werden, bei dem alle Parteien dem vorgeschlagenen Softwareupdate eines Zulieferers

zustimmen müssen, die Automobilhersteller des Blockchain-Netzwerks aber ein Veto-Recht besitzen. Durch Smart Contracts und dessen hinterlegte Logik können z.B. Folgen der Ablehnung eines eingestellten Artefakts implementiert werden.

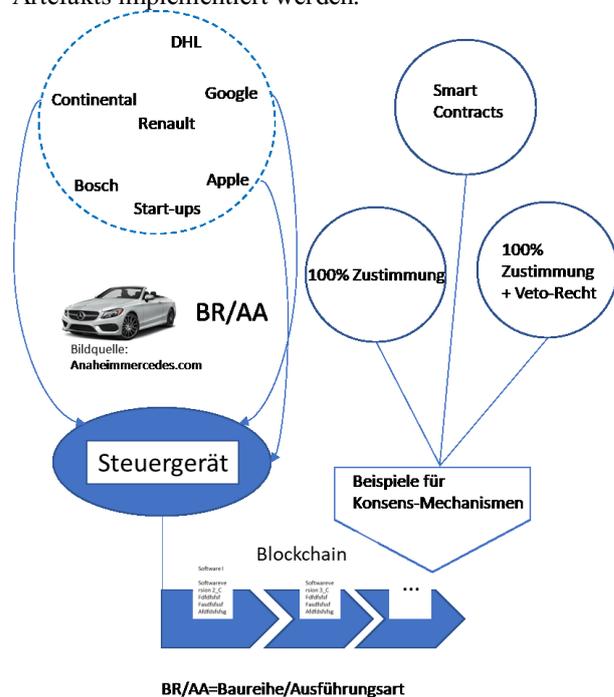


Abbildung 4: Grundbeschreibung Blockchain Use-Case

Die zuvor aufgeführten Untersuchungskriterien lassen sich dem erläuterten Use Case (Abbildung 4) zuordnen. Dies wird nachfolgend exemplarisch mit den fünf wichtigsten untersuchten Kriterien verdeutlicht:

- Bezüglich einer *hohen Integrationstiefe mit externen Stakeholdern* anhand standardisierter Schnittstellen (Kriterium 1) ermöglicht die Blockchain einen vereinfachten Datenaustausch, z.B. von Metadaten einer Steuergerätesoftware, der Teilnehmer des Blockchain-Ecosystems. Technisch lässt sich dies durch ein entsprechendes Datenmodell und Schnittstellen ermöglichen, dem die Teilnehmer zustimmen müssen. Aus den in der Blockchain implementierten Konsensmechanismen resultiert ein gemeinsames Vorgehen.
- Das Kriterium 5 einer *hohen Verfügbarkeit der Dokumente und Modelle* des System Engineerings bei nachgelagerten Prozessen ermöglicht es, bis hin zum After Sales, Rückschlüsse auf Simulationsmodelle (z.B. CAD) aus der Entwicklung zu ziehen. Dies wird durch die Verknüpfung der Blöcke erzielt. Hierdurch lässt sich eine Nachvollziehbarkeit, nicht nur mit externen Partnern, sondern auch intern über alle IT-Systeme hinweg, erreichen (vgl. Abbildung 2).
- Kriterium 7, *Redundanzfreiheit der Daten innerhalb eines Systems*, ist insbesondere dann relevant, wenn nicht nur viele Entwickler und Ingenieure eines Unternehmens entlang des Produktlebenszyklus Informationen wie Stücklisten bereitstellen und

benötigen, sondern zusätzlich externe Unternehmen bei der Entwicklung involviert sind. Innerhalb eines integrierten Ansatzes wie in Abbildung 4 zu sehen, kann die Blockchain dabei unterstützen einen Single Point of Truth zu ermöglichen. So lässt sich z.B. klar identifizieren, wo ein Steuergerät verbaut ist. Damit kann eine bessere Verblockung und Umsetzung der Redundanzfreiheit beispielsweise für eine Stückliste ermöglicht werden. Informationen hierzu lassen sich über ein Meta Data Layer bereitstellen.

- *Transparente Produktänderungen* (Kriterium 9) lassen sich mit der Blockchain sehr gut umsetzen: Über diese werden alle am Netzwerk teilnehmenden Parteien automatisch über für sie relevante Änderungen (z.B. eines Steckers) informiert, die eine Partei über den Konsensmechanismus eingesteuert hat. In der Praxis lassen sich so Dokumentationslücken (Kriterium 16) überbrücken, die beim Übergang zwischen den Lebenszyklusphasen entstehen. Dies ist u.a. deshalb relevant, da Dokumentationslücken auch bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Zulieferern entstehen können, beispielsweise wenn eine Partei eine neue Schnittstelle entwickelt, die kompatibel zur parallel entwickelten Software von einer weiteren Partei sein soll.

Zur Realisierung des zu Beginn erwähnten Dokumentationszwillings kann die Blockchain wiederum über ihre Grundeigenschaften beitragen: Beispielsweise lässt sich ein schnelleres Changemanagement für die Softwareentwicklung auf einem Steuergerät ermöglichen. Phasen- und anwendungsfall-spezifische Digital Twins können anhand des Dokumentationszwillings, welcher die Nachvollziehbarkeit in der internen IT-Landschaft gewährleistet, miteinander verknüpft werden. Die Blockchain sorgt dafür, dass eingestellte Datenänderungen innerhalb des Dokumentationszwillings sofort allen Teilnehmern zur Verfügung stehen.

Modell-Charakteristika und Ergebnisse

Als finales Intended Support Modell zeigt Abbildung 5 die Ergebnisse des Nutzwertvergleichs für die Durchgängigkeit der E/E-Produktdokumentation im Status Quo verglichen mit dem potenziellen Einsatz der Blockchain. Dort sind die zwanzig Kriterien den bereits zuvor aufgeführten drei Kategorien

- technische Aspekte,
 - organisatorische Aspekte, Prozesse und Rollen und
 - Daten-/Dokumentationsaspekte
- zugeordnet worden.

Für den Gesamtnutzwert über alle Kriterien hinweg ergibt sich eine Steigerung um 19,27%. Werden die absoluten Nutzwerte der Kategorien betrachtet, so ist zu konstatieren, dass die Kategorie der „Technischen Aspekte“ mit einem Nutzwertanteil von fast 50% am Gesamtnutzwert generell den wichtigsten Beitrag zur Erreichung einer höheren Durchgängigkeit leistet. Zehn der zwanzig Kriterien sind dieser Kategorie zugeordnet.

Aber auch die Kategorie „Organisatorische Aspekte und Rollen“ (28,82%) und „Daten-/Dokumentationsaspekte“ (23,09%) sind für die Durchgängigkeit in der Produktdokumentation relevant. Für die einzelnen Kategorien „Technische Aspekte“ und „Daten-/Dokumentationsaspekte“ ergeben sich im Vergleich zur gegenwärtigen Situation mit 23,02% und 33,32% deutliche Nutzwertsteigerungen. Bei den Kriterien in der Kategorie „Organisatorische Aspekte, Prozesse und Rollen“ fällt hingegen die Nutzwertsteigerung mit 1,76% deutlich geringer aus.

Durch die Zuordnung zu den Kategorien lassen sich Rückschlüsse darauf ziehen, auf welchen Bereich sich ein Einsatz der Blockchain besonders auswirkt und wo die Blockchain als Lösung eher ungeeignet ist. Für die Kategorien „Technische Aspekte“ sowie „Daten-/Dokumentationsaspekte“ bietet sich somit ein Einsatz der Blockchain an, um Verbesserungen zu erreichen. Für die Kategorie „Organisatorische Aspekte, Prozesse und Rollen“ hingegen wird deutlich, dass die Blockchain hier nur bedingt geeignet ist.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Kriterien nicht nur isoliert innerhalb der verschiedenen Kategorien betrachtet werden sollten. Ohne organisatorische Aspekte miteinzubeziehen, werden beim Aufbau von technischen Lösungen Aspekte wie die Umwelt, z.B. Stakeholder, nicht miteinbezogen. Bei einer technischen Lösung könnte es ansonsten vorkommen, dass beispielsweise nötige Schnittstellen oder Funktionen zur Interaktion mit externen Partnern fehlen bzw. mangelhaft ausgeprägt sind. Falls man Prozesse innerhalb des Unternehmens nicht hinreichend berücksichtigt, kann eine Technologie den Bedarf der Nutzer nicht abdecken. Dies wird tendenziell dazu führen, dass die Betroffenen sich ihrerseits Individuallösungen bauen, die aus Gesamtsicht suboptimal sind. Im schlechtesten Fall wird eine Schatten-IT aufgebaut, die dem Ziel einer erhöhten Durchgängigkeit diametral entgegensteht. Ähnliches gilt für die Daten- und Dokumentationsperspektive: Mangelhaft konzipierte Datenmodelle sorgen bspw. für eine niedrige Interoperabilität über verschiedene Fachbereiche im Produktlebenszyklus. Hierdurch müssen als Folge manuelle und/oder ressourcenaufwändige Ersatzlösungen für den Datenaustausch innerhalb und mit Stakeholdern außerhalb gefunden werden.

Die Nutzwerte der einzelnen Kriterien sind in Abbildung 5 absteigend nach ihren absoluten Beträgen angeordnet. Von besonderer Relevanz erweist sich ihre Interpretation:

- In Bezug auf die Nutzwertveränderungen in der Kategorie „Technische Aspekte“ erreicht das Kriterium 20 „Hohe Synchronisationsgeschwindigkeit“ des Digital Twins einen niedrigeren Nutzwert (ca. -33 %) als in der Ausgangssituation. Dies lässt sich dadurch begründen, dass die Blockchain nur eine limitierte Synchronisationsgeschwindigkeit besitzt („Gossip“-Protokoll). Beim Einsatz der Blockchain ist deshalb die sinnvolle Aggregation und Abbildung von

Nutzdaten in Form von Metadaten wichtig, sodass nicht die Gefahr besteht, dass die Blockchain zum Engpass für das Gesamtkonzept wird. Gegenwärtig

ist die Blockchain nicht auf große Datenmassen ausgelegt.

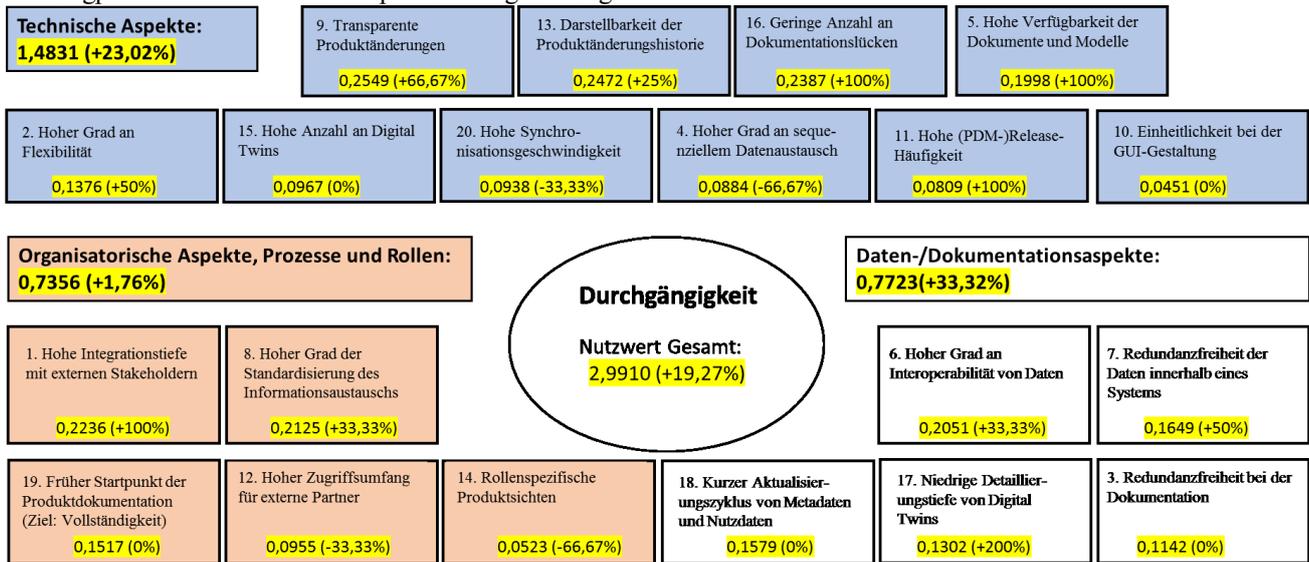


Abbildung 5: Finales Intended Support Modell zur Bewertung der Nutzwertbeiträge zur Durchgängigkeit in der Produktdokumentation (absolute Nutzwerte und prozentuale Veränderungen)

- Der Nutzwert des Kriteriums 4 „Hoher Grad an sequenziellem Datenaustausch“ ist bei der Blockchain um 60% niedriger als im Status Quo. Zwar vermeidet die Blockchain durch ihren Konsensmechanismus bzw. durch den Check-in/Check-out-Gedanken grundsätzlich die Existenz mehrerer Wahrheiten bei den Metadaten. Da die Metadaten sich aber auf Nutzdaten beziehen ist dieses Prinzip besonders wichtig bei der Dateneingabe in den angebundenen Autorensystemen. Für sequenzielle Kontrollmechanismen erbringt die Blockchain nach heutigem Stand aber keinen Mehrwert, sondern weniger Optionen als bestehende Lösungen.
- Für das Kriterium 10 „Einheitlichkeit bei der GUI-Gestaltung“ ergibt sich im Vergleich zum Status Quo kein höherer Nutzwert. Die Blockchain-Technologie in ihrem Kern bietet keine integrierten Benutzeroberflächen bspw. für Entwickler, die mit Nutzdaten über verschiedene Systeme hinweg arbeiten wollen. Sie setzt vielmehr auf den dafür vorgesehenen Autorensystemen auf und kann helfen entsprechende Abstimmungen über verschiedene Fachbereiche zu erleichtern.
- Für Kriterium 15 („Hohe Anzahl an Digital Twins“) hat sich der Nutzwert gegenüber der Ist-Situation nicht verändert. Grundsätzlich ist die Möglichkeit von kontextsensitiven Daten über die Einbindung eines Frameworks und entsprechender Applikationen (insbesondere der Nutzdatensysteme) in Zukunft denkbar. Gegenwärtig fehlen aber noch geeignete Datenmodelle.
- Ein Mehrwert durch die Blockchain wird für die weiteren Kriterien der technischen Aspekte erwartet. Eine Steigerung von 100% erreicht das Kriterium 5

- „Hohe Verfügbarkeit der Dokumente und Modelle“ (siehe hierzu die Diskussion zum obigen Use Case). Gleiches gilt für Kriterium 16 („Geringe Anzahl an Dokumentationslücken“). In beiden Fällen spielt die Integration in die bestehende IT-Systemlandschaft bzw. die Anbindung an bestehende PDM-Systeme eine zentrale Rolle. Beispielsweise lassen sich Fragen bezüglich der Korrektheit einer Steuergeräte-Softwareversion schneller beantworten bzw. individuelle Recherchen reduzieren. Dies trägt auch zur Erhöhung des Nutzwerts „Transparente Produktänderungen“ (Kriterium 9) bei.
- Bei den Kriterien der organisatorischen Aspekte, Prozesse und Rollen fallen folgende Ergebnisse auf: Das Kriterium 14 „Rollenspezifische Produktsichten“ weist einen um ca. 67% kleineren und insgesamt sehr niedrigen Nutzwert aus. Da die Blockchain bestehende Nutzdatensysteme nicht ersetzt, erweist sich diese Bewertung als schlüssig. Im Sinne eines Need-to-Know-Prinzips wären sicherlich auch Rollen innerhalb des Blockchain-Frameworks hilfreich. Hierfür gibt es jedoch noch keine direkt in der Blockchain verankerten Lösungen. Ähnliche Herausforderungen gibt es beim Kriterium 12 „Hoher Zugriffsumfang für externe Partner“ mit einem um ca. 33 % niedrigerem Nutzwert. Eine wirkliche Ausdifferenzierung von Lese-/Schreibrechten wird nur von wenigen Lösungen wie Hyperledger Fabric über Frameworks als Frontendlösungen angeboten. Wie ein Zugriff auf den darunterliegenden Chain-Code und die darin enthaltenen Informationen ausgeschlossen werden kann ist noch nicht geklärt.
- Das Thema „Konsortial-Blockchain“ ist in der Automobilentwicklung aufgrund sensibler

Produktdaten von essenzieller Bedeutung. Das Kriterium 1 „Hohe Integrationstiefe mit externen Stakeholdern“ hat einen um 100% höheren Nutzwert. Von den gegebenen technischen Möglichkeiten lässt sich dieser Sachverhalt mit standardisierten Schnittstellen und passenden Datenmodellen gut durch die Blockchain erfüllen. Bezüglich eines „hohen Grads der Standardisierung des Informationsaustausches“ (Kriterium 8) muss konstatiert werden, dass es formal festgelegte und vereinbarte Standards zu Workflows für die Blockchain-Technologie noch nicht gibt. Dies lässt sich aber mit zunehmendem Reifegrad und weiteren Use Cases bewerkstelligen.

- Bei den Kriterien der Kategorie „Daten-/Dokumentationsaspekte“ ist das Kriterium 17 „Niedrige Detaillierungstiefe von Digital Twins“ hervorzuheben. Der Nutzwert liegt um 200% höher gegenüber dem Ausgangswert. Weitere Erfolgspotenziale liegen darin begründet, zukünftig ein Metadatenmodell für die Blockchain zu schaffen, welches die Use Case-spezifischen Strukturen der Digital Twins entlang des Produktlebenszyklus verknüpfen kann. Dieses könnte evolutionär bei den verschiedenen Digital Twins entlang des Produktlebenszyklus die im jeweiligen Kontext (z.B. im Baureihen- oder Simulationszwilling) zugehörigen Daten adressieren.

FAZIT UND AUSBLICK

Limitationen

Die Problemstellung einer Durchgängigkeit in der E-/E-Produktdokumentation wurde mittels einer qualitativ-methodischen Herangehensweise untersucht und zentrale Eigenschaften für Nachvollziehbarkeit darin herausgearbeitet (Ziel 1). Diese unterliegt allerdings subjektiven Einflüssen. Es wurde deshalb angestrebt, quantitative Verfahren wie Benchmarking und Befragungen einzusetzen um relevante Beurteilungskriterien sowohl für PDM/PLM, als auch für den Digital Twin Einsatz zu ermitteln (Ziel 2). Das Vorgehen beinhaltete die konkrete Sammlung und Analyse von Literatur, eine Umfrage mit PDM-/PLM-Experten sowie Einzelinterviews mit Experten aus dem PDM-/PLM- und dem Blockchain-Bereich. Mit der Absicht einer ganzheitlichen Evaluierung wurde ein darauf aufsetzender Nutzwertanalysevergleich verwendet (Ziel 3). Hinzugezogen wurde zur Ausgestaltung eines konkretisierten Intended Support Modells ein Use Case aus der Praxis (Ziel 4).

Das zentrale Anliegen bestand darin, Aussagen darüber treffen zu können, ob die Blockchain einen sinnvollen Beitrag zur Nachvollziehbarkeit in der Produktdokumentation auf Einzelfahrzeugebene leisten kann. Diese Forschungsarbeit erhebt jedoch nicht den Anspruch, aus nachgewiesenen Ergebnissen heraus absolute Aussagen abzuleiten zu können. Vielmehr soll sie Erkenntnisgewinne über die grundlegende Eignung der Blockchain-Technologie im Sinne eines Einsatzes

dieser innerhalb des Umfelds der Produktdokumentation in der Automobilindustrie ermöglichen.

Abschließende Beurteilung und Ausblick

Es bleibt festzuhalten, dass die Blockchain durch ihre Transparenz und aufgrund der dezentralen Bereitstellung von Informationen großes Potenzial aufweist den Informationsaustausch innerhalb der Automobilentwicklung in Verbindung mit externen Stakeholdern deutlich effizienter zu gestalten. Damit verbunden ist die leichtere Umsetzbarkeit von Interoperabilität dank eines durchgängigen Metadaten-Konzepts, mit dem das Schließen von heute bestehenden Dokumentationslücken zwischen den PDM-Systemen gelöst werden kann. Letzteres wird dadurch erbracht, dass signifikante Produktänderungen an Software oder Hardware und mögliche Probleme bezüglich dieser sofort von den betroffenen Teilnehmern gesehen werden, die über den Meta Data Layer Zugriff auf die relevanten Informationen haben. Werden Fehler oder Inkompatibilitäten z.B. einer Software erkannt, lässt sich durch die Blockchain die verursachende Partei identifizieren und die Ursache für die Produktänderung ermitteln. Dies ist bei einer Zusammenarbeit im Sinne des oben erwähnten Pools mit vielen kleineren und größeren Teilnehmern sehr nutzstiftend. Um dieses Potenzial auszuschöpfen, empfiehlt sich eine weitere Erforschung mit Fokus auf Konsortial-Blockchains.

Aus den Resultaten dieser Arbeit lässt sich ableiten, dass die Blockchain aus Perspektive eines praktischen Einsatzes aktuell keine Komplettlösung für die Gesamtheit der in der Produktdokumentation vorhandenen Herausforderungen bietet: Sie ermöglicht keine rollenspezifischen Benutzeroberflächen, mit denen Nutzer detaillierte Daten einpflegen können. Außerdem gibt es bisher nur rudimentäre Lösungen für ausdifferenzierte Zugriffsmöglichkeiten externer Stakeholder. Jedoch besteht großes Potenzial für die Unterstützung technischer Herausforderungen der Durchgängigkeit in der verteilten Entwicklung.

Die zentrale Herausforderung für Wissenschaft und Praxis wird es sein, den in der Forschung neu diskutierten Ansatz der Konsortial-Blockchain innerhalb praktischer Use Cases und zusätzlich über entsprechende Proof of Concepts zu untersuchen. Gegebene Datenmodelle der Blockchain sollten an die Erfordernisse der PLM-Landschaft angepasst werden.

Ein Informationsaustausch mit anderen Unternehmensbereichen, in dem die Blockchain potenziell eingesetzt werden kann (z.B. dem After Sales Bereich), erweist sich als hilfreich. Auch sollte auf Entwicklungen in anderen Branchen und auf dort entstehende neue Use Cases im Sinne der Konsortial-Blockchain geachtet werden.

Weiterhin ist zu empfehlen, dass aufgrund der Ähnlichkeiten des Metadatenkonzepts auch ein Austausch mit Projekten im Umfeld des Digital Twins erfolgen sollte. Damit können synergetische Potenziale im Auge behalten werden. Die Blockchain stellt nur ein ergänzendes Konzept für die bisherige

Produktdokumentation dar und ersetzt Autorensysteme aufgrund ihrer Limitationen, wie des begrenzten Datendurchsatzes, nicht. Sie befindet sich aktuell jedoch auch noch mitten im Entstehungsprozess, bei dem über die bekannten Anwendungsfelder hinaus (z.B. im Finanzsektor) weitere Einsatzmöglichkeiten explorativ erforscht werden. Bezüglich eines Einsatzes der Blockchain in der Automobilentwicklung muss der zukünftige Fokus der Forschung auf eine Integrierbarkeit der Blockchain in die sich aktuell wandelnde PLM-Landschaft gelegt werden.

LITERATUR

- Bashir, I. 2018. *Mastering blockchain*. Packt Publishing, Birmingham.
- Bitzer M., M. Eigner, K.-G. Faißt, C. Muggeo und T. Eickhoff. 2017. „Framework of the evolution in virtual product modelling and model management towards digitized engineering.“ In *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*, Vol. 6: Design Information and Knowledge. Design Society, Vancouver.
- Blessing, L.T.M. Chakrabarti, A. 2009. *DRM, a Design Research Methodology*. Springer, London.
- Boschert, S. und R. Rosen. 2016. „Digital Twin—The Simulation Aspect“. In *Mechatronic Futures*, P. Hehenberger und D. Bradley (Hrsg.). Springer, Cham, 59-74.
- Dobrian, J. 2016. “Record numbers of software complaints and recalls threaten trust in automotive technology”, J.D. Power SafetyIQ, <http://www.jdpower.com/cars/articles/safety-and-mpg/record-numbers-software-complaints-and-recalls-threaten-trust>, zuletzt abgerufen am 07.08.2018.
- Eigner M., D. Roubanov und R. Zafirov. 2014. *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Springer Vieweg, Berlin.
- Eigner M. und R. Stelzer. 2009. *Product Lifecycle Management - Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management*. Springer, Dordrecht.
- Grieves, M. und J. Vickers. 2017. „Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems.“ In *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems – New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (Hrsg.). Springer, Cham, 85-113.
- Groll, M.W. und D.T. Heber. 2016. “E/E-Product Data Management in Consideration of Model-Based Systems Engineering”, In *Transdisciplinary Engineering: Crossing Boundaries*. IOS Press, Amsterdam, 289-298.
- Halvorson, B. 2016. “Software now to blame for 15 percent of car recalls”, Popular Science. <https://www.popsci.com/software-rising-cause-car-recalls>, zuletzt abgerufen a, 07.08.2018.
- Heber, D.T. und M.W. Groll. 2017. „Towards a digital twin: how the blockchain can foster E/E-traceability in consideration of model-based systems

- engineering”, In *Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17)*. Design Society, Vancouver, 321-330.
- Heber, D.T. und M.W. Groll. 2018. „A Meta-Model to connect Model-based Systems Engineering with Product Data Management by Dint of the Blockchain“. In *Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems*. IEEE, Piscataway, NJ.
- Katzenbach, A. 2015. „Automotive“. In *Concurrent engineering in the 21st century*, J. Stjepandić, V. Nel and J.C. Wim (Eds.). Springer, Cham, 607-638.
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA). 2015. *Jahresbericht 2013/2014*. Flensburg.
- Morabito, V. 2017. *Business Innovation Through Blockchain*. Springer, Cham.
- Nakamoto, S. 2008. „Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system“, bitcoin.org.
- Narayanan A. und J. Clark. 2017. “Bitcoin's academic pedigree”, *Communications of the ACM*. ACM, New York, 36-45.
- Schicker, E. 2017. *Datenbanken und SQL - Eine praxisorientierte Einführung mit Anwendungen in Oracle, SQL Server und MySQL*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Stark, J. 2016. *Product Lifecycle Management (Volume 2) – The Devil is in the Details*. Springer, Cham.
- Trippner D., S. Rude und A. Schreiber. 2015. „Challenges to Digital Product and Process Development Systems at BMW.“ In *Concurrent engineering in the 21st century*, J. Stjepandić, V. Nel and J.C. Wim (Hrsg.). Springer, Cham, 555-569.

KONTAKT

Dominik T. Heber
University of Twente und Daimler AG
Hanns-Klemm-Str. 5, 71034 Böblingen
T +49 176 309 456 39, dominik.heber@daimler.com

Florian Michelbach
Daimler AG
Erich-Herion-Str. 11, 70736 Fellbach
T +49 176 309 805 46, florian.michelbach@daimler.com

Prof. Dr. Frank S. Morelli
HS Pforzheim
Tiefenbronnerstr. 65, 75175 Pforzheim
T +49 7231 28-6697, frank.morelli@hs-pforzheim.de

Prof. Dr. Marco W. Groll
University of Twente und Daimler AG
De Horst 2, 7522 LW Enschede
T +31 53 489 3703, m.w.groll@utwente.nl