

Bedarfsgerechte Automatisierung der mechanischen Fertigung für die Einzel- und Kleinserie

# Vorgehen zur Bestimmung des Automatisierungspotenzials

A. Koch, T. Dannen, P. Niemietz, T. Bergs

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Fertigungsautomatisierung in der Einzel- und Kleinserie ist aufgrund der geringen Standardisierbarkeit und der heterogenen Anforderungen herausfordernd. Im vorliegenden Beitrag werden die Anforderungen an einen Ansatz zur Bestimmung bedarfsgerechter Automatisierungsmaßnahmen abgeleitet und ein Grobkonzept für ein solches Vorhaben vorgestellt.

## STICHWÖRTER

Automatisierung, Fertigungsplanung, Werkzeug- und Formenbau

## Procedure for determining potential for automation

**ABSTRACT** Production automation in individual and small series is challenging due to the low level of standardization and heterogeneous requirements. This article derives the requirements for an approach to determine needs-based automation measures and presents a rough concept for such a project.

## 1 Einleitung und Motivation

Produzierende Unternehmen in Deutschland sehen sich heutzutage mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert. Dazu zählen der demografische Wandel, der resultierende Fachkräftemangel und die steigenden Faktorkosten [1–4]. Nach einer Umfrage der Deutschen Industrie- und Handelskammer verlagern deutsche Unternehmen zunehmend Standorte ins Ausland, um Kosten zu sparen [5]. Produzierende Unternehmen in Low Cost Ländern erreichen immer häufiger konkurrenzfähige Produktqualitäten zu geringeren Preisen [1, 6]. Eine Möglichkeit für den Produktionsstandort Deutschland, diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die Steigerung der Automatisierung der Fertigung zur Erhöhung der Produktivität [1, 7].

In der Großserienfertigung werden häufig hohe Automatisierungsgrade erreicht, da die Anforderungen an die benötigten Ressourcen weitestgehend homogen sind und Synergieeffekte entstehen. Diese begünstigen eine hohe Auslastung der automatisierten Fertigungssysteme und damit den wirtschaftlichen Betrieb sowie die schnelle Amortisation [4, 8]. In der Einzel- und Kleinserienfertigung ist die Auswahl von Automatisierungsmaßnahmen aufgrund des heterogenen Produktspektrums herausfordernd [2]. Die hohe Varianz der unterschiedlichen Prozessketten und der geringe Grad an Wiederholeffekten schränken die Möglichkeiten zur Standardisierung ein.

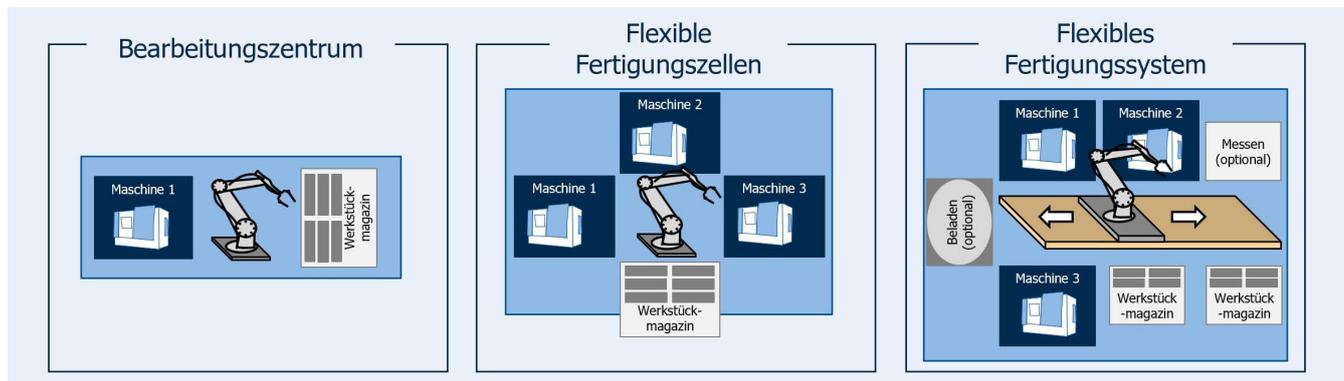
Vor diesem Hintergrund ist es für Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung mit sehr geringen Losgrößen nicht in jedem Fall möglich, einen hohen Automatisierungsgrad erfolgreich umzusetzen. Weiterhin ist die Umsetzung konkreter Automatisierungsmaßnahmen oftmals investitionsintensiv, vor allem mit steigendem Automatisierungsgrad, und umfasst die Umstruk-

turierung bestehender Prozesse oder Anpassung vorhandener Ressourcen [4, 9, 10]. Die Entscheidung für Automatisierungsmaßnahmen muss fundiert getroffen werden. Daher ist nicht grundsätzlich der höchstmögliche Automatisierungsgrad anzustreben, sondern es muss der für das Unternehmen sinnvollste Automatisierungsgrad bedarfsgerecht anhand der Anforderungen aus dem Fertigungsspektrum abgeleitet werden [11]. Aktuell erfolgt die Investitionsentscheidung in der Praxis meist erfahrungsbasiert. Somit fallen die Ergebnisse stark personenabhängig und nicht wiederholbar aus. Aufgrund des Risikos der Fehlinvestition werden Investitionen tendenziell nicht getätigt und das Potenzial einer Erhöhung des Automatisierungsgrades der Fertigung nicht genutzt [12].

Im Folgenden werden zunächst der Stand der Technik in der Praxis dargelegt und die Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung analysiert, welche die Hindernisse in der Implementierung von Automatisierungsmaßnahmen darstellen. Danach werden Anforderungen definiert, welche an einen Ansatz zur Identifikation unternehmensindividuell bedarfsgerechter Automatisierungslösungen zu stellen sind.

## 2 Stand der Technik

Während Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung vereinzelt bereits hohe Automatisierungsgrade vorweisen können, fällt es der Mehrzahl insbesondere kleiner und mittelständischer Unternehmen schwer, zielgerichtet Automatisierungsmaßnahmen zu implementieren. Die Herausforderungen wachsen mit der Heterogenität der Prozessketten und der benötigten Flexibilität. Es existieren Automatisierungslösungen unterschiedlicher Automatisierungsgrade, welche mit den heterogenen Charakteristika



**Bild 1.** Verkettungsarten verschiedener Umfänge für die Einzel- und Kleinserie. Grafik: MTI der RWTH Aachen, in Anlehnung an [4]

des Fertigungsspektrums und den strategischen und kapazitiven Anforderungen eines Unternehmens in Einklang zu bringen sind.

Eine Übersicht über die existierenden Automatisierungslösungen in Bezug auf deren Automatisierungsgrad und Flexibilität wird im Folgenden dargelegt. Danach werden die Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung analysiert, die ursächlich sind für die Herausforderungen im Rahmen der Automatisierung. Aus diesen Charakteristika sind die Anforderungen abzuleiten, denen ein Ansatz zur Lösung des Problems genügen muss. Im letzten Schritt der vorliegenden Arbeit werden relevante bestehende wissenschaftliche Ansätze anhand der abgeleiteten Anforderungen bewertet.

## 2.1 Industrielle Automatisierungslösungen

Industrielle Automatisierungslösungen reichen von automatisierten Einzeloperationen bis hin zu vollständig automatisierten Fertigungssystemen mit Verkettung mehrerer Maschinen verschiedener Technologien. Es lassen sich drei Grade der Verkettung unterscheiden (**Bild 1**) [13].

In einem Bearbeitungszentrum wird eine einzelne NC (numerical control)-fähige Werkzeugmaschine durch Peripherieelemente zum automatisierten Werkzeugwechsel ergänzt. Zudem kann auch die Bauteilbereitstellung automatisiert erfolgen [4, 14]. Durch die Verkettung mehrerer Maschinen einer Technologie mit zentraler Handhabungseinheit in einer sogenannten flexiblen Fertigungszelle lassen sich Liege-, Rüst- und Transportzeiten verkürzen. Die Bearbeitungsmaschinen werden durch eine Handhabungseinheit bestückt, die rotatorisch oder linear verfährt [2, 13, 15]. Die Steuerung erfolgt über einen Leitreechner [14].

Ein flexibles Fertigungssystem hingegen enthält Maschinen verschiedener Technologien und ein üblicherweise linear verfahrenes Handhabungssystem [2, 4, 13]. Alle notwendigen prozessorientierten Funktionen der technologieübergreifenden Informationsbereitstellung, Bearbeitung und Logistik der Werkzeuge und Werkstücke erfolgen automatisiert und werden über ein Job Management System zentral gesteuert [4, 15]. In den vorgestellten flexiblen Systemen müssen die Komponenten und Prozesse sowohl hardware- als auch softwaretechnisch standardisiert sein [4]. Limitierende Faktoren in der Bearbeitung heterogener Bauteile sind die Eigenschaften der Maschinen (wie Bauraum, Kinematik, Genauigkeit) sowie der Handhabungseinheiten (hinsichtlich der Abmessungen und des Gewichts der Bauteile).

Die Werkstücke werden im Falle der vorgestellten Systeme außerhalb der Maschine aufgespannt und mithilfe von Nullpunkt-

spannsystemen innerhalb der Maschine positioniert. Zur (Zwischen-) Speicherung der Bauteile und Bearbeitungswerkzeuge dienen Magazine und Regale, auf die durch Handhabungsroboter zugegriffen wird [2, 4]. Moderne Speichersysteme bieten bis zu 100 Palettenplätze mit verschiedenen Palettengrößen und die Anbindung mehrerer verschiedener Maschinen inklusive Leitreechner, Überwachungs- und Verwaltungstools [16].

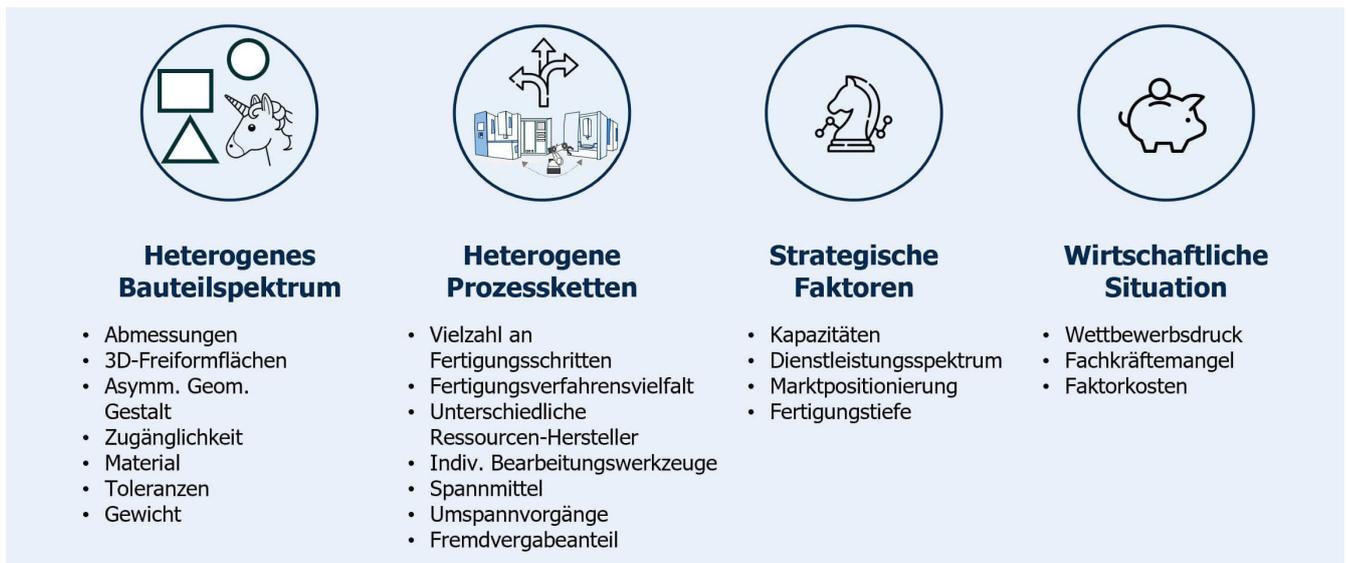
Trotz dieser Lösungen bleibt ein gewisser Grad an Standardisierung Voraussetzung zur erfolgreichen Nutzung verketteter Systeme. Zudem steigt die nötige Investition mit dem Automatisierungsgrad und der Komplexität des Systems. Diese ist im Bereich hoch flexibler Systeme typischerweise sehr hoch [4].

## 2.2 Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung

Die Herausforderung der Automatisierung in der Einzel- und Kleinserienfertigung ist in deren charakteristischen Eigenschaften begründet. Die Einzel- und Kleinserienfertigung zeichnet sich durch geringe Losgrößen bis zur Unikatfertigung aus. In einigen Anwendungsfällen und Branchen sind die Produkte stark individuell und unterscheiden sich in zentralen Eigenschaften [17]. Ein Beispiel ist die Branche Werkzeugbau. Die Werkzeugkonstruktion ist stark abhängig von Kundenwünschen und der vorgegebenen Produktauslegung [2]. Das Werkzeug besteht aus einer Vielzahl an Einzelkomponenten, die sich wiederum in ihren Eigenschaften unterscheiden [18].

Ein relevantes Unterscheidungsmerkmal sind die Abmessungen, die vom Meterbereich bei Außenhautwerkzeugen bis hin zu wenigen Zentimetern bei kleinen Spritzgießwerkzeugen reichen. Ein einzelnes Werkzeug enthält auch Komponenten stark unterschiedlicher Abmessungen [4, 7]. Weiterhin variiert die geometrische Komplexität stark durch asymmetrisch gestaltete Features und 3D-Freiformflächen. Ebenso limitieren hohe Aspektverhältnisse die technologiebedingte Erreichbarkeit sowie die Verwendung spezifischer Bearbeitungswerkzeuge [7, 19]. Bei den im Werkzeugbau gefertigten Bauteilen handelt es sich teils um Aktivkomponenten, die direkt an der Formgebung beteiligt sind und teils um Passivkomponenten. Aktivkomponenten besitzen in der Regel wesentlich höhere Toleranzanforderungen. Außerdem sind sie oftmals aus härteren Werkstoffen gefertigt [1]. Durch die stark verschiedenen Abmessungen, die geometrische Gestalt und das Material ergeben sich große Differenzen im Bauteilgewicht.

Im Jahr 2023 gaben 24,4% der Teilnehmenden des Branchenwettbewerbs „Excellence in Production“ zum „Werkzeugbau des Jahres“ an, dass ihre Werkzeuge Unikate darstellen [1]. Aus dem



**Bild 2.** Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung. *Grafik: eigene Darstellung*

heterogenen Bauteilspektrum folgt eine hohe Varianz der Prozessketten [4, 18]. Die Prozesskette besteht aus einer hohen Zahl an Fertigungsschritten, welche durch eine Vielfalt an Fertigungsverfahren realisiert werden. Die etablierten Verfahren Fräsen, Drehen, Schleifen, Draht- und Senkfunkenerosion unterteilen sich in spezifische Verfahrensvarianten wie etwa das Weich- und Hartfräsen oder -drehen [7, 19]. Zudem werden vereinzelt Sonderverfahren wie das Tieflochbohren, Laserauftragsschweißen oder pulverbettbasierte additive Fertigungsverfahren eingesetzt [4]. Innerhalb der einzelnen Fertigungsverfahren kommt wiederum eine Vielzahl an Bearbeitungswerkzeugen sowie teils individuelle Spezialwerkzeuge zum Einsatz. Hinzu kommen zahlreiche Umspannvorgänge inner- sowie außerhalb der einzelnen Verfahren, welche durch den manuellen Eingriff ein Hindernis bei der Verkettung von Ressourcen darstellen [4].

Die verwendeten Maschinen unterscheiden sich teils auch innerhalb der Fertigungsverfahren bezüglich Hersteller und Eigenschaften, was eine Vereinheitlichung der Prozesskette auch für die Datenerfassung erschwert. Die Fremdvergabe einzelner Prozessschritte unterbricht die Prozesskette: insbesondere die Wärmebehandlung und Beschichtung werden oft fremdvergeben. Auch die Spannmittel unterscheiden sich abhängig von den Technologien, der Bauteilgröße, -geometrie und der Bearbeitungsaufgabe.

Zudem ist die strategische Positionierung der Unternehmen zu beachten. So treten im Werkzeugbau in vielen Fällen Instandhaltungs- und Änderungsaufträge auf, die teils kurzfristig eingeplant werden müssen. Für derartige Aufträge halten Werkzeugbauunternehmen oftmals gezielt Kapazitäten frei. Vor allem interne Werkzeugbaubetriebe verfolgen das Ziel, die Produktionsfähigkeit der Serienfertigung sicherzustellen und Reparaturaufträge möglichst schnell durchzuführen. Diese kapazitative Fokussierung bedeutet eine strategische Entscheidung vonseiten des Werkzeugbaus. Auch für externe Kunden werden Dienstleistungen wie Instandhaltungstätigkeiten angeboten, die Kapazitäten in der Fertigung benötigen. [1]

Des Weiteren beeinflusst die Positionierung am Markt und im Produktionsnetzwerk die Ausrichtung der Fertigung eines Unternehmens. Neben der produktseitigen Positionierung lässt sich für den Werkzeugbau hierunter die Aufteilung in interne und externe

Werkzeugbaubetriebe fassen [19]. Für interne Werkzeugbaubetriebe, die primär Werkzeuge für das eigene Mutterunternehmen fertigen, besteht eventuell die Möglichkeit, die Artikelauslegung hin zu einer höheren Standardisierung der Werkzeuge zu beeinflussen [7, 19]. Die Marktverteilung in Deutschland ist im Jahr 2023 ausgeglichen mit 49% interner und 51% externer Werkzeugbaubetriebe [1]. Eine weitere strategische Entscheidung im Rahmen der Positionierung ist die Fertigungstiefe. Je größer diese ist, desto länger und komplexer werden die Prozessketten. In deutschen Werkzeugbaubetrieben beträgt die Fertigungstiefe im Durchschnitt 69,4% [1]. Die zentrale zu lösende Aufgabe in der produzierenden Industrie ist die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit angesichts der Herausforderungen des Fachkräftemangels und der steigenden Faktorkosten (siehe Kapitel 1). Diese ist zur Sicherung der Zukunftsfähigkeit der deutschen Produktionsstandorte unabdingbar. Die Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung werden in **Bild 2** zusammengefasst.

### 2.3 Anforderungen an einen Ansatz zur bedarfsgerechten Automatisierung

Es wird ein zielgerichtetes Vorgehen benötigt, das es Unternehmen ermöglicht, Automatisierungspotenziale in ihrer Fertigung zu bestimmen und Maßnahmen abzuleiten. Ein solches Vorgehen muss spezifischen Anforderungen genügen, die aus den Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung abzuleiten sind. Es wurden fünf Anforderungen (A1-A5) identifiziert, die im Folgenden vorgestellt werden.

Eine zentrale Herausforderung besteht in der festgestellten Heterogenität der Bauteile und Prozessketten. Deshalb lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen über geeignete Automatisierungsmaßnahmen oder Kosten-Nutzen-Prognosen treffen. Um die Eignung der Bauteile für Automatisierungsmaßnahmen bewertbar zu machen, müssen die Bauteile anhand ihrer relevanten Charakteristika bewertet werden (A1). Die Implikationen und Synergien der Vielzahl an Fertigungsschritten, Fertigungsverfahren und Ressourcen sowie die Unterbrechung der Prozesskette durch Fremdvergabeumfänge müssen zudem auf der Ebene der Gesamtprozesskette analysiert werden (A2). In einer tiefgehen-

den Betrachtung der Operationsfolgen sind außerdem die einzelnen Bearbeitungsaufgaben unter Berücksichtigung der teils individuellen (Spezial-)Bearbeitungswerkzeuge, Spannmittel und Umspannvorgänge zu betrachten (A3). Starke Heterogenität in diesen Aspekten erschwert die Automatisierbarkeit und stellt besondere Anforderungen an mögliche Automatisierungslösungen, wie etwa das Vorhandensein einer entsprechenden Anzahl an Werkzeugwechslerplätzen. Auch muss der Automatisierungsgrad im Einklang mit den strategischen Randbedingungen stehen (A4). Die strategisch-kapazitative Auslegung und damit verbunden das Dienstleistungsspektrum, die Marktpositionierung und die Fertigungstiefe beeinflussen die benötigte Flexibilität und die Vielfalt an Fertigungsverfahren. Die Notwendigkeit der zunehmenden Automatisierung folgt aus der abnehmenden Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandortes Deutschland, welche produzierende Unternehmen verschiedener Branchen verspüren. Verstärkt wird der wirtschaftliche Druck durch den Fachkräftemangel und die steigenden Faktorkosten (siehe Kapitel 1). Daraus folgt der Bedarf einer quantifizierbaren Optimierung der Fertigung durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades (A5).

## 2.4 Bewertung bestehender Ansätze

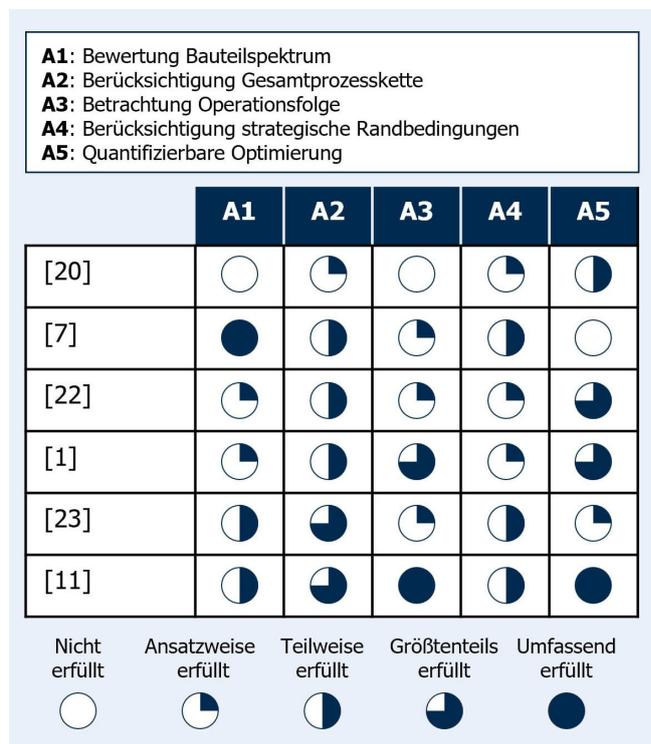
Fasth stellt in ihrer Dissertation [20] eine Methode zur Bestimmung des Automatisierungsgrades vor, welche eine Weiterentwicklung der „Level of Automation“ nach Frohm [21] ist. Das Werkstückspektrum sowie Fertigungsprozessketten oder gar Operationen der mechanischen Fertigung werden nicht betrachtet. Auch wird kein Vorgehen zur systematischen Festlegung individuell relevanter Optimierungsgrößen konkretisiert.

Heeschen dagegen entwickelte eine systematische Methodik zur kennzahlenbasierten Auswahl von bedarfsgerechten Fertigungstechnologien und -ressourcen im Werkzeugbau [7]. Diese enthält eine umfassende Analyse des Werkstückspektrums. Abgeleitet wird der Bedarf an Technologien des Werkzeugbaus anhand der unternehmensindividuellen Bedarfe und strategischen Positionierung. Die Option der Automatisierung wird nicht direkt betrachtet. Auf die Erhöhung des Automatisierungsgrades konzentriert sich Seifermann, der eine Methodik zu dessen situativ optimaler Erhöhung vorstellt [22]. Diese bezieht sich auf hybride Fertigungszellen und berücksichtigt kostenseitige, qualitative, zeitliche und ergonomische Zielgrößen. Ein Vorgehen zur individuellen Anpassung der Zielgrößen wird nur unzureichend gegeben. Auch das Werkstückspektrum wird nicht betrachtet.

Prümmer bewertet verkettete Fertigungssysteme anhand eines modularen, kennzahlenbasierten Bewertungssystem [4]. Der Fokus liegt auf der Leistungsfähigkeit, der Automatisierungsgrad wird nicht gezielt betrachtet. Nur ansatzweise werden das unternehmensindividuelle Werkstückspektrum und die unternehmensindividuelle Fokussierung berücksichtigt.

Den größten Überdeckungsgrad mit der vorliegenden Zielstellung weisen die Arbeiten von Horstkotte auf [11]. Seine Methodik zur bedarfsgerechten Automatisierung ist jedoch auf die additive Prozesskette der Laser Powder Bed Fusion gerichtet, sodass zur Anwendung auf die mechanische Fertigung in der Einzel- und Kleinserie weiterer Forschungsbedarf besteht, vor allem bei der Bauteilanalyse und der benötigten Flexibilität der Prozessketten.

Nguyen et al. entwickeln eine holistische Methode zur Optimierung des Automatisierungsgrades, indem sie die Prozesse mit dem höchsten Automatisierungspotenzial unter Berücksichtigung tech-



**Bild 3.** Bewertung relevanter Ansätze anhand der abgeleiteten Anforderungen. Grafik: eigene Darstellung

nischer, organisatorischer und wirtschaftlicher Faktoren identifizieren [23]. Die Bedarfsgerechtigkeit des Automatisierungsgrades bleibt unberücksichtigt. Obgleich die Gesamtprozesskette im Fokus steht, fehlt es diesem Ansatz am nötigen Detaillierungsgrad zur Ausgestaltung automatisierter Operationsfolgen. Es bleibt festzustellen, dass kein bestehender Ansatz das vorliegende Problem vollumfänglich lösen kann, **Bild 3**.

## 3 Grobmethodik zur Bestimmung bedarfsgerechter Automatisierungsmöglichkeiten

Im Folgenden wird eine Grobmethodik vorgestellt, welche das aufgezeigte Forschungsdefizit adressiert. Damit wird die bedarfsgerechte Automatisierung in der Einzel- und Kleinserienfertigung durch ein gezieltes Vorgehen für Unternehmen zugänglich. Die Methodik gliedert sich in drei Phasen, **Bild 4**.

### 3.1 Phase 1: Ableitung von Automatisierungskonzepten

Zuerst wird ein Lösungsraum von verschiedenen Automatisierungskonzepten für den Werkzeugbau entwickelt, der Lösungen mit verschiedenen Automatisierungsgraden enthält. Die Ableitung der Automatisierungskonzepte erfolgt durch eine systematische Analyse von Fertigungsumgebungen und der Modellierung ihrer Funktionsstrukturen. Diese Funktionsstrukturen bilden die Interaktion der Fertigungsressourcen als Subsysteme der Fertigung miteinander ab und werden nachfolgend in Bezug auf automatisierbare Funktionserfüllung (Tätigkeiten oder Interaktionen der Subsysteme) bewertet.

Innerhalb dieser Funktionsstrukturen werden relevante Automatisierungskonzepte abgegrenzt. Es handelt sich um generische Konzepte, welche die Art der Interaktion zwischen den (automa-

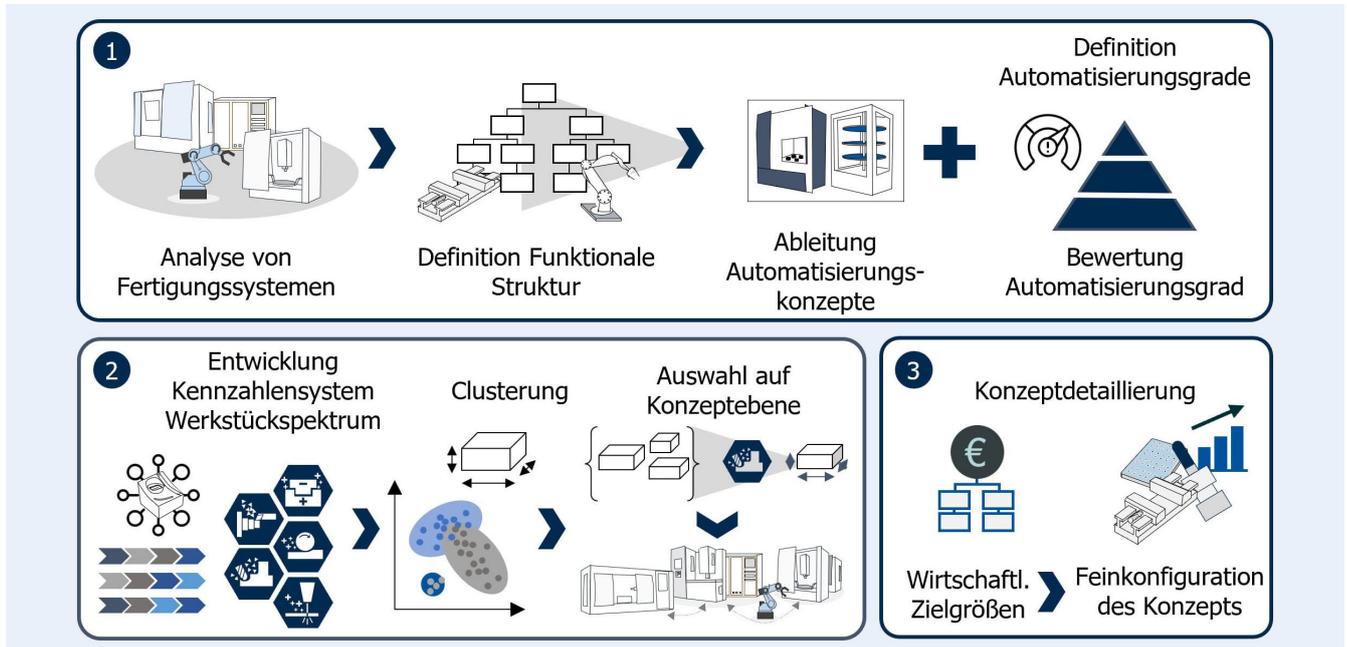


Bild 4. Methodik zur Bestimmung von bedarfsgerechten Automatisierungskonzepten. Grafik: eigene Darstellung

tisierten sowie nicht automatisierten) Subsystemen beschreiben. Zudem wird ein Vorgehen zur Berechnung des Automatisierungsgrades anhand von definierten Kennzahlen benötigt, das den aus Teillösungen zusammengesetzten Gesamtautomatisierungsgrad einer Fertigungsumgebung bewertbar macht.

### 3.2 Phase 2: Auswahl von Automatisierungskonzepten anhand des Werkstückspektrums

Im Anschluss an die Betrachtung der generischen Lösungskonzepte werden die unternehmensseitigen Randbedingungen mit dem Werkstückspektrum als zentralem Betrachtungsgegenstand analysiert. Es werden technologiespezifische Beschreibungsmodelle entwickelt und die theoretische Technologieeignung der Werkstücke auf Basis ihrer Merkmale, wie Abmessungen, Aspektverhältnisse und Toleranzen untersucht. In einem Kennzahlensystem werden diejenigen Kennzahlen strukturiert, die zur Bewertung des Automatisierungspotenzials benötigt werden.

Im nächsten Schritt wird das Werkstückspektrum mithilfe von entwickelnden Cluster-Algorithmen auf Grundlage der zugehörigen Prozessketten sowie der theoretischen Technologieeignung zusammengefasst. Zuletzt werden die für die Werkstückcluster optimalen Automatisierungskonzepte ausgewählt. Die Herleitung der grundsätzlich geeigneten Konzepte erfolgt zunächst technologiespezifisch bevor eine detailliertere Ausgestaltung anhand der geometrischen Eigenschaften der Werkstücke vorgenommen wird. Das Ergebnis sind generische Automatisierungskonzepte auf Technologieebene.

### 3.3 Phase 3: Konzeptdetaillierung und Bewertung auf Basis der wirtschaftlichen Zielgrößen

Die finale Detaillierung und kapazitative Auslegung der gewählten Automatisierungskonzepte erfolgt über wirtschaftliche und unternehmensindividuelle Zielgrößen. Durch die Betrachtung beispielsweise von Kapitalwerten und dem Materialfluss werden

die Automatisierungslösungen auf einer herstellerunabhängigen Ebene bis hin zu ihrer Ausstattung und ihren Bedarfen (zum Beispiel Anzahl Werkzeugwechslerplätze, Anzahl Palette, benötigte Mitarbeiterkapazität) ausdetailliert.

## 4 Fazit

Aufgrund der Charakteristika der Einzel- und Kleinserienfertigung ist die Anwendung bestehender Automatisierungsvorgehen nicht geeignet. Grund ist die fehlende Standardisierbarkeit, vor allem resultierend aus der Heterogenität der Bauteile und der Prozessketten, aber auch aufgrund der teils sehr unterschiedlichen strategischen Ausrichtung der Betriebe, wie sie beispielsweise in der Branche Werkzeugbau zu beobachten ist.

Im Beitrag wurde erörtert, dass ein Ansatz zur Lösung dieses Problems folgende Anforderungen erfüllen muss: Bewertung der Bauteile anhand ihrer relevanten Charakteristika (A1), Betrachtung der Gesamtprozesskette (A2), tiefgehende Betrachtung der Operationsfolgen (A3), Berücksichtigung der strategischen Randbedingungen (A4), Erreichung einer quantifizierbaren Optimierung der Fertigung durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades (A5).

Es wurde festgestellt, dass kein bestehender Ansatz diese Anforderungen ausreichend erfüllt. Um die Forschungslücke zu schließen, wurde eine Grobmethodik entwickelt, welche eine Grundlage zur bedarfsgerechten Identifikation von Automatisierungslösungen bildet. Nach dieser Grobmethodik werden zunächst generische Automatisierungskonzepte zur Anwendung in der mechanischen Fertigung identifiziert und deren Automatisierungsgrade anhand eines zu entwickelnden Vorgehens bewertet. Anschließend werden das unternehmensindividuelle Bauteilspektrum und die zugehörigen Prozessketten analysiert und geclustert. Für die entstandenen Cluster wird zunächst auf Technologieebene eine Grobauswahl von Automatisierungskonzepten vorgenommen, die anschließend anhand der geometrischen sowie der wirt-

schaftlichen und individuellen strategischen Zielgrößen detailliert werden.

## Literatur

- [1] Boos, W.; Lukas, G.; Barth, S. et al.: Tooling in Germany. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH 2023
- [2] Boos, W.; Arntz, K.; Johannsen, L. et al.: Erfolgreich Automatisieren im Werkzeugbau. Aachen: WBA Aachener Werkzeugbau Akademie GmbH 2023
- [3] Tebis Consulting: Studie zur Marktlage 2023. Aufwärtstrend erkennbar – Aktuelle Tebis Consulting-Umfrage zur Marktlage im Werkzeug-, Modell- und Formenbaue zur Marktlage im Werkzeug-, Modell- und Formenbau. Internet: [www.tebis-consulting.com/de/studie-zur-marktlage-2023/n2651](http://www.tebis-consulting.com/de/studie-zur-marktlage-2023/n2651) Zugriff am 18.10.2024
- [4] Prümmer, M.: Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem der Leistungsfähigkeit verketteter Fertigungssysteme in der mechanischen Fertigung des Werkzeugbaus. Dissertation, RWTH Aachen University, 2020
- [5] Deutsche Industrie- und Handelskammer (DIHK): Auslandsinvestitionen in der Industrie 2024. Sonderauswertung der DIHK-Konjunkturumfrage vom Jahresbeginn 2024. Stand: 2024: Internet: [www.dihk.de/resource/blob/114840/96224c77096649b2e2af7ae8fdd5f29b/international-auslandsinvestitionen-in-der-industrie-2024-data.pdf](http://www.dihk.de/resource/blob/114840/96224c77096649b2e2af7ae8fdd5f29b/international-auslandsinvestitionen-in-der-industrie-2024-data.pdf). Zugriff am 18.10.2024
- [6] TMG Consultants: Kostendruck in der Produktion. Internet: [www.tmg.com/kostendruck-in-der-produktion](http://www.tmg.com/kostendruck-in-der-produktion). Zugriff am 18.10.2024
- [7] Heeschen, D.: Kennzahlenbasierte Auswahl der Fertigungstechnologien und -ressourcen im industriellen Werkzeugbau. Dissertation, Technische Hochschule Aachen 2015
- [8] Groß, R.: Schlanke Unikatfertigung. Zweistufiges Taktphasenmodell zur Steigerung der Prozesseffizienz in der Unikatfertigung auf Basis der Lean Production. Wiesbaden: Gabler 2010
- [9] Zheng, C.; Du, Y.; Sun, T. et al.: Multi-agent collaborative conceptual design method for robotic manufacturing systems in small- and mid-sized enterprises. *Computers & Industrial Engineering* 183 (2023), #109541
- [10] Windmark, C.; Gabrielson, P.; Andersson, C. et al.: A Cost Model for Determining an Optimal Automation Level in Discrete Batch Manufacturing. *Procedia CIRP* 3 (2012), pp. 73–78
- [11] Horstkotte, R.; Heinrich, F.; Prümmer, M. et al.: Generation and evaluation of automation concepts of additive process chains with Laser Powder Bed Fusion (LPBF). *Procedia CIRP* 96 (2021), pp. 97–102
- [12] Appelfeller, W.; Feldmann, C.: Nutzenbewertung von Investitionen in die Digitalisierung. In: Appelfeller, W.; Feldmann, C. (Hrsg.): Die digitale Transformation des Unternehmens. Systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung. Heidelberg: Springer Verlag 2023, S. 313–334
- [13] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2005
- [14] Heinrich, B.; Linke, P.; Glöckler, M.: *Grundlagen Automatisierung. Sensorik, Regelung, Steuerung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2017
- [15] Ihme, J.: *Logistik im Automobilbau. Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau*. München: Hanser 2006
- [16] DMG Mori: LPP – Moderne Palettenpoolsystem für bis zu 8 Maschinen und 99 Paletten. Internet: <https://de.dmgmori.com/produkte/automation/palettenhandling/linearspeichersystem/lpp>. Zugriff am 18.10.2024
- [17] Boos, W.: Methodik zur Gestaltung und Bewertung von modularen Werkzeugen. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 2008
- [18] Klotzbach, C.: *Gestaltungsmodell für den industriellen Werkzeugbau*. Aachen: Shaker 2007
- [19] Klocke, F.; Eversheim, W.: *Werkzeugbau mit Zukunft. Strategie und Technologie*. Heidelberg: Springer 1998
- [20] Fasth, A.: *Quantifying Levels of Automation -to enable competitive assembly systems*. Göteborg: Chalmers Reproservice 2012
- [21] Jörgen Frohm: *Levels of automation in production systems*. Dissertation, Chalmers University of Technology, 2008
- [22] Seifermann, S.: *Methode zur angepassten Erhöhung des Automatisierungsgrades hybrider, schlanker Fertigungszellen*. Dissertation, TU Darmstadt, 2018
- [23] Nguyen, T.; Bonini, M.; Langenbahn, J. E. et al.: Automation? Yes ... But Where to Begin? *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (2021), pp. 435–441



**Anna Koch, M.Sc.**   
[a.koch@mti.rwth-aachen.de](mailto:a.koch@mti.rwth-aachen.de)  
 Tel. +49 241 / 80-28186  
 Foto: Vincent Sima

**Tammo Dannen, M.Eng.** 

**Philipp Niemietz, M.Sc.** 

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs** 

Manufacturing Technology Institute –  
 MTI der RWTH Aachen  
 Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen  
[www.mti.rwth-aachen.de](http://www.mti.rwth-aachen.de)

