

Industrielle Update-Fabriken in der automobilen Kreislaufwirtschaft

Rekonfiguration variantenreicher Produkte

T. Schmidt, N. Demke, F. Mantwill

ZUSAMMENFASSUNG Die Verlängerung der Produktlebensdauer ist ein zentrales Ziel der nachhaltigen Produktentwicklung. Mit dem Konzept der Update-Fabrik besteht ein ganzheitlicher Ansatz zur Realisierung von Produktupdates im industriellen Maßstab als Beitrag einer Kreislaufwirtschaft. In diesem Artikel wird ein Vorgehensmodell zur Rekonfiguration von variantenreichen Produkten in der Nutzungsphase beschrieben. Am Beispiel der Automobilindustrie wird ein erweitertes Dokumentationsmodell für die durchgängige Nachverfolgbarkeit aufgezeigt.

STICHWÖRTER

Automobilindustrie, Nachhaltigkeit,
PLM (Product Lifecycle Management)

Reconfiguration of variant-rich products – Industrial update factories in the automotive circular economy

ABSTRACT Extending the product life cycle is a fundamental objective of sustainable product development. The update factory is a holistic approach for implementing product updates on an industrial scale as a contribution to a circular economy. This article describes a process model for reconfiguring variant-rich products in the use phase. An extended documentation model for the continuous traceability of product updates is presented, using the automotive industry as an example.

1 Einleitung

Eines der Ziele, welches das Konzept der Kreislaufwirtschaft verfolgt, ist die Nutzungsphase eines Produktes und damit den Produktlebenszyklus (PLZ) insgesamt zu verlängern [1]. Im Gegensatz dazu steht die konventionelle lineare Wirtschaft, in der die Produktnutzung mit dem End of Life (EoL) endet.

Durch ein dynamisches Marktumfeld besteht die Notwendigkeit, ein Produkt an die sich ändernden Anforderungen anzupassen. Neben ordnungspolitischen Anforderungen führen immer kürzere Entwicklungszyklen bei gleichbleibender Qualität zu verschärften Wettbewerbsbedingungen. Um diesen unsicheren und komplexen Abhängigkeiten zu begegnen, werden beispielsweise Flexibilisierungsstrategien in Form skalierbarer und anpassbarer Produkt-Architekturen für individuelle Kundenlösungen (Mass Customization) verfolgt [2–4].

Die Automobilindustrie ist ein häufig zitiertes Beispiel für die Abwägung von Flexibilität an Kundenanforderungen und Standardisierung der Produktion durch kundenindividuelle Massenfertigung [5]. Mithilfe modularer Produkte und Fertigungslinien werden Standardisierungen sowie ein regelbasiertes Konfigurationsmanagement genutzt, um eine wirtschaftliche Umsetzung zu ermöglichen (Mass Production) [3]. Mit steigendem Individualisierungsgrad infolge geänderter Kundenanforderungen, Technologien oder Wettbewerbssituationen, müssen Änderungsbedarfe zunehmend konstruktiv berücksichtigt werden. Aufgrund des Forschungscharakters des Konzeptes der Update-Fabrik bestehen Bedarfe nach methodischen Ansätzen.

Für die Entwicklung von Produktupdates im industriellen Maßstab wird in diesem Beitrag die „Rekonfiguration“ als Kreislaufstrategie vorgestellt und im Rahmen eines Vorgehensmodells auf die Anforderungen an die Produktdokumentation variantenreicher Produkte erweitert. So sollen Handlungsfelder für zukünftige Assistenzsysteme und die Entwicklung von Produktupdates in industriellen Update-Fabriken aufgezeigt werden. Dabei umfassen die Voraussetzungen einer flexiblen Rekonfiguration die Modularisierung, Skalierbarkeit und funktionale Austauschbarkeit von Modulen [3]. Als Beispiel wird die variantenreiche deutsche Automobilindustrie unter Verwendung modularer Bauweisen herangezogen und das Konzept der Update-Fabrik als Möglichkeit einer Umsetzung von Produktupdates im industriellen Maßstab betrachtet. Dadurch kann ein Beitrag für eine kreislauffähige Automobilindustrie geleistet werden.

Der Beitrag gliedert sich in fünf Kapitel, wobei im folgenden Kapitel der Stand der Technik zu den Themen Kreislaufstrategien, Modularisierung und der Update-Fabrik vorgestellt wird. Anschließend führt Kapitel 3 das Konzept der Rekonfiguration ein und Kapitel 4 stellt die Ergebnisse vor. Zuletzt werden die Ergebnisse zusammengefasst und vor dem Hintergrund nachhaltiger Produktentwicklung in der Automobilindustrie diskutiert.

2 Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt den aktuellen Stand zu den Themen der Kreislaufwirtschaft und der modularen Produktentwicklung sowie der Update-Fabrik und dem Ansatz der Rekonfiguration.

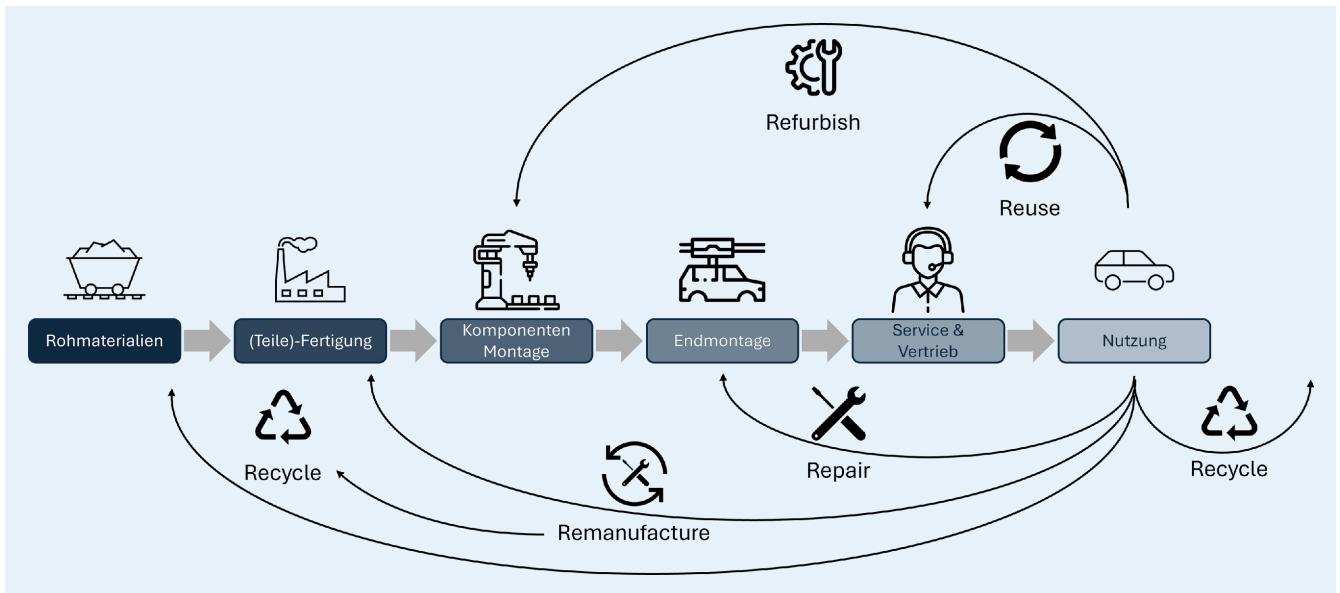


Bild 1. Konzept der Update-Fabrik mit den Basis-Kreislaufstrategien. *Grafik: HSU, nach [6]*

Damit wird die Grundlage für ein Verständnis von rekonfigurierbaren Systemen und die Übertragung des Konfigurationsproblems auf die Entwicklung von Produktupdates gelegt.

2.1 Strategien in der Kreislaufwirtschaft

Die Transformation der linearen Wirtschaft in eine Kreislaufwirtschaft wird anhand von Kreislaufstrategien beschrieben und umgesetzt. Basisstrategien umfassen die Wiederverwendung (Reuse), also die „wiederholte Verwendung eines Produktes mit demselben Zweck“, die Reparatur (Repair), welche die „Beseitigung eines Fehlerzustandes durch Instandsetzung“ meint, sowie die Aufarbeitung (Refurbish), wobei der Begriff Reparatur „um eine optische und/oder funktionale Aufarbeitung“ erweitert wird [6]. Zudem zählen zu den Basisstrategien das Remanufacturing, bei dem einem Produkt eine neue Teilidentität auf dem Niveau eines Neuprodukts zugewiesen wird, sowie das Recycling, das eine Materialverwertung im Sinne einer „Rückgewinnung der eingesetzten Materialien“ beschreibt [6]. Zu den Basisstrategien werden je nach zugrunde liegender Quelle unterschiedlich umfangreiche Erweiterungen gezählt. Dazu zählen: Rethink, Reduce, Repurpose, Recover, Share, Upgrade, Update [7]. Für die Weiterverwertung von konfigurierbaren Produkten wird in keiner der untersuchten Quellen Rekonfiguration als Kreislaufstrategie genannt. **Bild 1** stellt fünf der Kreislaufstrategien symbolisch dar.

Die Kreislaufstrategien werden im PLZ in mehreren Themenbereichen behandelt. In der nachhaltigen Produktlebenszyklusplanung spielt die Produktentwicklung sowie die Produktion eine essenzielle Rolle [8]. Beide Bereiche entscheiden im Zusammenwirken bereits in der frühen Phase über die Nutzbarkeit und Recyclingfähigkeit von Produkten. Diese werden durch Entscheidungen zur Produktarchitektur festgelegt. Der Einfluss und die Implikationen der Kreislaufstrategien auf die Produktentwicklung ist Teil des Circular Product Designs und verfolgt die Ziele Kreisläufe zu entwerfen, zu verlangsamen oder am Beispiel der Natur zu inspirieren [9]. Ansätze, welche die gesamte Nutzungsphase eines Produktes betrachten, mit dem Ziele diesen zu verlängern, werden beispielsweise von Martinez und Xue vorgestellt [10].

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft überschneidet sich mit den Konzepten aus dem Eco-Design sowie den Prinzipien der Mass Customization. Gemeinsamkeiten liegen in der effizienten Konfiguration und im flexiblen Fertigungsprozess, welche die Einzelkosten geringhalten und variantenreich konstruierte Produkte vorsieht [11]. Eine Übersichtsarbeit über Eigenschaften nachhaltiger und kundenindividueller Massenproduktion findet sich in Osorio *et al.* [11] und Piller und Tseng [4]. Auch beschreiben Mesa *et al.* [12] eine Literaturrecherche zu Open Architecture Products (OAP) und deren Vorteile im Kontext der Kreislaufwirtschaft. Für die Entwicklung von Methoden zur kreislaufähigen Produktentwicklung liegt in der untersuchten Literatur der Fokus auf einzelnen Produkten, wobei es notwendig ist, Produktfamilien modularer Plattformen zu betrachten [12].

2.2 Modulare Produktentwicklung

Mit dem modularen Design wird auf die Wiederverwendung von Gleichteilen und die Modularisierung von Produkten gesetzt. Somit werden wesentlichen Voraussetzungen für die Kreislaufstrategien geschaffen [13, 14]. Die Modularisierung setzt dabei auf ein Baukastenprinzip mit definierten und standardisierten Schnittstellen, welches auf einer mit anderen Baureihen geteilten Plattform aufbaut und durch den Hut, austauschbare Module und wiederverwendete Gleichteile entwickelt wird [4]. Diese Produktarchitekturgestaltung, untergliedert in Funktionsstruktur und Produktstruktur, ist umfangreich in Schuh *et al.* [15] beschrieben. Um Produktfamilien-Ansätze zu berücksichtigen, wird, neben der gemeinsamen Verwendung von Gleichteilen, ein Fokus auf die geteilte Produktplattform gesetzt, durch deren Einsatz vielfältige Derivate und abgeleitete Varianten gebildet werden können [16].

Ein Open-Architecture-Product wird aus Komponenten entwickelt, durch deren Austausch Eigenschaften des Produktes geändert werden können. Die anpassbare Entwicklung ist Gegenstand des Adaptable Designs mit dem Ziel das Produkt oder die Produktion anpassbar zu gestalten, wobei Anpassbarkeit auch als Erweiterung des Nutzens verstanden wird [17].

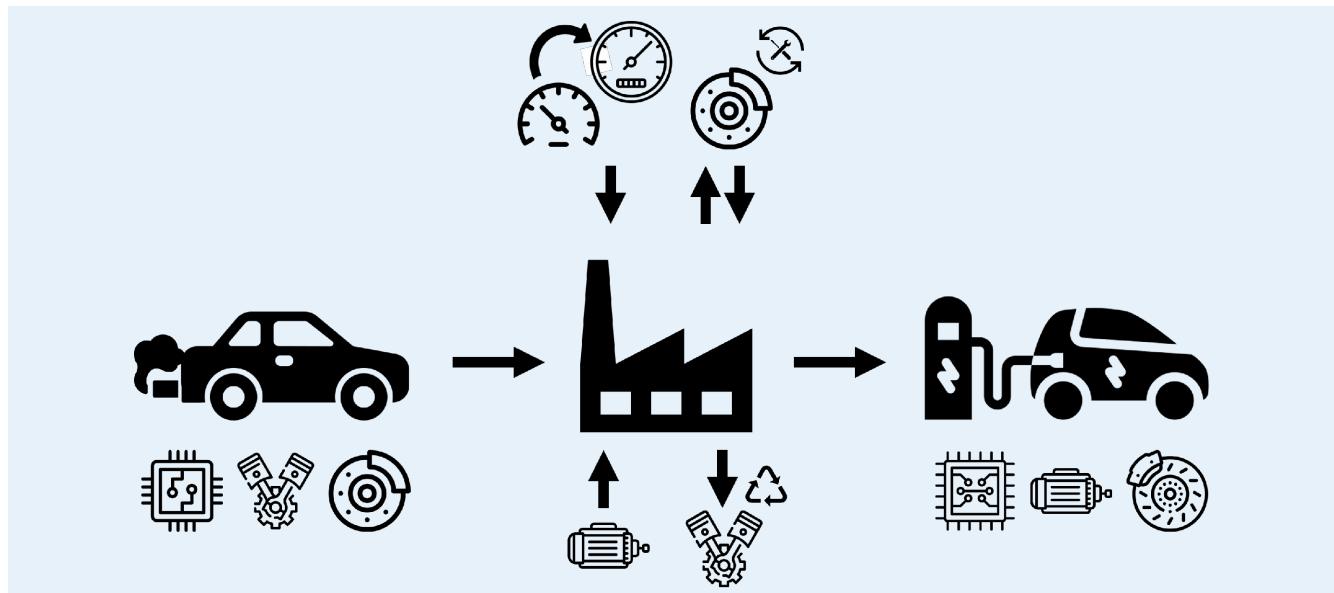


Bild 2. Grundprinzip der Update-Fabrik am Beispiel der Aufwertung eines PKW. *Grafik: HSU, nach [6]*

Als Assistenz im Konfigurationsprozess und zum Finden einer gültigen Kombination von Merkmalen, bei gleichzeitiger Einhaltung aller Abhängigkeiten, kommen bei variantenreichen Massenprodukten spezifische Dokumentationsmodelle und Konfigurationsmodelle mit wissensbasierter Datenverarbeitung zum Einsatz [18]. Zur Verifikation von Konfigurationen und bei der Rekonfiguration bestehender Produkte kommen Ansätze aus der Aus sagenlogik zur Prüfung der Erfüllbarkeit eines Entscheidungsproblems (SAT) zum Einsatz [19, 20].

2.3 Konzept der Update-Fabrik

Die Update-Fabrik stellt als Konzept zur Verlängerung der Nutzungszeit einen wesentlichen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft dar. In Anlehnung an Software-Updates sollen Produkte dabei im industriellen Maßstab Aufwertungen oder Veränderungen erhalten und die Nutzungsphase beim Kunden somit verlängern. Die Update-Fabrik ist eng mit den Prinzipien der Produktgenerationsentwicklung, der Modularisierung sowie des Condition Monitorings verbunden [6]. Zur Abgrenzung bestehen flexible und dezentrale Fertigungssysteme für die Herstellung variantenreicher Produkte in Smart Factories [21] sowie die Ansätze der digitalen Fabrik [22]. **Bild 2** stellt das Prinzip der Update-Fabrik schematisch dar.

Eine der formulierten Thesen zur Vielschichtigkeit der verbundenen Herausforderungen ist die erfolgreiche Entwicklung von Geschäftsmodellen im Sinne eines wirtschaftlichen Systems [6]. Diese muss zusammen mit dem Konzept erfolgen und im Rekonfigurationsprozess berücksichtigt werden, da mit industriellen Produktupdates neue Märkte erschlossen und bestehende Märkte mit neuen Ansätzen adressiert werden.

2.4 Bestehende Ansätze zur Rekonfiguration von smarten Produkten

Rekonfigurierbarkeit beschreibt die Möglichkeit der nachträglichen Anpassung einer Produktionsressource an geänderte Bedingungen durch Austausch, Hinzufügen oder Entfernen von

Komponenten und Baugruppen [2, 23, 24]. In diesem Sinne wird bei der Rekonfiguration auch von einer Umstrukturierung anstelle einer Neustrukturierung gesprochen [25]. Laut Abramovici *et al.* beschreibt Rekonfigurierbarkeit die Modifikation einer bereits existierenden Produktinstanz zur Erfüllung neuer Anforderungen [26, 27]. Gründe für eine Rekonfiguration können beispielsweise der Austausch von Komponenten oder neue Funktionalitäten durch Änderung oder Erweiterung sein [28]. Rekonfiguration wird bei der durchgängigen Anpassung von Produktionszielen an variable Nachfrage, sich ändernde Anforderungen sowie häufiger Einführung neuer Modellvarianten, Materialien und Fertigungsverfahren benötigt [3].

In der merkmalsbasierten Modellierung und Dokumentation von Steuergerätereleases in der Software-Entwicklung kann die Rekonfiguration auf den Austausch von Teilreleases in historischen Konfigurationen erweitert werden [29]. Nach Abramovici *et al.* bezieht sich eine Rekonfiguration auf die Erzeugung einer verbundenen und interdisziplinären durchgängigen Begleitung des gesamten PLZ, etwa durch den digitalen Zwilling [30, 31]. Der digitale Zwilling ist die lebenszyklusübergreifende Dokumentation eines holistischen System-Lifecycle-Approach [32]. Rekonfiguration bezieht sich demnach auf Smart Products (SPs), die Informationen zur Nutzung, zur Komponente und zur Architektur umfassen [30]. Product-Lifecycle-Management (PLM) ist der bestehende Ansatz zu Speicherung, Management und Nutzung von Produktinformationen entlang des PLZ [30]. Der Einfluss von Rekonfiguration auf die Entwicklung von cyber-physicalen Produktionssystemen ist beschrieben in Müller *et al.* [33, 34] und Stehle und Heisel [35] sowie deren Absicherung in Zeller und Weyrich [36] beziehungsweise auf einen Internet-of-Things (IoT)-getriebenen Ansatz aus dem System-of-Systems-Lifecycle-Ansatz in Forte *et al.* [37].

Die Produktentwicklung umfasst neben der frühen Phase ebenso die Nutzungsphase des Produktes. Daraus entsteht die Notwendigkeit einer domänenübergreifenden Rekonfigurierbarkeit von smarten Produkten [26]. Eigenschaften von smarten Produkten umfassen neben der Konnektivität auch einen höheren Grad der Personalisierbarkeit und Autonomie sowie autonome

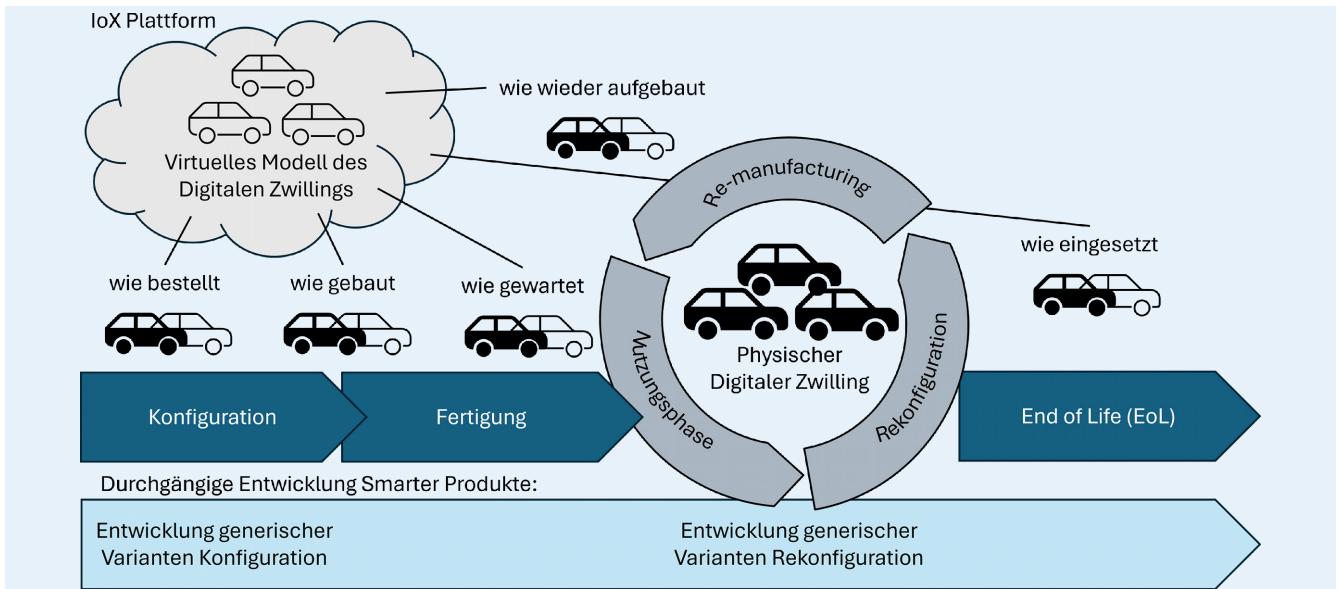


Bild 3. Rekonfiguration von smarten Produkten im Kontext des digitalen Zwillings. *Grafik: HSU, nach [26]*

Entscheidungen. Die Konfiguration eines smarten Produktes benötigt [26]:

1. eine durchgängige Entwicklung kompatibler Produktmodellversionen
2. ein individuelles Management von Produktinstanzen über alle Engineering Domänen
3. eine Synchronisation initialer virtueller Produktkonfigurationen
4. eine durchgängige Entwicklung und Update-Fähigkeit des gesamten Konfigurationswissens (beispielsweise Regeln) der beteiligten Akteure

Smarte Produkte sind als cyber-physische Systeme zu verstehen, die intelligent und vernetzt um smarte Services ergänzt werden und einzeln oder im Verbund als Product-Service Systems (PSS) betrachtet werden können [38, 39].

Anders als beim konventionellen Retrofit, bei dem bestehende Produkte digitalisiert und „smart“ gemacht werden, oder der Parametrierung, bei welcher Werte der Steuerung angepasst werden, geht es bei der Rekonfiguration um den Austausch von Komponenten ausgehend von einem Ökosystem aus Plattform und Modulen [40]. Nach Abramovici [38] sind Ansätze für die Personalisierung und Rekonfiguration smarter Produkte inklusive Methoden, IT-Werkzeuge und Informationsmodelle im Kontext der Planungsansätze eine Priorität. **Bild 3** zeigt die Rekonfiguration als Bestandteil eines smarten Produkt Lifecycles, eingebettet in die Entwicklung smarter Produkte mit einer geteilten IoX-Plattform eines digitalen Zwillings nach Abramovici *et al.* [26].

Konfiguration und Rekonfiguration technischer Systeme findet mittels einer constraint-logischen Modellierung statt [28, 41]. Bei der Rekonfiguration komplexer industrieller Produkte ist stets die Erfüllbarkeit der zugrunde liegenden technischen Regeln und zeitlichen Gültigkeiten zu gewährleisten. Rekonfiguration kommt im industriellen Umfeld in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz. Bereits seit den 90er-Jahren wird der Begriff der Rekonfiguration in der theoretischen Informatik für die rechenintensive Bestimmung von Netzwerkmodellen verwendet [42].

In der komponentenbasierten Wartung von Softwaresystemen zur Laufzeit kommt Rekonfiguration zur kontinuierlichen Errei-

chung von veränderten Anforderungen und erweiterter Funktionalitäten bei zeitgleich minimalem Ausfall zum Einsatz [43, 44]. In der Produktionsplanung kommen rekonfigurierbare Produktionsysteme zum Einsatz zur Planung skalierbarer Kapazitäten und anpassbarer Funktionalitäten in der PPS [45] sowie in Fertigungssystemen [46, 31], in Produktionsnetzwerken [47, 48] oder in der Materialflusssimulation [49]. Motiviert durch die Industrie 4.0, findet dynamische Rekonfiguration bei der Planung von verteilten intelligenten Produktionsanlagen statt [50].

In der Automobilindustrie beziehen sich die Aktualisierungsmöglichkeiten meistens auf Software-Updates sowie auf Tuning-Konzepte, die in Werkstätten oder Manufakturen und nicht in industriiellem Maßstab durchgeführt werden [6]. Jedoch kommen in der automobilen Produktion bereits flexibel rekonfigurierbare und skalierbare Fertigungsanlagen zum Einsatz [51, 52]. Colledani *et al.* unterscheiden dabei drei Anwendungsfälle: Ramp-Up-Phase neuer Modelle und Ramp-Down alter Modelle, die Bauteilproduktion während der Reifephase zur komplementären Deckung der Produktion durch OEMs und die Lieferung von Ersatzteilen für den Aftermarket [3]. An dieser Stelle besteht Handlungsbedarf, Produktaktualisierungen für variantenreiche Produkte im Sinne einer Rekonfiguration im industriellen Maßstab anbieten zu können. Auch bestehende, nicht variantenreiche Produkte können als Konfigurationsproblem behandelt werden.

Herausforderungen bestehen grundsätzlich in der Einbeziehung geänderter oder neuer Anforderungen aus dem Markt, der Technologie und dem Wettbewerb mit Auswirkungen auf das bestehende Produkt. In Abhängigkeit der Individualisierung, können bei der Rekonfiguration Produktionsansätze wie Configure-to-Order (beispielsweise Konfigurator und Bestellung eines neuen Produkts), Reconfigure-to-Order (beispielsweise Freischaltung von Features in der Nutzungsphase) und Engineering-to-Order (kundenindividuelle Entwicklung von Produkten) unterschieden werden, um die wirtschaftliche Entwicklung von Produktupdates zu betrachten. Entsprechend sollen diese Ansätze im nächsten Kapitel als konzeptioneller Rahmen für die Entwicklung von Produktupdates im industriellen Maßstab herangezogen werden.

Tabelle 1. Fallanalyse für Produktupdates ausgehend von Produktionsansätzen in industriellen Update-Fabriken.

Fall	Art	Beschreibung	Beispiele	Implikation auf Update-Fabrik
1	Config-to-Order	Neuentwicklung mit initialen Konfigurationsmöglichkeiten	Konfigurator eines Herstellers	F&E und kunden-individuelle Serienfertigung beim Hersteller ohne Update-Fabrik.
2.1	Reconfig-to-Order	Eingeschränkte Entwicklung im Rahmen von vorgehaltenen Konfigurationsmöglichkeiten in der Nutzungsphase	Freischalten eines abgesicherten Produkt-features in der Nutzungsphase	F&E beim Hersteller oder Systemlieferanten . Umbauten können in Vertragswerkstätten oder als Teilumfang in Update-Fabriken erfolgen.
2.2	Reconfig-to-Order mit Übernahme baureihen-übergreifender Gleichteile	Eingeschränkte Entwicklung im Rahmen übernommener Konfigurationen des eigenen Produktportfolios als gezieltes Update	Interner Ansatz erweitert um Kompatibilitäten als Übergangsbereich, wenn Konstruktionen nicht 1:1 passen	F&E von Produktupdates mit Absicherung beim Hersteller oder bei externen Ingenieur-dienstleistern. Individualisierung über Werkstätten mit Fertigungsanteil oder in Kooperation möglich, Skalierbarkeit über Update-Fabrik.
3.1	Reconfig-to-Order mit Engineering-to-Order-Anteilen	Erweiterungsentwicklung auf Grundlage neuer Module oder individueller Lösungen an vereinheitlichten Schnittstellen	Kleinserien-Umbauten durch Anpassung beim Hersteller oder durch Tuninganbieter	F&E und Umbauten beim Hersteller in Kleinserie oder Anbieter mit internen oder externen Ingenieur-dienstleister . Möglichkeit der Spezialisierung auf wiederholbare Umbauten in Update-Fabriken, um Skaleneffekte zu heben.
3.2	Engineering-to-Order	Anpassungs- und Neuentwicklung anhand kundenindividueller Anforderungen	Sonderumbauten beispielsweise im VIP-Bereich oder bei behindertengerechten Fahrzeugen	Customizing-Bereich bei Herstellern und Ingenieur-dienstleistern. Erweiterung auf Individualisierung durch auf Einzelfertigung spezialisierte Werkstätten.

Standardisierung → Flexibilisierungsgrad → Individualisierung

3 Rekonfiguration variantenreicher Produkte in industriellen Update-Fabriken

Mit nachfolgend beschriebenem Konzept zur Rekonfiguration, bestehend aus einer Fallunterscheidung für Produktupdates, einem Vorgehensmodell und einem erweiterten Produktdokumentationsmodell für den Rekonfigurationsprozess, sollen Entwicklungsperspektiven für die wirtschaftliche Entwicklung marktfähiger Produktupdates in industriellen Update-Fabriken in der Automobilindustrie unterstützt werden. Über die Betrachtung von bestehenden Produkten als Konfigurationsproblem sollen das Zusammenspiel von Produktionsansätzen über den gesamten PLZ konzeptionell beschrieben und erforderliche Rahmenbedingungen aufgezeigt werden.

Die Fallanalyse für Produktupdates in **Tabelle 1** umfasst eine erste Einordnung und Abgrenzung der ausgewählten Produktionsansätze sowie deren Beschreibung, Beispiele und eine Verortung, in welchem Rahmen F-&-E-Umfänge und deren Umsetzung in Update-Fabriken realisiert werden könnten. Die Fälle sind aufsteigend nach Flexibilisierungsbedarf aufgezählt und beschreiben die Auflösung des Zielkonflikts zwischen einem hohen Individualisierungsgrad von Serienprodukten im industriellen Maßstab durch die Update-Fabrik. Dabei wird der zunehmende Flexibili-

sierungsanteil durch zunehmende Engineering-to-Order Anteile ermöglicht.

Nachdem auf die Unterschiede von Produktupdates in der Fallbetrachtung eingegangen wurde, soll zunächst das Vorgehensmodell zur Rekonfiguration in zwei Schritten behandelt werden. Dabei wird in einem ersten Schritt auf die veränderten Anforderungen für das bestehende Produkt durch geänderte Markt- und Wettbewerbssituationen sowie neue Technologien eingegangen. Dabei wird aus Komplexitätsgründen das bestehende Produkt als Konfigurationsproblem verstanden, um auf bestehende Erkenntnisse zur Abbildung und Analyse variantenreicher Produkte [53, 54] zurückzugreifen.

In einem nächsten Schritt gilt es, das bestehende Produkt für die Entwicklung von Produktupdates zu erfassen. Dazu sind nicht nur die Produktdokumentation, sondern auch Informationen über den aktuellen Zustand des Produkts sowie Daten und Modelle zu Produktmängeln sowie Kundenwünsche erforderlich, um die Auswirkungen eines Produktupdates auch in Hinblick auf die Lebensdauer bestehender Komponenten und die Attraktivität für den Kunden betrachten zu können. Dabei sind Konzepte wie der digitale Zwilling und der digitale Produktpass (DPP) hilfreich, um die erforderliche Informationsbeschaffung zu automatisieren und eine wirtschaftliche Umsetzung von Produktupdates zu ermöglichen.

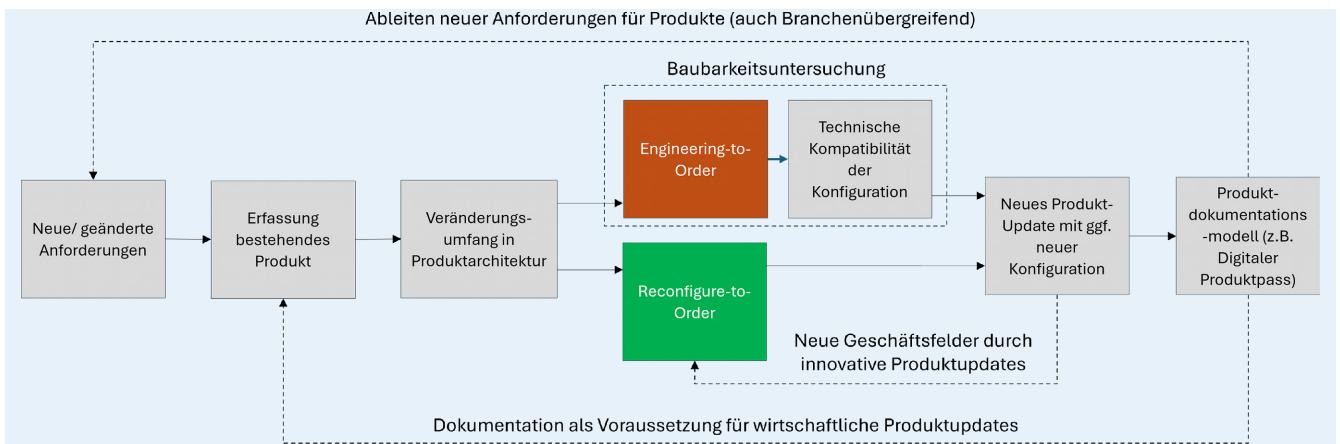


Bild 4. Prozess für die Rekonfiguration im Rahmen der Entwicklung neuer Produktupdates in industriellen Update-Fabriken. *Grafik: HSU*

Aufbauend auf den verfügbaren Informationen über Produkt und Anforderungen, werden Bewertungen über die zu ändernden Produktbereiche und die Auswirkungen auf die Funktionalität vorgenommen. Entsprechend des Änderungsumfangs in Abhängigkeit vorgehaltener Konfigurationen, der Umsetzung von Modularisierungen und der Standardisierung von Schnittstellen (im weiteren Sinne der Interoperabilität) werden im Engineering-to-Order-Prozess bestehende Fähigkeiten erweitert oder neue technische Fähigkeiten hinzugefügt. Da Fähigkeiten aufeinander aufbauen, beispielsweise dass Sensoren für mehrere unterschiedliche Systeme verwendet werden, müssen entsprechende Systemkompetenzen vorhanden sein, um Funktionalität entwickeln und absichern zu können. An dieser Stelle wird der Hinweis gegeben, dass nicht homologationsrelevante Fragestellungen im Mittelpunkt dieses Beitrags stehen, sondern die konzeptionelle Betrachtung von Rekonfiguration in industriellen Update-Fabriken. Entsprechend müssen im Rahmen von Baubarkeitsuntersuchungen technische Kompatibilitäten von möglichen Konfigurationen sowie funktionale und geometrische Zusammenhänge überprüft werden. Dies ist vor allem im Zusammenhang mit anderen Systemen relevant.

Als Ergebnis steht das Produktupdate mit einer möglichen neuen Konfiguration, die für die Entwicklung neuer Geschäftsfelder, etwa branchenspezifische Produktupdates, herangezogen und in den Angebotsprozess des Anbieters von Produktupdates integriert werden können. Parallel dazu wird die Produktdokumentation als Ausgangspunkt für nachfolgende Produktupdates auf den aktuellen Stand gebracht. So können aus der Erweiterung technischer Fähigkeiten über Produktupdates auch weiterführende Analysen zur Bildung von Verhaltensmodellen durchgeführt werden, um daraus mögliche neue Anforderungen abzuleiten.

Bild 4 fasst das Vorgehen zusammen.

Wie bereits beim Vorgehensmodell beschrieben, wird aus Komplexitätsgründen auf bestehende Konzepte zu Abbildung und Analyse variantenreicher Produkt Bezug genommen. Etablierte Produktdokumentationsmodelle werden bereits im Entwicklungsprozess bei Neu-, Anpassungs- und Änderungskonstruktionen genutzt, um die mögliche Vielfalt beispielsweise durch logikbasierte Wissensverarbeitung in Form regelbasierter Komplexstückliste bei offenen Variantenkonfigurationen unterstützen zu können. Für die Entwicklung von Produktupdates müssen Veränderungen in der Vergangenheit reproduzierbar sein, damit mögliche Widersprüche bereits aus den damalig gültigen Anforderungen zu

ermitteln sind. Auch müssen neben den Anforderungen abgeleitete Funktionen für die Absicherung von Systemen dokumentiert werden, um die Eigenschaftabsicherung zu unterstützen und als Informationen für Prüforganisationen oder für nachfolgende Produktupdates zu nutzen.

Ausgehend von den Anforderungen und Funktionen werden auf der Produktebene die konfigurierbaren Eigenschaften vor Kunde sowie die Regeln, beispielsweise technische Zwänge, Lokalisierungen oder Vertrieb, beschrieben. Die technische Ebene verbindet über technische und zeitliche Gültigkeiten die Produktebene mit den offenen Variantenkonfigurationen der geometrischen Ebene mit den Bauteilen. Diese Ebene fasst das Produkt aus einer physischen Gesamtfahrzeugsicht zusammen. Ergänzend zur geometrischen Ebene müssen auch Elektrik- und Elektronik- sowie Softwareumfänge dokumentiert werden. Die Übersetzung und das Zusammenspiel der Dokumentationsebenen bildet einen wesentlichen Kern bei der Entwicklung von Produktupdates. An dieser Stelle besteht Handlungsbedarf, Produktaktualisierungen für variantenreiche Produkte im Sinne einer Rekonfiguration in industriellen Maßstab anbieten zu können. So ist das Management von Produktdaten nicht die Kernaufgabe eines Entwickelnden, sodass die wirtschaftliche Umsetzung von Produktupdates von der Informationsverarbeitung im Unternehmen und zwischen Unternehmen abhängig ist. Hilfreich wäre eine Kopplung der Produktdokumentation mit entsprechenden Zusammenhangswissen an den DPP, sodass Produktinformationen nicht mehr an Unternehmen gebunden sind. Entsprechend soll zusammenfassend in **Tabelle 2** ein erweitertes Produktdokumentationsmodell für Produktupdates vorgeschlagen werden.

4 Ergebnis und Diskussion

Das vorgestellte Konzept beschreibt die Umsetzung von einer Anforderungsänderung bis zur Dokumentation in einem Rekonfigurationsprozess und zeigt Handlungsfelder für die Automobilindustrie als Beitrag zur Kreislaufwirtschaft auf. Der PLZ ist dabei charakterisiert durch alternierende Nutzungsphasen beim Kunden und Updatezyklen in der Update-Fabrik in unterschiedlich flexiblen Produktionsansätzen. In der Nutzungsphase geänderte Kundenbedürfnisse der Anforderungsebene sowie revidierte technische Bauteile am Produkt auf den darunterliegenden Ebenen werden im Dokumentationsmodell festgehalten. Dabei ist zu jedem Rekonfigurationszeitpunkt zwischen Nutzung und Update ein

Tabelle 2. Erweitertes Produktdokumentationsmodell nach Herlyn [53] und Frischen et al. [54] für Produktupdates in industriellen Update-Fabriken mit beispielhaften Dokumentationselementen.

Dokumentations-Ebenen	Beispiele	Dokumentationselemente
Anforderungsebene	Dokumentation externer und interner Änderungsbedarfe (wie etwa Bauteilrevisionen oder veränderte Kundenanforderungen)	Anforderungslisten beispielsweise in Doors, Anforderungsdiagramme im MBSE
Funktionsebene	Analyse absicherungsrelevanter Bereiche	Funktionskatalog, Funktionsstruktur
Produktebene	Konfigurationen vor Kunde, Angebotsprogramm, Eigenschaften, Regelwerke	Eigenschaftskatalog mit merkmalsbasierter Steuerung variantenreicher Produkte
Technische Ebene	Stückliste mit technischen und zeitlichen Gültigkeiten	Regelbasierter Komplexstückliste, Bauteilfamilien, Module
Geometrische Ebene	Betrachtung der Einzelkomponenten	CAD-Modelle
Software-/ Hardware-Ebene	Elektrik, Elektronik und Softwareumfänge	Software Storable Elements, Schaltpläne

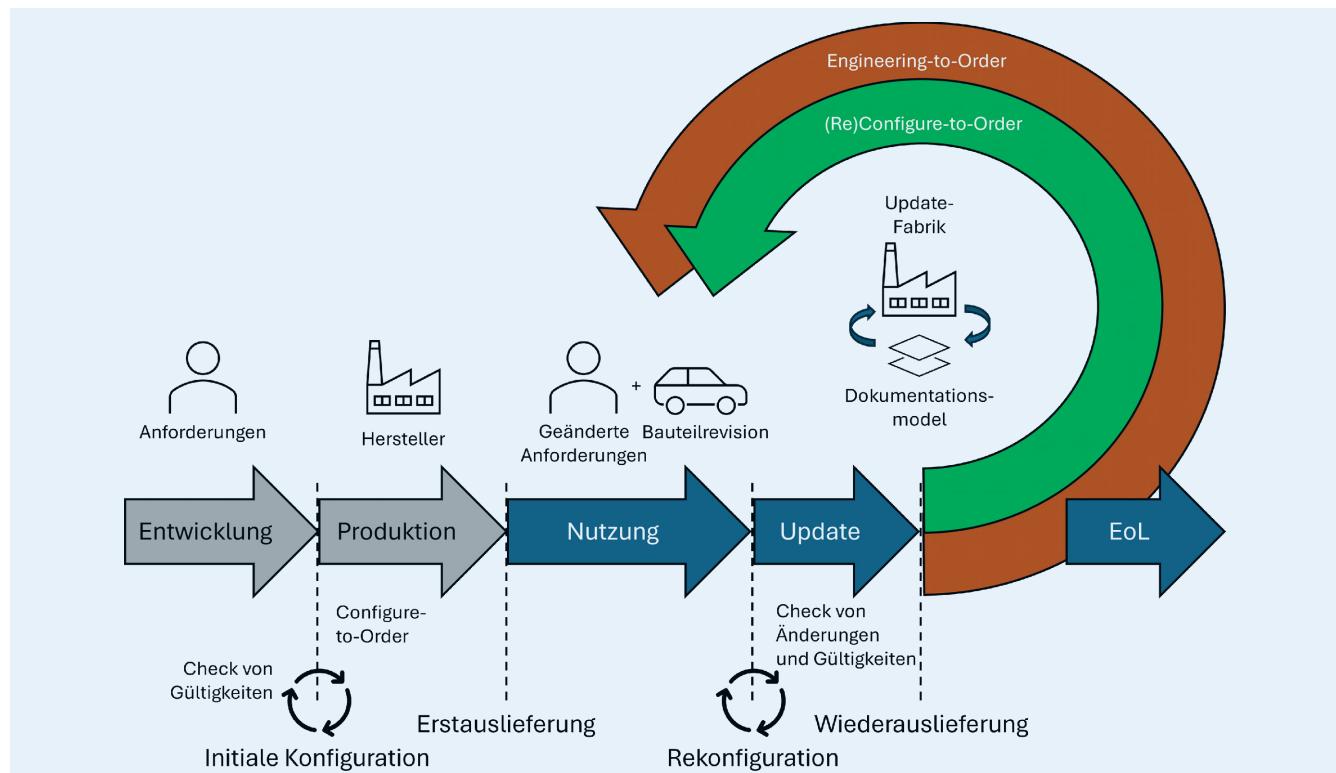


Bild 5. Schematische Darstellung der Rekonfiguration in der Update-Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. *Grafik: HSU*

Gültigkeitscheck bei Reconfigure-to-Order und eine vollständige Baubarkeitsprüfung bei Engineering-to-Order-Umfängen nötig. Die Prüfung bezieht sich immer auf technische sowie zeitliche Gültigkeiten und Änderungen.

Am Beispiel der Automobilindustrie werden Anforderungen in Produkteigenschaften übersetzt, auf deren Grundlage die Gültigkeit der jeweiligen (Re-)Konfiguration bestimmt wird und die erforderlichen Bauteilumfänge gesteuert werden. Ermöglicht durch den verbreiteten Einsatz der Modulbauweise im Automobilbau zur Realisierung von Funktionen, beziehen sich Reconfigure-to-Order-Umfänge daher auf den Austausch von Modulen, welche bereits durch den Hersteller in der Entwicklung vorgehalten und abgesichert wurden (Fall 2.1 und 2.2). Eingeschlossen ist dabei die Möglichkeit einer nachträglichen (nach SOP) Einführung zusätzlicher Module sowie geupdateter Komponenten im

Sinne einer Revision mit neuer Teilenummer. Umfänge, die über den Austausch von Modulen hinausgehen und nicht vom Hersteller vorgehalten und abgesichert wurden, fallen in den Bereich des Engineering-to-Order (Fall 3.1 und 3.2).

Bild 5 ordnet den Rekonfigurationsprozess in den erweiterten PLZ ein. Kaskadenartige Produktupdates in industriellen Maßstab können zu neuen Produktgenerationen führen, die jeweils ein EoL im Sinne einer ewigen Verwendung beziehungsweise einer Mehrgenerationenfähigkeit besitzen können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschreibt einen Beitrag zur Entwicklung kreislauffähiger Produkte im Rahmen von Produktupdates im industriellen Maßstab anhand des Konzeptes der Update-Fabrik. Dabei

wird die Abwägung zwischen kundenindividuellen Lösungen (Mass Customization) und standardisierter Serienfertigung (Mass Production) beleuchtet und durch Kreislaufstrategien für modularisierte Produkte beschrieben. Für diesen Tradeoff bedarf es Flexibilität in Produktionsansätzen und Transparenz in der Dokumentation entlang der Wertschöpfungskette. Variantenreiche Produkte in Modulbauweise eignen sich durch die Austauschbarkeit von Modulen und gemeinsam genutzten Schnittstellen besonders für die Aktualisierbarkeit von Produkteigenschaften und dadurch erweiterbarer Funktionen. Die damit verbundene Erfüllbarkeit von geänderten Anforderungen in der Nutzungsphase verbessert die Verlängerbarkeit des PLZ und ermöglicht grundsätzlich eine Kreislauffähigkeit.

Als Ergebnis dieses Beitrags wurde zunächst mit der Rekonfiguration eine neue Kreislaufstrategie zur Verlängerung der Nutzungsphase und somit der Lebensdauer eines Produktes vorgeschlagen. Zusätzlich wurden die (Re)Configure-to-Order und Engineering-to-Order-Produktionsprinzipien in einer Fallunterscheidung in die Konzepte der Serienfertigung, Update-Fabrik und Werkstatt eingeordnet und jeweils voneinander abgegrenzt. Außerdem wurden Anknüpfungspunkte für die Geschäftsfeldentwicklung im Rekonfigurationsprozess aufgezeigt. Abschließend wurde mit der Beschreibung des technologischen Prozesses zur Realisierung der Rekonfiguration variantenreicher Produkte ein Vorgehensmodell und ein erweitertes Dokumentationsmodell vorgeschlagen. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden vor dem Hintergrund der deutschen Automobilindustrie eingeordnet und diskutiert.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit wurde auf das Konzept und die Belegbarkeit aus der zugrunde liegenden Literatur gelegt. Fragestellungen aus der Homologation und den Zulassungsvoraussetzung für Produktupdates wurden nicht untersucht. Neben diesen Fragestellungen besteht weiterer Forschungsbedarf in der Untersuchung der Skalierbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes und in einer wissenschaftlichen Evaluation der Ergebnisse.

LITERATUR

- [1] Geissdoerfer, M.; Savaget, P.; Bocken, N. M. P. et al.: The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 143 (2017), pp. 757–768, doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048
- [2] ElMaraghy, H. A.; Wiendahl, H.-P.: Changeability – An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Ed.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer Series in Advanced Manufacturing 2009, pp. 3–24, doi.org/10.1007/978-1-84882-067-8_1
- [3] Colledani, M.; Gyulai, D.; Monostori, L. et al.: Design and management of reconfigurable assembly lines in the automotive industry. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65 (2016) 1, pp. 441–446, dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.123
- [4] Piller, F. T.; Tseng, M.: Handbook of Research in Mass Customization and Personalization. New Jersey: World Scientific 2010, doi.org/10.1142/7378
- [5] Brabazon, P. G.; MacCarthy, B.; Woodcock, A et al.: Mass Customization in the Automotive Industry: Comparing Interdealer Trading and Reconfiguration Flexibilities in Order Fulfillment. *Production and Operations Management Society* 19 (2010) 5, pp. 489–502, doi.org/10.1111/j.1937-5956.2010.01132.x
- [6] Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP), Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP): Update-Factory für ein industrielles Produkt-Update – Ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft. Positionspapier. Stand: 2021. Internet: wgp.de/wp-content/uploads/Positionspapier_Update-Factory.pdf. Zugriff am 20.05.2025
- [7] Mantwill, F.; Demke, N.; Willems, W. et al.: Der Beitrag der Produktentwicklung zur kreislauffähigen Wertschöpfung. In: Sauer, A.; Miehe, R.; Hözle, K. (Hrsg.): Handbuch Kreislauffähige Wertschöpfung – Schlüsselkonzepte, Technologien, Geschäftsmodelle und Rahmenbedingungen. Wiesbaden: Springer Gabler 2025
- [8] Kirchner, E.: Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung. Heidelberg: Springer 2020, doi.org/10.1007/978-3-662-61762-5
- [9] Mestre, A.; Cooper, T.: Circular Product Design – A Multiple Loops Life Cycle Design Approach for the Circular Economy. *The Design Journal* 20 (2017) 1, pp. 1620–1635, doi.org/10.1080/14606925.2017.1352686
- [10] Martinez, M.; Xue, D.: A modular design approach for modeling and optimization of adaptable products considering the whole product utilization spans. *Journal of Mechanical Engineering Science* 232 (2018) 7, pp. 1146–1164, doi.org/10.1177/0954406217704007
- [11] Osorio, J.; Romero, D.; Betancur, M. et al.: Design for Sustainable Mass-Customization: Design Guidelines for Sustainable Mass-Customized Products. 20th IEEE Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE 2014, Bergamo, Italy, 2014, pp. 1–9, doi.org/10.1109/ICE.2014.6871560
- [12] Mesa, J. A.; Esparragoza, I.; Maury, H.: Trends and Perspectives of Sustainable Product Design for Open Architecture Products: Facing the Circular Economy Model. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 6 (2019), pp. 377–391, doi.org/10.1007/s40684-019-00052-1
- [13] Kimura, F.; Kato, S.; Hata, T.; Masuda, T.: Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 50 (2001) 1, pp. 89–92, doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62078-2
- [14] Koga, T.; Aoyama, K.: Modular Design Method for Sustainable Life-Cycle of Product Family Considering Future Market Changes. *ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Volume 5, Brooklyn, New York, USA, 2009, pp. 3–10, doi.org/10.1115/DETC2008-49379
- [15] Schuh, G.; Lenders, M.; Nußbaum, C. et al.: Produktarchitekturdurchgestaltung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Innovationsmanagement. Heidelberg: Springer-Verlag 2012, S. 115–160, doi.org/10.1007/978-3-642-25050-7_4
- [16] Mesa, J.; Esparragoza, I.; Maury, H.: Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production* 196 (2018), pp. 1429–1442, doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131
- [17] Gu, P.; Hashemian, M.; Nee, A. Y. C.: Adaptable Design. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 53 (2004) 2, pp. 539–557, doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60028-6
- [18] Felfernig, A.; Friedrich, G.; Jannach, D.: Intelligente Produktkonfiguratoren als Voraussetzung für maßgeschneiderte Massenprodukte. *Elektrotechnik & Informationstechnik* 116 (1999), S. 201–207, doi.org/10.1007/BF03159041
- [19] Walter, R.: SAT-based Analysis, (Re-)Configuration & Optimization in the Context of Automotive Product Documentation. Dissertation, Universität Tübingen, 2017
- [20] Janota, M.; Botterweck, G.; Marques-Silva, J.: On lazy and Eager Interactive Reconfiguration. 8th International Workshop on Variability Modeling of Software-Intensive Systems, VaMoS 2014, Sophia Antipolis, France, 2014, pp. 1–8, doi.org/10.1145/2556624.2556644
- [21] Bochmann, L. S.: Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für varianteureiche Produkte. Dissertation, ETH Zürich, 2018
- [22] Schallow, J.; Ludevig, J.; Schmidt, M. et al.: Digitale Fabrik, Planung, Produktionsmanagement – Zukunftsperspektiven der Digitalen Fabrik. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 3, S. 139–145. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [23] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P. et al.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 56 (2007) 2, pp. 783–809, doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003
- [24] Brecher, C.; Özdemir, D.; Eilers, J. et al.: Modellbasierte Rekonfigurierbarkeit für die Montage automatisierungstechnischer Produkte. *wt Werkstattstechnik online* 103 (2013) 2, S. 157–161. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [25] Landherr, M. H.: Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die varianteureiche Serienfertigung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2014
- [26] Abramovici, M.; Göbel, J. C.; Savarino, P.: Reconfiguration of smart products during their use phase based on virtual product twins. *CIRP Annals, Manufacturing Technology* 66 (2017a) 1, pp. 165–168, dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.042
- [27] Abramovici, M.; Göbel, J. C.; Savarino, P. et al.: Dynamische Rekonfiguration als neue Engineering Herausforderung im Lebenszyklus Smarter Produkte. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2017. Stuttgart: Fraunhofer IAO 2017

- [28] John, U.: Rekonfiguration komplexer industrieller Produkte mittels constraint-logischer Programmierung. In: Bry, F.; Geske, U.; Seipel, D. (Hrsg.): 14. Workshop Logische Programmierung, 2000, S. 43–54
- [29] Manhart, P.: Systematische Rekonfiguration eingebetteter softwarebasierter Fahrzeugsysteme auf Grundlage formalisierbarer Kompatibilitätsdokumentation und merkmalsbasierter Komponentenmodellierung. In: Kowalewski, S.; Rumpe, B. (Hrsg.): Software Engineering 2013. Fachtagung des GI-Fachbereichs Softwaretechnik, Aachen 2013, S. 301–318
- [30] Abramovici, M.; Göbel, J. C.; Dang, H. B.: Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems. CIRP Annals, Manufacturing Technology 65 (2016) 1, pp. 185–188, doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.051
- [31] Ashtari Talkhestani, B.; Weyrich, M.: Digital Twin of manufacturing systems: a case study on increasing the efficiency of reconfiguration. at-Automatisierungstechnik 68 (2020) 6, pp. 435–444, doi.org/10.1515/auto-2020-0003
- [32] Dickopf, T.; Apostolov, H.; Müller, P. et al.: A Holistic System Lifecycle Engineering Approach – Closing the Loop between System Architecture and Digital Twins. Procedia CIRP 84 (2019), pp. 538–544, doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.257
- [33] Müller, T.; Jazdi, N.; Weyrich, M.: Intelligentes Rekonfigurationsmanagement selbstorganisierter Produktionssysteme in der diskreten Fertigung. Stuttgart: Universität Stuttgart 2020, dx.doi.org/10.18419/opus-10928
- [34] Müller, T.; Jazdi, N.; Schmidt, J.-P.; Weyrich, M.: Cyber-physical production systems: enhancement with self-organized reconfiguration management. Procedia CIRP 99 (2021), pp. 549–554, doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.075
- [35] Stehle, T.; Heisel, U.: Konfiguration und Rekonfiguration von Produktionssystemen. In: Spath, D.; Westkämper, E.; Bullinger, H.J. et al. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Heidelberg: Springer Vieweg 2017, S. 333–367, doi.org/10.1007/978-3-662-55426-5_39
- [36] Zeller, A.; Weyrich, M.: Absicherung der Rekonfiguration von Produktionssystemen während des Betriebs – Warum Assistenzsysteme beim Testen verteilter IT-Systeme an Relevanz gewinnen. Stand: 2016. Internet: www.ias.uni-stuttgart.de/dokumente/publikationen/2016_Absicherung_der_Rekonfigurationen_von_Produktionssystemen.pdf. Zugriff am 20.05.2025
- [37] Forte, S.; Dickopf, T.; Weber, S. et al.: Towards Sustainable Systems Reconfiguration by an IoT-driven System of Systems Engineering Lifecycle Approach. Procedia CIRP 105 (2022), pp. 654–659, doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.109
- [38] Abramovici, M.: Engineering smarter Produkte und Services Plattform Industrie 4.0. STUDIE. Stand: 2018. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/hm-2018-fb-smart.pdf?__blob=publicationFile&v=3. Zugriff am 20.05.2025
- [39] Schreiber, D.; Gembarski, P. C.; Lachmayer, R.: Modeling and Configuration for Product-Service-Systems: State of the art and future research. 19th International Configuration Workshop, La Defense, France, 2017, pp. 72–79
- [40] Kammler, F.; Gembarski, P. C.; Brinker, J. et al.: (Re-)Engineering smarter Produkte – Mit dem digitalen Freiheitsgrad zu flexiblen Leistungsangeboten. In: Meinhardt, S.; Wortmann, F. (Hrsg.): IoT – Best Practices, Edition HMD. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2021, S. 293–305, doi.org/10.1007/978-3-658-32439-1_17
- [41] John, U.; Geske, U.: Konfiguration komplexer Produkte mit Constraint-basierter Modellierung. Informatik Forschung und Entwicklung 17 (2002), S. 167–176, doi.org/10.1007/s00450-002-0113-1
- [42] Ben-Asher, Y.; Peleg, D.; Ramaswami, R.; Schuster, A.: The Power of Reconfiguration. Journal of Parallel and Distributed Computing 13 (1991), pp. 139–153
- [43] Matevska, J.: Rekonfiguration komponentenbasierter Software-systeme zur Laufzeit. Wiesbaden; Vieweg+Teubner 2010, doi.org/10.1007/978-3-8348-9780-0
- [44] Köhler, M.: Dokumentationsmethodik zur Rekonfiguration von Softwarekomponenten im Automobil-Service. Dissertation, Universität Tübingen, 2011
- [45] Hees, F. A.: System zur Produktionsplanung für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Dissertation, TU München, 2017
- [46] Oke, A. O.; Abou-El-Hosseini, K.; Theron, N. J.: The Design and Development of a reconfigurable manufacturing system. South African Journal of Industrial Engineering 22 (2011) 2, pp. 121–132, DOI: doi.org/10.7166/22-2-20
- [47] Atug, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Rekonfiguration von Produktionsnetzwerken – Methode zur Produktionsplanung von rekonfigurierbaren Netzwerken in volatilen Märkten. wt Werkstattstechnik online 108 (2018) 3, S. 137–142, doi.org/10.37544/1436-4980-2018-03-33
- [48] Rodemann, N.; Ays, J.; Gützlaff, A. et al.: Influencing factors for the design of agile global production networks. In: Wulfberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (Eds.): Production at the leading edge of technology. Heidelberg: Springer Vieweg 2019, pp. 563–571, doi.org/10.1007/978-3-662-60417-5_56
- [49] Hoellthaler, G.; Schreiber, M.; Vernickel, K.; be Isa, J.; Fischer, J.; Weinet, N.; Rosen, R.; Braunreuther, S.: Reconfiguration of production systems using optimization and material flow simulation. Procedia CIRP 81 (2019), pp. 133–138, doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.024
- [50] Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C. et al.: Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen – Evolution statt Revolution. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 145–158, DOI: doi.org/10.1007/978-3-662-60462-8_7
- [51] Michalos, G.; Sipsas, P.; Makris, S. et al.: Decision making logic for flexible assembly lines reconfiguration. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 37 (2016), pp. 233–250, dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2015.04.006
- [52] Trierweiler, M.; Bauernhansl, T.: Reconfiguration of Production Equipment of Matrix Manufacturing Systems. In: Weißgraebel, P.; Heieck, F.; Ackermann, C. (Eds.): Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. ARENA2036. Heidelberg: Springer Vieweg 2021, pp. 20–27, doi.org/10.1007/978-3-662-62962-8_3
- [53] Herlyn, W.: Zur Problematik der Abbildung variantenreicher Erzeugnisse in der Automobilindustrie. Dissertation, TU Braunschweig, 1990
- [54] Frischen, C.; Marbach, A.; Tichla, F. et al.: Durchgängige Variantensteuerung mit Hilfe der regelbasierten Komplexstückliste. 30th Symposium Design for X, DFX 2019, Jesteburg, Deutschland, 2019, S. 13–24, doi.org/10.35199/dfx2019.2

Thorsten Schmidt, M. Sc. 

thorsten.schmidt@hsu-hh.de

Tel. +49 40 / 6541-3794

Dr.-Ing. Niels Demke Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill 

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg [HSU]

Institut für Maschinenelemente und Rechnergestützte

Produktentwicklung [MRP]

Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

www.hsu-hh.de/mrp

LIZENZ



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