

Mit der digitalen Produktakte zur dynamischen Dimensionierung und Strukturierung

Fabrikplanung für die Re-Assembly

G. Schuh, E. Schukat, N. Lehde genannt Kettler, F. von Danwitz

ZUSAMMENFASSUNG Die Re-Assembly ist ein Befähiger der Upgrade-Circular-Economy. Neue Funktionen werden in das Produkt nach dessen End-of-Use integriert, um neue vollständige Nutzungszyklen zu ermöglichen. Allerdings birgt die Re-Assembly inhärente Unsicherheiten, die die Planung von Fabriken grundlegend verändern. Dieser Beitrag skizziert ein Konzept zur dynamischen Dimensionierung und Strukturierung von Fabriken, um erhöhte Anpassungsgeschwindigkeiten durch proaktive Rekonfiguration zu ermöglichen.

STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Flexible Fertigungssysteme, Nachhaltigkeit

Factory design for re-assembly

ABSTRACT A core element of the upgrade circular economy is the re-assembly, which focuses on integrating new functionalities into the product after the user cycle, allowing it to enter a new lifecycle. However, re-assembly entails inherent uncertainties that fundamentally change the planning paradigm of factory design. This paper outlines a concept on dynamically dimensioning of factories enabling higher rate of change through proactive reconfiguration.

1 Einleitung und Motivation

Der durch den Menschen verursachte Klimawandel sowie die fortschreitende Ressourcenknappheit stellen die Menschheit vor Herausforderungen [1]. Ein Ansatz zur Bewältigung der Herausforderungen liegt in der Transformation von einer Linearwirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Eine spezifische Ausprägung davon ist die sogenannte Upgrade-Circular-Economy, die sich auf die Wiederverwendung, Aufwertung und Verlängerung der Nutzungsdauer von Produkten konzentriert [2]. Die darin enthaltene Strategie der Re-Assembly sieht vor, dass Alt-Produkte, auch Cores genannt, bis auf Komponentenebene demonstriert und anschließend zu neuen Produkten remontiert werden.

Die Re-Assembly ist mit einer Reihe von Unsicherheiten verbunden, die sich insbesondere auf die Menge, Qualität und den Zustand der Alt-Produkte beziehen. Die Aufbereitung der Alt-Produkte erfordert eine individuelle Produktionsprozessabfolgen. Planung und Ausführung rücken chronologisch näher zusammen, was die industrielle Arbeitsplanung erschwert [3]. Dies resultiert in neuen Herausforderungen für die Fabrikplanung, in der die Dimensionierung und Strukturierung von Fabriken eine zentrale Aufgabe darstellt.

Die Dimensionierung und Strukturierung befasst sich mit der Auslegung von Produktionssystemen, um für die zukünftige Produktion notwendigen Ressourcen zu bestimmen [4]. Die klassischen Vorgehensweisen zur Dimensionierung und Strukturierung sind nicht auf die stark schwankenden Ressourcenbedarfe und hohen Änderungsgeschwindigkeiten in der Wandlungsfähigkeit für die Re-Assembly ausgelegt.

Ein Lösungsansatz zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist die Verfügbarkeit einer digitalen Produktakte zur Unterstützung der Planung. Eine digitale Produktakte stellt einen lebenszyklusübergreifendes Datensatz dar, welcher Daten und aus verschiedenen Lebensphasen eines Produkts beinhaltet. Mithilfe dieser Daten lässt sich der Zustand der Alt-Produkte prognostizieren, noch bevor das Produkt die Fabrik erreicht [5]. Somit trägt eine digitale Produktakte zur Minimierung der genannten Unsicherheiten der Re-Assembly bei. Eine industrielle Arbeitsplanung durch Trennung von Produktionsplanung und -betrieb wird ermöglicht. Dies ermöglicht einen neuen Ansatz für die Planung von Fabriken basierend auf den Daten einer digitalen Produktakte. Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Konzept vorgestellt, welches eine dynamische Dimensionierung und Strukturierung zur proaktiven Rekonfiguration von Re-Assembly-Fabriken befähigt.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Betrachtungsbereich

Die „Circular-Economy“, auch Kreislaufwirtschaft genannt, ist ein Wirtschaftssystem, die darauf abzielt, den Primär-Ressourceneinsatz, die Abfallproduktion, die Umweltverschmutzung und den Energieaufwand in der Produktion zu minimieren. Ressourcen und Produkte sind so lange wie möglich wiederzuverwenden. Die Kreislaufwirtschaft zeichnet sich daher durch geschlossene Material- und Energiekreisläufe aus [6, 7]. In der Literatur wurden verschiedene Definitionen der Circular-Economy erarbeitet. *Bandh et al.* definiert die Circular-Economy als eine wiederherstellende, regenerative Wirtschaftsordnung, mit dem Ziel die

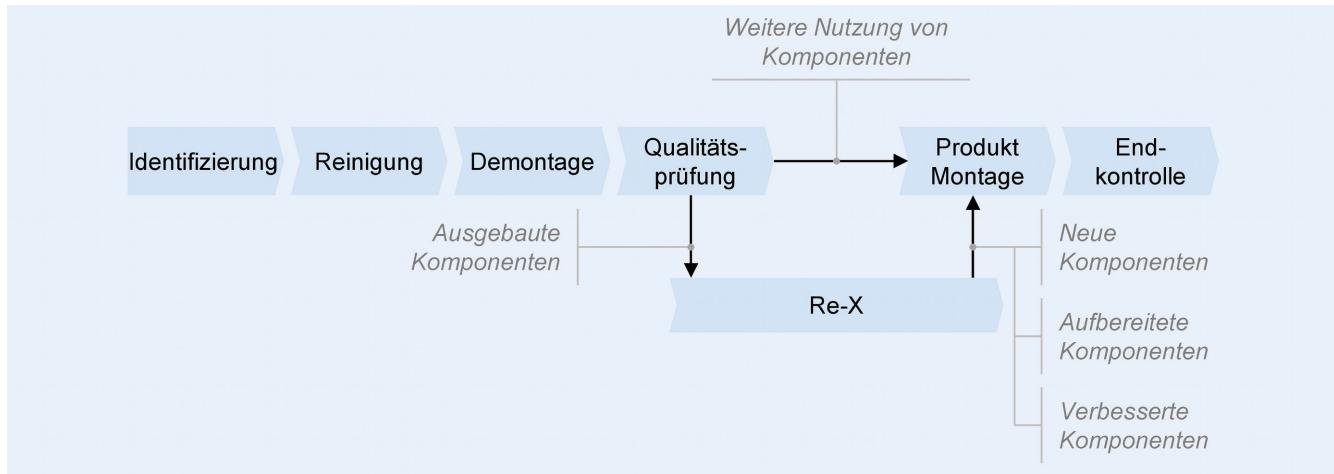


Bild 1. Darstellung des Re-Assembly-Prozesses. *Grafik: WZL*

absoluten Systemflüsse bei der Produktion von Gütern zu reduzieren [8]. Das enthält die Minimierung der entstehenden Abfälle und Emissionen während des gesamten Produktlebenszyklus bei gleichzeitiger Maximierung der Ressourceneffizienz. Ressourcen sollen so lange wie möglich wiederverwendet werden [8]. Sauvé *et al.* definieren die Circular-Economy als ein System für die Produktion und den Gebrauch von Gütern durch geschlossene Stoffkreisläufe. Die mit der Gewinnung der Rohstoffe und der Entstehung der von Abfällen verbundenen externen Einwirkungen auf die Umwelt werden in das System internalisiert [9]. Die Circular-Economy hat das Potenzial das gesamte Lebens- und Wirtschaftsmodell substanziiell zu verbessern [10].

Innerhalb der Kreislaufwirtschaft fokussieren produzierende Unternehmen verschiedene „Strategien“ zur Wertschöpfung in ihren Geschäftsmodellen. [6, 7] Diese Strategien verfolgen das grundsätzliche Ziel des Werterhalts der Produkte im Material- und Energiekreislauf. Die Strategien differenzieren sich maßgeblich durch zwei Faktoren: die Ebene des Werterhalts sowie das Resultat des Werterhalts. Fünf Strategien werden definiert: Das Repair und das Reuse erfüllen den initial vorgesehenen Nutzungszyklus auf Produktebene. Das Refurbishment erfüllt auf Komponentenebene fast vollständige zusätzliche Nutzungszyklen. Das Remanufacturing erfüllt vollständige zusätzliche Nutzungszyklen auf Komponentenebene. Das Recycling verwertet als zuletzt zu wählende Strategie auf Werkstoffebene. [11] Bestehende Maßnahmen und Strategien sind entweder durch den Werterhalt auf Komponentenebenen oder die Erfüllung des initial vorgesehenen Nutzungszyklus limitiert. Die Strategie „Re-Assembly“ geht darüber hinaus. Re-Assembly beschreibt den industriellen Werterhalt auf Produktebene zur Erfüllung zusätzlicher vollständiger Nutzungszyklen. Außerdem zielt die Re-Assembly darauf ab Produkt-Upgrades zu integrieren, um so Neu-Produkt-Charakter zu ermöglichen. Daher verwendet dieser Beitrag die Bezeichnung Upgrade-Circular-Economy [12].

Die Re-Assembly erfolgt typischerweise durch einen spezifischen, auf diesen Zweck zugeschnittenen Prozess. Der „Re-Assembly-Prozess“ startet mit der Identifikation der ankommenen Alt-Produkte, [11] wobei deren Zustand anhand der digitalen Produktakte bereits im Vorfeld prognostiziert ist und im Rahmen der Eingangsprüfung identifiziert wird. Im Anschluss erfolgen die Reinigung und Demontage. Die Demontagetiefe erfolgt abhängig vom Zustand der Alt-Produkte bis auf Komponentenebene. Im

Anschluss werden die Komponenten einer Qualitätsprüfung unterzogen. In einem mehrstufigen Prozess werden die Komponenten aufbereitet und in ihrer Funktionalität erweitert. Aufbereitete, verbesserte und neue Komponenten werden schließlich zu neuen Produkten montiert. Der Prozess endet mit der Endkontrolle [13]. **Bild 1** stellt den Re-Assembly-Prozess und die Komponentenflüsse dar.

2.2 Gestaltungsbereich

Die Fabrikplanung fokussiert sich auf die „Fabrik“ als Planungsobjekt. Nach VDI 5200 stellt die Fabrik einen Ort dar, an dem durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter Wertschöpfung generiert wird [14]. Die Fabrik wird auch als komplexes sozio-technisches System mit Teilsystemen beschrieben [15]. Die Fabrik unterteilt sich in das Produktionssystem und das Industriegebäude. Das Produktionssystem ist unmittelbar für die Wertschöpfung erforderlich [4]. Es ist der inhaltliche Schwerpunkt dieses Beitrags. Eine Betrachtung des Industriegebäudes findet nicht statt.

Die „Wandlungsfähigkeit“ beschreibt neben der Flexibilität eine Eigenschaft zur Anpassungsfähigkeit von Fabriken und Produktionssystemen auf vorhersehbare und nicht vorhersehbare Randbedingungen zu reagieren. Wandlungsfähigkeit nutzt eine gezielt einsetzbare Verhaltensvariabilität des Produktionssystems durch reaktive oder antizipative Eingriffe in deren Struktur oder Elementmenge [16]. Wandlungsfähigkeit wird durch Wandlungsbefähiger wie Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität, Kompatibilität und Standardisierung realisiert [17].

Die „Fabrikplanung“ ist die vorausschauende Gestaltung industrieller Fabrik- und Produktionssysteme [18]. Sie ist in Teilphasen unterteilt, die von der Vorbereitung und Definition der Ziele über die Konzeptphase, Detailplanung, Ausführungsplanung bis zur Inbetriebnahme der Fabrik reichen [19]. Der Fokus dieses Beitrags liegt in der Konzeptphase angesiedelt [14]. Dabei stehen die Planungsfälle Umgestaltung und Erweiterung im Fokus. Die Fabrikplanung lässt sich in die Ebenen Standortplanung, Werkstrukturplanung, Gebäudestrukturplanung, Bereichs- und Segmentplanung sowie die Arbeitsplatzgestaltung unterteilen [20]. Dieser Beitrag betrachtet die Segmentebene, welche die räumliche Anordnung der Maschinen und Segmente sowie deren Material- und Informationsfluss beinhaltet. Der Planungshori-

Tabelle 1. Anwendung der „Starlite“-Mnemonik nach Booth.

Elemente		Einordnung
S	Sampling Strategy	Selektiv: Identifikation relevanter Literatur innerhalb festgeschriebener Grenzen
T	Type of Studies	Partiell: Suchstrings werden thematisch eingestellt, um Überkategorien zu bilden
A	Approaches	Stichwortsuche in Datenbanken, Vorwärts- und Rückwärtssuche
R	Range of Years	Fokussierung auf Quellen die nach 2013 veröffentlicht wurden
L	Limits	Sprachen: Englisch und Deutsch Dokumententypen: Wissenschaftliche Literatur jeder Art Datenbanken: Exportierbar mit Zitationsdatei
I	Inclusion and Exclusion	Ausgeschlossen: Nur peripherie thematische Relevanz, zu geringe wissenschaftliche Tiefe, mangelnde Qualität
T	Terms used	Siehe Tabelle 2
E	Electronic Sources	IEEE-Xplore, Scopus, Web of Science

zont, im weiteren Verlauf Planungsperiode genannt, beträgt im Mittel ein Quartal eines Kalenderjahres.

Im Rahmen der Fabrikplanung umfasst die „Dimensionierung und Strukturierung“ des Produktionssystems die qualitative und quantitative Bestimmung der Ressourcenbedarfe sowie die räumliche und organisatorische Gliederung der Produktion. Die Ermittlung der notwendigen Kapazitäten an Betriebsmitteln, Personal und Flächen erfolgt ausgehend vom Produktionsprogramm, welches das Mengengerüst der geplanten Produktion bildet. Im Anschluss erfolgt die Segmentierung dieser Kapazitäten in autonome Funktionseinheiten, sogenannte Segmente, sowie die Zuweisung spezifischer Organisationsformen zu jedem Segment [4].

Die Dimensionierung von Fabriken für Re-Assembly wird durch stark schwankende Kapazitätsbedarfe und unvorhersehbare Aufbereitungsprozesse der Alt-Produkte erschwert. Die klassische Dimensionierung und Strukturierung kann die Änderungsgeschwindigkeiten, mit denen Anpassungen im Produktionsystem vorgenommen werden müssen, nicht ausreichend abdecken. Zudem verhindern die individuellen Aufbereitungsbedarfe der Alt-Produkte eine industrielle Arbeitsplanung, was die Effizienz durch mangelnde Trennung von Planung und Ausführung des Systems reduziert und die Ausschöpfung von Stückzahlpotenzialen beeinträchtigt. Es ist zu prüfen, ob und wie bestehende Methoden zur Anpassungsfähigkeit von Fabriken und Produktionssystemen die genannten Änderungsgeschwindigkeiten erfüllen können.

3 Ansätze zur Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly-Fabriken

Basierend auf der vorherigen Problembeschreibung in Abschnitt 2 braucht es Ansätze, die dieses Problem lösen. Dazu sind vier Anforderungen an eine mögliche Lösung definiert worden:

1. Berücksichtigung von dynamischen quantitativen und qualitativen Kapazitätsbedarfen.
2. Hochwandlungsfähige organisatorische und räumliche Struktur der Re-Assembly-Fabrik.

3. Proaktive Rekonfiguration zur Bereitstellung der Kapazitätsangebote.

4. Integration der Produktlebenszyklusdaten in die Dimensionierung.

Zur Untersuchung von Ansätzen anhand dieser Anforderungen ist eine systematische Literaturrecherche (SLR) in Anlehnung an *vom Brocke et al.* [21] durchgeführt worden. Zur Charakterisierung der SLR findet die STARLITE-Mnemonik nach *Booth* [22] Anwendung. **Tabelle 1** fasst die Einordnung der SLR anhand der Mnemonik zusammen.

Die verwendeten Suchbegriffe sind in die drei Bereiche Fokus, Ziel und Bereich eingeteilt. Innerhalb der Bereiche erfolgt basierend auf dem Betrachtungs- und Gestaltungsbereich dieses Beitrages eine Kategorisierung. Die Suchbegriffe der jeweiligen Kategorien setzen sich, wie in **Tabelle 2** dargestellt, jeweils aus einer Kombination der Suchbegriffe aus jedem Bereich zusammen.

Als Ergebnis der Literatursuche wurden insgesamt 1.318 Quellen identifiziert. Nach der Filterung, bei der Quellen, Doppelungen und die Relevanz der Titel und Abstracts berücksichtigt wurden, verbleiben 67 Quellen. Nach der Synthese dieser Quellen verbleiben 12 Quellen, welche sich jeweils einem primären inhaltlichen, jedoch nicht exklusiven, Schwerpunkt zuordnen lassen: Kapazitätsplanung, Produktlebenszyklusdaten, Re-Assembly-Prozess und Produktionssystem-Rekonfiguration. Nachfolgend werden die Quellen je Schwerpunkt eingeführt und der Schwerpunkt inhaltlich eingeordnet.

Kapazitätsplanung

Huster et al. [23] stellen ein Konzept zur Kapazitätsplanung vor, welches mithilfe einer diskreten Ereignissimulation (DES) und unter produktspezifischen Annahmen die Kapazität modelliert. Die Verkaufsdaten stellen dabei die primäre Datenbasis dar. Mithilfe der Annahmen, die die Lebensdauer von Produkt und Komponenten beschreiben, wird der Forecast für den zukünftigen Kapazitätsbedarf modelliert. *Jurczyk-Bunkowska* [24] stellt einen Ansatz zur taktischen Kapazitätsplanung mithilfe einer diskreten Ereignissimulation kombiniert mit Durchsatzkostenrechnung vor.

Tabelle 2. Verwendete Suchbegriffe.

Bereich	Kategorie	Suchbegriff
Bereich	A1 Re-Assembly	re-assembly, remanufacturing, refurbishment
	A2 Produktionssystem	production system, production process, manufacturing system, manufacturing process, assembly system, assembly process, disassembly system, disassembly process
	A3 Digitale Produktakte	digital product file, digital product pass, digital product data, product data, product file, product pass, data model, information model
Ziel	O1 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit	flexible, adaptable, reconfigurable, reconfiguration, reconfigure
	O2 Segmentierung	cell, cellular, group, matrix
	O3 Proaktiv	proactive, predictive, planning, design, decision
Fokus	F1 Kapazitätsplanung	Capacity planning, capacity design, capacity determination, capacity calculation, capacity identification, capacity decision, capacity expansion, capacity adjustment, capacity scalability
	F2 Produktionsstrukturplanung	Production structure planning, production organization planning, production structure design, production organization design

Ziel ist, die Kapazitätserweiterung oder -kontraktion unter ökonomischen Gesichtspunkten zu bewerten. Der Fokus liegt dabei auf einem taktischen Planungshorizont. Niemann *et al.* [25] entwickeln eine zweistufige Kapazitätsplanungsmethodik für wandlungsfähige Produktionssysteme. Der Prozess beruht auf der Realoptionstheorie, welche den Wert von strategischen Anpassungsmöglichkeiten unter Unsicherheiten berücksichtigt.

Produktlebenszyklusdaten

Goodal *et al.* [26] präsentieren ein Framework zur Simulation von Materialflüssen in Remanufacturing-Prozessen. Ziel ist die Vorhersage des Materialflussverhaltens, indem Daten aus dem Produktionssystem genutzt werden. Das Framework besteht aus drei Elementen: Adaptive Remanufacturing-Simulation, Remanufacturing-Informationsmodell und Informations-Service-Ebene. Acerbi *et al.* [27] präsentieren ein holistisches Datenmodell mit dem Ziel der Daten- und Informationsstrukturierung im Kontext zirkulärer Fertigungsstrategien. Das Datenmodell soll Hersteller und Aufbereiter in der Kreislaufwirtschaft dazu befähigen, zirkuläre Fertigung effizient umzusetzen. Bestandteil des Datenmodells sind 29 Klassen, welche sich in die drei Hauptkategorien Produkt, Prozess, Technologie und Management gliedern. Kerin *et al.* [28] beschreiben eine Forschungsaufgabe für die Anwendung von Industrie 4.0-Technologien zur Befähigung der Kreislaufwirtschaft. Die Autoren führen eine systematische Literatursuche und -analyse durch. Im Ergebnis steht ein Framework für Industrie 4.0-Technologieanwendungen und Entwicklungspfade in der Kreislaufwirtschaft. Das Framework wird von 33 Forschungshypothesen begleitet.

Re-Assembly-Prozess

Kampker *et al.* [29] zeigen das Potenzial des Remanufacturings von batterieelektrischen Fahrzeugen auf. Dazu präsentieren die

Autoren einen generischen Remanufacturingprozess sowie dazugehörige Szenarien. Die Szenarien werden mit der Methode des Total Cost-of-Ownership (TCO) bewertet und verglichen. Ardi *et al.* [30] untersuchen die Kapazitätsplanung für die Aufbereitung von elektronischen Verbraucherprodukten innerhalb einer geschlossenen Lieferkette. Durch die Modellierung als Causal-Loop mit anschließender Simulation des Systems wird analysiert, wie technologische Innovationen die Nachfrage und Rücknahme der Produkte beeinflussen. Die Autoren zeigen Kapazitätserweiterungsstrategien zur Kostenminimierung vor. Reddy *et al.* [31] präsentieren einen Ansatz zur Kapazitäts- und Lagerplanung für ein hybrides Produktionssystem zur Primärproduktion und Aufbereitung. Ein stochastisches Modell unterstützt die Planung der Kapazitäten und Lagerbestände. Ziel ist die Reduktion der Produktionskosten und Steigerung der Ressourceneffizienz.

Produktionssystem-Rekonfiguration

Mansour *et al.* [32] präsentieren einen Ansatz zur Parallelisierung von Layoutplanung und Produktionssystem-Rekonfiguration. Untersucht wird die Rekonfiguration von Fertigungszellen. Jede Zelle beinhaltet verschiedene Werkzeugmaschinen. Die Rekonfiguration wird zwischen unterschiedlichen Planungsperioden mit abweichendem Produktprogramm betrachtet. Zhang *et al.* [33] präsentieren ein zweiphasiges Framework im Kontext der *dynamic virtual cell formation* (DVCF). Ziel ist die Kapazitätsplanung in virtuellen dynamischen Fertigungszellen unter schwankenden Bedarfen über mehrere Planungszyklen. Die Fertigungszellen sind periodisch entsprechend den Bedarfen logisch zu rekonfigurieren. Koren *et al.* [34] präsentieren einen Ansatz zur wirtschaftlichen und technischen Bewertung der Skalierbarkeit in *reconfigurable manufacturing systems* (RMS). Die Autoren greifen auf RMS zurück, um eine inkrementelle Anpassung der Produktionssystem-Kapazität zu ermöglichen. Dazu werden zunächst

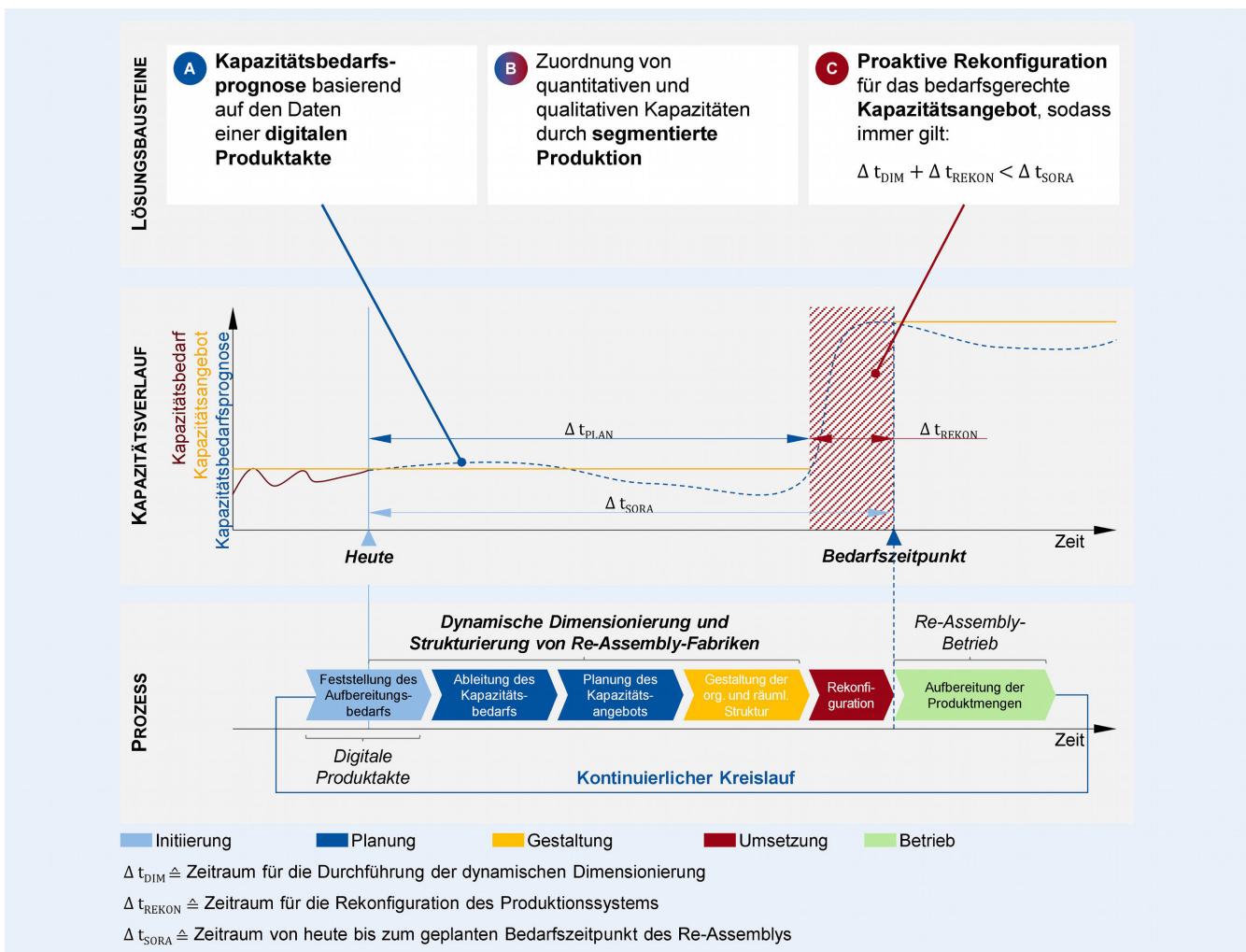


Bild 2. Lösungsbausteine des Konzeptes zur dynamischen Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly-Fabriken. *Grafik: WZL*

Gestaltungsprinzipien entwickelt, sowie mit einer Bewertung der Skalierbarkeit quantifiziert.

Die vorgestellten Ansätze stellen wertvolle Beiträge zur Lösung des Problems dar. Bisherige Ansätze beziehen zwar Anpassungsfähigkeit durch Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ein, lassen jedoch die Potenziale der Produktlebenszyklusdaten in der Dimensionierung und Strukturierung außen vor. Die Wandlungsfähigkeit ist dabei im Besonderen zu betrachten, um die stark volatilen Kapazitätsbedarfe zu bedienen, da zur Rekonfiguration eine für die industrielle Arbeitsplanung erforderliche Vorlaufzeit notwendig ist. Keiner der vorgestellten Ansätze alle Anforderungen. Ein ganzheitlicher Ansatz zur Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly Fabriken ist erforderlich.

4 Konzept der dynamischen Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly-Fabriken

4.1 Kernidee des Konzeptes

Das Konzept besitzt drei Lösungsbausteine: (A) Kapazitätsbedarfsprognose basierend auf den Daten einer digitalen Produktakte, (B) Abgleich von Kapazitätsbedarf und -angebot sowie Zuordnung von quantitativen und qualitativen Kapazitäten durch segmentierte Produktion und (C) proaktive Rekonfiguration für

das bedarfsgerechte Kapazitätsangebot. Der Fokus des vorliegenden Konzeptes, liegt dabei auf der Beschreibung der Methodik des Planungsprozesses für die nachfolgende Gestaltung der Fabrik als Planungsobjekt. Das Zielbild des Konzeptes ist in **Bild 2** dargestellt.

Um die industrielle Arbeitsplanung sowie physische Gestaltung der Fabrik termingerecht durchzuführen, soll als primäre Datenquelle für den Planungsprozess eine digitale Produktakte herangezogen werden. Darüber hinaus soll die Komplexität in der Planung verursacht durch die stark schwankenden, quantitativen und die vielfältigen, qualitativen Kapazitätsbedarfe, durch eine segmentierte Produktion reduziert werden. Produktionssegmente nutzen Aspekte aus der Strategie der Gruppentechnologie. Durch die Bildung von Fertigungszellen nach Teilefamilien werden ähnliche Fertigungsschritte zusammengefasst und können effizienter durchgeführt werden [35]. Dass eine solche Segmentierung der Produktion zu einer erhöhten Leistung des Produktionssystems führt, wurde bereits an vergleichbaren Stellen bewiesen [36]. Die Planungsmethodik schließt mit der organisatorischen und räumlichen Strukturierung der Produktionssegmente ab. Es erfolgt eine Übergabe an die reale Umsetzung in der Fabrik. Dadurch soll die Gestaltung einer Fabrik ermöglicht werden, die sich bei stark schwanken Kapazitätsbedarfen durch eine Rekonfiguration ihres Produktionssystems anpassen kann.

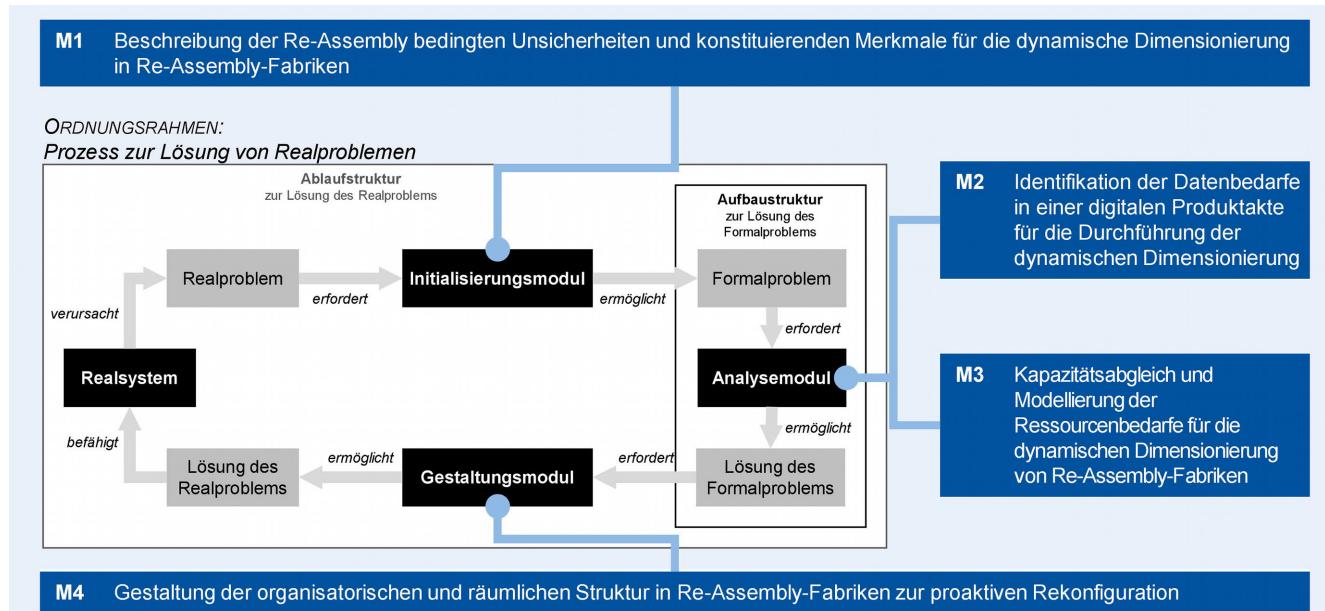


Bild 3. Struktur der Module zur Umsetzung des Konzeptes zur dynamischen Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly-Fabriken. *Grafik: WZL*

Das Ziel des vorliegenden Konzeptes kann daher folgendermaßen zusammengefasst werden:

Ziel ist die Entwicklung einer Methodik zur dynamischen Dimensionierung und Strukturierung von Re-Assembly-Fabriken basierend auf den Daten einer digitalen Produktakte, um Abweichungen im Abgleich von Kapazitätsbedarf und -angebot zu reduzieren.

4.2 Strukturierung des Konzeptes

Zur Umsetzung des Konzeptes sind geeignete methodische Ansätze erforderlich. Die Fabrik ist bereits als System beschrieben worden. Um dieses reale System Fabrik zu abstrahieren, werden Methoden der Systemtechnik herangezogen. Die Systemtechnik bietet geeignete Techniken und Vorgehensmodelle zur Analyse von Systemen und zur Strukturierung von Problemlösungsprozessen [37]. Die Systemtechnik gibt damit einen Rahmen vor, der dabei unterstützt, komplexe, technische Probleme zu erkennen und zu lösen [38]. Für den Erkenntnisprozess zur Lösung des Problems wird auf die Modelltheorie zurückgegriffen [39, 40]. Modelle dienen der vereinfachten Darstellung komplexer Zusammenhänge in der Realität [41]. Aus dem realen System ist ein Modell zu bilden. Dazu wird der Re-Assembly-Prozess mit seinen Unsicherheiten und konstituierenden Merkmalen beschrieben (Modul M1). Innerhalb der Modellwelt kann das formalisierte Problem analysiert und gelöst werden. Dazu werden die Kapazitätsbedarfsprognosen (Lösungsbaustein A) analysiert und die Datenbedarfe in einer digitalen Produktakte beschrieben (M2). Anschließend erfolgt der Kapazitätsabgleich (A) zur Be-

schreibung der Ressourcenbedarfe (M3). Anschließend erfolgt ein Übertrag in das reale System zur Lösung des Problems [42]. Dazu werden für die proaktive Rekonfiguration (C) Produktionssegmente (B) gebildet und deren organisatorische und räumliche Struktur definiert (M4). Dieses Vorgehen wird als Prozess zur Lösung von Realproblemen bezeichnet und bildet den Ordnungsrahmen zur Strukturierung des vorliegenden Konzeptes [40, 43, 44]. **Bild 3** stellt diesen Ordnungsrahmen dar. Die Module werden nachfolgend erläutert.

4.2.1 Beschreibung der Re-Assembly-bedingten Unsicherheiten und konstituierenden Merkmale für die dynamische Dimensionierung in Re-Assembly Fabriken

Das Beschreibungsmodell des Re-Assembly-Prozesses und die systematische Analyse der Informationsbedarfe für die Durchführung der Dimensionierung von Fabriken bilden die Basis des Konzeptes. Ziel ist die Beschreibung der für die Durchführung der dynamischen Dimensionierung von Re-Assembly-Fabriken notwendigen Informationsbedarfe. Die konstituierenden Merkmale strukturieren die Vielzahl an unterschiedlichen Kapazitätsbedarfsinformationen. Als Ordnungsrahmen dient dabei der idealtypischen Re-Assembly-Prozesses nach Schuh *et al.* [13]. Die Strukturierung der produkt- und nutzungsinduzierten Kapazitätsbedarfe erfolgt dabei nach Produkt-, Prozess- sowie Betriebsmittelinformationen. Die direkten und indirekten Informationsbedarfe für den Planungsprozess sind dem Aachener Fabrikplanungsvorgehen entnommen, zuletzt veröffentlicht durch Fölling [45]. Das Aachener Fabrikplanungsvorgehen zeichnet sich im Vergleich zu sequenziellen Planungsvorgehen durch eine informatorische-planungsprojektspezifische Vernetzung aus. Planungsaufgaben sind in sogenannten Modulen gekapselt. Die notwendigen Planungsinformationen und -module sind identifiziert, für die dynamische Dimensionierung konfiguriert und um die re-assembly-prozessspezifischen Informationsbedarfe und -vernetzungen ergänzt.

4.2.2 Identifikation der Datenbedarfe in einer digitalen Produktakte für die Durchführung der dynamischen Dimensionierung

Ziel des Moduls ist die Erklärung der kausalen und semantischen Zusammenhänge zwischen den in Modul 1 beschriebenen Informationsbedarfen. Zur Erklärung der Zusammenhänge erfolgt zunächst eine Visualisierung und Verknüpfung mittels Causal-Loop-Diagrammen. Causal-Loop-Diagramme sind eine Methode zur Analyse komplexer Zusammenhänge. Sie erlauben eine klare und intuitive Visualisierung jener Zusammenhänge. Neben der Erfassung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen werden auch die Polaritäten berücksichtigt. Darüber hinaus können positiv oder negativ verstärkende selbstregulierende Wirkungsschleifen identifiziert werden, wodurch die Entstehung und das Verhalten von der dynamischen Dimensionierung erklärt werden [46]. Anschließend ist gemäß Abschnitt 4.3 zur Problemlösung eine Modellbildung erforderlich. Dazu erfolgt die Anlehnung an die Disziplin des Systems Engineering zur Lösung komplexer Probleme. Die Zusammenhänge werden mithilfe der Unified Modeling Language (UML) [47] modelliert. Das Modell stellt damit ein Modell einer digitalen Produktakte dar, wie sie in der europäischen Union bereits für ausgewählte Produkte vorgeschrieben ist. [48] Die Datenbedarfe sind dem im Rahmen des Exzellenzcluster entwickelten Internet of Production (IoP) [12] auf der Basisebene in Expertensystemen und Rohdaten identifiziert und verknüpft. Derartige Expertensysteme sind beispielsweise das Product-Lifecycle-Management (PLM), das Manufacturing-Execution-System (MES) oder das Customer-Relationship-Management (CRM).

4.2.3 Kapazitätsabgleich und Modellierung der Ressourcenbedarfe für die dynamische Dimensionierung von Re-Assembly-Fabriken

Das dritte Modul modelliert den technisch-mathematischen Abgleich zwischen Kapazitätsbedarf und Kapazitätsangebot. Zunächst sind die Kapazitätsarten in den Kategorien Betriebsmittel, Personal und Fläche definiert. Außerdem erfolgt eine Einordnung zwischen globaler und lokaler Kalkulation [4, 18]. Diese Einordnung soll Fälle berücksichtigen, sofern eine digitale Produktakte die zuvor definierten Daten nicht oder nicht in der erforderlichen Güte bereitstellen kann [49]. Die Kapazitätsarten sind zu dem in Modul 2 definierten Causal-Loop-Diagramm in Relation gesetzt. Die Modellierung erweitert das zweistufige Framework nach *Zhang et al.* [33]. Aufbauend auf dem *cell formation problem* (CFP) werden die Fertigungsressourcen nicht nur physisch verändert, sondern können virtuell zu Zellen konfiguriert werden. Die erste Stufe zielt darauf ab die Ähnlichkeit der Prozesse zu maximieren und die Arbeitsbelastung unter den Maschinen auszugleichen. Phase zwei zielt auf die Erhöhung der Rekonfigurationsstabilität ab, in dem die Anzahl der notwendigen Änderungen zwischen den Planungsperioden minimiert wird. Dadurch entsteht ein NP-hartes Optimierungsproblem, zu dessen Lösung *Zhang et al.* einen hybriden Lévy-NSAG-II Algorithmus nutzen, um sowohl lokal als auch global eine optimale Lösung zu finden. Das Framework ist zum einen um die re-assembly-spezifischen Einflussfaktoren und Kausalitäten aus Modul 1 und 2 erweitert, sowie um die definierten Kapazitätsarten mit ihren Detailarten. Stufe 1 des Frameworks modelliert den Kapazitätsabgleich basierend auf den Prä-

missen: hohe Ähnlichkeit der Prozesse zur Aufbereitung der Produkte und hohe Gleichmäßigkeit in der Verteilung der Kapazitäten im Gesamtsystem. Stufe 2 greift die Aspekte der Rekonfiguration der betrachteten Planungsperiode auf und modelliert den Kapazitätsabgleich zwischen Periode n und Periode n+1. Im Ergebnis sind die Kapazitätsbedarfe für Betriebsmittel, Personal und Flächen in Form einer Design Structure Matrix (DSM) [50] modelliert. Die DSM ist dazu geeignet die Elemente eines Systems und deren Vernetzung einheitlich abzubilden. Dazu sind quantitative und qualitative Affinitäten integriert, die aus den idealen und alternativen Aufbereitungsprozessfolgen abgeleitet sind. Die DSM wird im folgenden Abschnitt zur Produktionsystemgestaltung eingesetzt.

4.2.4 Gestaltung der organisatorischen und räumlichen Struktur in Re-Assembly-Fabriken zur proaktiven Rekonfiguration

Dieses Modul betrachtet die Gestaltung des Produktionssystems für die zukünftige Periode. Das Produktionssystem mit seinen Elementen E, Strukturen S und Prozessen P [51] bildet nach erfolgreicher Umsetzung in der Fabrik das Kapazitätsangebot ab. Ziel des Moduls ist die durch proaktiv, rekonfigurierbare Produktionssegmente organisatorisch und räumlich strukturierte Re-Assembly-Fabrik. Dazu sind Produktionssegmente zu bilden, welche sich der Strategie der Gruppentechnologie bedienen und als quasi-autonome und produktorientierte Einheiten innerhalb des Produktionssystems beschrieben werden können [35, 52]. Das gesamte Produktionssystem der Re-Assembly-Fabrik soll in die Lage versetzt werden, sich durch Zu- und Abschaltung der Produktionssegmente im Rahmen der Rekonfiguration aufwandsarm (technisch und wirtschaftlich) neuen Kapazitätsbedarfen anzupassen. Nach der Rekonfiguration erfolgt der Betrieb der Re-Assembly-Fabrik.

Zur Bildung der Produktionssegmente werden die in Modul M3 definierten DSM aufgegriffen. Die zu bildenden Produktionssegmente werden durch ein Clusteranalyseverfahren basierend auf dem Idicula-Gutierrez-Thebeau-Algorithmus (IGTA) [53] durchgeführt. Dieser Algorithmus ist insbesondere für die Strukturierung von DSM ausgelegt. Der Algorithmus zielt auf die Reduktion von Kosten und Aufwand ab [54]. Dabei sind virtuelle und physische Rekonfigurationen berücksichtigt. Das Ergebnis ist den in Modul 1 identifizierten Re-Assembly-Prozess zuzuordnen.

Die erzeugten Produktionssegmente hinsichtlich Fertigungs- und Montageorganisationen und -ablaufstrukturen zu charakterisieren. Dazu werden qualitative Anforderungen je Segment mit den qualitativen Eigenschaften der Organisations- und Ablaufstrukturen verglichen. Es ist eine systematisierte Entscheidung auf Basis einer Vielzahl an Kriterien zu treffen. Diese Entscheidung erfolgt daher mithilfe der Methode des Analytic Hierarchy Process (AHP) [55] je Produktionssegment und Planungsperiode.

Vor Abschluss der Methodik und Übergabe an die Umsetzung, wird dem Fabrikplanenden für den Übergang von Planungsperiode n zu Planungsperiode n+1 die Handlungsoptionen je Produktionssegment dargelegt und bewertet. Die Bewertung erfolgt dabei unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten. Dazu werden technisch ideale und ökonomisch sinnvolle Handlungsoptionen dargelegt und mithilfe des Realoptionsansatzes auf Basis ermittelter Flexibilitätsoptionen und resultierender Cashflows bewertet. Die Entscheidung trifft am Ende der Fabrik-

planende. Die Modellierung des Bewertungs- und Entscheidungsprozesses erfolgt mithilfe der Business Prozess Model and Notation 2.0 (BPMN 2.0) [56]. Diese Methode ist geeignet den Fabrikplanungsprozess mit seinen Aktivitäten und Entscheidungen präzise darzustellen. Abschließend wird an die Umsetzung zur Rekonfiguration übergeben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag skizziert ein Konzept zur dynamischen Dimensionierung von Re-Assembly-Fabriken unter Einbindung einer digitalen Produktakte. Eine digitale Produktakte und die darin enthaltenen Informationen sollen genutzt werden, die inhärenten Unsicherheiten der Circular Economy zu beherrschen. Durch eine proaktive Rekonfiguration des Produktionssystems einer Re-Assembly-Fabrik werden höhere Änderungsgeschwindigkeit in der Wandlungsfähigkeit ermöglicht. Damit sollen Re-Assembly-Fabriken so geplant werden können, dass sie die notwendigen quantitativen und qualitativen Kapazitätsbedarfe für eine industrielle Aufbereitung bereitstellen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere im Bereich einer digitalen Produktakte, die lebenszyklusübergreifenden Daten aus Entwicklung, Produktion und Nutzung enthält. Die Anforderungen der Fabrikplanung an eine digitale Produktakte sind zu spezifizieren. Eine digitale Produktakte ist ein zentraler Befähiger für die Industrialisierung der Re-Assembly. Im Gegenzug sind Vorgehen zur Fabrikplanung auf die neuen Daten aus einer digitalen Produktakte und den daraus abgeleiteten Informationen zu adaptieren. Vorgehen zur Fabrikplanung sind auf die höheren Änderungsgeschwindigkeiten sowie die inhärenten Unsicherheiten anzupassen. Das vorgestellte Konzept bedarf einer weiteren Detaillierung hinsichtlich der verwendeten Methoden und mathematischen Lösungsansätze. Aufbauend auf einer Detaillierung der vorgestellten Methodik ist das Konzept hinsichtlich Übertragbarkeit, Skalierbarkeit sowie Anwendbarkeit unter realen Bedingungen zu bewerten.

Literatur

- [1] Gavazzi, P.; Dobrucka, R.; Haubold, S.: The impact of climate change on selected areas of the world economy. *Research on Enterprise in Modern Economy - theory and practice (REME)* (2023), Vol. 1 No. 36, S. 4–16
- [2] Schuh, G.; Schmitz, S.; Lukas, G. et al.: Ordnungsrahmen für eine zirkuläre Produktionswirtschaft. Tagungsband (2023), S. 304–334
- [3] Lundmark, P.; Sundin, E.; Björkman, M.: Industrial Challenges within the Remanufacturing System. *Proceedings of the 3rd Swedish Production Symposium 2009* (2009), S. 132–138. Internet: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A375722&dswid=1118>. Zugriff am 20.12.2010.
- [4] Burggräf, P.; Schuh, G.: *Fabrikplanung. Handbuch Produktion und Management*. 4. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg 2021
- [5] Schuh, G.; Zeder, T.: Ein Beitrag zur probabilistischen Nachweisführung von bestehenden Tragwerken mit NLFEM und UQ-Lab. *Nachrechnung einer bestehenden Straßenbrücke in Stahlverbundbauweise*. Wiesbaden, Germany, Heidelberg: Springer Vieweg 2023
- [6] Potting, J.; Hekkert, M.; Worrel, E. et al.: Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain 2017
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik; VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: Deutsche Normsroadmap Circular Economy 2023. Internet: <https://www.din.de/resource/blob/892606/06b0b608640aadd63e5dae105ca77d8/normsroadmap-circular-economy-data.pdf>.
- [8] Bandh, S. A.; Malla, F. A.; Hoang, A. T. (Hrsg.): *Renewable Energy in Circular Economy*. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer 2023
- [9] Sauvé, S.; Bernard, S.; Sloan, P.: Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. *Environmental Development* 17 (2016), S. 48–56
- [10] Ghisellini, P.; Cialani, C.; Ulgiati, S.: A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* 114 (2016), S. 11–32
- [11] 91472: DIN SPEC 91472
- [12] Schuh, G.; Prote, J.-P.; Gützlaff, A. et al.: Internet of Production: Rethinking production management. In: Wulfsberg, J. P.; Hintze, W.; Behrens, B.-A. (Hrsg.): *Production at the leading edge of technology*, S. 533–542. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019.
- [13] Schuh, G.; Mauß, W.; Potente, T. et al.: *Green Re-Assembly Upgrade Factory 2023*
- [14] 5200: VDI 5200 Blatt 1
- [15] Westkämper, E.; Spath, D.: *Digitale Produktion*. Springer Berlin Heidelberg 2013
- [16] Westkämper, E.; Zahn, E.: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009
- [17] Nyhuis, P.; Klemke, T.; Wagner, C.: *Wandlungsfähigkeit. ein systematischer Ansatz*. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, S. 1–19. Berlin: GIT-Verlag 2010
- [18] Grundig, C.-G.: *Fabrikplanung. Planungssystematik und Methoden und Anwendungen*. München: Hanser 2021
- [19] Aurich, J. C.; Steimer, C.; Meissner, H. et al.: Einfluss von Industrie 4.0 auf die Fabrikplanung. *Effects of the special characteristics of cyber-physical production systems on factory planning*. *wt Werkstatttechnik online* 105 (2015), Nr. 04, S. 190–194. Zuletzt aufgerufen am 04.06.2024.
- [20] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.
- [21] vom Brocke, J.; Simons, A.; Niehaves, B. et al.: *RECONSTRUCTING THE GIANT: ON THE IMPORTANCE OF RIGOUR IN DOCUMENTING THE LITERATURE SEARCH PROCESS*. ECIS 2009 Proceedings (2009). Internetadresse: <https://aisel.aisnet.org/ecis2009/161>
- [22] Booth, A.: „Brimful of STARLITE“: toward standards for reporting literature searches. *Journal of the Medical Library Association : JMLA* 94 (2006), Nr. 4, 421-9, e205
- [23] Huster, S.; Rosenberg, S.; Glöser-Chahoud, S. et al.: Remanufacturing capacity planning in new markets—effects of different forecasting assumptions on remanufacturing capacity planning for electric vehicle batteries. *Journal of Remanufacturing* 13 (2023), Nr. 3, S. 283–304. Internet: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85173964621&doi=10.1007%2fs13243-023-00130-3&partnerID=40&md5=17026b1c81c647a03519264e5cdedf0e>.
- [24] Jurczyk-Bunkowska, M.: Tactical manufacturing capacity planning based on discrete event simulation and throughput accounting: A case study of medium sized production enterprise. *Advances in Production Engineering And Management* 16 (2021), Nr. 3, S. 335–347. Internetadresse: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120809742&doi=10.14743%2fapem2021.3.404&partnerID=40&md5=f299d7ccae6226bd35b001f2cd8115>.
- [25] J. Niemann; A. Schlegel; M. Putz: Method for Capacity Planning of Changeable Production Systems in the Electric Drives Production. In: 2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC), S. 1–6 2019
- [26] Goodall, P.; Sharpe, R.; West, A.: A data-driven simulation to support remanufacturing operations. *Computers in Industry* 105 (2019), S. 48–60
- [27] Acerbi, F.; Sasanelli, C.; Taisch, M.: A conceptual data model promoting data-driven circular manufacturing. *Operations Management Research* 15 (2022), 3-4, S. 838–857
- [28] Kerin, M.; Pham, D. T.: Smart remanufacturing: a review and research framework. *Journal of Manufacturing Technology Management* 31 (2020), Nr. 6, S. 1205–1235
- [29] Kampker, A.; Hollah, A.; Triebes, J. et al.: Remanufacturing of electric vehicles: Evaluation of economic potential. In: 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT), Cape Town, South Africa, 15.02.2019 - 17.02.2019, S. 122–127. IEEE 2019
- [30] Ardi, R.; Aditiya, G. P.; ACM: Remanufacturing Capacity Planning Strategy for Multigeneration Television Products in Closed Loop Supply Chain: A Causal Loop Modeling with Initial Result. In: 2019 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL AND BUSINESS ENGINEERING (ICIBE 2019), S. 143–147 2019
- [31] Reddy, K. N.; Kumar, A.: Capacity investment and inventory planning for a hybrid manufacturing–remanufacturing system in the circular economy. *International Journal of Production Research* 59 (2021), Nr. 8, S. 2450–2478. Internet: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85120809742&doi=10.14743%2fapem2021.3.404&partnerID=40&md5=f299d7ccae6226bd35b001f2cd8115>.

uri?eid=2-s2.0-85081404719&doi=10.1080%2f00207543.2020.1734681&partnerID=40&md5=77b22125bdd42219e965202d18252575.

[32] Mansour, H.; Afefy, I. H.; Taha, S. M.: Simultaneous layout design optimization with the scalable reconfigurable manufacturing system. *Production Engineering* 17 (2023), 3-4, S. 565–573. Internet: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85139653077&doi=10.1007%2fs11740-022-01168-1&partnerID=40&md5=204c5215b45c3b98924b6ea695cb2f99>.

[33] Zhang, Z.; Guan, Z.; Fang, W. et al.: DYNAMIC VIRTUAL CELLULAR RECONFIGURATION FOR CAPACITY PLANNING OF MARKET-ORIENTED PRODUCTION SYSTEMS. *Journal of Industrial and Management Optimization* 18 (2023), Nr. 3, S. 1611–1635. Internetadresse: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85141253103&doi=10.3934%2fjimo.2022009&partnerID=40&md5=c2d63981ed455907436b02e03da6f36b>.

[34] Koren, Y.; Wang, W.; Gu, X.: Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 55 (2017), Nr. 5, S. 1227–1242. Internet: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84958522729&doi=10.1080%2f00207543.2016.1145821&partnerID=40&md5=31644b8fdf5e4b6561e979ae9bcb8abe>.

[35] Wildemann, H.: Die modulare Fabrik. Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. München: TCW-Transfer-Centrum 1994

[36] Luckert, M.: Potenzial der Fertigungssegmentierung zur Erhöhung der produktionslogistischen Leistungsfähigkeit. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Apprimus Verlag

[37] Patzak, G.: Systemtechnik, Planung komplexer innovativer Systeme. Grundlagen, Methoden, Techniken. Berlin, New York: Springer-Verlag 1982

[38] Koch, S.: Methodik zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken im Maschinen- und Anlagenbau. Aachen: Apprimus-Verl. 2011.

[39] Döring, S. T.: Konfliktmanagement in der technischen Auftragsabwicklung im Werkzeugbau. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2010. Aachen: Apprimus-Verl. 2010

[40] Heimes, H. H.: Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2014. Aachen: Apprimus-Verl. 2014

[41] Haberfellner, R.: Systems engineering. Fundamentals and applications. Cham: Birkhäuser 2019

[42] Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien [etc.]: Springer 1973.

[43] Haunreiter, A.: Unsicherheitsmanagement von Produktanforderungen in der Entwicklung von Hochvolt-Batteriesystemen. Dissertation 2021

[44] Reims, P.: Methodik zur Nutzung von Skaleneffekten in der Produktion am Beispiel von Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellensystemen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Apprimus Verlag 2024

[45] Fölling, C.: Komplexitätsbeherrschung durch hybride Montageplanung. Dissertation, RWTH Aachen, Aachen 2022

[46] Barbrook-Johnson, P.; Penn, A. S.: Systems Mapping. How to build and use causal models of systems. Cham: Springer International Publishing; Imprint Palgrave Macmillan 2022

[47] Rümpe, B.: Agile Modellierung mit UML. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012.

[48] European Parliament: Digital product passports: enhancing transparency & consumer information. Internet: <https://www.europarl.europa.eu>.

eu/committees/en/digital-product-passports-enhancing-tran/product-details/20220510CHE10181. Zuletzt aufgerufen am 24.08.2024

[49] Broß, F. R.: Dimensionierung indirekter Bereiche auf Basis unscharfer Daten. München: utzverlag 2020

[50] Steward, D. V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. *IEEE Transactions on Engineering Management* EM-28 (1981), Nr. 3, S. 71–74

[51] Schmidgalla, H.: Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge: im Auftrag des VDA-AK Arbeitsgruppe „Rechnerunterstützte Fabrikplanung“. München: Carl Hanser 1995

[52] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014

[53] Borjesson, F.; Hölttä-Otto, K.: Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix. In: Volume 3: 38th Design Automation Conference, Parts A and B. ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Chicago, Illinois, USA, 12.08.2012 - 15.08.2012, S. 921–930. American Society of Mechanical Engineers 2012

[54] Stürgwolt, B. W.: A Model-Based Systems Engineering Approach for Developing Modular System Architectures. Dissertation, The School of Engineering and Applied Science of The George Washington University, Washington D.C. 2022

[55] Saaty, T. L.; Vargas, L. G.: Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. New York, Heidelberg: Springer 2012.

[56] Gadatsch, A.: Geschäftsprozesse analysieren und optimieren. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2022



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.
Günther Schuh
Foto: RWTH Aachen

Dr.-Ing. Esben Schukat

Nils Lehde genannt Kettler,
M. Sc. RWTH
n.lehde@wzl.rwth-aachen.de
Tel. +49 151 / 4288 9531

Friederike von Danwitz, M. Sc.

Werkzeugmaschinenlabor WZL
der RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

LIZENZ



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