

Potenzialanalyse technologischer und logistischer Freiheitsgrade der Produktionssteuerung

Integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung

J. B. Maier, H.-H. Wiendahl

ZUSAMMENFASSUNG Produzierende Unternehmen betrachten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung häufig sequenziell und damit voneinander entkoppelt. Doch ihre integrierte Betrachtung verspricht in bestimmten Anwendungsfällen Verbesserungen durch eine Flexibilitätssteigerung. Zu ihrer Identifikation stellt dieser Beitrag ein Vorgehen zur Bewertung anwendungsfallspezifischer Anforderungsmuster an eine integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung vor.

STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, PPS, Fertigungsplanung

Potential analysis of technological and logistical degrees of freedom for production control – Integrated process planning and production control

ABSTRACT Manufacturing companies often consider process planning and production control sequentially and thus decoupled from each other. However, their integrated consideration promises the potential for optimization for certain production systems by increasing flexibility. To identify these, this article proposes a method for evaluating use case-specific requirement patterns for integrated process planning and production control.

1 Ausgangssituation

Globale und lokale Krisen der letzten Jahre erhöhten die Volatilität in Lieferketten deutlich [1]. Neben kurzen Produktlebenszyklen erscheint vor allem die höhere Störanfälligkeit logistisch eng gekoppelter Lieferketten, gekennzeichnet durch reduzierte Bestände bei geringeren lokalen Wertschöpfungstiefen, als wichtige Ursache. Ansätze zur Flexibilitätssteigerung, beispielsweise durch flexible Organisationskonzepte [2, 3], sind deshalb, neben der Entkopplung über Lager- und Umlaufbestände, nach wie vor wichtig, um die Reaktionsfähigkeit auf die gestiegene Änderungsdynamik zu verbessern.

Flexibilität ergibt sich dabei aus dem Zusammenspiel der strukturellen Flexibilität im physischen System, welches die Freiheitsgrade der Entscheidung vorgibt und deren Nutzung durch die steuerungstechnische Flexibilität des logischen Systems [2]. Das logische System besteht aus technologischen Entscheidungsfunktionen der Arbeitsplanung, sowie logistischen Entscheidungsfunktionen der Produktionsplanung und -steuerung (PPS).

Der Beitrag fokussiert die kurz- und mittelfristige Flexibilitätssteigerung durch Shop Floor nahe Entscheidungen. Die Praxis ordnet sie der Produktionssteuerung zu und trifft diese primär unter logistischen Kriterien. Die Berücksichtigung technologischer Kriterien erweitert hier den Handlungsspielraum in bestimmten Fällen. Forschungsarbeiten adressieren das Potenzial zur Flexibilisierung durch die integrierte logistische und technologische Betrachtung schon seit längerem, vgl. unter anderem [4; 5]. Doch diese setzen sich in der Praxis kaum durch. Bis heute erfolgt dort eine integrierte Betrachtung meist erfahrungsbasiert und unsystematisch. Vor allem bei hohen Anforderungen

an die logistische Zielerreichung erscheint eine systematische Betrachtung erforderlich.

Um die Kluft zwischen Forschung und Praxis zu reduzieren, werden im Folgenden die Freiheitsgrade und ihre Potenziale zur Flexibilitätssteigerung bei einer integrierten Betrachtung untersucht. Mit der vorgestellten Methode können Unternehmen dieses Potenzial im konkreten Anwendungsfall abschätzen.

2 Aufgaben der Arbeitsplanung und PPS

Als Bindeglieder zwischen Produktionstechnik und Logistik beeinflussen Arbeitsplanung und PPS die Leistungsfähigkeit von Produktionssystemen maßgeblich [4]. Gemeinsam bestimmen sie Kostenstruktur, Belastungsprofil und logistische Zielerreichung (zum Beispiel Lieferzeit und Liefertreue) entscheidend [4]. Sie sind inhaltlich, bezogen auf die zu planenden Objekte, stark verflochten und erzeugen damit Wechselwirkungen zwischen Technik und Logistik [6; 7].

Praktisch findet man beide Aufgabengebiete in produzierenden Unternehmen heute noch getrennt betrachtet und zeitlich entkoppelt. **Bild 1** stellt die Entscheidungsfunktionen aus technologischer und logistischer Perspektive gegenüber und grenzt den Betrachtungsfokus anhand des Entscheidungshorizonts ein:

- Die Arbeitsplanung legt auftrags- und terminneutral aus technischer Sicht die Maßnahmen zur Herstellung eines Produkts fest [6; 8]. Entsprechend des Zeithorizonts besteht sie aus der langfristigen Arbeitssystemplanung, der mittelfristigen Planungsvorbereitung und der mittel- bis kurzfristigen Arbeitsablaufplanung und -realisierung [8]. Die konkrete zeitliche Abfolge der Funktionen ist unterschiedlich und unter anderem abhängig vom Neuheitsgrad der Produktionsaufgabe, Wieder-

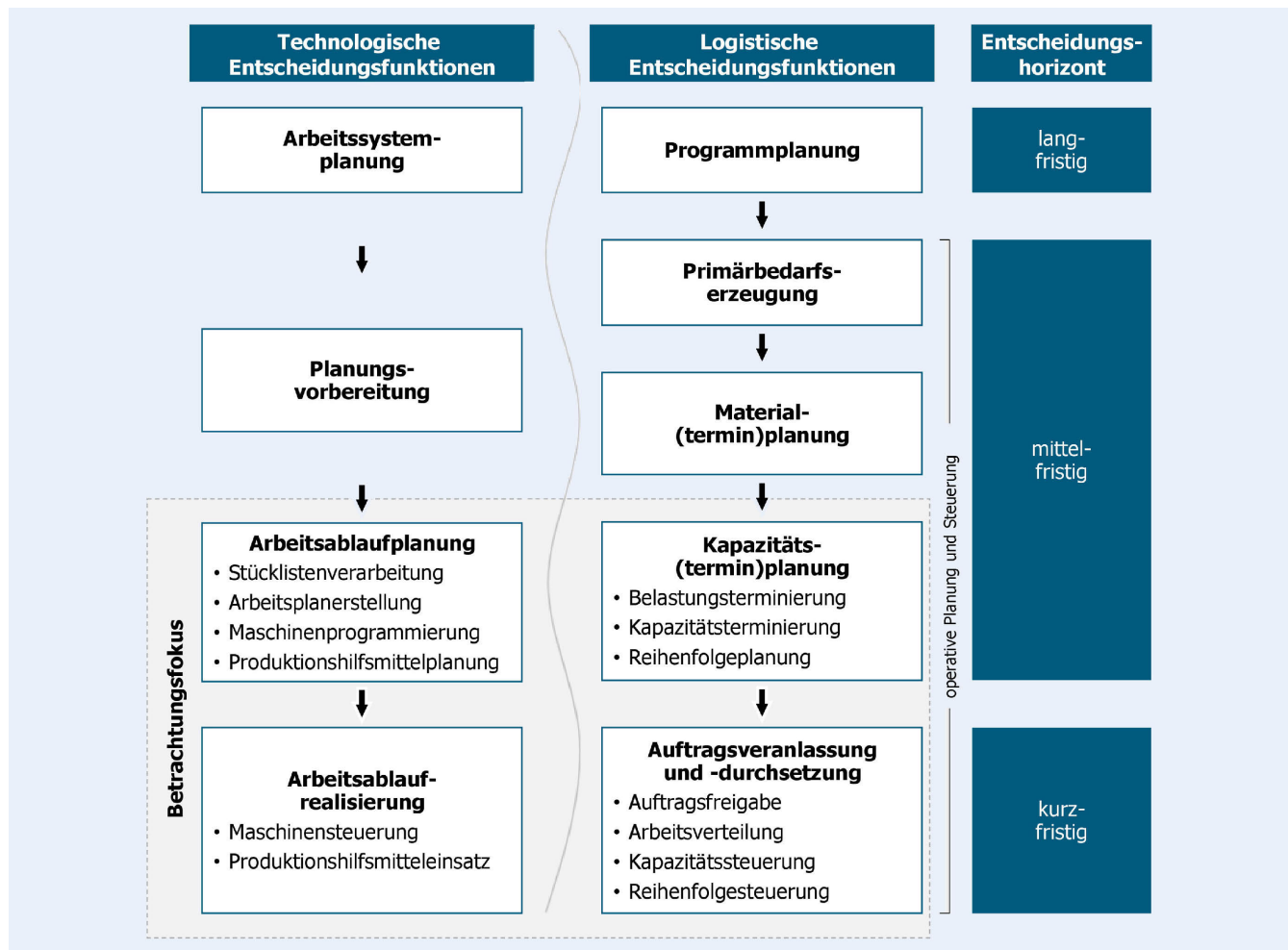


Bild 1. Zeitliche Gliederung der Entscheidungsfunktionen der Arbeitsplanung und PPS. Grafik: Fraunhofer IPA

holhäufigkeit und vorhandener Flexibilität des Produktionssystems [8]. Da sich die logische Flexibilität auf Entscheidungen im kurzfristigen Zeithorizont bezieht, steht die Arbeitsablaufplanung (insbesondere die Arbeitsplanerstellung) im Betrachtungsfokus. Arbeitsablaufplanung und Arbeitsplanung werden im Folgenden synonym verwendet. Trotz umfangreicher Forschungsarbeiten stellt die vollständige Automatisierung der Arbeitsplanung aufgrund der hohen Bauteilkomplexität bis heute eine große Herausforderung dar [9].

- Die PPS ist nach klassischem Verständnis funktional in die Produktionsplanung und die Produktionssteuerung geteilt, vgl. unter anderem [7; 10; 11; 12]: Die langfristige Produktionsplanung erstellt das Produktionsprogramm. Die mittelfristige Produktionsplanung erzeugt die Eigenfertigungs- und Fremdbezugsaufträge (Funktionsblöcke Primärbedarfserzeugung, Material(termin)planung und Kapazitäts(termin)planung). Die kurzfristige Produktionssteuerung setzt diesen Plan trotz der unvermeidlichen Änderungen und Störungen durch reaktive Entscheidungen um (Auftragsveranlassung und -durchsetzung). Die hier relevanten Entscheidungsaufgaben sind Auftragsfreigabe, Arbeitsverteilung (Zuordnung der Arbeitsgänge zu Ressourcen), Kapazitätssteuerung (Durchführung von Kapazitätsanpassungen) und Reihenfolgesteuerung (Festlegung der Abarbeitungsreihenfolge der Arbeitsgänge an den Ressourcen sowie gegebenenfalls Änderung der Arbeitsgang-

folge gegenüber dem Arbeitsplan soweit technisch zulässig).

In Abgrenzung zur langfristigen Programmplanung fasst die operative PPS die mittel- und kurzfristigen Funktionsblöcke zusammen. Auch im Bereich der PPS werden im Weiteren die kurzfristigen Entscheidungen betrachtet.

Beide Aufgabengebiete gelten auch wissenschaftlich als unterschiedliche Forschungsthemen. Bestehende Ansätze zur methodischen Umsetzung einer integrierten Betrachtung werden im Folgenden vorgestellt.

3 Bestehende Ansätze

Die Forschung untersucht Ansätze zur integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung seit mehr als 30 Jahren [9]. Dieses Kapitel kategorisiert zum einen bestehende Ansätze (Abschnitt 3.1). Zum anderen beleuchtet es beispielhaft ihren Anwendungskontext (Abschnitt 3.2).

3.1 Bestehende Methoden zur integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung

Eine einheitliche Klassifizierung für bestehende Methoden zur integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung existiert bisher nicht. Je nach Autor ergeben sich, drei [9; 13], vier [4] oder fünf [5] Grundkategorien methodischer Ansätze:

Arbeitsplanung vor Auftragsfreigabe				Arbeitsplanung nach Auftragsfreigabe
Einstufige Erstellung von Arbeitsplänen		Schrittweise Erstellung von Arbeitsplänen		
Technologie als Freiheitsgrad der Produktionssteuerung		Gleichzeitige Betrachtung von Technologie und Logistik		
Alternativarbeitsplanung (AAP)	Arbeitsplanung mit Netzarbeitsplänen (NLPP)	Just-in-Time Arbeitsplanung (JAP)	Hierarchische/ verteilte Arbeitsplanung (DPP)	Dynamische/ Echtzeit-Arbeitsplanung (CLPP)
<p>Alle alternativen Arbeitspläne werden generiert und priorisiert. Bei Störungen wird der Plan mit der nächsthöheren Priorität verwendet.</p> <p>👍 Pläne können basierend auf Belastungssituation gewählt werden</p> <p>👉 Mittlere Flexibilität, da Ausweichen auf Alternativpläne Umplanungsanforderung erfordert</p> <p>👉 Planung für kundenindividuelle Produktion zu aufwändig, da für jedes Teil sehr hohe Anzahl an Arbeitsplänen notwendig</p>	<p>Erstellung eines Arbeitsplans in Netzform zur Abbildung der Alternativen (Technologie, Arbeitsfolge, Ressourcen).</p> <p>👍 Gute Wiederverwendbarkeit der Pläne mit schrittweiser technologischer Verbesserung</p> <p>👍 Hohe Reaktionsfähigkeit bei Störungen</p> <p>👉 Höherer Aufwand und Komplexität für die Erstellung</p> <p>👉 Hoher Anpassungsaufwand für bestehende IT-Systeme</p> <p>👉 Bereitstellungsplanung von Produktionshilfsmitteln komplexer</p>	<p>Aufgaben der technischen Prozessplanung und Produktionssteuerung werden unmittelbar vor Produktionsstart durchgeführt.</p> <p>👍 Plan kurzfristig für aktuelle Produktionssituation erstellt</p> <p>👍 Geringerer Planungsaufwand, da keine Alternativplanung notwendig</p> <p>👉 Geringe Reaktionsfähigkeit auf Störungen und veränderte Belastungssituation</p>	<p>Zweistufiges Verfahren mit vorgelagerter technologischer Grobplanung und anschließender Feinplanung.</p> <p>👍 Länger in die Zukunft gerichtete, wiederverwendbare Grobplanung und situationspezifische Feinplanung</p> <p>👍 Komplexitätsreduktion und gute Eignung für dezentrale Ansätze durch Phasengliederung</p> <p>👉 Phasengliederung von Arbeitsplanung und Produktionssteuerung muss passen</p> <p>👉 Flexibilität auf Spielraum der Feinplanung beschränkt</p>	<p>Arbeitsplan wird inkrementell für jeden Arbeitsgang während der Produktion unter Berücksichtigung technolog. u. logistischer Randbedingungen erstellt (häufig auch mit eingeschränkter Vorausplanung).</p> <p>👍 Bestmögliche Integration von Arbeitsplanung und Produktionssteuerung</p> <p>👉 Keine Wiederverwendbarkeit bestehender Pläne</p> <p>👉 Geringer Planungshorizont reduziert Spielraum für mittelfristige Optimierung nach logistischen oder technolog. Zielgrößen</p>

Bild 2. Übersicht der Kategorien von Ansätzen zur integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung. Grafik: Fraunhofer IPA

1. Hierarchische oder verteilte Arbeitsplanung (engl. Distributed process planning, DPP) [4; 5; 9; 13]
2. Just-in-Time Arbeitsplanung (JAP) [4; 5]
3. Alternativarbeitsplanung (AAP) [5]
4. Arbeitsplanung mit Netzarbeitsplänen (engl. non-linear process planning, NLPP) [4; 5; 9; 13]
5. Dynamische- oder Echtzeitarbeitsplanung (engl. Closed-loop process planning, CLPP) [4; 5; 9; 13]

Verschiedene Aspekte beschreiben die Methodeneigenschaften:

- Aus zeitlicher Sicht gilt: Die vier Methoden DPP, JAP, AAP und NLPP führen die Arbeitsplanung vor der Auftragsfreigabe durch, die CLPP danach und somit parallel zum Produktionsfortschritt.
- Aus funktionaler Sicht gilt: JAP, CLPP und DPP betrachten technologische und logistische Aspekte gleichzeitig, bei der AAP und NLPP erfolgt zunächst eine technologische Planung mit Alternativen, die später als Freiheitsgrade der Produktionssteuerung zur Verfügung stehen.
- Aus der Sicht Erstellung gilt: CLPP und DPP erstellen den Arbeitsplan in mehreren Schritten, bei den übrigen Verfahren erfolgt die Erstellung in einem Schritt.
- Aus der Sicht Anpassbarkeit gilt: Der Plan ist bei der AAP, CLPP und NLPP während der Ausführung anpassbar. Die AAP generiert alle alternativen Arbeitspläne vor der Auftragsfreigabe, die NLPP beschreibt den Arbeitsplan als Netz mit Alternativen. Nach dem Produktionsstart wählt die AAP im Falle einer Störung den Arbeitsplan mit der nächsthöheren Priorität, die NLPP entsprechend den nächstbesten Pfad. Bei der CLPP ist der Plan durch die inkrementelle Erstellung inhärent anpassbar.

Bild 2 liefert eine vergleichende Übersicht der Vor- und Nachteile der einzelnen Kategorien. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die Komplexität des entstehenden Entscheidungsproblems, die Reaktionsfähigkeit des Ansatzes und den Einführungsaufwand, sowie die Wiederverwendbarkeit der erstellten Pläne.

Neuere, aus der Domänenperspektive stammende, produktionswissenschaftlichen Ansätze bauen auf dieser Klassifizierung auf und fokussieren sich auf Anwendungsaspekte oder entwickeln aus diesen hybriden Konzepten:

- *B. Schmidt* stellt die informationstechnische Umsetzung eines integrierten Ansatzes basierend auf Netzarbeitsplänen vor [4].
- *Sielemann* beschreibt einen hierarchischen Ansatz durch dezentrale autonome, kooperative Einheiten [5].
- Die Ermittlung und Einbindung von Zustandsinformationen für einen dynamischen Ansatz entwickelt *J. Schmidt* [13].
- *Meissner* und *Aurich* stellen ein hybrides Konzept bestehend aus NLPP und CLPP für die integrierte Betrachtung in cyberphysischen Produktionssystemen vor [14].

Zur Sicherstellung einer aktuellen Datenbasis für eine integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung entwickelt *Denkena*, aufbauend auf statistischen Verfahren, eine Methode zur Identifikation und Quantifizierung der Einflussfaktoren auf logistische Zielgrößen [15].

Daneben betrachten andere Autoren die Problemstellung eher aus einer mathematischen Perspektive im Kontext von Scheduling-Problemen, vgl. unter anderem [16–19]. Da diese die Problemstellung abstrakt ohne konkreten Anwendungsbezug beschreiben, werden sie nicht vertieft betrachtet.

Anknüpfend an die Übersicht bestehender Methoden wird im Folgenden untersucht, auf welche Anwendungsbereiche sich die Autoren bisher konzentrieren.

3.2 Anwendungsbereiche bisher entwickelter Ansätze

Für die Untersuchung der Anwendungsbereiche sind die vier Kriterien betrachteter Produktionsbereich, Fertigungsart, konkretes Anwendungsbeispiel und angewendete Freiheitsgrade von Bedeutung. **Tabelle 1** beschreibt vier Arbeiten aus der jüngeren Vergangenheit mit Anwendungsbeispielen:

Tabelle 1. Anwendungsbereiche ausgewählter produktionswissenschaftlicher Ansätze.

Produktionsbereich	Fertigungsart	Anwendungsbeispiel	Betrachtete Freiheitsgrade	Autor
Fertigung	Klein- und Mittelserienproduktion	Maschinenbau (Blechbearbeitungsmaschinen)	– Arbeitsgangfolge – Produktionsmittel	[4]
Fertigung (Flexibles Fertigungssystem)	Klein- und Mittelserienproduktion	Theoretisch	– Arbeitsgangfolge – Produktionsmittel – Verfahren	[20]
Fertigung	–	Theoretisch (Hydraulikzylinder)	– Arbeitsgangfolge – Produktionsmittel – Operationen – Produktionshilfsmittel – Verfahren	[5]
Fertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Versuchsfeld des Forschungsinstituts (spanende Bearbeitung)	– Verfahrensparameter – Arbeitsgangfolge – Produktionsmittel – Verfahren	[13]

Als Produktionsbereich steht hier ausschließlich die Teilefertigung im Fokus.

Die betrachtete Fertigungsart liegt dabei im Bereich der Einzel- bis Mittelserienproduktion.

Anwendungsbeispiele sind Prozessketten mit Fertigungsverfahren im Bereich der spanenden Bearbeitung, sowie umformen- de Verfahren. Darunter findet sich eine Pilotinstallation bei einem Industrieunternehmen [4] und eine prototypische Untersuchung im Versuchsfeld des Forschungsinstituts [13]. Die übrigen Autoren arbeiten mit Theoriebeispielen [5; 20].

Auch bei den genutzten Freiheitsgraden zeigen sich Unterschiede; am häufigsten werden alternative Produktionsmittel, Arbeitsgangfolgen und Verfahren betrachtet. *J. Schmidt* beleuchtet zusätzlich alternative Verfahrensparameter [13].

4 Kategorisierung der Anwendungsbereiche

Die Anwendungsbeispiele bisheriger Ansätze fokussieren sich auf ähnliche Bereiche und betrachtete Freiheitsgrade. Dabei fehlt eine Methode zur Identifikation weiterer Anwendungsbereiche und eine Möglichkeit zur Bewertung der nutzbaren Freiheitsgrade für diese Bereiche.

Der folgende Abschnitt beschreibt zunächst systematisch existierende Freiheitsgrade, welche Merkmale des Produktionssystems diese bestimmen und ordnet die Freiheitsgrade Entscheidungsfunktionen zu. Aufbauend auf dieser Systematik stellt der darauffolgende Abschnitt ein Bewertungsschema zur Potenzialanalyse für Unternehmen vor. Praxisbeispiele verdeutlichen die Anwendung des Bewertungsschemas.

4.1 Freiheitsgrade der technologischen und logistischen Entscheidungsfunktionen

Die verfügbaren Freiheitsgrade der technologischen und logistischen Betrachtung bestimmen die erzielbare Flexibilität im Rahmen der in Bild 1 dargestellten Entscheidungsfunktionen maßgeblich. **Tabelle 2** beschreibt die Freiheitsgrade für beide Bereiche sowie die Merkmale zur Identifikation dieser Freiheitsgrade und ordnet sie den jeweiligen Entscheidungsfunktionen zu:

- Für die technologische Flexibilität der Arbeitsablaufplanung sind vier Freiheitsgrade relevant: Verfahrensparameter, Pro-

duktionsmittel, Arbeitsgangfolge und Verfahren [21]. Die Arbeitsgangfolge umfasst aufgrund der hierarchischen Abhängigkeit auch Entscheidungen zur Operationsfolge.

- Für die organisatorische Flexibilität der Produktionssteuerung sind vier Freiheitsgrade relevant: Kapazität, Belegungsreihenfolge, Arbeitsverteilung und Arbeitsplatzverknüpfung [7; 22]. Der inhaltliche Bezug zwischen technologischen und organisatorischen Freiheitsgraden ist dabei unterschiedlich hoch. Eine hohe Überschneidung zeigen sowohl die Freiheitsgrade Produktionsmittel und Arbeitsverteilung, als auch Arbeitsgangfolge und Arbeitsplatzverknüpfung. Die Unterscheidung resultiert aus der technologischen beziehungsweise logistischen Entscheidungssicht:
- Beim Freiheitsgrad Produktionsmittel leiten die technologischen Produkt- und Verfahrensbedingungen die Auswahl. Demgegenüber wählt die Arbeitsverteilung aus den technologisch möglichen Alternativen nach logistischen Kriterien den am besten geeigneten Arbeitsplatz aus (zum Beispiel kürzeste Warteschlange oder minimale Rüstzeiten).
- Der Freiheitsgrad Arbeitsgangfolge prüft aus Produkt- und Verfahrensperspektive die Zwangsbeziehungen zwischen den Arbeitsgängen, in der Montage beispielsweise über den bekannten Vorranggraph [23; 6]. Die Arbeitsplatzverknüpfung bewertet die Durchlauffreizügigkeit, also die Ablauforientierung des Layouts, und damit die Möglichkeit alternativer Arbeitsgangfolgen [24].

Anforderungsmerkmale des Produkts und Fähigkeitsmerkmale der Produktion bestimmen die Freiheitsgrade:

- Produktanforderungen, resultierend aus regulatorischen Einschränkungen oder der Produktgestaltung, legen den Spielraum der technologischen und logistischen Freiheitsgrade des Herstellprozesses fest.
- Die Fähigkeiten des Verfahrensportfolios und der verfahrenstechnischen Flexibilität bestimmen die technologischen Freiheitsgrade Verfahren (vgl. DIN 8580) und Verfahrensparameter.
- Die Fähigkeitsmerkmale Verkettungsart, die zur Verfügung stehende Alternativressourcen und die Flexibilität der Vorrangbeziehungen der Arbeitsgänge bestimmen sowohl logistische, als auch technologische Freiheitsgrade.
- Das Fähigkeitsmerkmal Kapazitätsflexibilität bestimmt zusammen mit dem (durch externe Kundenanforderungen festgeleg-

Tabelle 2. Übersicht technologischer und logistischer Freiheitsgrade.

	Freiheitsgrade	Beschreibung	Merkmale	Entscheidungsfunktionen
Technologische Betrachtung	Verfahrensparameter	Verfahrensparameter sind unter Sicherstellung der geforderten Qualität anpassbar.	– verfahrenstechnischer Spielraum – regulat. Einschränkungen	– Maschinenprogrammierung
	Produktionsmittel	Arbeitsgänge sind basierend auf technologischen Kriterien alternativen Produktionsmitteln zuordenbar.	– Verkettungsart – alternative Produktionsmittel	Arbeitsplanerstellung – Produktionsmittel-zuordnung – Arbeitsgangfolgebestimmung – technologischer Verfahrensvergleich
	Arbeitsgangfolge	Die sequenzielle Reihenfolge der Arbeitsgänge ist technologisch anpassbar.	– Vorrangbeziehungen	
	Verfahren	Alternative Verfahren können einzelne oder mehrere Arbeitsgänge durchführen.	– Verfahrensportfolio – Rohmaterial/Werkstoff – regulat. Einschränkungen	
Logistische Betrachtung	Kapazität	Bereitgestelltes Kapazitätsangebot der Ressourcen ist anpassbar.	– Kapazitätsflexibilität – Belastungsflexibilität	– Kapazitätsterminierung – Belastungsterminierung – Kapazitätssteuerung
	Belegungsreihenfolge	Abarbeitungsreihenfolge der Arbeitsgänge an einer Ressource ist veränderbar.	– Verkettungsart – Rüstaufwände	– Reihenfolgesteuerung (Belegungssequenz)
	Arbeitsverteilung	Arbeitsgänge sind basierend auf logistischen Kriterien alternativen Produktionsmitteln zuordenbar.	– alternative Produktionsmittel – Verkettungsart	– Arbeitsverteilung
	Arbeitsplatzverknüpfung	Die Verknüpfung der Arbeitsplätze erlaubt unterschiedliche Arbeitsfolgen (Routen).	– Verkettungsart	– Reihenfolgesteuerung (Route)

ten) Merkmal Belastungsflexibilität den logistischen Freiheitsgrad Kapazität.

4.2 Bewertungsschema zur Potenzialanalyse

Eine Bewertung ist grundsätzlich unter Aufwand-Nutzen Überlegungen durchzuführen. Damit kommen qualitative oder quantitative Bewertungen in Frage:

- Eine qualitative Bewertung durch Fachexperten reduziert idealerweise den Aufwand um den Preis einer geringeren Ergebnislösung. Eine solche erste Abschätzung gibt Orientierung und identifiziert vielversprechende oder unklare Potenziale.
- Eine quantitative Bewertung sollte bei höherem Aufwand genauere Ergebnisse liefern. Hier zeigt die Literatur eine große

Menge an Metriken zur Messung von Flexibilitätsfaktoren [25]. Dabei besteht für viele Faktoren noch kein Konsens zur Bewertungsmetrik. Vollständig analytische Wirkbeschreibungen der Freiheitsgrade auf logistische Zielgrößen sind aufgrund der vielen Einflussfaktoren insbesondere im dynamischen Umfeld schwierig: So quantifiziert die Kennlinientheorie die Zusammenhänge zwar für stationäre Zustände [26], aber insbesondere für instationäre Zustände sind anwendungsfall-spezifische Simulationsstudien zusätzlich empfehlenswert. Um dem Grunddilemma von Aufwand und Nutzen zu begegnen ist das vorgeschlagene Vorgehen zweistufig: Erstens eine qualitative Bewertung und zweitens eine quantitative Bewertung bei Bedarf.

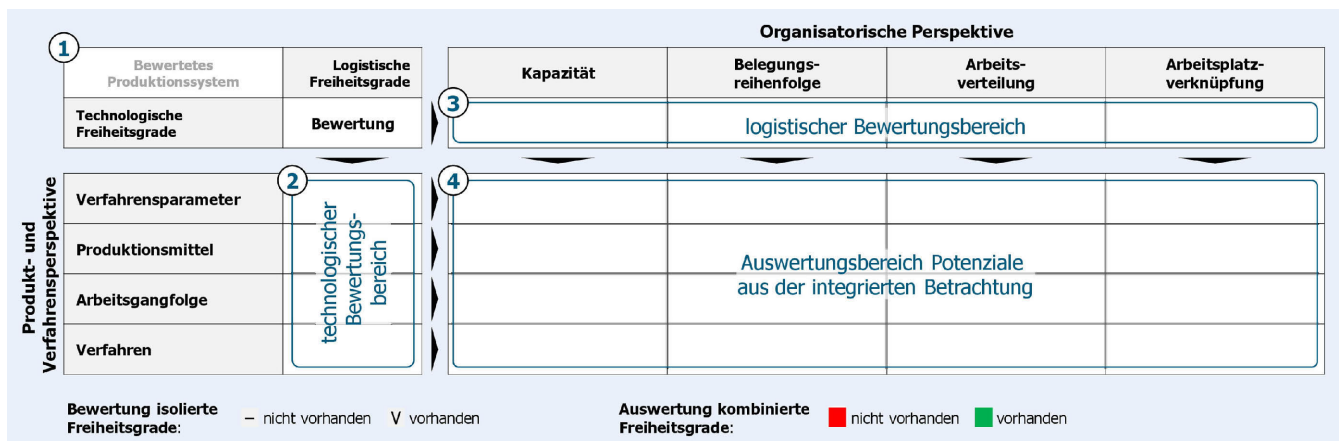


Bild 3. Bewertungsschema zur Potenzialanalyse einer integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung. Grafik: Fraunhofer IPA

Für die erste Stufe dient das in **Bild 3** dargestellte Bewertungsschema zur unternehmensindividuellen, qualitativen Potenzialanalyse. Es stellt technologische und logistische Freiheitsgrade als Kreuztabelle gegenüber. Die Tabelle besteht aus zwei Bereichen:

- Die Bewertungsbereiche betrachten die Freiheitsgrade jeweils isoliert aus technologischer oder logistischer Sicht. Fachexperten füllen diese aus.
- Der Auswertungsbereich betrachtet, die technologischen und logistischen Freiheitsgrade integriert. Er ist aus den beiden Bewertungsbereichen abgeleitet.

Die technologische Betrachtung sollte sich auf ein Produkt beziehungsweise eine Produktfamilie mit ähnlicher Ablauffolge beziehen. Die logistische Betrachtung bezieht sich immer auf die Produktion, also auf den gesamten Auftragsmix.

Die Bewertungsskala beschreibt, ob der Freiheitsgrad vorhanden ist (V) oder nicht (–). Das Bewertungsvorgehen umfasst vier Schritte:

1. Festlegung des Betrachtungsgegenstandes: Hier ist aus Produkt- und Produktionssicht der Umfang festzulegen. Typisch ist die Betrachtung einer Teile- oder Produktfamilie für einen Produktionsbereich, zum Beispiel das Produkt-/Produktionssegment Wellenfertigung.
2. Isolierte Bewertung der technologischen Freiheitsgrade.
3. Isolierte Bewertung der logistischen Freiheitsgrade.
4. Integrierte Bewertung ihrer Kombination: Freiheitsgrade entstehen dabei nur, wenn sie technologisch und logistisch existieren. Ein Farbschema visualisiert die Ausprägungen und bewertet die im konkreten Anwendungsfall wirkungsvollen Maßnahmenkombinationen.

5 Anwendung der Potenzialanalyse

Drei typische Beispiele demonstrieren die praktische Anwendung der Potenzialanalyse. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Merkmale Verkettungsart, verfahrenstechnischer Spielraum und Kapazitätsflexibilität. Die Analyse betrachtet zunächst die technologischen Freiheitsgrade, also Produktanforderungen und Verfahrensmöglichkeiten. Diesen stehen die Merkmale der Produktionsfähigkeiten, also die aus der Organisationsform resultierenden logistischen Freiheitsgrade gegenüber. Den Abschluss bilden die abgeleiteten Handlungsempfehlungen aus der Analyse.

5.1 Anwendungsbeispiel 1: Großserienmontage in einer starr verketteten Montagelinie

Das erste Anwendungsbeispiel ist eine starr verkettete, vollautomatisierte Montagelinie, die im Zweischichtbetrieb medizinische Produkte in Großserie herstellt.

Aus technologischer Sicht wurde aufgrund des Produktvolumens eine produktspezifische Linie entwickelt und zertifiziert, was kurzfristige Änderungen von Verfahren, techn. Arbeitsgangfolgen oder Produktionsmitteln verhindert. Möglicherweise zu Beginn bestehende verfahrenstechnische Spielräume schränken Produktentwicklung und Arbeitssystemplanung weitestgehend ein. Geringfügige Anpassungen der Verfahrensparameter (hier Robotergeschwindigkeit) sind technisch möglich, beeinflussen aber auch den Verschleiß.

Logistische Sicht: Die gewählte Organisationsform der starr verketteten Montagelinie bietet als logistischen Freiheitsgrad lediglich Kapazitätsanpassungen.

Diese Merkmalsausprägungen erlauben die qualitative Bewertung zur Potenzialanalyse, **Bild 4**. Der technologische Freiheitsgrad Verfahrensparameter sowie der logistische Freiheitsgrad Kapazität ist vorhanden. Der Auswertungsbereich visualisiert das kombinierte Handlungsfeld: Die Bedarfsschwankung bestimmt die notwendige Flexibilität; das Unternehmen kann entweder Verfahrensparameter oder Kapazität – auch in Kombination – anpassen.

5.2 Anwendungsbeispiel 2: Variantenreiche Serienproduktion in Reihe

Zweites Anwendungsbeispiel bildet ein variantenreicher Serienfertiger für Haushaltsgeräte, bestehend aus einer Fertigung der Blechgehäuse und einer anschließenden manuellen Montage. Die Produktion arbeitet in 15 Schichten pro Woche. Saisonschwankungen verursachen kapazitive Über- oder Unterlasten.

Technologische Sicht: Die Technologieplanung entschied sich für jeweils ein Produktionsverfahren, so dass in der operativen Steuerung Alternativen fehlen (s.u.). Die spezialisierten Produktionsmittel sind teilweise mehrfach verfügbar, was eine Arbeitsverteilung nach logistischen Kriterien ermöglicht (s.u.). Die Montagereihenfolge erlaubt aus Produktsicht Anpassungen. Nach umfangreichen KVP-Maßnahmen ist keine weitere Optimierung der Verfahrensparameter möglich.

		Organisatorische Perspektive			
		Kapazität	Belegungsreihenfolge	Arbeitsverteilung	Arbeitsplatzverknüpfung
1: Großserienproduktion in starr verketteter Linie		V	–	–	–
Technologische Freiheitsgrade	Logistische Freiheitsgrade				
	Bewertung				
Produkt- und Verfahrensperspektive	Verfahrensparameter	V	–	–	–
	Produktionsmittel	–	–	–	–
	Arbeitsgangfolge	–	–	–	–
	Verfahren	–	–	–	–
Bewertung isolierte Freiheitsgrade:		– nicht vorhanden	V vorhanden	Auswertung kombinierte Freiheitsgrade:	
				– nicht vorhanden	– vorhanden

Bild 4. Anwendungsbeispiel 1: Potenzialanalyse einer starr verketteten Montagelinie. Grafik: Fraunhofer IPA

		Organisatorische Perspektive			
2: Variantenreiche Serienproduktion in Reihe		Kapazität	Belegungsreihenfolge	Arbeitsverteilung	Arbeitsplatzverknüpfung
Technologische Freiheitsgrade	Logistische Freiheitsgrade	V	V	V	–
Produkt- und Verfahrensperspektive	Verfahrensparameter	–	–	–	–
	Produktionsmittel	–	–	–	–
	Arbeitsgangfolge	V	V	V	–
	Verfahren	–	–	–	–
Bewertung isolierte Freiheitsgrade: – nicht vorhanden V vorhanden		Auswertung kombinierte Freiheitsgrade: ■ nicht vorhanden ■ vorhanden			

Bild 5. Anwendungsbeispiel 2: Potenzialanalyse einer variantenreichen Reihenproduktion. Grafik: Fraunhofer IPA

Aus logistischer Sicht ermöglicht das verfügbare Personal eine gewisse Kapazitätsflexibilität. Zwischenpuffer erlauben teilweise Belegungsreihenfolgevertauschungen, allerdings nicht in den eng verketteten Linienabschnitten. Die an Lean-Gestaltungsrichtlinien orientierte Flussgestaltung verhindert organisatorisch eine Vertauschung von Montageoperationen. Redundante Linienabschnitte beziehungsweise Arbeitsstationen eröffnen einen Freiheitsgrad zur Arbeitsverteilung.

Im Vergleich zum ersten Anwendungsbeispiel zeigt die isolierte Betrachtung mehr logistische Freiheitsgrade, **Bild 5**: Aus der Produktperspektive wäre die Montagereihenfolge vertauschbar, die Organisationsform verhindert dies aber. Hierfür wäre in der zweiten Stufe das zusätzliche Flexibilitätpotenzial einer freien Verkettung quantitativ zu prüfen.

5.3 Anwendungsbeispiel 3: Einzel- und Kleinserienfertigung in klassischer Werkstattfertigung

Drittes Anwendungsbeispiel bildet eine Werkstattfertigung mit spanender Bearbeitung im Ein- beziehungsweise Zweischichtbetrieb. Es werden mechanische Komponenten für eigene Produkte und in Lohnfertigung hergestellt.

Aus technologischer Sicht stehen für einzelne Arbeitsgänge alternative Verfahren zur Verfügung. Beispielsweise wird die geforderte Oberflächengüte sowohl durch Schleifen, als auch durch Fräsen erreicht. Der Maschinenpark ist heterogen, bestehend aus

unterschiedlichen Generationen von Dreh- und Fräsmaschinen, sowie Dreh-Fräszentren. Damit stehen alternative Produktionsmittel zur Verfügung, allerdings mit Produktivitätsunterschieden. Eine Zwangsfolge gibt die Arbeitsgangfolge eines Werkstückes technisch fest vor. Über alle Werkstücke der Produktion betrachtet stellen die unterschiedlichen Ablauffolgen Anforderungen an die Flexibilität der Arbeitsplatzverknüpfung (s.u.). Hinsichtlich der Operationsfolge zur Herstellung der geometrischen Merkmale und der dafür verwendeten Verfahrensparameter besteht Spielraum. Dieser beeinflusst die Produktivität kaum.

Aus logistischer Sicht eröffnet die freie Verkettung der Arbeitsplätze große Flexibilität hinsichtlich technologischer Arbeitsgangfolgen, Belegungsreihenfolgen und (wegen verfügbarer Alternativressourcen) Arbeitsverteilung. Zwar bietet der Freiheitsgrad der Route beziehungsweise die flexible Arbeitsplatzverknüpfung wegen der technologischen Zwangsfolge für ein Werkstück keinen Vorteil, aber für unterschiedliche Werkstücke sind entsprechende Vorgangsfolgen flexibel realisierbar. Bei verfügbarem Personal sind auch die Kapazitäten im bestehenden Schichtmodell flexibel.

Bild 6 zeigt das Ergebnis der Potenzialanalyse: Die hohe Anzahl technologischer und logistischer Freiheitsgraden macht ihre kombinierte beziehungsweise integrierte Betrachtung interessant.

Dieses Beispiel verdeutlicht auch die mögliche Komplexität des entstehenden Entscheidungsproblems: Es sind nicht nur acht Freiheitsgrade einzeln nutzbar, sondern theoretisch

		Organisatorische Perspektive			
3: Einzel- und Kleinserienfertigung in Werkstatt		Kapazität	Belegungsreihenfolge	Arbeitsverteilung	Arbeitsplatzverknüpfung
Technologische Freiheitsgrade	Logistische Freiheitsgrade	V	V	V	V
Produkt- und Verfahrensperspektive	Verfahrensparameter	V	V	V	V
	Produktionsmittel	V	V	V	V
	Arbeitsgangfolge	–	–	–	–
	Verfahren	V	V	V	V
Bewertung isolierte Freiheitsgrade: – nicht vorhanden V vorhanden		Auswertung kombinierte Freiheitsgrade: ■ nicht vorhanden ■ vorhanden			

Bild 6. Anwendungsbeispiel 3: Potenzialanalyse einer klassischen Werkstattfertigung. Grafik: Fraunhofer IPA

bis zu 16 Kombinationen. Da jeder Freiheitsgrad in der Regel noch einen Parameterraum für dessen Konfiguration besitzt, entstehen leicht hochdimensionale Entscheidungsprobleme.

Die Ergebnisse der qualitativen Analyse visualisieren zum einen bestehende Freiheitsgrade als Potenzial zur Flexibilitätssteigerung und decken gleichzeitig Handlungsfelder zu ihrer Erweiterung auf. Aufbauend darauf konkretisiert der Folgeabschnitt Handlungsempfehlungen.

5.4 Handlungsempfehlungen aus der Potenzialanalyse

Die Potenzialanalyse zeigt für die drei Unternehmen unterschiedliche Freiheitsgradmuster mit spezifischen Anforderungen (Anforderungsmuster) an eine integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung: Im ersten Beispiel sind die Freiheitsgrade Kapazität und Parameter nutzbar. Im zweiten Beispiel sind Kapazität, Belegungsreihenfolge und Arbeitsverteilung anpassbar; allerdings verhindert die Organisationsform die technologisch mögliche Anpassung der Arbeitsgangfolge. Im dritten Beispiel sind alle beschriebenen Freiheitsgrade mit Ausnahme der Arbeitsgangfolge nutzbar.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- In Beispiel 1 sind zunächst mögliche Mehrkosten durch höheren Verschleiß zu quantifizieren. Ist die Nutzung ökonomisch sinnvoll, erweitert die Parameteranpassung den Handlungsspielraum der Kapazitätssteuerung ohne größeren Anpassungsbedarf.
- In Beispiel 2 ist zunächst zu prüfen, ob die Produktionssteuerung bereits alle logistischen Freiheitsgrade nutzt. Zusätzliches Handlungsfeld ist die Erweiterung der Freiheitsgrade durch die Anpassung der Organisationsform zur Flexibilisierung der Arbeitsplatzverknüpfung. Eine quantitative Bewertung muss die dafür notwendige Investition absichern.
- Beispiel 3 zeigt die umfassendsten Freiheitsgrade. Nutzt das Unternehmen die Freiheitsgrade noch nicht systematisch, ist eine Anpassung der Entscheidungsarchitektur zur Nutzung der zur Verfügung stehenden Methoden der integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung empfehlenswert. Eine Anpassung der Produktgestalt könnte zusätzlich den Freiheitsgrad Arbeitsgangfolge eröffnen. Auch hier muss eine quantitative Analyse die Entscheidung absichern.

Die Handlungsmaßnahmen lassen sich unter dem Aspekt der Veränderungsfähigkeit entsprechend in vier Kategorien einteilen:

1. Nutzung der Freiheitsgrade in der Steuerung zur kurz- bis mittelfristigen Flexibilitätssteigerung (Beispiel 1).
2. Veränderung der bestehenden Entscheidungsarchitektur, beispielsweise durch eine integrierte technologische und logistische Steuerung (Beispiel 3).
3. Veränderungen der Fähigkeitsmerkmale des Produktionssystems. Stellhebel sind hier beispielsweise die Flexibilisierung des Kapazitätsangebots, die Flexibilisierung des Materialflusses oder die Erweiterung des Verfahrensportfolios. Dies wird auch oft unter dem Stichwort Wandlungsfähigkeit zusammengefasst (vgl. [24]; Beispiel 2).
4. Veränderungen der Produktgestaltung. Der Austausch zwischen Produktion und Entwicklung könnte über konstruktive Anpassungen zusätzliche Freiheitsgrade für künftige Produktgenerationen eröffnen (zum Beispiel Reduzierung von Zwangsfolgen; Beispiel 3).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die integrierte technologische und logistische Betrachtung der Arbeitsplanung und Produktionssteuerung erweitert den Handlungsspielraum der Auftragsabwicklung und steigert damit die Unternehmensflexibilität. Zur systematischen Ermittlung relevanter Anwendungsbereiche erörtert dieser Beitrag die zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade der technologischen und logistischen Entscheidungsfunktionen und stellt darauf basierend eine Beziehung zu den relevanten Merkmalen von Produkt und Produktion her. Das entwickelte Bewertungsschema ermöglicht damit zum einen die qualitative Einschätzung hinsichtlich der Nutzung unternehmensspezifisch relevanter Freiheitsgrade. Über mehrere Unternehmen betrachtet visualisiert es Anforderungsmuster für eine integrierte Arbeitsplanung und Produktionssteuerung.

Aufbauend auf dieser Arbeit ergibt sich weiterer Forschungsbedarf: Zunächst erscheint eine empirische Untersuchung in produzierenden Unternehmen über die bislang genutzten Freiheitsgrade sinnvoll. Darüber hinaus wäre die Beschreibung von Anforderungsmustern, unter anderem durch eine systematische Strukturierung unerwarteter Ereignisse (der sogenannten Turbulenzen, vgl. dazu ausführlich [27]), hilfreich. Um diesen Anforderungen zu begegnen ist zu prüfen, ob sich typische Freiheitsgradkombinationen, beispielsweise nach Branchen oder Verfahrenstechnologie gegliedert, ergeben. Perspektivisch ist zu ermitteln, wie typische Anforderungsmuster die methodischen und technologischen Lösungen zur Umsetzung einer integrierten Arbeitsplanung und Produktionssteuerung bestimmen.

Literatur

- [1] GEP Global Supply Chain Volatility Index. Demand for Commodities, Raw Materials and Components at Its Softest in Nearly a Year, Signaling Persistent Weakness in the Global Economy: GEP, 2024
- [2] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P. et al.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 783–809
- [3] Hellmich, A.; Zumpfe, F.; Zumpfe, M. et al.: Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen. Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0, 2022
- [4] Schmidt, B. C.: Integration von Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung mit Netzarbeitsplänen. Düsseldorf: VDI Verlag 1996
- [5] Sielemann, M.: Integration von Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung bei autonomer, kooperativer Fertigung. Düsseldorf: VDI Verlag 2000
- [6] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3. Arbeitsvorbereitung. Berlin: Springer 1997
- [7] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 2019
- [8] Wiendahl, H.-H.; Denner, T.: Arbeitsplanung. In: Bauernhansl, T. (Hrsg.): Fabrikbetriebslehre 1. Berlin, Heidelberg: Springer 2020
- [9] Li, X.; Gao, L.: Effective Methods for Integrated Process Planning and Scheduling. Berlin, Heidelberg: Springer 2020
- [10] Wight, O. W.: Manufacturing Resource Planning: MRP II. Unlocking America's Productivity Potential. Wight, VT: Essex Junction 1984.
- [11] Hackstein, R.: Produktionsplanung und Produktionssteuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf: VDI Verlag 1984
- [12] Hopp, W. J.: Factory physics. Long Grove, Ill.: Waveland Press 2011
- [13] Schmidt, J.: Integrierte Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung auf Basis von Zustandsinformationen. 2015
- [14] Meissner, H.; Aurich, J. C.: Arbeitsplanung für cyber-physische Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112 (2017) 12, S. 899–901

- [15] Denkena, B.; Dittrich, M.-A.; Wilmsmeier, S.: Automated production data feedback for adaptive work planning and production control. *Procedia Manufacturing* 28 (2019), S. 18–23
- [16] Gao, S.; Daaboul, J.; Le Duigou, J.: Process Planning, Scheduling, and Layout Optimization for Multi-Unit Mass-Customized Products in Sustainable Reconfigurable Manufacturing System. *Sustainability* 13 (2021) 23
- [17] Jin, L.; Zhang, C.; Wen, X. et al.: A Neutrosophic Number-Based Memetic Algorithm for the Integrated Process Planning and Scheduling Problem With Uncertain Processing Times. *IEEE Access* 8 (2020), S. 96628–96648
- [18] Wen, X.; Li, X.; Gao, L. et al.: Modified honey bees mating optimization algorithm for multi- objective uncertain integrated process planning and scheduling problem. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 17 (2020) 3.
- [19] Li, X.; Shao, X.; Gao, L. et al.: An effective hybrid algorithm for integrated process planning and scheduling. *International Journal of Production Economics* 126 (2010) 2, S. 289–298
- [20] Saygin, C.; Kilic, S. E.: Integrating Flexible Process Plans with Scheduling in Flexible Manufacturing Systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 15 (1999) 4, S. 268–280.
- [21] ElMaraghy, H. A.: Evolution and Future Perspectives of CAPP. *CIRP Annals* 42 (1993) 2, S. 739–751
- [22] Fries, C.; Wiendahl, H.-H.; Foith-Förster, P.: Planung zukünftiger Automobilproduktionen. In: Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hrsg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer 2020.
- [23] Holtewert, P.; Wiendahl, H.-H.: Fertigungs- und Montagesysteme. In: Bauernhansl, T. (Hrsg.): *Fabrikbetriebslehre 1*. Berlin, Heidelberg: Springer 2020
- [24] Wiendahl, H.-H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Hanser 2024
- [25] Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2 (1990) 4
- [26] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- [27] Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld: Teil 1: Anforderungen. *wt Werkstattstechnik*, 96 (2006) 4, S. 183–189 Teil 2: Lösungsansätze, *wt Werkstattstechnik*, 96 (2006) 5, S. 325–330



Julian B. Maier, M.Sc. 

Foto: Fraunhofer IPA
julian.maier@ipa.fhg.de
 Tel. +49 711 / 970-1958



Dr.-Ing. habil. Hans-Hermann Wiendahl 

Foto: Autor
hans-hermann.wiendahl@ipa.fhg.de
hww@iff.uni-stuttgart.de

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
 und Automatisierung IPA
 Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Universität Stuttgart
 Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb IFF
 Allmandring 35, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de

LIZENZ



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