

Theoretischer Bezugsrahmen für kompetenzorientierte variantenreiche Produktionsanläufe

Kompetenzorientierter Produktionsanlauf

L. Mastroianni, M. Meiertöns, M. Schmidt

ZUSAMMENFASSUNG Steigende Produktvarianz und verkürzte Produktlebenszyklen erhöhen die Anlaufkomplexität. Zur Beherrschung dieser Komplexität ist die Berücksichtigung von Mitarbeiterkompetenzen, besonders in überwiegend manuell geprägten Montagesystemen, von zentraler Bedeutung. Dieser Beitrag entwickelt einen Bezugsrahmen, der technische, produktbezogene und kompetenzbezogene Systemgrößen im Anlauf strukturiert. Auf Basis einer integrierten Literaturanalyse werden diese Größen identifiziert und systematisiert.

STICHWÖRTER

Produktionsanlauf, Kompetenzentwicklung, variantenreiche Montage

Competence-based production ramp-up – Theoretical framework for competence-based ramp-up in high-variant production

ABSTRACT Increasing product variety and shorter product life cycles increase the complexity of production ramp-ups. To manage this complexity, it is of central importance to consider employee competencies, particularly in predominantly manual assembly systems. This paper develops a framework that structures technical, product-related, and competence-related system variables during the ramp-up. Based on an integrative literature review, these variables are identified and systematized.

1 Einleitung

Produzierende Unternehmen stehen aufgrund variantenreicher Montagesysteme vor wachsenden Herausforderungen, besonders im Produktionsanlauf. Eine zunehmende Variantenvielfalt bei kürzer werdenden Produktlebenszyklen führt dazu, dass die Zahl an Anläufen steigt und diese an Komplexität gewinnen. [1, 2]

Gleichzeitig stoßen Automatisierungslösungen in solchen flexiblen Umgebungen an ihre Grenzen, sodass in der Praxis häufig hybride oder vollständig manuell geprägte Montagesysteme eingesetzt werden [3]. In der Automobilendmontage liegt der Automatisierungsgrad lediglich bei 5 %, was die weiterhin zentrale Bedeutung menschlicher Arbeit für die Bewältigung hoher Produktvielfalt unterstreicht [4].

Die Hochlaufphase verstanden als die Phase, in der die Outputmenge einer neuen Montagelinie oder eines neuen Produktes auf das Niveau der Serienproduktion erhöht wird, gilt dabei als erfolgskritisch für den späteren Serienbetrieb. Viele Unternehmen verfehlen ihre Zeit-, Kosten- oder Qualitätsziele im Anlauf und ein Großteil der Verzögerungen bei Produkteinführungen ist auf Schwierigkeiten in dieser Phase zurückzuführen. [5]

Trotz der praktischen Bedeutung fehlt bislang eine hinreichende theoretische Fundierung des Themenfeldes. Die Hochlaufphase ist geprägt durch das komplexe Zusammenwirken technischer, menschlicher und produktbezogener Faktoren, doch ein umfassender Bezugsrahmen zur systematischen Erfassung dieser Systemgrößen existiert derzeit nicht. Es mangelt an einer integrierten Betrachtung, die die systemischen Einflussgrößen und ihre Wirkzusammenhänge im Produktionsanlauf ganzheitlich

abbildet. Hier setzt dieser Beitrag an, indem er einen theoretischen Rahmen für die Analyse des Produktionsanlaufs in variantenreichen Montagesystemen entwickelt.

Ziel ist es, relevante Systemgrößen in manuellen, variantenreichen Montagelinien während der Anlaufphase zu identifizieren und strukturiert darzustellen. Unter Systemgrößen werden dabei alle Größen verstanden, die das Verhalten des Montagesystems beeinflussen oder beschreiben.

2 Herausforderungen und Forschungsbedarf im variantenreichen Produktionsanlauf

Im variantenreichen Produktionsanlauf greifen mehrere Bereiche ineinander. Neben der klassischen Betrachtungsperspektive des soziotechnischen Systems, zu dem das technische Teilsystem (Arbeitsplatz, Produktionsmittel) und das soziale Teilsystem (Mensch, Organisation) gehören [6], tritt die spezifische Dynamik der Anlaufphase hinzu. Für ein fundiertes Verständnis des Anlaufs ist es daher erforderlich, diese Dimensionen gemeinsam und in ihren Wechselwirkungen zu analysieren.

2.1 Besonderheiten variantenreicher Produktionsanläufe in manuell geprägten Montagebereichen

Der Produktionsanlauf bildet die Übergangsphase zwischen Pilotserie und stabiler Serienproduktion und beschreibt die schrittweise Leistungssteigerung eines Produktionssystems unter Sicherstellung der geplanten Qualität, Kosten und Reproduzier-

barkeit [7, 8]. Nach Abschluss von Vor- und Nullserien, in denen Prototypen und seriennahe Produkte zur Validierung von Prozessen, Prüfschritten und Betriebsmitteln produziert werden [8], beginnt mit der Serienfreigabe die Hochlaufphase. Ziel ist die Erreichung der geplanten Ausbringungsmenge, Prozessstabilität und Normalproduktivität als Voraussetzung für den Übergang in die Serienphase. [7, 9]

Der Übergang von bestehenden zu neuen Produkten kann strategisch abrupt oder gleitend erfolgen. Volume-First-Strategien zielen auf einen schnellen Hochlauf hoher Stückzahlen und setzen eine geringe Variantenvielfalt sowie einen starken Zeitfokus voraus. Slow-Motion-Strategien erlauben hingegen einen risikoärmeren, parallelen Hochlauf mehrerer Varianten, verlängern jedoch die Dauer bis zur Stabilisierung. [10, 11]

Unabhängig von der gewählten Strategie unterscheidet sich der Anlauf grundlegend von der reifen Serienproduktion. Geringes Wissen über neue Produkte und Prozesse, hohe Störanfälligkeit und häufige Unterbrechungen zur Fehlerkorrektur prägen diese Phase. Kommt es zu Verzögerungen, verschiebt sich der Markteintritt. Gleichzeitig steigt die Kapitalbindung und der Aufwand für die Fehlerbeseitigung nimmt zu. [9, 11]

Das im Anlauf entstehende Erfahrungswissen wird vielfach nicht systematisch dokumentiert und steht für zukünftige Produkteinführungen nur eingeschränkt zur Verfügung [9, 12]. Vor diesem Hintergrund geraten die Zielgrößen Zeit, Kosten und Qualität in einen ausgeprägten Zielkonflikt. Ein schneller Hochlauf reduziert zwar Opportunitätskosten, erhöht aber das Risiko instabiler Prozesse und Qualitätsmängel. Eine stärkere Qualitätsfokussierung erfordert hingegen mehr Zeit und führt zu höheren Anlaufkosten [3, 13]. Dies macht ein integriertes Anlaufmanagement mit transparenten Kenn- und Zielwertsystemen erforderlich, das Zielgrößen nicht isoliert optimiert, sondern in ihrem Zusammenhang steuert [14].

Mit steigender Variantenvielfalt verschärfen sich diese Herausforderungen [9, 15, 16]. Produkt- und Prozessanpassungen wirken wechselseitig, erhöhen den Koordinationsaufwand und führen zu einer wachsenden Zahl separat zu erlernender Tätigkeiten [17]. Dies verringert die Regelmäßigkeit der Tätigkeitsausführung, verlängert Lernprozesse und verstärkt Vergessenseffekte, was sich unmittelbar auf Ausbringungsmengen und Personalbedarf im Hochlauf auswirkt [18].

Variantenreiche Produktionsanläufe in der Montage unterscheiden sich also deutlich von klassischen Ein-Produkt-Anläufen. Häufig ist nicht nur eine neue Produktgeneration, sondern ein gesamtes Produktprogramm mit zahlreichen Varianten in kurzer Zeit in die Serienmontage zu überführen [3, 19]. Die erhöhte Produkt- und Variantenvielfalt wirkt sich direkt auf Anzahl und Heterogenität der auszuführenden Tätigkeiten, die Prozessabfolgen sowie die Belastung der beteiligten Ressourcen aus [16, 20]. In überwiegend manuell geprägten Montagesystemen wird diese Komplexität primär durch die Mitarbeiter abgefangen.

2.2 Lernen und Vergessen: Kompetenzentwicklung im variantenreichen Produktionsanlauf

Die Kompetenzen der Mitarbeiter sind für die Bewältigung variantenreicher Produktionsanläufe zentral. Die Ausführungszeiten manueller Tätigkeiten folgen typischerweise Lernkurven. Mit zunehmender Wiederholung sinken Bearbeitungszeiten und Fehlerquoten, die Produktivität steigt [21–23]. Unterbrechungen

der Ausführung, etwa durch Schichtwechsel, Variantenumstellungen oder unregelmäßige Auftragsfolgen, führen hingegen zu Vergessenseffekten, die zuvor aufgebaute Kompetenzen teilweise wieder abbauen [24–26].

In variantenreichen Montagelinien mit vielen unterschiedlichen Tätigkeiten und unregelmäßig wiederkehrenden Aufgaben entsteht daraus ein dynamisches Spannungsfeld zwischen Lernen und Vergessen. Job-Rotation, Qualifikationskonzepte und die Gestaltung von Einsatzplänen bestimmen, welche Tätigkeiten mit welcher Frequenz von welchen Mitarbeitern ausgeführt werden und wie sich individuelle Kompetenzprofile über die Zeit entwickeln. [27–29] Bisherige Arbeiten adressieren diese Zusammenhänge punktuell, etwa durch simulationsbasierte Personaleinsatzplanung [30] oder tätigkeitsbasierte Lern- und Vergessensmodelle [31], erfassen jedoch die zugrunde liegenden Systemgrößen des Produktionsanlaufs bislang nicht in ihrer Breite und Systematik.

2.3 Produktvielfalt, Tätigkeiten und Reihenfolgen im Hochlauf

Die Komplexität variantenreicher Produktionsanläufe zeigt sich unmittelbar in der Anzahl zu produzierender Produkte und der dafür auszuführenden Tätigkeiten. Hohe Variantenvielfalt geht mit einer großen Zahl unterschiedlicher Merkmalsausprägungen und Konfigurationsmöglichkeiten einher. Mit jeder neuen Variante steigt potenziell die Zahl der im System vorhandenen Tätigkeiten, die im Produktionsanlauf beherrscht werden müssen. [16, 20]

Aus produktionstechnischer Sicht lassen sich zwei Ebenen unterscheiden: (1) die Menge unterschiedlicher Tätigkeiten und (2) deren Verteilung über Produkte, Stationen und Zeit (Wie häufig und in welchen Kombinationen treten diese Tätigkeiten auf?). Während die erste Ebene primär durch Produktstruktur und Prozessplanung geprägt wird, ergibt sich die zweite Ebene aus Produktionsprogramm und gewählter Produktionsreihenfolge im Anlauf [18, 32].

Die Produktionsreihenfolge bestimmt, welche Produkte in welcher Reihenfolge durch das System laufen und damit auch, in welcher zeitlichen Struktur die zugehörigen Tätigkeiten an den Stationen anfallen [32]. Stark gemischte Programme führen zu hohen Schwankungen in der Belastung und den auszuführenden Tätigkeiten, während gebündelte Sequenzen ähnlicher Varianten die Wiederholrate bestimmter Tätigkeiten kurzfristig erhöhen, andere Tätigkeiten jedoch zeitweise vollständig ausblenden [20, 26].

Für den Produktionsanlauf bedeutet dies: In der frühen Hochlaufphase sind Produkte und Prozesse noch nicht stabilisiert, gleichzeitig müssen zahlreiche Varianten und Tätigkeiten eingeführt und erprobt werden [3, 19]. Je nach Gestaltung von Produktionsprogramm und Produktionsreihenfolge kann dies zu lokalen Überlastungen, Engpässen oder unterschiedlich starken Lerneffekten führen.

Die Kombination aus Produkt, Tätigkeit und Produktionsreihenfolge bildet damit eine eigenständige, eng mit den übrigen Systemelementen verknüpfte Dimension des variantenreichen Produktionsanlaufs. Sie bestimmt, welche Tätigkeiten mit welcher Frequenz und in welcher zeitlichen Abfolge im System auftreten und damit auch, welche Lerneffekte und Vergessensprozesse auf Ebene der Mitarbeiter entstehen.

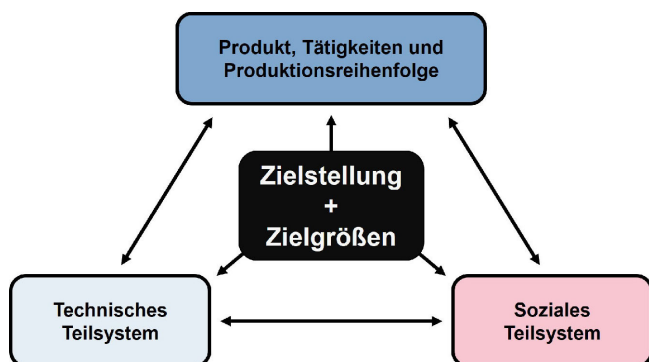


Bild 1 Wirkbereiche des Produktionsanlaufs. Grafik: IFA

2.4 Bedarf eines systemorientierten Bezugsrahmens für Systemgrößen

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Charakteristika variantenreicher Produktionsanläufe, die kompetenzbezogenen Mechanismen von Lernen und Vergessen (Abschnitt 2.2) sowie die in Abschnitt 2.3 dargestellten Eigenschaften von Produkt, Tätigkeit und Produktionsreihenfolge ergeben gemeinsam ein dreidimensionales Bild:

1. Der Anlauf als instabile Phase mit spezifischen Ziel- und Rahmenbedingungen,
2. der Mensch mit einem durch Lernen und Vergessen geprägten Kompetenzverlauf und
3. Produkt, Tätigkeit und Produktionsreihenfolge als strukturelle Taktgeber des Anlaufs.

Die Forschungslage zum Produktionsanlauf ist insgesamt fragmentiert.

Wie in den Abschnitten 2.1 bis 2.3 dargestellt, liegen zwar zahlreiche Arbeiten zu einzelnen Teilbereichen vor, diese betrachten den Anlauf, die Produktion oder die Kompetenzentwicklung jedoch überwiegend isoliert. Ein konsistenter, systemorientierter Bezugsrahmen, der die relevanten Systemgrößen integriert beschreibt, fehlt bislang. Hier setzt der vorliegende Beitrag an.

3 Methodisches Vorgehen

Die in diesem Beitrag betrachteten Systemgrößen werden auf Basis einer integrierten Literaturanalyse nach dem Vorgehen von *Torraco* identifiziert [33]. Dazu werden Beiträge zum Produktionsanlauf, zur variantenreichen, überwiegend manuellen Montage, zur Reihenfolgebildung, zur Personaleinsatzplanung sowie zu Lern- und Vergessenseffekten systematisch ausgewertet (siehe Kapitel 2). Ergänzend fließen projektinterne Modelle und Wirkdiagramme ein, sofern sie relevante Größen des Anlaufs benennen.

Aus den ausgewählten Quellen werden alle Größen extrahiert, die das Verhalten des Montagesystems im Anlauf beeinflussen oder zu dessen Bewertung herangezogen werden. Diese Größen werden anschließend konsolidiert (Zusammenführung von Synonymen, Aufspaltung zu breit gefasster Begriffe) und in zwei Schritten systematisiert: [33, 34]:

1. Auf Basis des in Abschnitt 2 beschriebenen soziotechnischen Systemverständnisses wird ein Bezugsrahmen mit vier Wirkbereichen festgelegt. Die extrahierten Systemgrößen werden diesen Wirkbereichen zugeordnet.

2. Anschließend wird bestimmt, in welcher Form die jeweiligen Größen auf das Gesamtsystem wirken beziehungsweise in welchem Umfang gezielt Einfluss auf sie genommen werden kann. Die Ergebnisse dieser Systematisierung werden in den folgenden Abschnitten kapitelweise entlang der identifizierten Wirkbereiche vorgestellt.

4 Wirkgrößen im kompetenzbasierten, variantenreichen Anlauf

In diesem Abschnitt werden die identifizierten Systemgrößen in einem systemorientierten Bezugsrahmen zusammengeführt. Zunächst werden die zugrunde liegenden Wirkbereiche beschrieben (Abschnitt 4.1). Anschließend werden die zugeordneten Systemgrößen abschnittsweise dargestellt und hinsichtlich ihrer Rolle im Anlauf eingeordnet.

4.1 Wirkbereiche

Die Einteilung der Wirkbereiche folgt dem soziotechnischen Systemverständnis des Produktionsanlaufs (siehe Abschnitt 2). Das beobachtbare Anlaufverhalten entsteht aus dem Zusammenspiel von (1) Produkt, Tätigkeiten und Produktionsreihenfolge als arbeitsinhaltliche Struktur, (2) dem sozialen Teilsystem als Träger von Kompetenz sowie (3) dem technischen Teilsystem als Ressourcen- und Unterstützungsstruktur. Übergeordnet wirkt die Zielstellung des Anlaufs, die alle drei Bereiche beeinflusst und normativ ausrichtet. Eine schematische Darstellung dieser Wirkbereiche und deren Zusammenspiel ist in **Bild 1** dargestellt.

Im ersten Wirkbereich stehen die Produkte, die daraus abgeleiteten Tätigkeiten und die Produktionsreihenfolge im Fokus. Die Reihenfolge bestimmt, welche Tätigkeiten wann und an welcher Station ausgeführt werden müssen und prägt damit die zeitliche Struktur des Anlaufs (siehe Abschnitt 2.3).

Das soziale Teilsystem umfasst die Mitarbeiter mit ihren Kompetenzen, Lern- und Vergessensprozessen sowie den organisationalen Personaleinsatz (siehe Abschnitt 2.2). In einem kompetenzbasierten Verständnis des Anlaufs steht im Vordergrund, wie Qualifikationen aufgebaut, erhalten und über Variantenwechsel hinweg nutzbar gemacht werden.

Das technische Teilsystem beschreibt Arbeitsplätze, Verkettungsart und weitere technische Rahmenbedingungen der betrachteten Montagelinien. Entscheidungen im Anlauf werden in allen drei Bereichen getroffen. Der Anlauf bildet daher keine eigene zusätzliche Dimension, sondern spiegelt sich durch spezifische Entscheidungsmöglichkeiten integrativ in allen Wirkbereichen wider. Die Systemgrößen werden entsprechend in einem gemeinsamen Modell zusammengeführt, um statt getrennter Teilmodelle ein konsistentes Gesamtbild des variantenreichen Produktionsanlaufs zu erhalten.

Alle aus Literatur und Projektkontext identifizierten Größen werden den vier Wirkbereichen zugeordnet und als Stellgrößen, Einflussgrößen, Störgrößen oder Zielgrößen klassifiziert. Stellgrößen sind Systemgrößen, auf die im Anlauf direkt eingewirkt werden kann. Einflussgrößen prägen das Systemverhalten, werden jedoch nur mittelbar über andere Systemgrößen beeinflusst und nicht gezielt eingestellt. Störgrößen sind nicht aktiv beeinflussbare, meist unvorhersehbare Einwirkungen auf das System. Zielgrößen geben den angestrebten Systemzustand vor und dienen als

Tabelle 1 Systemgrößen – Wirkbereich: Produkt, Tätigkeiten und Produktionsreihenfolge.

Systemgröße	Klassifikation	Erklärung	Quelle
Ausführungsanzahl (je Tätigkeit)	Einflussgröße	Die Anzahl, wie oft die betrachtete Tätigkeit ausgeführt wird (mitarbeiterunabhängig).	[21, 22, 31, 35]
Bearbeitungszeit (je Produkt)	Einflussgröße	Summe der Ausführungszeiten der einzelnen Tätigkeiten, die für das Produkt benötigt werden.	[21, 23, 36]
Durchlaufzeit (je Produkt)	Einflussgröße	Zeitspanne vom Eintritt eines Produkts in das betrachtete Produktionssystem bis zu seinem Verlassen nach Abschluss aller Prozessschritte.	[9-11, 17]
Losgröße	Stell- / Einflussgröße	Anzahl gleicher Produkte, die ohne Unterbrechung durch andere Produkte direkt nacheinander produziert werden.	[26, 32, 37]
(Volatilität der) Nachfrage (je Produkt)	Einfluss- / Störgröße	Vom Kunden erzeugte Nachfrage. Diese Nachfrage kann mit der Zeit schwanken. Der Kunde kann eine andere Abteilung im Unternehmen sein.	[12, 30, 38]
Produktanzahl	Stell- / Einflussgröße	Anzahl der verschiedenen zu produzierenden Produkte (neu/alt).	[16, 38]
Produktähnlichkeit	Einflussgröße	Ähnlichkeit von Produkten, bezogen auf deren Tätigkeiten.	[16, 35]
Produktänderung	Störgröße	Veränderung des Produktes in seinen Eigenschaften.	[13, 17, 37]
Produktionsmenge (je Produkt)	Einflussgröße	Die Menge, die von einem Produkt im betrachteten Zeitraum produziert werden soll.	[3, 10, 11]
Produktionsreihenfolge	Stellgröße	Die Reihenfolge, in der die jeweiligen Produkte die Produktion durchlaufen.	[26, 32, 39]
Produktpriorität	Stell- / Einflussgröße	Priorisierung der einzelnen Produkte, insbesondere die Gewichtung zwischen bestehenden und neuen Produkten.	[32, 37]
Reihenfolgestrategien	Stellgröße	Logik, nach der die zu produzierenden Produkte in eine Reihenfolge gebracht und in die Produktion eingesteuert werden.	[32, 37, 39]
Neue/bestehende Tätigkeiten	Einflussgröße	Menge der Tätigkeiten, die neu hinzukommen / die bereits ausgeführt werden.	[16, 23, 38]
Tätigkeitsanzahl (je Produkt)	Einflussgröße	Menge der Tätigkeiten, die jedes Produkt besitzt.	[16, 35]
Tätigkeitsanzahl (Produktportfolio)	Einflussgröße	Menge aller Tätigkeiten, die sich aus der Betrachtung aller Produkte ergeben.	[16, 23, 35, 38]
Tätigkeitsähnlichkeit	Einflussgröße	Ähnlichkeit zwischen zwei als unterschiedlich eingestuften Tätigkeiten.	[31, 35]
Tätigkeitskomplexität (je Tätigkeit)	Einflussgröße	Komplexität, die eine Tätigkeit besitzt, in Bezug auf die Erlernbarkeit und die Anforderungen an einen Mitarbeiter.	[16, 20, 35]

Referenz für Planung, Steuerung und Bewertung des Anlaufs. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die Einstufung als Stell- oder Einflussgröße szenarioabhängig ist und mit dem verfügbaren Entscheidungsspielraum im Anlauf sowie dem jeweiligen Planungshorizont variiert.

4.2 Produkt, Tätigkeiten und Produktionsreihenfolge

Im variantenreichen Produktionsanlauf ist eine Vielzahl ähnlicher, jedoch nicht identischer Produkte zu berücksichtigen. Neben klassischen Größen der Produktion und des Anlaufs (zum Beispiel Produktionsmenge, Bearbeitungszeit, Durchlaufzeit, Losgröße) spielt daher die Struktur der Tätigkeiten innerhalb und zwischen Varianten eine zentrale Rolle. [16]

Für die Berücksichtigung von Kompetenzen sowie deren Veränderung durch Lern- und Vergessenseffekte genügt eine reine Produktebene nicht. Aufgrund der Ähnlichkeit der Produkte und der damit verbundenen Überschneidungen müssen die zugehörigen Tätigkeiten explizit betrachtet werden [35]. Je nach Produktähnlichkeit werden identische Tätigkeiten für unterschiedliche Produkte benötigt. Die Ausführung dieser Tätigkeiten führt zu

Lerneffekten und Kompetenzaufbau bei den Mitarbeitern, die sich wiederum auf die Bearbeitung anderer Produkte mit denselben Tätigkeiten auswirken. Alle für diesen Bereich identifizierten Größen sind in **Tabelle 1** aufgelistet und mit den entsprechenden Quellen versehen [3, 9–13, 16, 17, 20–23, 26, 30–32, 35–39].

Die Möglichkeit, in diesem Wirkbereich über Stellgrößen auf verschiedene Einflussgrößen einzuwirken, hängt maßgeblich vom Zeitpunkt der Planung und vom verfügbaren Entscheidungsspielraum ab. Besteht in der Produktentwicklung oder der Produktportfolioentwicklung noch Gestaltungsfreiheit, kann gezielt auf Tätigkeitsinhalte und deren Ähnlichkeiten eingewirkt werden. In der klassischen Anlaufplanung ist dieser Spielraum jedoch in der Regel stark eingeschränkt oder bereits ausgeschöpft (daher die Einstufung einzelner Systemgrößen sowohl als Stell- als auch als Einflussgrößen). In dieser Phase bilden Entscheidungen über Losgrößen, Reihenfolgestrategien und die sich daraus ergebende Produktionsreihenfolge die typischen Stellgrößen in diesem Wirkbereich.

Die Tätigkeitsreihenfolge bildet den Kern dieses Wirkbereichs. Sämtliche Größen wirken direkt oder indirekt auf die im Anlauf auszuführenden Tätigkeiten und deren zeitliche Abfolge.

Tabelle 2 Systemgrößen – Wirkbereich: Technisches Teilsystem.

Systemgröße	Klassifikation	Erklärung	Quelle
Arbeitsstationsanzahl	Einflussgröße	Die Menge an Arbeitsstationen, an denen Mitarbeiter in der Montage arbeiten.	[15, 16]
Defekte Betriebsmittel	Störgröße	Ausfall von Betriebsmitteln, etwa durch Anlagestörungen oder defekte Maschinen.	[9, 13, 15]
Informationsbereitstellung / Assistenzsysteme	Stell- / Einflussgröße	Die Form und der Inhalt, mit denen Informationen an einer Montagestation bereitgestellt werden.	[12, 19]
Lieferfehler/Lieferkettenprobleme	Störgröße	Fehlendes oder falsches Material infolge von Störungen in Lieferung oder Lieferkette.	[9, 11, 13]
Montagelinienanzahl	Einflussgröße	Die Anzahl an Linien in der Produktion; je Linie gibt es eine oder mehrere Arbeitsstationen.	[10, 16]
Montageprozess	Einfluss- / Stellgröße	Der technische Prozess, der notwendig ist, um eine Tätigkeit auszuführen.	[10, 15]
Prozessänderungen	Störgröße	Die Anpassung/Veränderung von Montageprozessen.	[13, 17]
Prozessstabilität	Einflussgröße	Grad, mit dem ein Prozess über die Zeit hinweg reproduzierbar, störungsarm und mit erwarteter Leistungs- und Qualitätsfähigkeit betrieben werden kann.	[15, 17]
Puffergröße	Einfluss- / Stellgröße	Größe der Puffer vor, hinter und zwischen Arbeitsstationen.	[15, 17]
Verkettungsart	Einfluss- / Stellgröße	Die Form, mit der die Stationen innerhalb einer Linie miteinander verkettet sind (starr, flexibel, abhängig von Puffergröße).	[15, 16]

4.3 Technisches Teilsystem

Das technische Teilsystem beschreibt die technische Ausgestaltung des Montagesystems und bildet viele der äußeren Rahmenbedingungen, unter denen der Anlauf stattfindet. Es umfasst überwiegend klassische Größen der technischen Montageplanung wie Anzahl und Gestaltung der Arbeitsstationen, Ergonomie, Anzahl und Struktur der Montagelinien, Verkettungsart sowie den zugrunde liegenden Montageprozess.

Größen, die auch im stabilen Serienbetrieb relevant sind, rücken im Anlauf besonders in den Fokus, da sie in dieser Phase schwerer zu planen und zu beherrschen sind und häufig zentrale Herausforderungen verursachen. Dazu zählen insbesondere Prozessänderungen, fehlerhafte oder noch nicht ausreichend erprobte Betriebsmittel und falsche oder verspätete Lieferungen. Diese Faktoren sind im Anlauf nur eingeschränkt prognostizierbar und treten oft als Störgrößen auf, die die Stabilisierung des Systems verzögern und zusätzliche Koordinations- und Anpassungsaufwände auslösen. Alle für diesen Bereich identifizierten Größen sind in **Tabelle 2** aufgelistet und mit den entsprechenden Quellen versehen [9–13, 15–17, 19].

Das technische Teilsystem bildet aufgrund seiner physischen Komponenten und externen Abhängigkeiten einen vergleichsweise starren Teil der Systemgrößen, auf den, je nach Betrachtungshintergrund, im Anlauf nur begrenzt aktiv eingewirkt werden kann. Neben der Bereitstellung von Informationen und der Unterstützung durch Assistenzsysteme hängt es stark vom jeweiligen Szenario ab, ob im Hochlauf Anpassungen an Verkettungsart, Puffergrößen oder am eigentlichen Montageprozess noch möglich sind. Dies verdeutlicht, dass bei der Planung des technischen Montagesystems vielfältige Abhängigkeiten und Anforderungen frühzeitig zu berücksichtigen sind, einschließlich der spezifischen Anforderungen des Anlaufs.

4.4 Soziales Teilsystem

Im sozialen Teilsystem stehen die Mitarbeiter sowohl als Individuen als auch als Gruppe im Fokus. In diesem Beitrag wird, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, Kompetenz als Fähigkeit verstanden, eine Tätigkeit in einer bestimmten Zeit auszuführen. Die Kompetenz, welche ein Mitarbeiter zu einem bestimmten Zeitpunkt besitzt, ist damit eine dynamische Größe, die sich durch die Ausführung einer Tätigkeit (Lernen) und deren Ausbleiben (Vergessen) im Zeitverlauf verändert. Welche Tätigkeiten in welcher Reihenfolge ausgeführt werden, wird durch die individuelle Tätigkeitsreihenfolge vorgegeben und bestimmt somit die auftretenden Lern- und Vergessensprozesse.

Der Großteil der Stellgrößen dieses Wirkbereichs beeinflusst die Reihenfolge und Häufigkeit der von einer Person auszuführenden Tätigkeiten. Hier bestehen Gestaltungsmöglichkeiten sowohl hinsichtlich der Anzahl unterschiedlicher Tätigkeiten pro Mitarbeiter (mitarbeiterspezifischer Tätigkeitsumfang) als auch hinsichtlich der Ausführungsfrequenz einzelner Tätigkeiten (tätigkeitsspezifische Ausführungsanzahl). Zentraler Hebel ist die Personaleinsatzplanung, die zum Beispiel über Schichtmodelle, Job-Rotation oder Qualifikationskonzepte beeinflusst werden kann, gleichzeitig aber Randbedingungen wie Fluktuation, Krankheit, Urlaub oder den Einsatz von Leiharbeit berücksichtigen muss. Alle für diesen Bereich identifizierten Größen sind in **Tabelle 3** aufgelistet und mit den entsprechenden Quellen versehen [5, 6, 9, 18, 20–31, 35, 36, 40–46].

Sowohl die in diesem Wirkbereich getroffenen Entscheidungen als auch die Entscheidungen in den übrigen Bereichen wirken sich auf die Kompetenz einzelner Mitarbeiter ebenso wie auf die Kompetenz der Gesamtheit aus. Wird Kompetenz über die Ausführungszeit einer Tätigkeit abgebildet, lassen sich diese Wirkungen direkt in Produktionskennzahlen übersetzen. Auf diese Weise können die Auswirkungen der jeweiligen Systemgrößen auf das Produktionsgeschehen quantitativ beschrieben und in weiteren Schritten modelliert werden.

Tabelle 3 Systemgrößen – Wirkbereich: Soziales Teilsystem.

Systemgröße	Klassifikation	Erklärung	Quelle
Abwesenheitsdauer (je Mitarbeiter)	Einflussgröße	Die Dauer, die ein Mitarbeiter einem Unternehmen nicht zur Verfügung steht.	[27, 30, 40]
Arbeitskomplexitätsgrad (je Mitarbeiter)	Einflussgröße	Die Komplexität der Arbeit (alle Tätigkeiten, die ein Mitarbeiter ausführen muss) die sich individuell für jeden Mitarbeiter ergibt.	[20, 35]
Ausführungsanzahl (je Mitarbeiter und Tätigkeit)	Einflussgröße	Häufigkeit, mit der ein bestimmter Mitarbeiter eine bestimmte Tätigkeit in einem definierten Zeitraum ausführt.	[21, 31]
Ausführungszeit (je Mitarbeiter und Tätigkeit)	Einflussgröße	Die Dauer, die der Mitarbeiter benötigt, um die Tätigkeit auszuführen.	[21, 23, 36]
Einarbeitungsdauer	Einflussgröße	Die Dauer, die es braucht, bis die Einarbeitung der Mitarbeiter abgeschlossen ist (zum Beispiel durch Erreichen bestimmter Kompetenzniveaus).	[41-43]
Fehlerquote	Einflussgröße	Der Anteil der fehlerhaften Produkte an der Gesamtproduktionsmenge.	[5, 44]
Fluktuation	Störgröße	Anteil der Mitarbeiter, die in einem definierten Zeitraum das Unternehmen verlassen (und ggf. neu eintreten), bezogen auf den durchschnittlichen Personalbestand.	[30, 45]
Job Rotation	Stellgröße	Das Wechseln der Arbeitsplätze durch die Mitarbeiter zwischen oder während Schichten.	[28, 29, 46]
Kompetenz (je Mitarbeiter und Tätigkeit)	Einflussgröße	Die zum Betrachtungszeitpunkt bestehende Fähigkeit, eine Tätigkeit in bestimmter Zeit auszuführen.	[31, 35]
Kompetenzen (Unternehmen)	Einflussgröße	Alle im Unternehmen vorhandenen Kompetenzen in Anzahl und Ausprägung.	[6, 45]
Krankheit	Störgröße	Der Anteil an Mitarbeitern, die durch Krankheit nicht zur Verfügung stehen.	[30, 40]
Leiharbeit	Einfluss- / Stellgröße	Anteil der Mitarbeiter, die zeitlich befristet über Personaldienstleister im Unternehmen eingesetzt werden.	[30]
Lernen	Einflussgröße	Die Zunahme von Kompetenz.	[21-23]
Mitarbeiterzuweisungsstrategie	Stellgröße	Das Ziel, das mit der Personaleinsatzplanung verfolgt werden soll (zum Beispiel Leistungsorientierung, Kompetenzaufbau).	[27, 30]
Mitarbeiteranzahl	Einfluss- / Stellgröße	Anzahl der im betrachteten Zeitraum im Unternehmen beschäftigten Mitarbeiter.	[27, 30]
Personaleinsatzplanung	Stellgröße	Systematische zeitliche und räumliche Zuordnung von Mitarbeitern zu Arbeitsplätzen und Tätigkeiten.	[27, 30]
Personaleinsatzflexibilität	Einflussgröße	Fähigkeit des Systems, Mitarbeiter bei Bedarf auf unterschiedliche Arbeitsplätze und Tätigkeiten einsetzen zu können.	[18, 30]
Personalschwankung	Einflussgröße	Zeitliche Variabilität der tatsächlich verfügbaren Personalkapazität im Verhältnis zum geplanten Personalbestand.	[9, 30]
Personale Disposition	Einflussgröße	Individuelle Merkmale wie Motivation, Alter, Leistungsfähigkeit und Lernbereitschaft, die das Arbeitsverhalten beeinflussen.	[27, 30]
Qualifikationsmaßnahmen	Stellgröße	Gezielte Lern- und Trainingsaktivitäten zum Aufbau oder Ausbau arbeitsrelevanter Kompetenzen.	[41-43]
Soziale Faktoren	Einflussgröße	Eigenschaften des sozialen und _organisatorischen Umfelds, etwa Teamfähigkeit, Teamklima und Führungskultur.	[6, 29]
Tätigkeitsumfang (je Mitarbeiter)	Einflussgröße	Anzahl und Vielfalt der Tätigkeiten, die ein Mitarbeiter beherrscht und ausführen kann.	[18, 30]
Urlaub	Stör- / Stellgröße	Zeitraum genehmigter Abwesenheit, in dem Mitarbeiter dem Unternehmen nicht zur Verfügung stehen.	[27, 30]
Vorwissen/Berufserfahrung	Einflussgröße	Durch Ausbildung und bisherige Berufspraxis erworbene, für die aktuelle Tätigkeit relevante Kenntnisse und Fertigkeiten.	[35, 36, 45]
Vergessen	Einflussgröße	Zeitabhängige Abnahme zuvor aufgebauter Kompetenz bei ausbleibender oder seltener Ausführung einer Tätigkeit.	[24-26]
Wissensvermittlung	Stellgröße	Art und Weise, wie aufgabenspezifisches Wissen an Mitarbeiter weitergegeben wird (zum Beispiel Schulung, Unterweisung, kollegiale Einarbeitung).	[41, 42, 45]

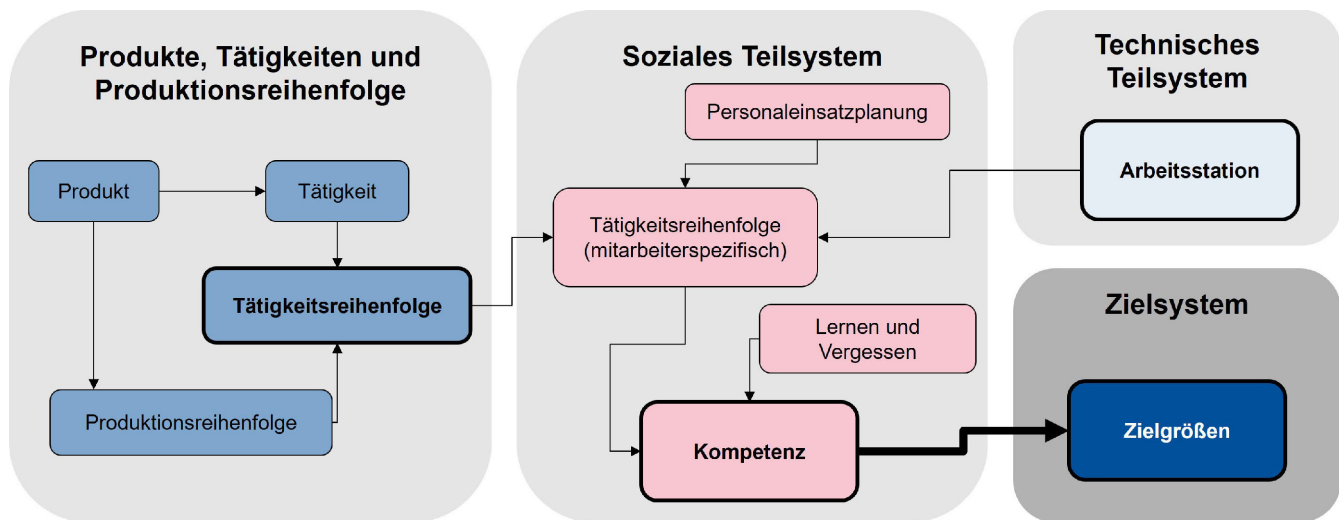


Bild 2 Darstellung der Wirkzusammenhänge der Kerngrößen im kompetenzorientierten Produktionsanlauf. Grafik: IFA

4.5 Zielstellung und Zielgrößen

Im letzten, übergeordneten Bereich werden die zuvor beschriebenen Systemgrößen in ihrem Zusammenspiel betrachtet und die Stellgrößen entsprechend der Zielstellung des Anlaufs ausgerichtet. Für jeden Anlauf sind sowohl die Zielstellung als auch die zugehörigen Zielgrößen explizit zu definieren. Abhängig von Produkt, Anlaufstrategie und Unternehmenskontext lassen sich drei grundlegende Zielstellungen unterscheiden:

1. Minimierung der Anlaufdauer: Ziel ist, eine definierte Zielgröße (zum Beispiel einen Zieloutput) in der kürzestmöglichen Zeit zu erreichen. Zeitliche oder mengenmäßige Restriktionen stehen im Hintergrund. Im Fokus steht das frühzeitige Erreichen des Zielniveaus.
2. Maximierung der Zielgröße in gegebener Zeit: Für einen fest vorgegebenen Zeitraum (zum Beispiel durch Projektplanung) soll die gewählte Zielgröße maximiert werden.
3. Maximierung der Zielgröße bei gegebener Produktionsmenge: Bei vorgegebener Anzahl zu produzierender Produkte im Anlauf soll die gewählte Zielgröße maximiert werden.

Ist die Zielstellung festgelegt, sind die konkreten Zielgrößen zu definieren. Neben den folgenden, in diesem Beitrag fokussierten Größen können je nach Anwendungsszenario weitere Zielgrößen ergänzt werden:

- Output (je Produkt): Menge eines Produkts, die das Produktionssystem zum betrachteten Zeitpunkt pro Zeiteinheit herstellen kann. Betrachtet wird nur der erreichte Leistungsstand, nicht der zeitliche Verlauf der Ausbringungsmenge (siehe Produktivitätsverluste).
- Produktivitätsverluste (zu minimieren): Summe der im Anlauf nicht produzierten Produkte im Vergleich zur hypothetisch möglichen Produktionsmenge im eingeschwungenen Zustand. Diese Größe berücksichtigt die Ausbringung über den gesamten Anlaufverlauf und nicht nur den Endzustand.
- Kompetenzniveau: Aggregierte Kennzahl (etwa Summe, Durchschnitt oder Verteilungsmaß), welche die Anzahl und Ausprägung der Kompetenzen der einzelnen Mitarbeiter beschreibt. Sie bildet ab, in welchem Umfang das System in der Lage ist, Tätigkeiten sicher und innerhalb der Sollzeiten auszuführen.

- Personaleinsatzflexibilität: Fähigkeit des Systems, Mitarbeiter auf unterschiedliche Arbeitsplätze und Tätigkeiten einsetzen zu können (zum Beispiel Anzahl alternativ einsetzbarer Mitarbeiter pro Arbeitsplatz). Sie gewinnt insbesondere in volatilen Umfeldern mit schwankender Nachfrage und Personalschwankungen an Bedeutung.

Zwischen diesen Zielgrößen bestehen kausale Zusammenhänge: Ein höheres Kompetenzniveau führt typischerweise zu kürzeren Ausführungszeiten, reduziert Produktivitätsverluste und erhöht den nachhaltig erzielbaren Output sowie die Personaleinsatzflexibilität. Je nach strategischer Ausrichtung können die Zielgrößen priorisiert, gewichtet und zu zusammengesetzten Zielfunktionen kombiniert werden.

4.6 Ganzheitliche Betrachtung

Die zuvor beschriebenen Wirkbereiche und Systemgrößen bilden ein eng gekoppeltes Zusammenspiel mit Rückwirkungen sowohl innerhalb eines Bereichs als auch zwischen den Bereichen. Die nachfolgende schematische Darstellung (**Bild 2**) fasst dies zusammen, indem sie die zentralen Systemgrößen je Bereich vereinfacht zeigt und jene Größen hervorhebt, die besonders stark bereichsübergreifend wirken.

Abschließend zeigt die ganzheitliche Betrachtung, dass der variantenreiche Produktionsanlauf nur im Zusammenspiel der drei Wirkbereiche verstanden werden kann. Produkte, Tätigkeiten und Produktionsreihenfolge bestimmen die anfallenden Arbeiten, das technische Teilsystem legt die Rahmenbedingungen ihrer Ausführung fest und das soziale Teilsystem übersetzt diese Anforderungen über Lernen und Vergessen in ein dynamisches Kompetenzniveau. Die Tätigkeitsreihenfolge bildet dabei die zentrale Kopplungsgröße zwischen den Bereichen.

Für die Praxis macht der Bezugsrahmen sichtbar, an welchen Stellgrößen im Anlauf gezielt angesetzt werden kann, etwa bei der Gestaltung des Produktprogramms und der Produktionsreihenfolge, der Auslegung von Arbeitsstationen oder der Personaleinsatzplanung. Unternehmen erhalten damit eine strukturierte Grundlage, um Zielkonflikte zwischen Zeit, Output, Qualität und Kompetenzaufbau frühzeitig zu erkennen, bewusst zu priorisieren

und Maßnahmen konsistent über alle Wirkbereiche hinweg auszurichten.

5 Diskussion und Ausblick

Der vorliegende Beitrag bietet eine strukturierte Aufbereitung des vorhandenen Wissens und einen theoretischen Bezugsrahmen, der die relevanten Systemgrößen des variantenreichen kompetenzorientierten Anlaufs in vier Wirkbereichen zusammenführt. Die Auswahl und Strukturierung der Systemgrößen folgt einem systematischen Vorgehen innerhalb des vorgegebenen Betrachtungsrahmens (variantenreiche, überwiegend manuelle Montage).

Bei der Zuordnung der Größen zu Wirkbereichen sowie ihrer Klassifikation als Stell-, Einfluss- oder Störgrößen gilt es zu beachten, dass diese betrachtungsabhängig sein können. Zusammenhänge zwischen den Wirkbereichen werden qualitativ beschrieben.

Die Stärke des Beitrags liegt in der Schaffung einer klaren terminologischen und konzeptionellen Grundlage. Die systematische Zusammenstellung der Systemgrößen und ihre Einbettung in einen integrierten Bezugsrahmen stellen einen ersten Schritt zur Schließung der identifizierten Forschungslücke dar und unterstützen den Aufbau eines fundierten Verständnisses des kompetenzbasierten, variantenreichen Produktionsanlaufs.

Aus dem entwickelten Bezugsrahmen ergeben sich drei zentrale Schritte für weitere Forschung. Erstens ist ein explizites Wirkmodell des variantenreichen Produktionsanlaufs zu entwickeln, das die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen Produkt-, technischem und sozialem Teilsystem sowie den Zielgrößen, einschließlich Lernen und Vergessen, abbildet. Zweitens sind die relevanten Systemgrößen zu operationalisieren und mit geeigneten Kennzahlen sowie empirischen oder experimentellen Daten zu hinterlegen, um den Bezugsrahmen zu parametrisieren. Drittens kann ein quantifiziertes Wirkmodell für simulationsbasierte Analysen genutzt werden, um Anlaufstrategien, Reihenfolgeplanungen und Personaleinsatzkonzepte zu vergleichen und Gestaltungsregeln abzuleiten, mit denen Anläufe beschleunigt, robuster

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – 521412658 im Rahmen des Projektes „Anlaufkurven auf Basis individueller Kompetenzentwicklung in einer variantenreichen Produktion (AnKovaP)“

LITERATUR

- [1] Franzkoch, B.; Gottschalk, S.: Anlauforganisation. In: Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis. Heidelberg: Springer 2008, S. 55–64
- [2] Mourtzis, D.: Challenges and future perspectives for the life cycle of manufacturing networks in the mass customisation era. *Logistics Research* 9 (2016) 1, pp. 1–20
- [3] Kuhn, A. (Hrsg.): „Fast ramp up“ Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2002
- [4] Holweg, M.; Pil, F. K.: The Second Century: Reconnecting Customer and Value Chain through Build-to-Order Moving beyond Mass and Lean Production in the Auto Industry. Cambridge/USA: The MIT Press 2004
- [5] Fleischer, J.; Spath, D.; Lanza, G.: Qualitätssimulation im Serienanlauf. Vorbestimmte Qualitätsfähigkeitskurven von Elementarprozessen. *wt Werkstattstechnik online* 93 (2003) 01/02, S. 50–54. Düsseldorf: VDI Fachmedien, 2003, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2003-1-2>
- [6] Karafyllis, N. C.: Soziotechnisches System. In: Liggieri, K.; Müller, O. (Hrs.): Mensch-Maschine-Interaktion. Stuttgart: J.B. Metzler 2019, S. 300–303
- [7] Hinrichs, M. P.; Schmitt, R. H.: Qualitätssicherung für die Serienfreigabe im Produktionsanlauf. Ein modellgestützter Ansatz zur Risikobewertung von validierungsrelevanten Produktionswechselwirkungen am Beispiel der Automobilindustrie. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 119 (2024) 4, S. 205–209
- [8] Schuh, G.; Stölzle, W.; Straube, F. (Hrsg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis. Heidelberg: Springer 2008
- [9] Laick, T.: Hochlaufmanagement: sicherer Produktionshochlauf durch zielorientierte Gestaltung und Lenkung des Produktionsprozesssystems. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2003
- [10] Schuh, G.; Desoi, J.-C.; Tücks, G.: Holistic Approach for Production Ramp-Up in Automotive Industry. In: Bramley, A.; Brissaud, D.; Coutellier, D. et al. (Hrsg.): Advances in Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering. Heidelberg: Springer-Verlag 2005, pp. 255–268
- [11] Surbier, L.; Alpan, G.; Blanco, E.: A comparative study on production ramp-up: state-of-the-art and new challenges. *Production Planning & Control* 25 (2014) 15, pp. 1264–1286
- [12] Heraud, J.; Medini, K.; Andersen, A.-L.: Managing agile ramp-up projects in manufacturing – Status quo and recommendations. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 45 (2023), pp. 125–137
- [13] Nagel, J.: Risikoorientiertes Anlaufmanagement. Wiesbaden: Gabler 2011
- [14] Urban, G.; Seiter, M.: Fragestellungen zum Produktionsanlauf. *Industrie Management* 20 (2004) 4, S. 57–59
- [15] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. *wt Werkstattstechnik online* 92 (2002) 11/12, S. 650–655. Düsseldorf: VDI Fachmedien, 2002. <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2002-11-12>
- [16] Schuh, G.; Gartz, T.; Wagner, J.: Complexity-oriented ramp-up of assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 10 (2015), pp. 1–15
- [17] Haller, J.; Kumar, B.; Göppert, A. et al.: A System Dynamics Stability Model for Discrete Production Ramp-Up. *Systems* 12 (2024) 12, pp. 1–19
- [18] McCreery, J. K.; Krajewski, L. J.: Improving performance using workforce flexibility in an assembly environment with learning and forgetting effects. *International Journal of Production Research* 37 (1999) 9, pp. 2031–2058
- [19] Dombrowski, U.; Wullbrandt, J.; Krenkel, P.: Industrie 4.0 in production ramp-up management. *Procedia Manufacturing* 17 (2018), pp. 1015–1022
- [20] Fast-Berglund, Å.; Fässberg, T.; Hellman, F. et al.: Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly. *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013) 3, pp. 449–455
- [21] Wright, T. P.: Factors Affecting the Cost of Airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences* 3 (1936) 4, pp. 122–128
- [22] Yelle, L. E.: The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey. *Decision Sciences* 10 (1979) 2, pp. 302–328
- [23] Anzanello, M. J.; Fogliatto, F. S.: Learning curve models and applications: Literature review and research directions. *International Journal of Industrial Ergonomics* 41 (2011) 5, pp. 573–583
- [24] Globerson, S.: Incorporating Forgetting into Learning Curves. *International Journal of Operations & Production Management* 7 (1987) 4, pp. 80–94
- [25] Nembhard, D. A.; Osothsilp, N.: An empirical comparison of forgetting models. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48 (2001) 3, pp. 283–291
- [26] Ostermeier, F. F.; Deuse, J.: Modelling forgetting due to intermittent production in mixed-model line scheduling. *Flexible Services and Manufacturing Journal* 36 (2024) 2, pp. 503–532
- [27] Denkena, B.; Dittrich, M. A.; Winter, F. et al.: Simulation-based planning and evaluation of personnel scheduling in knowledge-intensive production systems. *Production Engineering* 10 (2016) 4–5, pp. 489–496
- [28] Denkena, B.; Stobrawa, S.; Jenkner, I.: Kompetenzorientierte Arbeitsplatzwechsel. Ein simulationsbasierter Ansatz zur Durchführung von Jobrotation unter Berücksichtigung von Kompetenzen für die Personaleinsatzplanung von Industrieunternehmen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2017) 10, S. 640–643

- [29] Mlekus, L.; Maier, G. W.: More Hype Than Substance? A Meta-Analysis on Job and Task Rotation. *Frontiers in psychology* 12 (2021), pp. 1–18
- [30] Ast, J.: Risikoabhängige Bestimmung der funktionellen Personalflexibilität in Montagesystemen. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2023
- [31] Dar-El, E. M.; Ayas, K.; Gilad, I.: A dual-phase model for the individual learning process in industrial tasks. *IIE Transactions* 27 (1995) 3, pp. 265–271
- [32] Framinan, J. M.; Leisten, R.; Ruiz García, R.: *Manufacturing Scheduling Systems*. London: Springer 2014
- [33] Torraco, R. J.: Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. *Human Resource Development Review* 4 (2005) 3, pp. 356–367
- [34] Snyder, H.: Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research* 104 (2019), pp. 333–339
- [35] Nembhard, D. A.; Uzumeri, M. V.: Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics* 25 (2000) 4, pp. 315–326
- [36] Jong, J. R. De: The Effects of Increasing Skill On Cycle Time And Its Consequences For Time Standards. *Ergonomics* 1 (1957) 1, pp. 51–60
- [37] Marangé, P.; Lemoine, D.; Aubry, A. et al.: Coupling Robust Optimization and Model-Checking Techniques for Robust Scheduling in the Context of Industry 4.0. In: Sokolov, B.; Ivanov, D.; Dolgui, A. (Hrsg.): *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing 2020, pp. 103–124
- [38] Mourtzis, D.: Challenges and future perspectives for the life cycle of manufacturing networks in the mass customisation era. *Logistics Research* 9 (2016) 1, pp. 1–20
- [39] Lennartson, B.; Bengtsson, K.; Yuan, C. et al.: Sequence Planning for Integrated Product, Process and Automation Design. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 7 (2010) 4, pp. 791–802
- [40] Cohen, Y.: Absenteeism as a major cause of bottlenecks in assembly lines. *International Journal of Production Research* 50 (2012) 21, pp. 6072–6080
- [41] Arthur, W.; Bennett, W.; Edens, P. et al.: Effectiveness of training in organizations: a meta-analysis of design and evaluation features. *The Journal of applied psychology* 88 (2003) 2, pp. 234–245
- [42] Aguinis, H.; Kraiger, K.: Benefits of training and development for individuals and teams, organizations, and society. *Annual review of psychology* 60 (2009), pp. 451–474
- [43] Buck, H.; Witzgall, E.: Mitarbeiterqualifizierung in der Montage. In: Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion*. Heidelberg: Springer 2012, S. 397–417
- [44] Li, G.; Rajagopalan, S.: The impact of quality on learning. *Journal of Operations Management* 15 (1997) 3, pp. 181–191
- [45] Argote, L.: *Organizational learning. Creating, retaining and transferring knowledge*. New York: Springer 2013
- [46] Jorgensen, M.; Davis, K.; Kotowski, S. et al.: Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector. *Ergonomics* 48 (2005) 15, pp. 1721–1733

Luca Mastroianni, M.Sc. 
mastroianni@ifa.uni-hannover.de

Mark Meiertöns, M.Sc. 

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Schmidt 
Leibniz Universität Hannover
Institut für Fabrikanlagen und Logistik
An der Universität 2, 30823 Garbsen
www.ifa.uni-hannover.de/de

LIZENZ



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