

Vom Single-Purpose zur Re-X

EaaS-Ansatz für kreislauffähige Produktionssysteme

M. Weismüller, O. Petrovic, C. Brecher, V. Schubert, S. Eichhorn, A. Werner, F. Breitenbach, A. Dideban, M. Kanesamoorthy

ZUSAMMENFASSUNG Hohe Volatilität erfordert flexible Produktion. Das Projekt „AutoPilot“ entwickelte hierfür ein zirkuläres Produktionszellenkonzept, das physische Modularität (unter anderem Holzverbundstoffe) mit digitalen Zwillingen verknüpft. Die Validierung belegt gesteigerte Wandlungsfähigkeit und reduzierten Carbon Footprint. Durch datenintegriertes Equipment-as-a-Service werden zudem Kosten gesenkt und die Wiederverwendung gefördert. Der Beitrag stellt Realisierung und Betreibermodelle vor.

STICHWÖRTER

Nachhaltigkeit, Automobilindustrie, Equipment-as-a-Service

EaaS approach for circular production systems – From single-purpose to Re-X

ABSTRACT High volatility requires flexible production systems. The ‘AutoPilot’ project developed a circular production cell concept combining physical modularity (e.g., wood veneer composites) with digital twins. Validation confirms increased adaptability and a reduced carbon footprint. Furthermore, data-integrated equipment-as-a-service lowers costs and promotes component reuse. This paper presents the technical implementation and associated operator models.

1 Einleitung und Motivation

Die Transformation der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität ist gekennzeichnet durch eine hohe Marktdynamik und verkürzte Innovationszyklen. Während klassische Verbrennerfahrzeuge oftmals Produktionslaufzeiten von sieben Jahren und mehr aufwiesen, sehen sich Hersteller (OEMs) und Zulieferer im Bereich der E-Mobilität mit volatilen Abrufzahlen und häufigen technischen Änderungen konfrontiert. Diese Volatilität steht im direkten Konflikt zu den heute vorherrschenden, starren Produktionskonzepten [1]. Dedizierte Fertigungslinien, welche für ein spezifisches Produkt optimiert sind („Single-Purpose-Anlagen“), bergen bei schwankender Nachfrage oder verfrühtem Modellwechsel das Risiko, zu sogenannten „Stranded Assets“ zu werden. Dies sind kapitalintensive Investitionsgüter, die vor Ende ihrer technischen Lebensdauer wirtschaftlich wertlos werden [2–4].

Neben der ökonomischen Herausforderung rückt die ökologische Bewertung der Produktion selbst zunehmend in den Fokus. Bisherige Ansätze zur Reduktion des PCF (Product Carbon Footprint) konzentrieren sich überwiegend auf das Endprodukt (zum Beispiel Batterieherstellung, Karosseriematerialien) oder den Energieverbrauch der Fabrik. Ein wesentlicher Hebel wird dabei oft vernachlässigt: die „grauen Emissionen“, die in den Betriebsmitteln selbst gebunden sind [5]. Vorrichtungen, Ladungsträger und Fertigungszellen bestehen heute fast ausschließlich aus energieintensiven Materialien wie Stahl oder Aluminium [6]. Werden diese Betriebsmittel nach Projektende verschrottet, geht nicht nur der Materialwert verloren, sondern auch der darin gespeicherte ökologische Rucksack [7, 8].

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist ein Paradigmenwechsel von linearen Wirtschaftsmodellen hin zu zirkulärer Bewirtschaftung von Produktionsmitteln notwendig. Das Ziel ist, den kurzen Lebenszyklus der Produkte vom potenziell langen Lebenszyklus der Betriebsmittel beziehungsweise Produktionsanlage zu entkoppeln.

Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse des im Projekt „AutoPilot“ entwickelten Ansatzes zur Entkopplung der Lebenszyklen vor. Nach einer Erläuterung des Stands der Technik, des technischen Konzepts der physischen Zellen und der digitalen Plattformarchitektur, erfolgt eine Validierung anhand zweier industrieller Demonstratoren. Abschließend werden die ökologischen und ökonomischen Potenziale quantifiziert, um die Tragfähigkeit zirkulärer Produktionssysteme für die industrielle Praxis aufzuzeigen.

2 Stand der Technik

Während für Endprodukte wie etwa das Automobil in der Fahrzeugproduktion bereits vielfältige Recycling- und Kreislaufkonzepte existierten, bilden die Produktionsmittel einen blinden Fleck in der Nachhaltigkeitsstrategie und werden häufig nicht wiederverwendet [9]. Der Stand der Technik in der Industrie ist hier oft von starren, linearwirtschaftlichen Strukturen geprägt [10]. Verschiedene Forschungsarbeiten betrachten daher Ansätze, diese linearwirtschaftlichen Strukturen aufzubrechen [11] und die Nutzungsphase der Produktionsmittel durch Rekonfigurierbarkeit zu erhöhen.

Das Forschungsprojekt „Reed“ [12] betrachtet die Entwicklung einer „Manufacturing-as-a-Service“ (MaaS)-Plattform, über die Hersteller Technologien, Ausrüstungen und Dienstleistungen

für die Produktion sperriger Teile im Investitionsgüterbereich bereitstellen. Das Ziel ist, die Produktivität zu maximieren und die Umweltbelastung zu minimieren, wobei Transparenz und Rückverfolgbarkeit durch einen blockchain-basierten digitalen Produktpass erzielt werden soll.

Das EU-geförderte Forschungsprojekt „ReconCycle“ [13] untersucht die Entwicklung einer selbst-rekonfigurierbaren Roboterzelle, die das Ziel verfolgt, die Demontage einer Vielzahl von elektronischen Geräten zu ermöglichen. Ein Lösungsansatz diente dazu, die selbstständige Neukonfiguration der Zelle bei einem Wechsel eines Gerätemodells durch Kombination sensomotorischer Lernansätze und anderer KI-Techniken durchzuführen.

Zwar werden in den genannten Projekten auch rekonfigurierbare und flexible Fertigungsplattformen untersucht [14], jedoch wird die zirkuläre Nutzung von Betriebsmitteln zur Steigerung der Nachhaltigkeit außer Acht gelassen. Insbesondere die ökologischen und ökonomischen Potenziale neuer Betreibermodelle, wie „Equipment as a Service“ (EaaS), sowie der Digitalisierung und Wiederverwendung einzelner Komponenten wurden in bisherigen Arbeiten vernachlässigt.

Diese Defizite bildeten die zentrale Motivation für „AutoPilot“, welche darin bestand, die Diskrepanz zwischen hochflexiblen Produktanforderungen und starrer Produktionsinfrastruktur durch zirkuläre, modulare und digital überwachte Betriebsmittel zu schließen.

3 Lösungsansatz

Im Rahmen des Forschungsprojekts „AutoPilot“ wurde ein ganzheitlicher Lösungsansatz entwickelt, um die Diskrepanz zwischen langlebigen Produktionsmitteln und kurzzyklischen Produkten aufzulösen. Dieser basiert auf den drei Säulen:

1. Physische Modularität und Materialsubstitution: Der Einsatz geeigneter biobasierter Holz- und biobasierter Kunststoffwerkstoffe in tragenden und formgebenden Strukturen und eine modulare Bauweise verbessern die Nachhaltigkeit durch eine initiale Reduktion des CO₂-Fußabdrucks und einer ermöglichten Wiederverwendung von Komponenten [15, 16].
2. Digitale Durchgängigkeit: Durch die Abbildung jedes Betriebsmittels als digitalen Zwilling unter der beispielhaften Verwendung der Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS) wird es ermöglicht, Umbauten simulativ abzusichern, PCF dynamisch zu kalkulieren und Re-Use-Potenziale datenbasiert zu identifizieren.
3. Neue Betreibermodelle: Die durch Säule 1 und 2 gegebene Wandlungsfähigkeit des Produktionssystems bildet die Basis für neue Geschäftsmodelle, wie EaaS-Modelle [17], bei welchen Betriebsmittel nicht mehr gekauft, sondern nutzungsorientiert abgerechnet werden, was wiederum zur Einsparung von Produktionskosten und Steigerung der Nachhaltigkeit führt.

Das entwickelte System im Projekt „AutoPilot“ basiert auf der Hypothese, dass eine wirtschaftliche Kreislaufführung von Betriebsmitteln und die Etablierung neuer Betreibermodelle (wie EaaS) nur durch das Zusammenspiel dieser wesentlichen Faktoren möglich sind.

In all diesen drei Bereichen wurden im Projekt neue Ansätze entwickelt. Durch den physischen Aufbau einer Referenzzellplattform, der „ReStackCell“, sowie einer prototypischen IT-Infrastruktur für die digitale Plattform wurde der Einsatz und das Zusammenspiel zwischen EaaS-Anbietern und EaaS-Anwendern

erprobt. Die Plattform diene als primärer Versuchsträger und wurde für die Entwicklung der modularen Betriebsmittel, der digitalen Zwillinge und Services sowie der Integrationsfunktionen weiterverwendet.

Basierend auf dieser Referenzplattform wurde eine zweite Plattform, die „ReStackCell II“ entwickelt. Diese stellt eine Plattform dar, bei welcher die Materialsubstitution maximiert und auf die gesamte Anlageneinhausung angewandt wurde.

Ein zentrales Merkmal beider Zellen ist die Trennung von Grundkonfiguration (wie Rahmen, Roboter, Steuerung, Ventilinsel) und Prozessmodulen zur Erweiterung. Dies betrifft sowohl die physischen Betriebsmittel als auch deren digitale Abbildungen in den digitalen Zwillingen. Während die Grundkonfiguration über mehrere Produktlebenszyklen hinweg unverändert bleiben kann, lassen sich die Prozessmodule (Schrauber, Greifer, Zuführungen) flexibel und produktspezifisch austauschen. Die parallele Verfügbarkeit beider Systeme erfüllte einen doppelten Zweck: Zum einen ermöglichte sie den direkten Benchmark zwischen konventioneller und bio-basierter Bauweise. Zum anderen fungierte das Setup als physische Validierungsumgebung für das Equipment-as-a-Service-Geschäftsmodell. Durch den Austausch von Modulen zwischen den Zellen konnten Szenarien wie die Rücknahme, Aufbereitung und der Wiedereinsatz (Re-X) von Betriebsmitteln sowie die Interoperabilität der Schnittstellen unter realen Bedingungen getestet werden. Die Koexistenz der Zellen ist somit Voraussetzung, um die entwickelten Plug-and-Produce-Technologien nicht nur theoretisch, sondern im operativen Wechselspiel zwischen einem simulierten „Service-Provider“ (Lager/Aufbereitung) und „Produzenten“ (aktive Zelle) nachzuweisen.

Für die Bewertung der ökologischen Effekte des Lösungsansatzes in AutoPilot wurde ein dreistufiges Szenarienmodell entworfen, welche gemäß DIN EN ISO 14040/44 durchgeführt wurde. Als Modellierungssoftware wurde „Umberto 11“ unter Rückgriff auf die Ecoinvent-Datenbank (v3.9) eingesetzt. Die ausgewählten Szenarien zur ökologischen und ökonomischen Bewertung sind wie folgt beschrieben:

- Szenario S01 (Status quo): Referenzsystem in konventioneller Bauweise mit einer „Cradle-to-Grave“-Betrachtung und linearem Lebenszyklus.
- Szenario S02 (Materialsubstitution): Einsatz-Werkstoffe mit geringerem PCF bei funktionaler Äquivalenz innerhalb der Betriebsmittel, bei linearem Lebenszyklus.
- Szenario S03 (Zirkulärsystem/EaaS): Betrachtung eines „erweiterten Lebenszyklus“ in Form eines „Cradle-to-Grave“ mit Re-X-Wiederverwendung. Dieser Ansatz wurde gewählt, um diepotenzielle Lastenverschiebung (Burden Shifting) durch die Kaskadierung des Holzmaterials in einen sekundären Lebenszyklus nicht zu vernachlässigen.

Ein Auszug der Annahmen der verschiedenen Szenarien sind in der **Tabelle** aufgeführt. Für umfangreichere Beschreibungen der Szenarien wird auf den Abschlussbericht des Projektes verwiesen [18].

4 Technische Realisierung

Die erste Generation „ReStackCell I“ (**Bild 1**, links) repräsentiert den aktuellen Industriestandard.

Die Tragstruktur besteht aus konventionellen stranggepressten Aluminiumprofilen. Als Ladungsträger und Vorrichtungsaufnahmen kommen gefräste Stahl- und Aluminiumplatten und additiv

Tabelle Annahmen zu betrieblichen Aspekten in jedem Szenario.

Betriebsaspekt	Szenario S01	Szenario S02	Szenario S03
Hauptnutzung	<ul style="list-style-type: none"> Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker muss beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker muss beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> Re-X-Berücksichtigung gemäß Re-X-Analyse Kein Techniker notwendig („Plug&Play“)
Wartung	<ul style="list-style-type: none"> Wartung jede 50'000 Zyklen Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker fährt mit notwendigen Teilen gemäß Wartungsplan Techniker muss beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> Wartung jede 50'000 Zyklen Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker fährt mit notwendigen Teilen gemäß Wartungsplan Techniker muss beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> Wartung jede 50'000 Zyklen Keine Re-X-Berücksichtigung Kein Techniker notwendig („Plug&Play“)
Anpassung	<ul style="list-style-type: none"> 1 Anpassung Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker muss für Produkteinrichtung beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> 1 Anpassung Keine Re-X-Berücksichtigung Techniker muss für Produkteinrichtung beim Kunden übernachten 	<ul style="list-style-type: none"> 1 Anpassung Re-X-Berücksichtigung gemäß Re-X-Analyse Kein Techniker notwendig („Plug&Play“)



Bild 1 ReStackCell I (links) und ReStackCell II (rechts). Fotos: WZL RWTH Aachen

gefertigte Komponenten aus Standard-Kunststoffen (zum Beispiel Polyamid) zum Einsatz. Diese Zelle dient im weiteren Verlauf als Basis für die Ökobilanzierung und Kostenanalyse.

Die zweite Generation „ReStackCell II“ (Bild 1, rechts) setzt diesen Ansatz der nachhaltigen Produktion konsequent um. Ziel war es, funktionale Äquivalenz zur Aluminium-Zelle bei minimiertem CO₂-Fußabdruck zu erreichen. Das Grundgestell und die tragenden Ebenen bestehen aus WVC (Wood Veneer Composite). Dies sind Hochleistungsleichtbauwerkstoffe, die eine ausreichende mechanische Leistungsfähigkeit bei deutlich geringerem Eigengewicht und negativen GWP (Global Warming Potential)-Werten durch die Kohlenstoffspeicherung im Holz besitzen. WVC entfalten ihr volles Potenzial im Strukturleichtbau.

Um zudem die nötige Wandlungsfähigkeit zu gewährleisten, wurde ein durchgängiges 50-mm-Lochraster-System entwickelt. Dies erlaubt die Montage von Komponenten (Roboterbasis, Zuführungen, Sensoren) ohne spanende Bearbeitung der Grundplatte. Die Verbindungen erfolgen über standardisierte Schraub- und Stecksysteme in Kombination mit Passbuchsen, die eine präzise und zerstörungsfreie Demontage und Re-Montage erlauben.

Um die Potenziale der Transformation zu erschließen, wurden auf beiden Plattformen Betriebsmittel entwickelt, die konzeptionell die zentralen Faktoren verinnerlichen: die Materialsubstitution, eine durchgängige modulare Granularität für physische wie auch digitale Komponenten sowie die Integration und Vernetzung für die datenbasierten Zusammenarbeit, beispielsweise durch die Integration und Abbildung von Sensor-Daten in digitalen Zwillingen und Geschäftsprozessen. In Bild 2 sind zwei während des Projektes entwickelte Betriebsmittel beispielhaft dargestellt.

5 Aufbau der digitalen Plattform

Die Realisierung wandlungsfähiger Fertigungszellen erfordert eine IT-Infrastruktur, die nicht nur Maschinendaten erfasst, sondern den gesamten Lebenszyklus der Betriebsmittel, von der Konstruktion über die Nutzung bis Re-X (Wiederverwendung/Aufbereitung) abbildet. Im Projekt AutoPilot wurde hierfür eine föderierte Architektur, die spezialisierte Systeme über standardisierte Schnittstellen verbindet, entwickelt.

Ein wesentliches Ergebnis des Projektes ist die Erkenntnis, dass die digitale Plattform nicht als ein einzelnes System fungieren

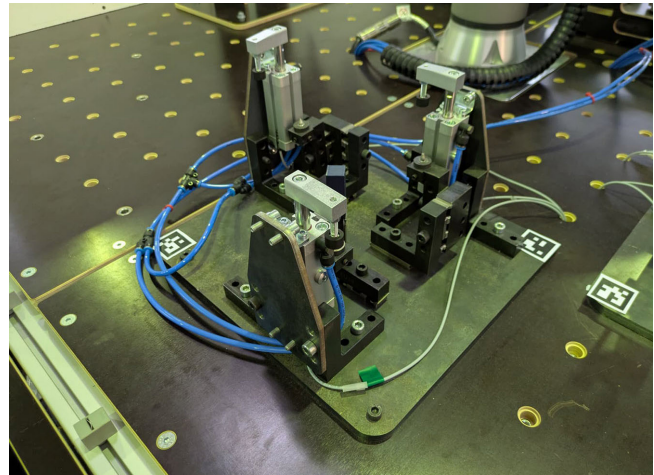
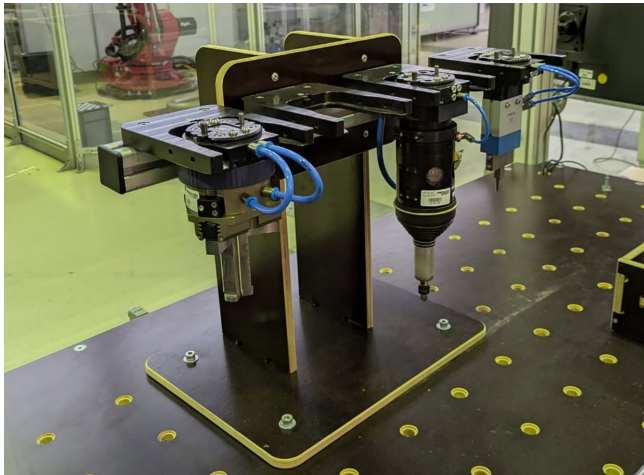


Bild 2 Beispielhafte Betriebsmittel der ReStackCell I und ReStackCell II; links: Werkzeugwechsler in Hybridbauweise; rechts: Modulare Spannvorrichtung für Gehäusekomponenten. Fotos: WZL RWTH Aachen

kann, sondern die Interaktion in und zwischen Datenräumen dezentral orchestriert werden muss. Neben der Berücksichtigung bestehender und sich parallel entwickelnder Datenraum-Initiativen, allen voran „Catena-X“ mit ihrer Referenzimplementierung „Tractus-X“, wurde das Augenmerk auf den Auf- und Ausbau der Handhabung von digitalen Zwillingen (DT) und ihrer Integration in Datenplattformen gesetzt. Hierbei werden insbesondere die im Engineering (Entwicklung/Konstruktion Re-X) sowie im Bereich Business/Operation (Produktion/Logistik) anfallenden Daten für Re-X und EaaS fokussiert.

5.1 Engineering-Datenraum und Digital Twin Backbone

Es wurde ein Konzept umgesetzt, das die statische Konstruktionswelt mit dem dynamischen Betriebsverhalten verknüpft. Der Integrationsansatz basiert auf dem Zusammenspiel dreier Systembereiche. Als „Single Source of Truth“ für die Produktstruktur dient der Engineering Backbone in Form des PLM (Product Lifecycle Management)-Systems (PTC Windchill), in welchem CAD-Daten, Stücklisten (Bill of Material, BoM) und geometrische Beschreibungen verwaltet werden. Für den operativen Betrieb und das Monitoring der digitalen Zwillinge kommt der Digital Twin Backbone auf Basis einer IIoT-Plattform (PTC ThingWorx) zum Einsatz, die als zentrale Verwaltungsschale für den EaaS-Anbieter fungiert. Die Synchronisation zwischen diesen Welten übernimmt die Plattform „CoreFace“ als Integrationsschicht. Die dritte Ebene stellt die Datenplattform dar, in der die Anbindung zu weiteren Datenräumen und im B2B (Business-to-Business) erfolgt.

Die Innovation für das Engineering liegt in der bidirektionalen Kopplung dieser Bereiche über CoreFace, wobei der Prozess über API-Endpunkte gesteuert wird und „Transformatoren“ die Datenlogik übersetzen. Der Workflow beginnt mit der Initialisierung: Werden im PLM-System neue Fertigungszellen oder Module freigegeben, extrahiert CoreFace die Stücklisteninformationen und überführt sie in den Digital Twin Backbone. Während der Instanziierung wird geprüft, ob für die Stücklistenpositionen passende funktionale Bausteine („Thing Shapes“) existieren. Dies können beispielsweise AAS-Submodelle für PCF-Daten oder Typenschilder sein. Diese Shapes werden dynamisch zu einem „Thing Template“ zusammengeführt, aus dem der digitale Zwilling als instan-

zierbares Objekt entsteht und wiederum der Datenplattform die nötige Basis für eine weitere Service- und B2B-Integration liefert.

Essenziell für ein effektives Re-X-Management ist zudem der Rückkanal. Da es nicht ausreicht, nur Neuteile zu verwalten, werden Nutzungsdaten wie Lastzyklen oder Reparaturen, die im Digital Twin Backbone anfallen, in das PLM-System zurückgespielt. Dies erlaubt es, bereits genutzte Komponenten im Engineering-Prozess als verfügbare Ressourcen zu identifizieren und deren Restlebensdauer fundiert zu bewerten.

5.2 Business- und Operation-Datenraum

Sind die Integrationsanforderungen des digitalen Zwillinges im Engineering-Bereich erfüllt, wie oben verdeutlicht, kann über den digitalen Zwilling in weiteren Lebenszyklusphasen eine datenbasierte Betriebsgrundlage für die Bereitstellung der EaaS- und der Re-X-Services geschaffen werden. In dieser müssen Anforderungen an Datensouveränität und B2B-Integration berücksichtigt werden, vor allem mit Blick auf EaaS-Geschäftsmodelle und die Interaktion zwischen Anbieter und Anwender. Anstatt alle Daten zentral zu speichern, folgt die Architektur dem Ansatz einer hybriden „Enterprise Integration Platform as a Service“ (EIPaaS), um Datenräume dezentral und übergreifend zu vernetzen.

Zentrales Element ist die Business Integration Suite (BIS)-Plattform, die als Datendrehscheibe fungiert. Sie bindet Subsysteme wie ERP, MES oder CRM wie auch Datenplattformen an, um die Erweiterung und Verbindung der Datenräume zu schaffen. Änderungen in einem System, etwa ein Serviceaufruf, werden so in Echtzeit an alle relevanten Partner und Systeme propagiert. Für die dezentrale Anbindung auf Cloud- und Edge-Ebene wurde als Integration Workspace der Asset Information Manager (AIM) genutzt und weiterentwickelt, um Daten zum digitalen Zwilling als AAS-Typ 1, 2 und 3 sowie die IT/OT-Integration der Steuerungssysteme sicherzustellen. Auf dieser Infrastruktur wurden spezifische Services und Datenprodukte (DP) für den digitalen Zwilling implementiert, darunter ein dynamischer PCF-Service, der auf Basis von Auditparametern und realen Zustandsdaten kontinuierlich CO₂-Bilanzen berechnet und via AAS und DSP (Dataspace Protocol) persistiert und benachrichtigt.

Um die Heterogenität der Quellsysteme aufzulösen, nutzt die digitale Plattform im Engineering wie auch in der Operation die

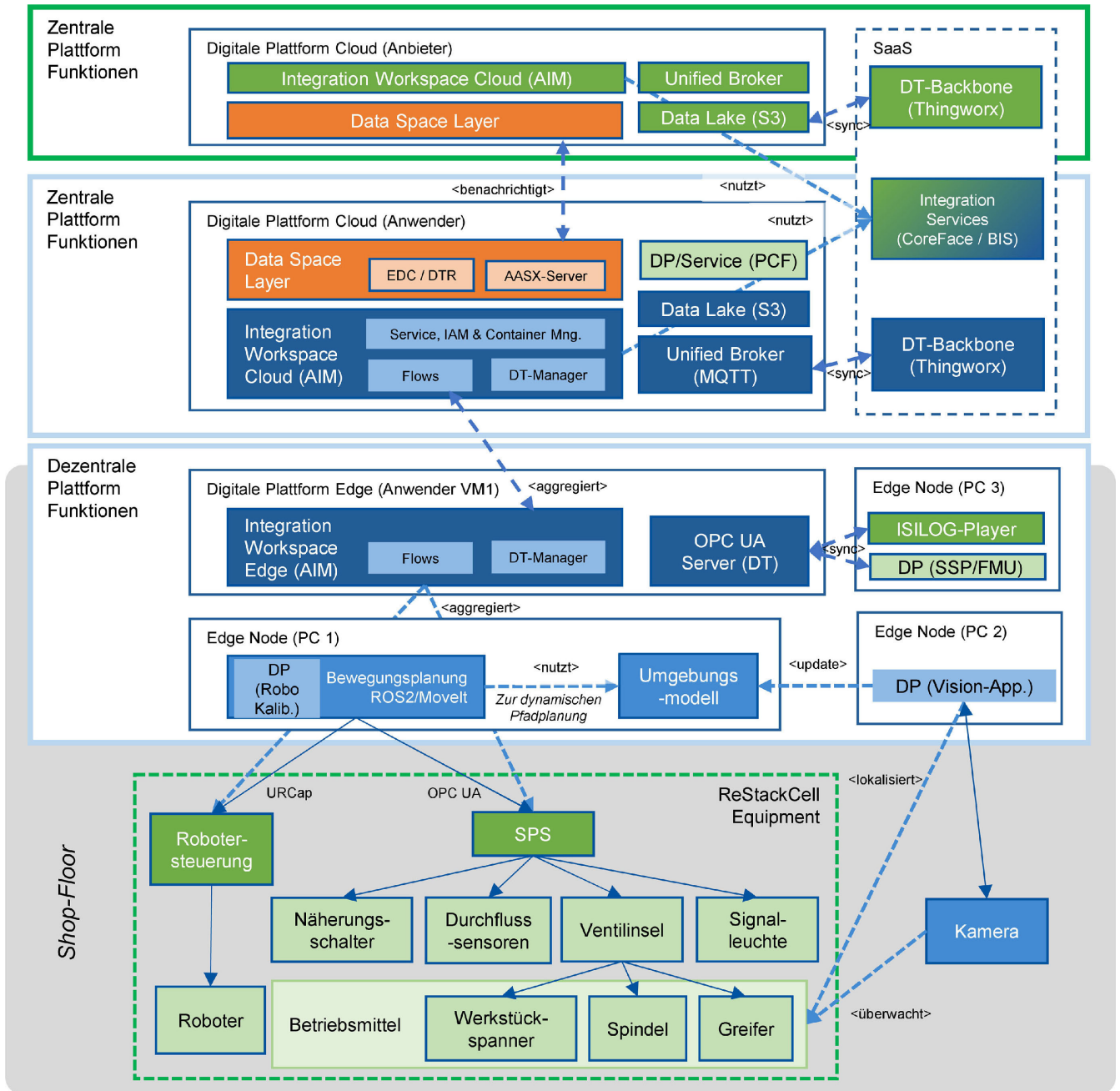


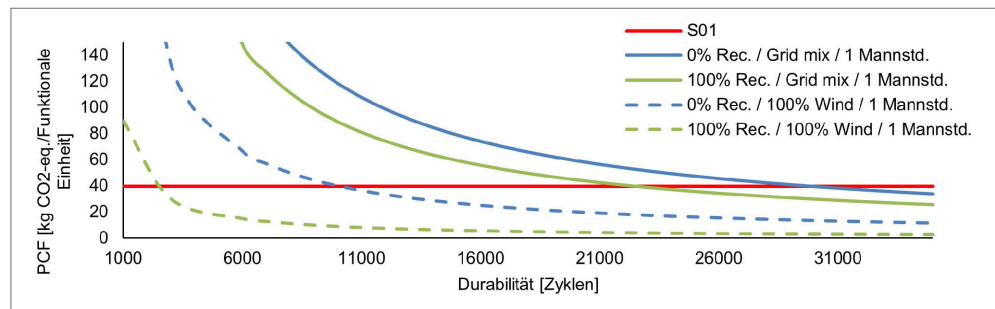
Bild 3 Architektur und Umsetzung der digitalen Plattform in der Phase „Betrieb“. Grafik: Seeburger AG

Strukturen der AAS sowie diese selbst als Standard. Die digitalen Zwillinge wurden über spezifische AAS-Submodelle realisiert, die in dem Digital Twin Backbone als „Thing Shapes“ und im IWS/AIM im AAS-Server, als Unified Broker (MQTT) und OPC-UA-Server implementiert oder im Data Lake abgelegt sind. Zur eindeutigen Identifizierung und Rückverfolgung dienen das Digital Nameplate sowie Hierarchical Structures, welche die BoM-Struktur abbilden. Für die ökologische Bewertung werden die im PCF-Service ermittelten Werte entlang der Lieferkette (Scope 1–3) in das Submodell Carbon Footprint überführt. Ergänzend dazu wurde das Submodell Provision of Simulation Models benutzt, um den Bezug und die Integration von Functional Mock-up Units (FMU) zu realisieren, wodurch ein Abgleich der Verhaltensweisen wie auch des Energieverbrauchs zur Laufzeit ermöglicht wur-

de. Für das Condition Monitoring im Kontext des EaaS-Betriebs wurden zudem Time Series Data zur persistenten Erfassung von Echtzeit-Betriebsdaten genutzt.

Diese Architektur ist in **Bild 3** dargestellt und ermöglicht es, Änderungen am physischen Produkt, wie etwa den Austausch eines Greifers, durch Anpassung der Shapes im digitalen Zwilling sofort abzubilden und konsistent über alle Systeme, vom Shop-floor bis zur Abrechnung und der Meldung und Interaktion mit dem Anbieter zu propagieren. Die zwischenbetriebliche Vernetzung zwischen EaaS- und Service-Anbietern sowie Anwendern erfolgt in Anlehnung an Konzepte von „GAIA-X“ und „Manufacturing-X“, insbesondere „Catena-X“ über die eingesetzten Komponenten zur Umsetzung des DSP und DCP (Decentralized Claims Protocol).

Bild 4 Sensitivitätsanalyse für PCF (Product Carbon Footprint) unter verschiedenen Annahmen (Polylactid-Greiferfinger). Grafik: Capgemini



Durch die Dienste, Mechanismen und Komponenten der digitalen Plattform konnte eine horizontale wie auch vertikale Erweiterung und Vernetzung eigener wie auch externer Datenräume erreicht werden, welche die Sicht des Engineerings wie auch Operations und Business im Kontext kreislauffähiger Produktions- und Betriebsmittel berücksichtigen.

Diese bilden die technologische Grundlage für die Skalierbarkeit zukünftiger Industrie-4.0-Anwendungen hin zu einer autonomen vorausschauenden Produktionssteuerung.

6 Validierung und Bewertung

Die Validierung des AutoPilot-Ansatzes erfolgte zweistufig: Zunächst wurde die technische Machbarkeit der Rekonfiguration im realen Betrieb nachgewiesen, anschließend erfolgte eine detaillierte ökologische und ökonomische Bewertung anhand des PCF und der Lebenszykluskosten (LCC).

6.1 Technische Wandlungsfähigkeit

Als Validierungsszenario diente der Transfer eines kompletten Montageprozesses von der konventionellen „ReStackCell I“ auf die „ReStackCell II“. Dieser Wechsel umfasste nicht nur den physischen Transfer, sondern auch die Variation der Betriebsmittelkonfiguration sowie des Zelllayouts.

Bei dem Transfer wurde deutlich, dass die Standardisierung der mechanischen Schnittstellen zwar eine hohe Kompatibilität gewährleistet, jedoch die geometrischen Eigenschaften der Trägerstruktur limitierend wirken können. Einige Prozessschritte konnten nicht transferiert werden, da die Nutzfläche der ReStackCell II kleiner ist und für dieses spezifische Bestandsmodul keine ausreichende Stellfläche bot. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, bei zukünftigen Re-X-Designs skalierbare Flächenreserven für Vollausstattungs-Szenarien einzuplanen.

Simultan zum physischen Transfer erfolgte die Integration der digitalen Zwillinge nahezu in Echtzeit, da diese ihre Informationen über die AAS digital transferieren können. In einem realen EaaS-Szenario standen dem neuen System somit sofort alle historisierten Informationen der Betriebsmittel zur Verfügung, zum Beispiel Belastungsszenarien über Verschleißdaten bis hin zu den exakten Koordinaten für die Roboteransteuerung. Die manuelle Neuaufnahme von Parametern bei der Inbetriebnahme entfiel vollständig, wodurch der „Plug-and-Produce“-Anspruch des Systems technisch validiert wurde. Dies reduzierte ebenfalls den Aufwand der Inbetriebnahme, da benötigte Roboterkoordinaten, Kollisionsmodelle und Bahnplanungsprogramme bereits vollständig vorlagen und lediglich gemäß dem gewählten Layout zusammengeführt werden mussten.

6.2 Ökologische Bewertung (PCF)

Die Product-Carbon-Footprint-Analyse zeigt, dass die Materialsubstitution im Wesentlichen von der Art der Komponente abhängt. Hier wird funktional zwischen den passiven, statischen Strukturkomponenten und den aktiven Funktionsbaugruppen unterschieden, welche die Hauptfunktionen der Fertigungszelle ausführen.

Bei den Strukturkomponenten, wie Ladungsträger und Tableau, dominieren in der Rohstoffemission im Status quo (S01) zu über 70 % Stahl und Aluminium, die Substitution durch Holzwerkstoff (S02) führt zu einer deutlichen Emissionsreduktion:

- Tableau: Reduktion des PCF um 91 %
- Ladungsträger (Aufbau): Reduktion um 64 %
- Ladungsträger (Unterbau): Reduktion um 38 % (begrenzt durch verbleibende Metall-Rollen/Achsen). Der biogene Kohlenstoffspeicher des Holzes überkompensiert hierbei die leicht erhöhten Emissionen in der thermischen Verwertung am Lebensende.

Bei den komplexen Funktionsbaugruppen, wie der Spannvorrichtung, ist das Potenzial der reinen Materialsubstitution bei einer Emissionsreduktion von lediglich 7 % gering. Kernkomponenten wie Pneumatikspanner oder Zylinder bleiben hier weiterhin aus Metall bestehen.

Für diese Komponenten besteht in der Anwendung von kreislauffähigem Design und service-orientierten Geschäftsmodellen das größte Potenzial (S03). Eine Re-X-Bewertungsmatrix analysiert dabei die individuellen Re-Use-, Repair- und Recyclingraten der Komponenten auf Basis des Designs, Materialität, Beanspruchung und Kompatibilität. Aus ersten Erfahrungswerten der Projektpartner wurde für die Spannvorrichtung eine Re-Use-Rate von 50 % für Einzelkomponenten und eine 10 %-ige Repair-/Remanufacturing-Rate für die funktionalen Pneumatikspanner angenommen.

Eine Untersuchung von additiv gefertigten Greiferfingern aus Polylactid (PLA) zeigte im Vergleich zu den konventionellen Bauteilen aus Aluminium eine geringere mechanische Haltbarkeit. Dies führt zu einem höheren PCF durch den Betrieb der PLA-Lösung und einem insgesamt schlechteren PCF-Ergebnis. Der PCF-Verlauf über den Nutzungszyklen ist in **Bild 4** dargestellt. Dies belegt die Notwendigkeit, bei der Bewertung der Komponenten sämtliche Lebenszyklusphasen und deren immanente Emissionen zu betrachten.

6.3 Ökonomische Bewertung (LCC) und Equipment-as-a-Service (EaaS)

Aus der Lifecycle-Costing-Analyse (LCC) ergeben sich bei den Materialsubstitutionen für die Herstellkosten keine wesent-

lichen Unterschiede im Vergleich zu konventionellen Materialien. Deutliche ökonomische Vorteile zeigen sich in der Anwendung von EaaS-Ansätzen in der Betriebsphase (S03).

Am Beispiel der Spannvorrichtung der ReStackCell konnten die Lebenszykluskosten durch den Wechsel auf ein EaaS-Modell mit „Plug-and-Play“-Wartung gegenüber dem Kaufszenario um 54 % gesenkt werden. Im konventionellen Geschäftsmodell werden durch Wartungen und Anpassungen hohe Personalkosten für oft mehrtägige Dienstreisen für Techniker verursacht. Dem gegenüber steht der eigenhändige Tausch von Modulen durch den Anwender und die Aufbereitung der Module durch den Anbieter unter der Berücksichtigung der entsprechenden Designanforderungen an Modularität und Kompatibilität.

Für die Betrachtung der Gesamtbilanz auf Systemebene der vollständigen ReStackCell ergibt sich im optimierten Kreislauf-szenario (S03) eine PCF-Reduktion von 64 % und eine Kostenreduktion von 24 % gegenüber dem Status Quo (S01).

Die Zahlen belegen, dass nachhaltige Produktion kein Kostentreiber, sondern vielmehr ein Innovationstreiber sein kann. Equipment-as-a-Service-Modelle evozieren wirtschaftlichen Erfolg für die Anwender bei geringerem Investitionsaufwand, höherer Effizienz und mehr Flexibilität. Die Umsetzung adäquater Ecodesign-Anforderungen, wie nachhaltige Materialapplikationen und Modularität des Equipments, bilden dabei die Grundlage für ein funktionierendes, kostenoptimiertes und nachhaltiges EaaS-Geschäftsmodell.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt „AutoPilot“ hat gezeigt, dass die Entkopplung von kurzzyklischen Produkt-Lebenszyklen (Fahrzeug) und langlebigen Produktionsmitteln (Anlage) technisch möglich und ökologisch wie ökonomisch vorteilhaft ist. Der entwickelte Ansatz einer zirkulären Produktionszelle verbindet dafür physische Modularität auf Basis nachwachsender Rohstoffe mit der digitalen Durchgängigkeit vernetzter Datenräume. Die zentralen Erkenntnisse sind:

1. Technik: Der Einsatz von Holz-Verbundwerkstoffen in Form von WVC für die Struktur der Fertigungszelle und von standardisierten Schnittstellen für die Prozessmodule ermöglicht eine flexible Nutzung im industriellen Umfeld. Der Aufwand der Umrüstung kann durch die automatisierte Übernahme der Daten aus den digitalen Zwillingen reduziert werden. Der Einsatz der AAS und entsprechender Submodelle zur Erweiterung der Datenräume im „Engineering“ und „B2B/Betrieb“ zeigte die Potenziale der vernetzten datenbasierten Zusammenarbeit auf, die für Re-X-Prozesse an Bedeutung gewinnen.
2. Ökologie: Für die statischen Komponenten (Ladungsträger, Tableau) wird durch den Einsatz von Holz in Form von WVC eine deutliche Reduktion des PCF um bis zu 91 % erzielt. Für die funktionalen Baugruppen sind Materialsubstitutionen weniger sinnvoll, Faktoren wie Langlebigkeit, Reparatur- und Upgrade-Möglichkeit sind hier entscheidend für eine optimale Gestaltung der Nutzung innerhalb des EaaS-Modells.
3. Ökonomie: Die Validierung des Equipment-as-a-Service-Modells zeigte Kostensenkungspotenziale von mehr als 50 % im gesamten Lebenszyklus. Dies wird hauptsächlich durch den Entfall kosten- und zeitintensiver Service-Einsätze und einer modularen Instandhaltung („Plug&Play“) erreicht.

Auch wenn heute die Auswirkungen der Betriebsmittel am Gesamt-PCF eines Fahrzeuges nur gering sind, so kann zukünftig durch die optimierte Nutzungsphase unter dem Einsatz klimafreundlicher Energie und einer nachhaltigeren Verwertung eine deutliche Steigerung des PCF-Impacts der Betriebsmittel erwartet werden.

Auf dem Weg dahin zählen weitere Maßnahmen zur Ertüchtigung der Re-X-Fähigkeit der Betriebsmittel sowie die Skalierung der AAS-Infrastruktur auf komplexere Supply Chains zu den wesentlichen Herausforderungen für die nächste Ausbaustufe der Gesamt-Roadmap im AutoPilot-Projekt. Darin werden industrielle Fertigungsunternehmen eingebunden, die in realen Produktionsumgebungen die ökonomische und ökologische Validierung des Geschäftsmodells vornehmen und dieses in eine Serienfertigung überführen können.

Technologieanbieter wie auch produzierende Unternehmen, die diesen Transformationspfad zu einer intelligenten, flexiblen und nachhaltigen Produktion in serviceorientierten Geschäftsmodellen mitgestalten wollen, sind eingeladen, sich an der Definition der nächsten Pilotanlagen zu beteiligen.

FÖRDERHINWEIS

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) unter dem Förderkennzeichen 02J21E000 im Rahmen der Maßnahme „MobilKreis“ gefördert.


DANKSAGUNG

Wir danken den Projektpartnern Capgemini, EDAG, Innoface, Johnson Electric, Igenium und Seeburger für die produktive Zusammenarbeit.

L i t e r a t u r

- [1] Khanna, K.; Kumar, R.: Reconfigurable manufacturing system: a state-of-the-art review. In: Benchmarking: An International Journal 26 (2019) 8, pp. 2608–2641, doi.org/10.1108/BIJ-05-2018-0140
- [2] Kampker, A.; Vallée, D.; Schnettler, A. (Hrsg.): Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Heidelberg: Springer 2018
- [3] Koren, Y.; Shpitalni, M.: Design of reconfigurable manufacturing systems. Journal of Manufacturing Systems 29 (2010) 4, pp. 130–141
- [4] Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F. et al.: Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals 48 (1999) 2, pp. 527–540, https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63232-6
- [5] Hansen, J. O.; Kampker, A.; Trieb, J.: Approaches for flexibility in the future automobile body shop: results of a comprehensive cross-industry study. Procedia CIRP 72 (2018), pp. 995–1002
- [6] Frischknecht, R.; Althaus, H.-J.; Bauer, C. et al.: The environmental relevance of capital goods in life cycle assessments of products and services. International Journal of Life Cycle Assessment 12 (2007), pp. 7–15, https://doi.org/10.1065/LCA2007.02.309
- [7] Allwood, J. M.; Cullen, J. M.: Sustainable materials: With both eyes open. Materials today 15 (2012) 9, p. 410, https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70169-4

- [8] Herrmann, C. et al.: Life Cycle Engineering and Sustainable Manufacturing. *Journal of Industrial Ecology* 18 (2014) 4, pp. 471–477, <https://doi.org/10.1111/jiec.12177>
- [9] Walla, W.; Kiefer, J.: Life Cycle Engineering – Integration of New Products on Existing Production Systems in Automotive Industry. In: Hesselbach, J.; Herrmann, C. (eds.): *Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Heidelberg: Springer 2011, pp. 207–212
- [10] Blanke, P.; Blondrath, A.; Petrovic, O., et al.: Sustainable Production with Circular Equipment – Opportunities and Challenges in Practice. In: Dröder, K.; Vietor, T. (Hrsg.): *Circularity Days 2024*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2025, pp. 217–228, https://doi.org/10.1007/978-3-658-45889-8_17
- [11] Maganha, I., Silva, C.; Ferreira, L.M.D.F. The layout design in reconfigurable manufacturing systems: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 105, (2019). pp. 683–700, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04190-3>
- [12] European Commission: REsponsive and REconfigurable value network for the manufacture of bulky parts (REED). Internet: cordis.europa.eu/project/id/101178405. Zugriff am 23.03 2026
- [13] European Commission: Self-reconfiguration of a robotic workcell for the recycling of electronic waste. Internet: cordis.europa.eu/project/id/871352. Zugriff am 23.03 2026
- [14] Özdemir, M.; Phanden, R. K.; Wang, L.: Realisation of responsive and sustainable reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 62 (2024) 8, pp. 2725–2746, <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2233625>
- [15] Eichhorn, S.; Kluge, P.; Müller, C. et al.: Substitution energieintensiver Stahl- und Aluminiumwerkstoffe durch nachwachsende Rohstoffe in der Fördertechnik – SubSTANCE. Schlussbericht. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz 2017. Internet: monarch.qucosa.de/id/qucosa%3A20803. Zugriff am 23.03 2026
- [16] Bengtsson, J.; Johansson, E.; Nilsson, J.: LCA (Life cycle assessment) of ACQ-treated Veneer Based Composite utility poles. *Journal of Cleaner Production* 124 (2016), pp. 383–391, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.130>
- [17] West, S.; Humbeck, P.; Rolle, M.: Equipment as a Service in Machine Tool Manufacturing: Unlocking Greater Value for All. *California Management Review*. Stand: 2025. Internet: cmr.berkeley.edu/2025/11/equipment-as-a-service-in-machine-tool-manufacturing-unlocking-greater-value-for-all. Zugriff am 23.03 2026
- [18] Weismüller, M.; Groß, T.; et. al.: Nachhaltige Fahrzeugproduktion durch eine wandlungsfähige Produktionszelle. Hannover: Technische Informationsbibliothek (TIB) 2023, <https://doi.org/10.34657/29565>

Marc-André Weismüller, M.Sc. 
m.weismueller@wzl.rwth-aachen.de

Oliver Petrovic, M.Sc. 
o.petrovic@wzl.rwth-aachen.de

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher 
c.brecher@wzl.rwth-aachen.de
Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.wzl.rwth-aachen.de

Dipl. Wi.-Ing. Viktor Schubert 
v.schubert@seeburger.de
Seeburger AG
Edisonstr. 1, 75015 Bretten
www.seeburger.com

Dr.-Ing. Sven Eichhorn
sven.eichhorn@ligenium.de
ligenium GmbH
Annaberger Str. 240, 09125 Chemnitz
www.ligenium.de/

Dipl.-Des. (FH) Axel Werner
axel.werner@capgemini.com
Capgemini Engineering
Birnbäumstücker 3, 38448 Wolfsburg
www.capgemini.com

Dr.-Ing. Frank Breitenbach
frank.breitenbach@edag-ps.com
EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG
Reesbergstr. 1, 36039 Fulda
www.edag-ps.com

Dipl.-Ing. Afschin Dideban
afschin.dideban@innoface.de
Innoface AG
Victor-Gollancz-Str. 5, 76137 Karlsruhe
www.innoface.com/de

Mayuvarunaan Kanamoorthy, M.Sc.
mayuvarunaan.kanamoorthy@johnsonelectric.com
Johnson Electric Aachen GmbH
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
www.johnsonelectric.com

LIZENZ



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