Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87

Modulare Montagezellen zur Umsetzung wandlungsfähiger Produktionssysteme

Realisierung modularer Montagezellen

A. Gaugenrieder, J. Möhrle, J. Fink, C. Härdtlein, R. Daub

ZUSAMMENFASSUNG Ein Instrument zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit von Montagesystemen ist die technische Wandlungsfähigkeit. Die Modularisierung ist ein Schlüsselfaktor der Wandlungsfähigkeit. In dieser Arbeit werden die unterschiedlichen Dimensionen der Modularisierung beschrieben. Die Umsetzung modularer Montagesysteme erfordert komplexe Schnittstellen zwischen den eingesetzten Modulen. Ein beispielhaftes modulares Montagesystem wird vorgestellt und dessen Rekonfigurationszeit gemessen.

STICHWÖRTER

Maschinenbau, Produktionstechnik, Entwicklung

Implementation of modular assembly cells - Modular assembly cells for implementing flexible production systems

ABSTRACT An instrument to increase the efficiency of assembly systems is technical adaptability. Modularization is a key factor in adaptability. This paper describes the different dimensions of modularization. The implementation of modular assembly systems requires complex interfaces between the modules used. An exemplary modular assembly system is presented and its reconfiguration time is measured.

Tabelle 1. Beschreibung der Wandlungsbefähiger [9, 10].

Wandlungsbefähiger	Bedeutung
Skalierbarkeit	Skalierbarkeit bedeutet die technische Atmungsfähigkeit (Erweiter- und Reduzierbarkeit) von Fabrikmodulen.
Universalität	Unter Universalität wird die Eigenschaft von Fabrikmodulen verstanden, für verschiedene Aufgaben, Anforderungen und Funktionen verwendbar zu sein. Diese Eigenschaft wird durch eine entsprechende Gestaltung und (Über-)Dimensionierung der Fabrikmodule erzielt.
Kompatibilität	Kompatibilität bedeutet die Vernetzungsfähigkeit von Fabrikmodulen bezüglich Material, Medien und Energie.
Mobilität	Mobilität bedeutet die örtliche Beweglichkeit von Fabrikmodulen.
Modularität	Module sind standardisierte, vorgeprüfte Einheiten, die autonom agieren und eine hohe Austauschbarkeit aufweisen.

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen sind verschiedenen internen und externen Einflüssen ausgesetzt [1]. Wesentliche Wandlungstreiber sind Mengenänderungen, zunehmende Individualisierung, wachsende Variantenanzahl, kürzere Produktlebenszyklen und neue Technologien [2]. Trotz der Unwägbarkeiten dieser Wandlungstreiber ist zum Erhalt des Markterfolgs eine hohe Wirtschaftlichkeit der Unternehmen erforderlich [3]. Um den wechselnden Einflüssen gerecht zu werden, ist eine Anpassung des Unternehmens und somit auch der Wandlungsobjekte, wie der Montagesysteme, nötig. Die Wandlungstreiber müssen vom Unternehmen analysiert und eine Wandlungsstrategie abgeleitet werden. Die Wandlungsstrategie wirkt sich überwiegend auf die Anlagenlebenszyklusphasen der Planung und des Betriebs aus. Produzierende Unternehmen können in folgende Systemebenen eingeteilt werden: Produktionsnetzwerk, Produktionsstandorte, Produktionssegmente, Produktionssysteme, Zellen und Arbeitsplätze. Dabei wird auf allen Systemebenen Wandlungsfähigkeit gefordert [4].

Die technische Wandlungsfähigkeit erlaubt die aufwandsarme Anpassung von Betriebsmitteln an sich verändernde Produkte, Prozesse oder Mengen [5]. Die hierbei auftretende strukturelle Änderung wird Rekonfiguration genannt [6]. Wandlungsbefähiger sind Systemeigenschaften, welche die Veränderungsfähigkeit eines Systems erhöhen. Sie stellen damit einen elementaren Baustein in der Anlagenentwicklung dar [7]. In der Literatur gibt es unterschiedliche Definitionen für den Begriff „Wandlungsbefähiger“. Im Bereich der Produktionssysteme sind die Wandlungsbefähiger aus **Tabelle 1** gebräuchlich [8–10]. Wandlungsfähigkeit ermöglicht es Unternehmen, mit geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

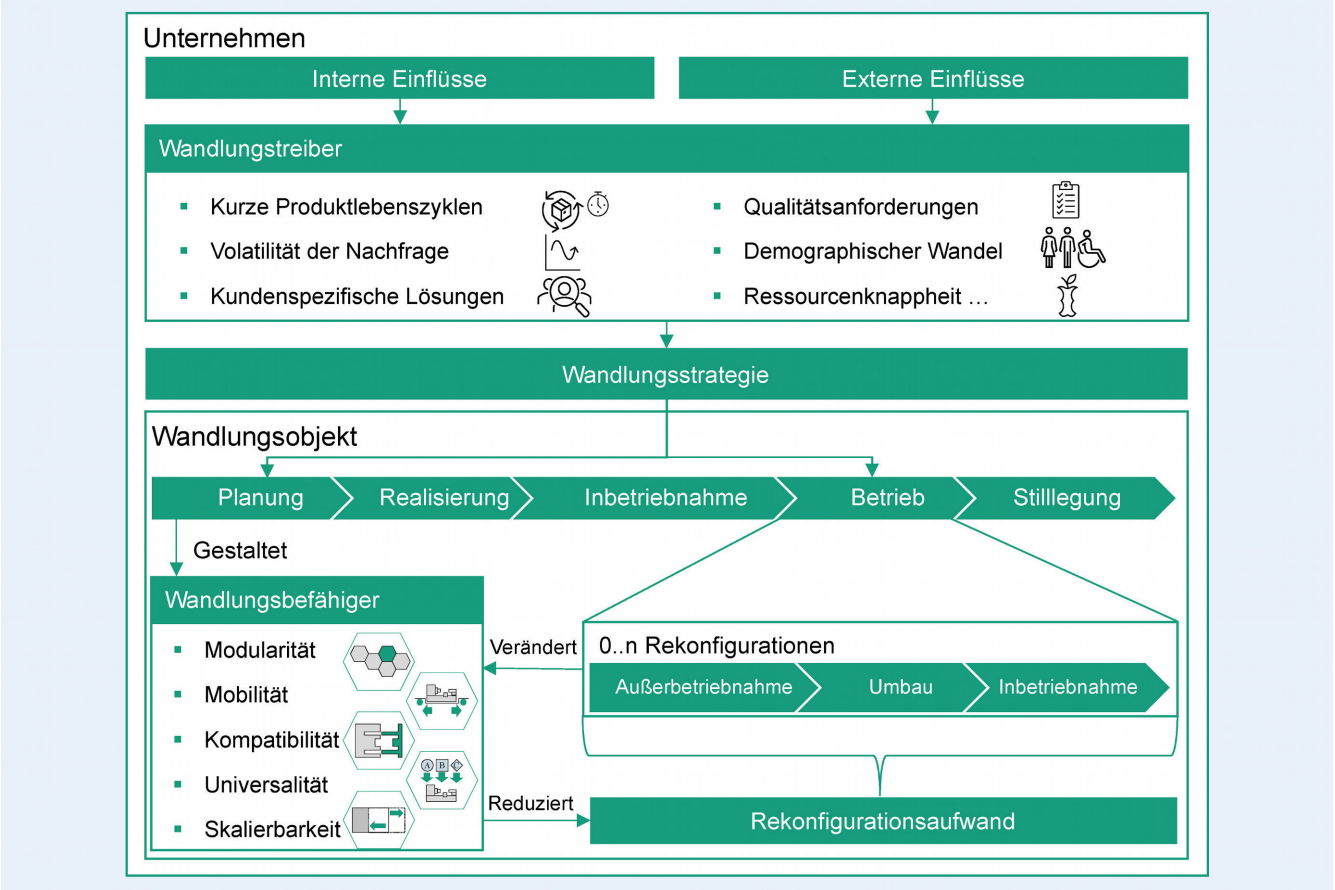

Bild 1. Zusammengefasste Wirkzusammenhänge wandlungsfähiger Anlagen. *Grafik: Fraunhofer IGCV*

neue Marktanforderungen zu erfüllen [11]. Sie wird daher für Unternehmen immer wichtiger [8].

Gründe für den aktuell geringen Einsatz von wandlungsfähigen Anlagen sind die erhöhte Komplexität und unzureichendes Wissen im Bereich der Wandlungsfähigkeit innerhalb der interdisziplinären Anlagenentwicklung [12]. Die Wirkzusammenhänge wandlungsfähiger Anlagen über den Anlagenlebenszyklus sind in **Bild 1** zusammengefasst.

Unter dem Begriff ‚Modularisierung' wird die Zerlegung einer Gesamtfunktion in Subsysteme (Module) verstanden [13]. Die Modularität nimmt eine Schlüsselrolle als Wandlungsbefähiger ein, da wiederum weitere Wandlungsbefähiger, wie die Mobilität, Skalierbarkeit und Kompatibilität, beeinflusst werden [14]. Die Modularität ist aus diesem Grund der wichtigste Wandlungsbefähiger [9]. Der Wandlungsbefähiger der Modularität besitzt eine starke Wechselwirkung mit der Integrierbarkeit der Module [15]. Die Betrachtung der Modulschnittstelle ist somit für die Steigerung der Modularität von hoher Bedeutung. Die für die Integrierbarkeit notwendige Kompatibilität der Module wird durch die Vernetzungsfähigkeit hinsichtlich Material, Medien und Energie sichergestellt.

Zur Senkung der Komplexität bei der Umsetzung der Modularisierung in der Anlagenentwicklung werden in diesem Beitrag mehrere Dimensionen modularer Montagesysteme aufgezeigt. Eine entwickelte Modulschnittstelle sichert die für die Modularisierung notwendige Kompatibilität der Module. Der Fokus liegt auf der Modularisierung von Montagezellen. Im folgenden Stand der Technik werden bestehende Modularisierungsansätze von Maschinen betrachtet.

2 Stand der Technik modularer Montagesysteme

In der Arbeit von *Slama* [16] werden mehrere Ausprägungen modularer Montagesysteme vorgestellt. Modulare Baukastensysteme bieten eine hohe Anpassungsfähigkeit durch standardisierte und funktionsorientierte Module, bedingen aber hohe Planungskosten und können zu instabilen Prozessen führen. Modulsysteme bestehen aus betriebsfertigen Grundmodulen, die mit spezifischen Komponenten ergänzt werden und eine schnelle Inbetriebnahme erlauben. Sie sind besonders im Bereich der Materialflusstechnik verbreitet, weisen aber Defizite beim Einsatz intelligenter Module auf. Intelligente Module arbeiten steuerungstechnisch vollkommen autark gegenüber den Nachbarmodulen. Modulare Komplettsysteme haben einen geringen Marktanteil (circa 2 %) und bieten Vorteile in der Umsetzung, werden jedoch durch hohe Kosten und unflexible produktspezifische Werkstückträger eingeschränkt. [16] Die von *Slama* definierten Ausprägungen modularer Montagesysteme werden in der Arbeit von *Kluge* [17] aufgegriffen. Zusätzlich wird die Fähigkeit des Plug-&-Produce nach *Hildebrand* für die Montagesysteme aufgenommen, wobei keine Hinweise zur Umsetzung von Plug-&-Produce bei modularen Montagesystemen erfolgen.

Auch die Arbeit von *Drabow* [13] unterteilt die Produktionsmodule in die Modultypen Baukastenmodul, Strukturmodul und

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Technologiemodul zur Umsetzung von Hilfs-, Grund- und Spezialprozessen.

Gotthard und *Bercsey* [18] vergleichen konventionelle Designmethoden mit einem modularen Ansatz, um modulare Produktionslinien zu entwerfen. Es werden fünf Elementtypen modularer Maschinenfamilien eingeführt: Basiselement, Hilfselement, Spezialelement, Anpassungselement und Nichtbauelement. Diese Elementtypen werden für die notwendigen Module herangezogen. Die Vorteile und Limitationen modularer Maschinen werden aus Hersteller- und Kundensicht erarbeitet. [18]

Kern et al. [19] stellen neun Prinzipien für ein modulares Montagekonzept auf. Aus den Prinzipien wurde ein prozessbasiertes und ein produktbasiertes modulares Montagesystem entwickelt. In dem prozessbasierten Konzept werden den Modulen die Aufgaben nach dem spezifischen Montageprozess zugewiesen. Dies reduziert die Komplexität der Stationen hinsichtlich Produktionstechnologien und erleichtert die Automatisierung. Allerdings kann der Transportaufwand im System steigen, da Montagezeiten an verschiedenen Stationen anfallen. Bei dem produktbasierten Konzept werden die Montagetätigkeiten basierend auf der Produktstruktur zugewiesen. Hierbei werden zusammenhängende Komponenten in einer Station montiert, unabhängig von den benötigten Technologien. Dies verbessert die Verantwortlichkeit der Arbeitskräfte und ermöglicht eine bessere Integration in Problemlösungsprozesse. [19]

Die Veröffentlichung von *Gauss et al.* [20] beschreibt die Methodik des Module-Based Machinery Design für die Entwicklung modularer Maschinenfamilien. Die Methode ermöglicht einen strukturierten Ansatz zur Planung, Konzeptentwicklung und für das Systemdesign, um Anpassungsfähigkeit und Kosteneffizienz zu gewährleisten. [20]

Der Beitrag von *Jürgensmeyer* [21] befasst sich mit der Modularisierung von Prozessanlagen und Logistik. Anlagen werden hierbei in Module vormontiert und am Aufstellungsort endmontiert. Zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit werden vier Stufen beschrieben: Kapselung der Produktions- und Logistikaufgaben, Modularisierung durch Multiframes, Modularisierung durch Singleframes und die smarte, containerbasierte Fabrik. [21]

Foith-Förster [22] entwickelt die Axiomatic Design Method weiter, wodurch ein systematisches und strukturelles Entwicklungsvorgehen für modulare Matrixproduktionssysteme entsteht. Die Methode wählt Prozessmodulkonfigurationen für Produktionssysteme aus, die auf Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit basieren, um den Anforderungen an die personalisierte Produktion gerecht zu werden. Sie umfasst die Identifizierung von Prozessmodulen, die Planung von Materialflüssen und die Gestaltung eines Layouts, das die Effizienz und Flexibilität des Systems maximiert. [22]

Die in diesem Kapitel betrachtete Literatur zeigt, dass ein Teil der Arbeiten die technische Gestaltung modularer Montagesysteme fokussiert, wobei andere Arbeiten die Zuordnung von Anforderungen in einzelne Module methodisch strukturieren. Die bestehenden Ansätze behandeln eine mögliche Umsetzung modularer Montagezellen unzureichend, da nur vereinzelt technische Ausprägungen aufgeführt sind.

In der Automatisierungstechnik wurden in den letzten Jahren vielfältige neue Technologien entwickelt. Zu diesen zählt der Kommunikationsstandard Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und die Nutzung von hochsprachenfähigen Steuerungen [23], die eine komplexere Programmierung erlauben. Die Fortschritte in der Automatisierungstechnik wurden bisher nicht in Modularisierungskonzepte integriert. Dieses Defizit soll in dieser Arbeit behoben werden.

3 Steigerung der Wandlungsfähigkeit

3.1 Modularisierung der Montagesysteme

Die Kernausprägungen der Modularisierung werden in diesem Beitrag in drei Dimensionen unterteilt. Diese drei Dimensionen sind die Funktionsmodularität, die Baugruppenmodularität und die Automatisierungsmodularität. Die separierte Betrachtung der Funktionsmodularität ist an die Arbeiten von *Gauss et al.* und *Foith-Förster* angelehnt. Die isolierte Betrachtung der Baugruppenmodularität basiert auf den Arbeiten von *Gotthard* und *Bercsey*, *Drabow* und *Slama*. Die separierte Betrachtung der Automatisierungsmodularität entspricht den Transformationsstufen von *Jürgensmeyer et al*. Durch die unabhängige Beschreibung ist eine beliebige Kombination der drei Dimensionen Funktions-, Baugruppen- und Automatisierungsmodularität möglich. Die Unab-

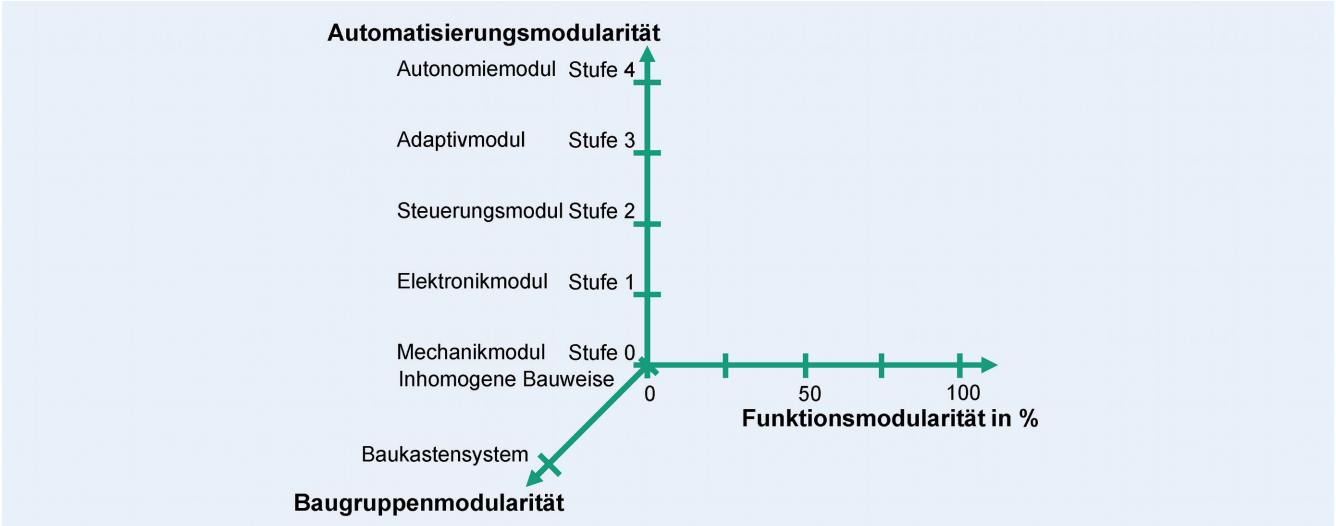

Bild 2. Dimensionen modularer Montagesysteme. *Grafik: Fraunhofer IGCV*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Eigenschaften und Bezeichnung der Stufen.

Stufe	Bezeichnung	Struktur- und Steuerungseigenschaften
0	Mechanikmodul	Das Modul besteht ausschließlich aus mechanischen oder mechatronischen Komponenten. Die Verdrahtung der Schalter, Sensoren und Aktoren wird zu einem zentralen Schaltschrank geführt und an die Steuerungstechnik angeschlossen.
1	Elektronikmodul	Die Schalter, Sensoren und Aktoren sind an dezentralen Schaltschränken angeschlossen. In den dezentralen Schaltschränken befindet sich die für die Aktoren des Moduls benötigte Leistungselektronik. Die Schalter, Sensoren und Aktoren des dezentralen Schaltschranks sind über ein Bussystem an die zentrale Steuerung angeschlossen.
2	Steuerungsmodul	Der dezentrale Schaltschrank wird um Komponenten der Steuerungstechnik erweitert. Abhängig von den Erfordernissen des Moduls wird der Schaltschrank um eine Maschinensteuerung, eine Mensch-Maschine-Schnittstelle und ein Sicherheitsschaltgerät ergänzt. Die einzelnen Module sind durch die Komponenten der Steuerungstechnik eigenständig betreibbar.
3	Adaptivmodul	Ein Adaptivmodul erleichtert die Anpassungsfähigkeit in der Kommunikation zu weiteren Modulen und erleichtert die Anpassungsfähigkeit an wechselnde Einsatzbedingungen. Die Interaktion mit weiteren Modulen kann durch eine standardisierte Maschine-zu-Maschine-Kommunikation vereinfacht werden. Ein Beispiel einer standardisierten Kommunikation stellt die Nutzung von Companion Specifications von OPC UA dar. Die Anpassung der Maschinenparameter an wechselnde Einsatzbedingungen oder Produkte erfolgt modellbasiert und automatisch.
4	Autonomiemodul	Die Autonomie erlangt ein Modul durch die selbständige Integration in das Produktionsumfeld. Ein Auftragsmanagementsystem kann die Durchführung von Prozessen an dem Modul anfragen und erhält automatisiert eine Antwort mit der Bewertung des Ressourcenbedarfs. Die notwendige Kommunikation kann das Modul selbständig aufbauen. Das Modul ermöglicht Plug-&-Produce, durch die automatisierte Kommunikation zu weiteren Modulen und der automatisierten Produktionsanfrage eines Auftragsmanagementsystems.

hängigkeit der drei Dimensionen wird durch die Darstellung im kartesischen Koordinatensystem verdeutlicht (**Bild 2**).

3.1.1 Funktionsmodularität

Kernaspekt der Modularisierung einer Anlage ist die Aufteilung der Primärfunktionen in einzelne Module.

Die Funktionsmodularität gibt den Aufteilungsgrad der Primärfunktionen $n_{Funktionen}$ in einzelne Module n_{Modul} an. Eine hohe Funktionsmodularität kennzeichnet einen hohen Aufteilungsgrad der Anlage in einzelne Module. Die Einteilung der Module kann durch die von *Foith-Förster* erarbeitete Methode des Axiomatic Designs ermittelt werden [22]. Die Funktionsmodularität kann neben der Ebene der gesamten Anlage auch auf der Ebene des einzelnen Moduls berechnet werden.

$$Funktionsmodularität = f(n_{Modul}, n_{Funktionen}) = \begin{cases} \frac{n_{Modul} - 1}{n_{Funktionen} - 1}, & n_{Module} > 1 \\ \frac{n_{Modul}}{n_{Funktionen}}, & n_{Module} = 1 \end{cases}$$

$$n_{Funktionen}, n_{Modul} \in \mathbb{Z}^+$$

3.1.2 Baugruppenmodularität

Die standardisierte Bauweise von Maschinen mit einer Aufteilung in Standardmodule und verschiedenen prozessspezifischen Erweiterungen wird durch die Baugruppenmodularität beschrieben. Die Verwendung von bestehenden Standardmodule verkürzt die Entwicklungszeit und reduziert die Kosten in der Fertigung [18]. Standardmodule mit Außenabmessungen, die gestuft in festen Rastern erfolgt, bieten Vorteile durch einfachere Kombinierbarkeit und Austauschbarkeit einzelner Module. Die Nutzung von gleichen Aufbauhöhen für die Prozesstechnik erlaubt die aufwandsarme Übergabe von Werkstücken zwischen den Modulen. Schaltschränke mit einer prozessunabhängigen Ausrüstung und die Definition von Bauraum für prozessspezifische Erweiterung sind mögliche Elemente eines standardisierten Aufbaus.

In der Bewertung der Baugruppenmodularität wird zwischen einer Bauweise im Baukastensystem und einer inhomogenen Bauweise unterschieden.

Die Bauweise im Baukastensystem besitzt eine inhaltliche Schnittmenge mit dem Wandlungsbefähiger Kompatibilität. Die mit der Funktionsmodularität separierten Module erhalten durch das Baukastensystem eine standardisierte Form, wodurch die Kompatibilität der Module gestärkt wird. Die Baugruppenmodularität grenzt sich von dem Wandlungsbefähiger der Kompatibilität durch die Standardisierung, die eine kurze Entwicklungszeit zum Ziel hat, ab.

3.1.3 Automatisierungsmodularität

Die Automatisierungsmodularität ist in Stufen eingeteilt. Die Stufen umfassen Struktur- und Steuerungseigenschaften. Zu den Struktureigenschaften zählen der elektrische Aufbau und die Architektur der Steuerungskomponenten. Die Steuerungseigenschaften werden durch die Funktionalität der Software beeinflusst, die durch die Kommunikation zwischen den Modulen und automatisierte Aufgabenausführung gekennzeichnet ist. Mit zunehmender Stufe sinken der Rekonfigurationsaufwand und die Abhängigkeit zwischen den Modulen. Die **Tabelle 2** beschreibt die Eigenschaften der Stufen.

3.2 Modulschnittstellengestaltung

Die Steigerung der Modulanzahl führt zu einer größeren Anzahl an Schnittstellen zwischen den Modulen. Die Stufen der Automatisierungsmodularität und die damit verbundenen unterschiedlichen Funktionalitäten in der Interoperabilität der Module können zu Inkompatibilitäten führen. Um die für die Modularität notwendige hohe Austauschbarkeit (siehe Tabelle 1) zu erreichen, ist eine Standardisierung der Modulschnittstellen zur Vermeidung von Adaptern nötig. Die standardisierte Bauweise unterstützt die Verwendung von standardisierten Modulschnittstellen, da die einheitliche räumliche Anordnung die Kompatibilität erleichtert.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

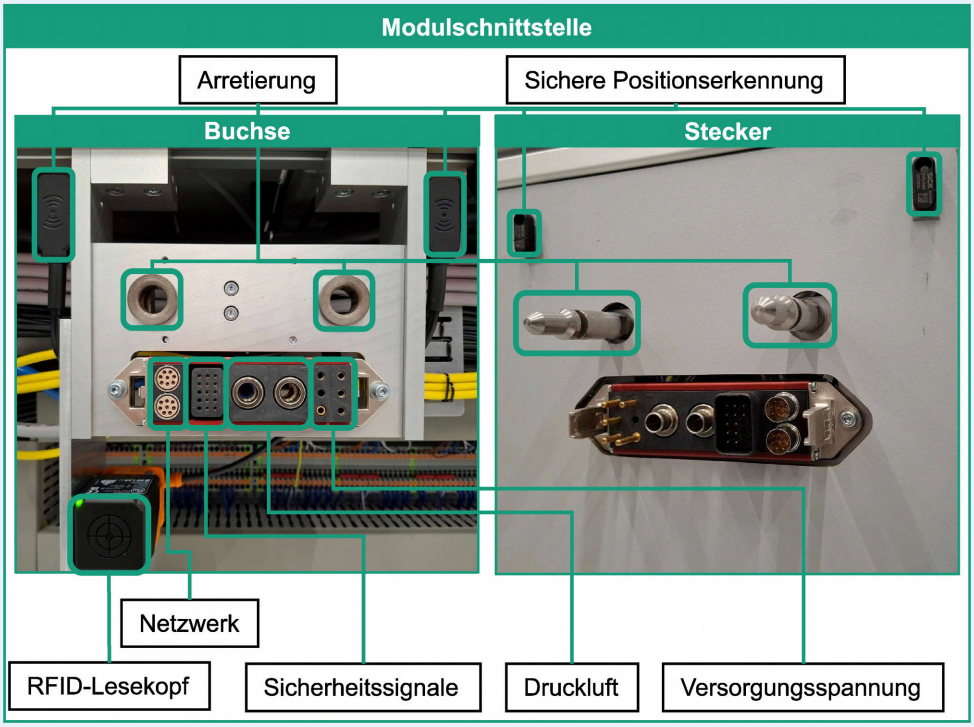

Bild 3. Umsetzungsbeispiel einer Modulschnittstelle. *Foto: Fraunhofer IGCV*

3.2.1 Anforderungen an Modulschnittstellen

Die Kompatibilität von Modulschnittstellen bezieht sich auf die mechanische Kopplung und Positionierung, die Energieversorgung und die Datenschnittstelle. Eine Möglichkeit, die Anzahl der Steckverbindungen zu senken, besteht in der Verwendung von Multifunktionssteckern, die mehrere Medien, Energie und Informationen übertragen können.

Es bestehen mechanische Anforderungen an die Modulschnittstelle, welche sich aus möglichen Unebenheiten der Aufstellfläche und der Notwendigkeit einer Arretierung zwischen den Modulen ergeben. Zur Energieversorgung eines Moduls sind je nach Modulanforderungen unterschiedliche Energieformen möglich. Die Energieübertragung kann mechanisch (zum Beispiel durch die Nutzung einer Zentralwelle), elektrisch oder fluidisch erfolgen. Die Energie kann von einem anderen Modul oder von der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) stammen. Der für den Bediener sichere Betrieb der Maschine wird durch die funktionale Sicherheit gewährleistet. Die Module müssen die normativen Anforderungen (etwa ISO 13849 [24], DIN EN ISO 12100 [25]) erfüllen und in einem übergreifenden Sicherheitskonzept agieren. Die zur Erreichung des Sicherheitskonzepts nötige Datenübertragung muss zwischen den Modulen gewährleistet sein. Zwischen den Modulen müssen die für die Produktion erforderlichen Informationen, wie die Freigaben zum Werkstücktransport, ausgetauscht werden. Die Informationsübertragung kann durch verschiedene physikalische Medien und verschiedene Kommunikationsarchitekturen und -protokolle (zum Beispiel Profinet, MQTT und OPC UA) erfolgen.

3.2.2 Beispielhafte Umsetzung einer Modulschnittstelle

Am Fraunhofer IGCV wurde zur Erprobung modularer Montagezellen ein Demonstrator entwickelt und aufgebaut, dessen Modulschnittstelle nachfolgend beschrieben und in **Bild 3** abgebildet ist.

Zur Erreichung der mechanischen Anforderungen wurde die Modulschnittstellenbaugruppe federnd gelagert. Dadurch ist eine horizontale und vertikale Ausgleichsbewegung möglich. Die Arretierung zwischen den Modulen ist mit zwei Führungsstiften und Führungsbuchsen gelöst. Um ein unbeabsichtigtes Abkoppeln der Module zu verhindern, wurde ein Sperrmechanismus realisiert. Die Führungsstifte sind mit einer Nut versehen, um den Arretierungskeil, der hinter der Führungsbuchse montiert ist, zu halten. Der Arretierungskeil kann durch die Ansteuerung eines Pneumatikzylinders verfahren werden, wodurch die Arretierung gelöst oder geschlossen wird.

Die Energieübertragung zwischen den Modulen wurde mit zwei unterschiedlichen Energieformen realisiert. Die elektrische Energie wird in Form einer dreiphasigen Wechselspannung mit 400 V, 50 Hz und 16 A Absicherung an das Modul übertragen. Die zweite Energieform ist Druckluft mit einem Systemdruck von 6 bar. Die Druckluft kann für verschiedene Aktoren, wie Greifer oder Zylinder, verwendet werden. Um eine hohe Verfügbarkeit der Module zu ermöglichen, soll die Rekonfiguration eines Moduls zu keiner Betriebsunterbrechung bei anderen Modulen führen. Die Module sollen dynamisch während des Betriebs an- und abdockbar sein. Diese Anforderung wird durch die Nutzung von Freigaben, Lichtgittern und Positionserfassungssensoren gewährleistet. Das zentrale Modul besitzt eine programmierbare Sicherheitssteuerung. An jedem Modul befindet sich ein Not-Aus-Taster. Einzelne Module sind über weitere Sicherheitstechnik, wie Türzuhaltungen und Lichtgittern zur externen Übergabe ausgerüstet.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 3. Gespeicherte Modulinformationen auf RFID-Tag.

Information	Erklärung
Modul-ID	Eindeutiger und globaler Identifier des Moduls.
Gate-ID	Module können mehr als eine Modulschnittstelle aufweisen. Der Identifier gibt die lokale Modulschnittstelle an. Diese kann bei dem Aufruf von OPC-UA-Methoden zur Spezifikation des Tasks verwendet werden.
IP-Adresse	Die IP-Adresse der Modulsteuerung wird zum Aufbau der Kommunikation benötigt.
OPC UA Username	Der Username des OPC-UA-Servers, der notwendige Rechte zum Lesen und Schreiben von Variablen sowie zum Aufruf von Methoden besitzt.
OPC UA Password	Das dem OPC-UA-Username zugeordnete Password.

Durch zwei Sensoren zur sicheren Positionserkennung wird die sichere Erkennung der Anwesenheit eines Moduls und zur Unterscheidung in der Modulbaugruppenform ermöglicht.

Um produktionsrelevante Daten auszutauschen, werden die Module per Ethernet verbunden. Die Modulsteuerungen befinden sich im selben IP-Netz. Zur Kommunikation wird der Kommunikationsstandard OPC UA verwendet. Jede Modulsteuerung besitzt die Funktionalität des OPC-UA-Servers und des OPC-UA-Clients. Der OPC-UA-Server wurde über ein modulspezifisches Datenset implementiert, das mehrere Companion Specifications nutzt. Durch die Client-Funktionalität der Modulsteuerung kann auf die Daten und Methoden anderer Modulsteuerungen zugegriffen werden. Ein dynamischer Zugriff ohne Parametrierung des Kommunikationspartners ist durch die Nutzung der Companion Specifications und der Verwendung von Daten-Tags möglich. Die Schnittstellen der Module sind mit RFID-Daten-Tags und Lesegeräten ausgerüstet. Die Daten-Tags speichern die Informationen aus **Tabelle 3**. Die Nutzung der Daten-Tags schafft eine informationstechnische Erkennung der Module.

Die Modulschnittstelle ist mit zwei Netzwerkschnittstellen ausgerüstet, wodurch zwei unterschiedliche Ethernet-Netze verbunden werden können. Die zweite Netzwerkschnittstelle ermöglicht die Verwendung von Feldbussystemen unabhängig von der Nutzung der ersten Netzwerkschnittstelle. Die beschriebene Modulschnittstelle kann ab einer Automatisierungsmodularität der Stufe 1 eingesetzt werden. Bild 3 zeigt im linken Bildbereich die Modulschnittstellen-Buchse und im rechten Bildbereich den Modulschnittstellen-Stecker. Im rechten Bildbereich wird der RFID-Tag und die federnd gelagerte Modulschnittstelle durch die Einhausung verdeckt.

4 Rekonfiguration eines modularen Montagesystems

Ein am Fraunhofer IGCV entwickelter Demonstrator zeigt die Modularisierung eines Batteriemontagesystems. Der Demonstrator fügt 20 Batteriezellen in ein Batteriemodulgehäuse und verschließt dieses mit einem Deckel. An dem Zentralmodul können bis zu sechs Einzelmodule mittels der Multifunktionsschnittstelle aus Abschnitt 3.2 an- und abgedockt werden. Der Transport von Werkstücken und Werkzeugen wird durch das Umlaufsystem des Zentralmoduls ermöglicht. Die Module können durch die Kinematiken und Greifer in den Arbeitsraum des Zentralmoduls eindringen und die Werkstücke oder Werkzeuge abnehmen. Das Umlaufsystem verfügt über zwölf unabhängig ansteuerbare Transportwagen. Die hohe Flexibilität des Transportsystems kann zur Realisierung verschiedener Produktionsformen, wie Linienproduktion und Matrixproduktion, genutzt werden. Zur Realisierung der Module stehen zwei unterschiedliche Baugruppengrößen zur Verfügung. **Bild 4** zeigt das Batteriemontagesystem mit einem Modul zur Lagerung der Gehäusekomponenten und der Fertigprodukte, einem Modul zum Fügen der Batteriezellen und einem Modul zum Verschließen der Gehäuse. Die Modularisierung der drei Aufgaben: Lagern, Fügen und Verschließen in drei einzelnen Modulen führt zu einer Funktionsmodularität von 1.

Die Module des Demonstrators sind mit speicherprogrammierbaren Steuerungen (PLC) unterschiedlicher Hersteller (Beckhoff, B&R, Siemens und WAGO) ausgerüstet und verfügen über eigenständige webbasierte Visualisierungen. Die Module können die notwendigen sicherheitsgerichteten Funktionen durch die Verwendung von sicheren, speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPLC) ausführen. Der universelle Aufbau der Modulschnittstelle in Verbindung mit der elektrischen Verschaltung erlaubt die Realisierung ohne Verwendung einer SPLC. Die PLCs führen die Funktionalität des OPC-UA-Servers mit standardisierten Companion Specifications aus, wodurch eine standardisierte Kommunikation realisiert ist. Die Kommunikation zwischen den Modulen erfolgt mittels einer direkten Client-Server-Verbindung zwischen den Modulen. Die für die Client-Verbindung nötigen Kommunikationsparameter werden automatisiert über die RFID-Tags ausgelesen. Die Automatisierungsmodularität entspricht durch die beschriebene technische Realisierung der Stufe 3.

Die Sicherstellung der funktionalen Sicherheit bei der erreichten Automatisierungsmodularität erfordert die Festlegung von Abläufen zum Andocken und Abdocken der Module. Für das Andocken eines Moduls und der damit verbundenen Integration in das Montagesystem sind mehrere Schritte notwendig. Diese werden durch den Bediener initialisiert und vom Einzel- oder Zentralmodul ausgeführt. **Bild 5** zeigt den Ablauf des Andockvorgangs für ein Modul. Der Ablauf der Integration eines Moduls am Zentralmodul ermöglicht durch das Sicherheitskonzept einen unterbrechungsfreien Ablauf des Zentralmoduls und der restlichen Einzelmodule.

Zur Erprobung der modularen Bauweise und der Modulschnittstelle wurde das Montagesystem durch das Andocken des Lagermoduls rekonfiguriert und die benötigte Zeit gemessen. Der in Bild 5 dargestellte Ablauf des Andockvorgangs ist zur Messung zu feingranular, weswegen dieser zu drei Schritten zusammengefasst wurde. In Bild 5 wurden die Prozessschritte entsprechend gekennzeichnet. Die drei zusammengefassten Schritte sind:

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

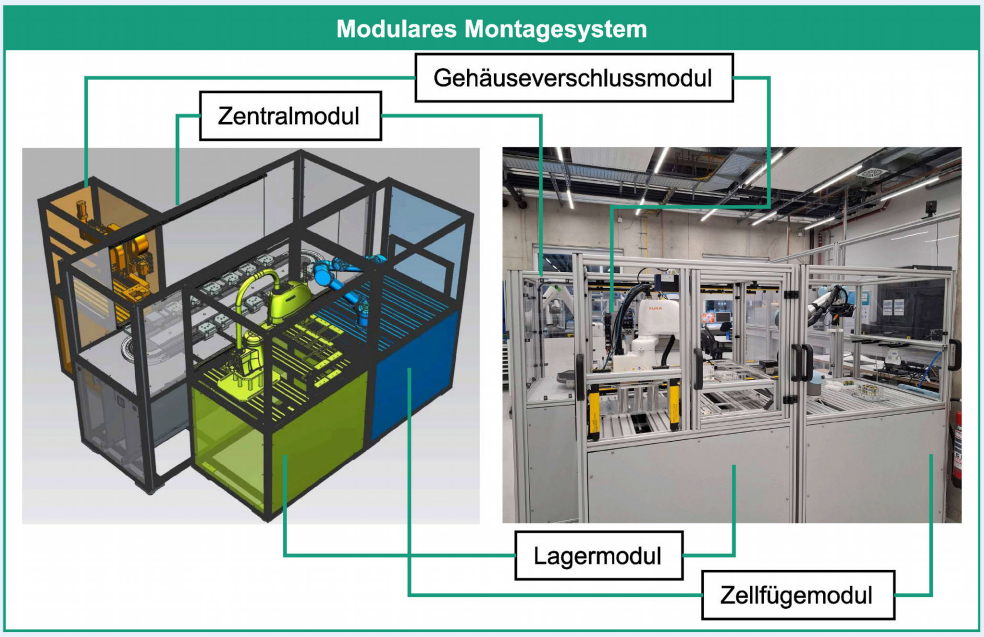

Bild 4. Modulares Montagesystem am Fraunhofer IGCV. *Bild: Fraunhofer IGCV*

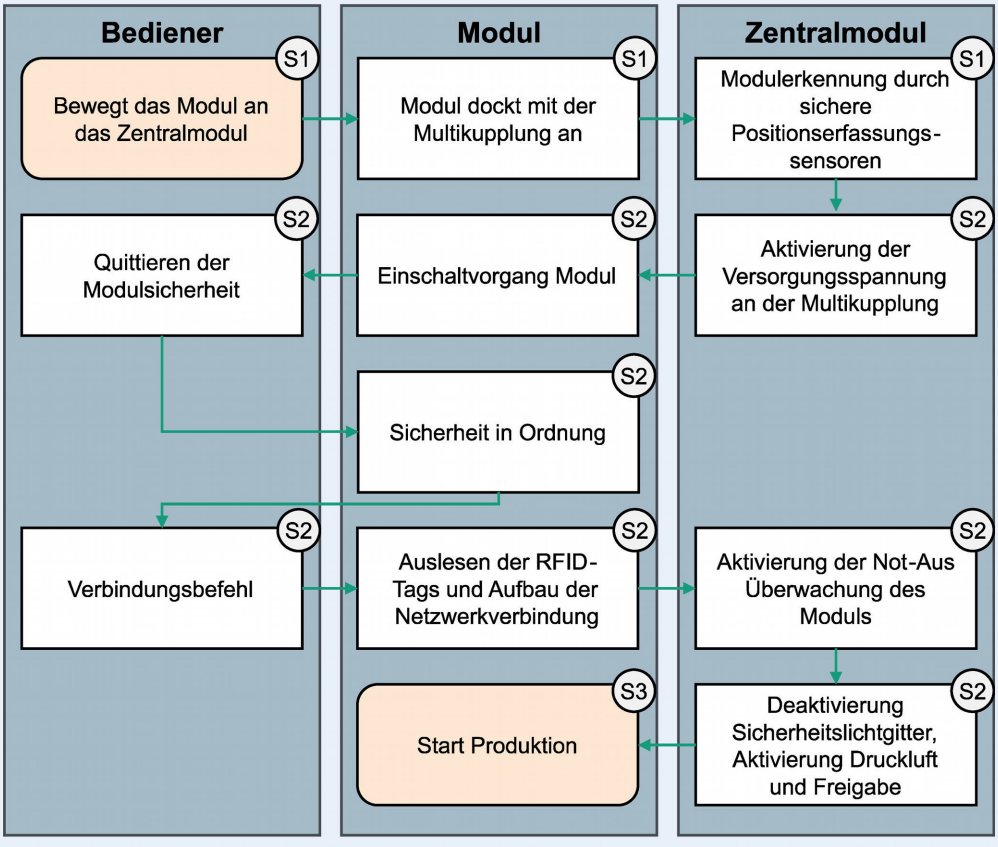

Bild 5. Ablaufdiagramm des Andockvorgangs eines Moduls. *Bild: Fraunhofer IGCV*

- S1: Bewegen des Moduls zum Zentralmodul: Das Modul wird von dem 10 m entfernten Modullagerplatz zum Zentralmodul bewegt und verbunden.
- S2: Start der Steuerungen und Verbindungsaufbau: Die Steuerung des Moduls und die Robotersteuerung werden gestartet. Die Verbindung zwischen Lagermodul und Zentralmodul wird aufgebaut.
- S3: Initialisierungsvorgang des Lagermoduls: Der Roboter scannt mit einer Kamera die Lagerplätze ab und registriert die DataMatrix-Codes auf den Batteriemodulen, damit ein

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 4. Rekonfigurationszeiten zum Andocken des Lagermoduls.

Rekonfigurationsschritt	Zeit in Sekunden
1. Bewegen des Moduls zum Zentralmodul	18
2. Start der Steuerungen und Verbindungsaufbau	86
3. Initialisierungsvorgang des Lagermoduls	71
Gesamtrekonfigurationsdauer	174

Abgleich zwischen der Lagerplatzverwaltung und der Realität erfolgt.

Tabelle 4 zeigt die Messergebnisse der einzelnen Schritte zum Andocken des Lagermoduls.

Die Gesamtrekonfigurationsdauer von 174 s vom Start der Bewegung bis zum betriebsbereiten Zustand ist kurz und verdeutlicht die hohe Wandlungsfähigkeit des Montagesystems. Die hohe Wandlungsfähigkeit ist begründet durch die hohe Funktionsmodularität, die Bauweise im Baukastensystem, die hohe Automatisierungsmodularität und die Gestaltung der Modulschnittstellen . Die hohe Funktionsmodularität erlaubt die gezielte Anpassung des Montagesystems um zusätzliche Funktionen. Die Baugruppenmodularität ermöglicht, durch die einheitlichen Abmessungen der beiden Baugruppengrößen, gleiche Bauhöhen und vermeidet dadurch einen potenziellen Anpassungsbedarf in der mechanischen Ausgestaltung des Moduls. Die Automatisierungsmodularität der Stufe 3 ermöglicht die automatisierte Vernetzung der Module und sicherheitstechnische Kopplung. Die Modulschnittstelle schafft durch die Integration der benötigten Signale und der Informationen auf dem RFID-Tag die Ausgangssituation, welche die Automatisierungsmodularität ermöglicht. Die mechanische Gestaltung der Modulschnittstelle reduziert zusätzlich die Aufwände beim Andocken und Abdocken.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Modularisierung von Montagesystemen weist verschiedene Vorteile im Anlagenlebenszyklus auf. Bestehende Ansätze berücksichtigen die technische Umsetzung der Modularisierung von Montagezellen nur unzureichend.

Zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit wurden in diesem Beitrag mehrere Dimensionen der Modularisierung beschrieben. Die für eine Modularisierung notwendige Kompatibilität der Module wurde durch die Vorstellung einer Modulschnittstelle sichergestellt.

Die Einteilung der Modularisierung in die Ausprägungen Funktionsmodularität, Baugruppenmodularität und Automatisierungsmodularität von modularen automatisierten Montagezellen ermöglicht es, bestehende Montagesysteme in ihrer Modularität zu bewerten. Für zu entwickelnde Montagesysteme können durch die gestufte Einteilung der drei Modularisierungsdimensionen Zielvorgaben definiert werden.

Eine Steigerung der Modulanzahl und die Stufen der Automatisierungsmodularität erfordern die Betrachtung der Modulschnittstellen. Die vorgestellte Gestaltung der Modulschnittstellen zeigt die Integration der notwendigen Funktionen zur Sicherstellung der Kompatibilität und die dadurch mögliche automatisierte Identifikation benachbarter Module, was zu einer kurzen Rekonfigurationszeit führt.

Die Einteilung eines bestehenden Montagesystems in die Modularisierungsdimensionen erfolgte im Kapitel 4. Zusätzlich wurde gezeigt, welche Abläufe für eine sichere Kopplung bei der erreichten Automatisierungsmodularität und der Modulschnittstelle möglich ist. Die Messung der kurzen Rekonfigurationsdauer zeigt die hohe Wandlungsfähigkeit. Diese wird durch die Funktionsmodularität Baugruppenmodularität, Automatisierungsmodularität und die Modulschnittstelle erreicht.

In zukünftigen Arbeiten sollen die modularen Montagezellen um zusätzliche Elemente erweitert werden. Eine automatisierte Rekonfiguration der Module soll durch die Kopplung mit einem fahrerlosen Transportfahrzeug (FTF) erfolgen. Dazu soll eine weitere Variante des Standardmoduls entwickelt werden, in dem die Transportrollen des Moduls durch Antriebsrollen ersetzt und Sensorik nachgerüstet wird. Zukünftig soll somit eine autonome Rekonfiguration ermöglicht werden.

Ein weiteres Forschungsfeld bietet die Kopplung zu weiteren Produktionsschritten und zur Logistik, das durch die automatisierte Beladung mit einem Mobilen Manipulator (MM) erreicht werden kann. Hierzu soll eine automatisierte Übergabe von Werkstücken oder Werkzeugen zwischen einem Modul und dem Manipulator des MM ohne Produktionsunterbrechung erfolgen.

Literatur

[1] Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2016

[2] Fechter, M.; Dietz, T.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems. In: Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hrsg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Heidelberg: Springer-Verlag 2020, S. 11–17

[3] Meyer-Schwickerath, B.: Wandlungsfähigkeit von KMU erhöhen. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 7/8 Seite 624. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

[4] Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Heidelberg: Springer-Verlag 2009

[5] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl Hans-Hermann: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Carl Hanser Verlag 2019

[6] Götz, G.: Methode zur Steigerung der Formatflexibilität von Verpackungsmaschinen. Dissertation, Technische Universität München, 2017

[7] Andersen, A.-L.; Nielsen, K.; Brunoe, T. D. et al.: Understanding Changeability Enablers and Their Impact on Performance in Manufacturing Companies. In: Moon, I.; Lee, G. M.; Park, J. et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Production Management for Data-Driven, Intelligent, Collaborative, and Sustainable Manufacturing. Cham: Springer International Publishing 2018, pp. 297–304

[8] Nyhuis, P.; Reinhart, G.; Abele, E. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2008

[9] Wiendahl, H.-P.; Noven, D.; Klußmann, J. H.: Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Carl Hanser Verlag 2005

[10] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2002

[11] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser Verlag 2011

[12] Schuh, G.; Riesener, M.: Produktkomplexität managen. Strategien-Methoden-Tools. München: Carl Hanser Verlag 2017

[13] Drabow, G.: Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme. Dissertation, Universität Hannover, 2006

[14] Ullrich, A.: Eigenschaften wandlungsfähiger Systeme – Erarbeitung eines Indikatorsystems. Berlin: GITO Verlag 2018

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[15] Napoleone, A.; Pozzetti, A.; Macchi, M.: Core Characteristics of Reconfigurability and their Influencing Elements. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, pp. 116–121
[16] Slama, S.: Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweitereter Mitarbeiterkompetenz. Bamberg: Meisenbach Verlag 2004
[17] Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2011
[18] Gotthard, V.; Bercsey, T.: Development of Modular Production Lines. Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng. 50 (2006) 2, pp. 125–145
[19] Kern, W.; Rusitschka, F.; Kopytynski, W. et al.: Alternatives to assembly line production in the automotive industry. 23rd International Conference on Production Research, ICPR 2015, doi.org/10.24406/publica-fhg-391281
[20] Gauss, L.; Lacerda, D. P.; Sellitto, M. A.: Module-based machinery design: a method to support the design of modular machine families for reconfigurable manufacturing systems. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 102 (2019) 9–12, pp. 3911–3936
[21] Jürgensmeyer, N.; Osenberg, D.; Reitze, A. et al.: Development of a Transformation Model – Modularization Step by Step. Chemie Ingenieur Technik 92 (2020) 12, pp. 1998–2004
[22] Foith-Förster, P.: Design of matrix production systems for the personalized production of mechatronic machine modules. Dissertation, Universität Stuttgart, 2023
[23] Rothhöft, M.: Marktstudie SPS-Systeme 2022. Ergebnisse einer Befragung von Unternehmen aus dem Maschinenbau in Deutschland. Stand: 2022. Internet: www.marktstudien.org/marktstudien/marktstudie-sps-systeme/. Zugriff am 06.03.2025
[24] ISO 13849–1:2023: Safety of machinery – Safety-related parts of control systems – Part 1: General principles for design. Ausgabe 2023
[25] ISO 12100:2010: Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction, Ausgabe 2010

Andreas Gaugenrieder, M.Eng.
andreas.gaugenrieder@igcv.fraunhofer.de
Tel. +49 821 90678 / 313
Foto: Fraunhofer IGCV
Jannik Möhrle, M.Sc.
Johannes Fink, M.Eng.
Christian Härdtlein, M.Eng.
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub
Fraunhofer-Institut für Gießerei-,
Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 10, 86159 Augsburg
www.igcv.fraunhofer.de

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-03-87 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -