

Analyse von Störgrößen und Kennzahlen in Matrixproduktionssystemen

Matrixproduktionssysteme: steuerungsrelevante Kennzahlen

K. Nordwig, M. Kunze, T. Bauernhansl, W. Sophia

ZUSAMMENFASSUNG Matrixproduktionssysteme sind flexibel und gleichzeitig produktiv. Für einen reibungslosen Betrieb werden präzise Informationen benötigt. Deshalb ist es wichtig, sich mit der Frage zu beschäftigen, ob es spezifische steuerungsrelevante Kennzahlen für die Matrixproduktion gibt. In diesem Beitrag werden steuerungsrelevante Kennzahlen identifiziert und der Einfluss von Störgrößen untersucht, um einen möglichst reibungslosen Betrieb zu erreichen.

STICHWÖRTER

Flexible Fertigungssysteme, Montage,
Produktionsmanagement

Matrix production systems: control-relevant key figures

ABSTRACT Matrix production systems are characterized by flexibility and productivity. A smooth operation, however, requires precise information. It is therefore important to consider specific control-relevant key figures in matrix production. This article identifies control-relevant key figures and assesses the impact of disturbance variables on operational efficiency.

1 Einleitung

Das moderne Produktionsumfeld ist geprägt von vielen Einflussfaktoren, darunter geopolitische Auseinandersetzungen, klimabedingte Herausforderungen und volatile Märkte mit kurzen Produktlebenszyklen. Stabile Lieferketten, ausreichend verfügbare Ressourcen und Nachhaltigkeit sind dabei unerlässlich, um wettbewerbsfähig zu sein. Gleichzeitig verändern neue Technologien wie Industrie 4.0, das Internet der Dinge und künstliche Intelligenz sowie die damit einhergehende Vernetzung die Produktionslandschaft. [1] Um diesen Herausforderungen zu begegnen und den Anforderungen des Marktes (wie etwa kurze Produktlebenszyklen, individualisierte Produkte, Losgröße 1) gerecht zu werden, sind flexible und gleichzeitig produktive Produktionssysteme wie das Matrixproduktionssystem erforderlich [2].

Das Matrixproduktionssystem hat das Ziel, mit Flexibilität und Wandlungsfähigkeit den Herausforderungen eines sich ständig verändernden Marktes, etwa Stückzahlschwankungen und einer hohen Produktvarianz, zu begegnen und dabei gleichzeitig produktiv zu sein. Auch externe Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Lieferkettenprobleme, erfordern ein hohes Maß an Flexibilität, um reaktionsfähig zu sein und störungsfreie Produktionsabläufe sicherzustellen [3, 4]. Gründe für die Produktivität eines Matrixproduktionssystems sind etwa die Nutzung eines gemeinsamen Produktionssystems von mehreren Produkten beziehungsweise Produktvarianten und eine bessere Auslastung der Ressourcen. Diese Flexibilität bedingt aber auch eine höhere Komplexität in der Steuerung [5]. Deshalb müssen auftretende Störgrößen und Kennzahlen betrachtet werden, welche dabei helfen, den hohen Steuerungsaufwand zu bewältigen.

Dieser Beitrag zeigt eine Methode auf, die eine Auslegung verschiedener steuerungsrelevanter Kennzahlen erlaubt. In Kapitel 2

wird eine kurze Erläuterung zu Matrixproduktionssystemen gegeben sowie das methodische Vorgehen dargestellt. Kapitel 3 gibt einen Überblick zu grundlegenden Inhalten der Kennzahlanalyse, Identifikation und Bewertung relevanter Störgrößen sowie deren zusammenhängende Betrachtung in sogenannten Spinnennetzdiagrammen. Zuletzt wird ein erster Vorschlag für eine Auslegung steuerungsrelevanter Kennzahlen gezeigt, um die einflussreichsten Störgrößen einer Matrixproduktion bestmöglich bewältigen zu können. Zudem wird eine kritische Reflexion der Vorgehensweise und Ergebnisse durchgeführt. Der Beitrag schließt mit Fazit und Ausblick.

2 Grundlagen und methodisches Vorgehen

In Kapitel 2.1 werden relevante vorausgehende Arbeiten zum Thema betrachtet und die Forschungslücke aufgezeigt. Kapitel 2.2 erklärt kurz, was unter einem Matrixproduktionssystem zu verstehen ist. Kapitel 2.3 zeigt die methodische Vorgehensweise zur Erstellung des Konzepts auf.

2.1 Relevante vorherige Arbeiten

Kennzahlen sind in der Produktion unerlässlich, da sie die Grundlage zur Bewertung der Effizienz sowie zur Kontrolle und Steuerung der Produktionsprozesse bilden. Entsprechend findet sich eine große Bandbreite an Literatur, wobei die Kennzahlen teils unterschiedlich kategorisiert werden [3, 6, 7]. Besonders für die Steuerung von Matrixproduktionssystemen relevant sind die Arbeiten von Kempkes *et al.* [8] sowie von Hofmann [9].

Kempkes *et al.* beschäftigen sich mit Kennzahlen zur Produktionssteuerung für Industrie 4.0. Sie haben eine Produktion-4.0-Scorecard entwickelt, die unternehmensspezifische Flexibili-

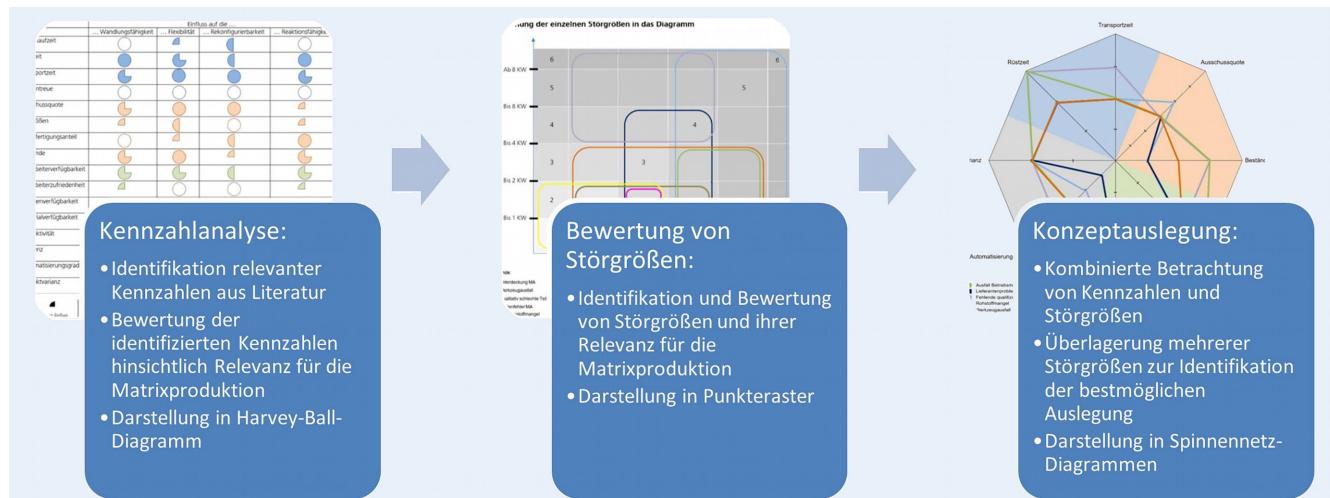


Bild 1. Vorgehensweise der Konzeptausarbeitung in drei Teilschritten: Kennzahlanalyse, Bewertung von Störgrößen und Konzeptauslegung.
Grafik: Fraunhofer IPA

tätskennzahlen enthält [8]. Diese sind auch für die Steuerung von Matrixproduktionssystemen interessant. Hofmann [9] beschäftigt sich in seiner Dissertation mit einer vorausschauenden und reaktiven Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion. Der Fokus liegt auf der Auftragsreihenfolge, die mit einem Multi-Objective-Monte-Carlo-Tree-Search-Ansatz optimiert werden soll. Dabei werden vor allem kritische Vorgänge und Belegungsintervalle der Steuerung berücksichtigt.

Ähnliche Ansätze, die sich vorwiegend mit algorithmischen beziehungsweise KI-getriebenen Ansätzen zur Auftragssteuerung befassen bieten Müller, Bochmann, Echsler Minguillon und Göppert *et al.* [10–13]. Der Schwerpunkt liegt jeweils stärker auf der Produktionssteuerung und Auftragsreihenfolgeplanung. Kennzahlen spielen in den genannten Arbeiten maximal eine untergeordnete Rolle.

Störfaktoren in der Produktion werden in der Literatur unterschiedlich definiert und klassifiziert. Kletti definiert eine Störung als Ereignis, das eine Abweichung von einem Plan- zu einem Ist-Wert verursacht [14]. Gronau *et al.* unterteilen Störungsursachen in technische, organisationale und menschliche Ursachen [15]. Van Brackel unterscheidet deterministische und stochastische Störungen, also geplante und unerwartete Störungsursachen [16]. Wagner *et al.* haben eine Bewertungsmethodik zur Erkennung störungsrelevanter Montageprozesse in der Kleinserie erarbeitet [17]. Sie fokussieren sich dabei auf klassische Montagesysteme. Es ist davon auszugehen, dass die Vorgehensweise generell auf ein Matrixproduktionssystem übertragbar ist. Allerdings muss die Störungsrelevanz der einzelnen Prozesse für jedes Produktionsystem neu bewertet werden. Eventuell sind Besonderheiten von Matrixproduktionssystemen gesondert zu berücksichtigen.

Nordwig *et al.* [5] haben Steuerungsbedarfe für den operativen Betrieb von Matrixproduktionssystemen aufgezeigt. Als wesentliche Handlungsfelder einer neuen Funktion zur Steuerung werden die Orchestrierung von Informationen, das Treffen kurzfristiger Entscheidungen sowie die Sicherstellung der Zielerreichung genannt. Um eine adäquate Entscheidungsgrundlage und einen Überblick über diese Handlungsfelder zu haben, benötigt diese Funktion umfassende Kenntnisse der für die Matrixproduktion relevanten Kennzahlen und wahrscheinlichen Störfaktoren sowie deren Auswirkungen.

2.2 Erläuterung zu Matrixproduktionssystemen

Eine Matrixproduktion ist räumlich in einem Raster aufgebaut. Frei verkettete Prozessmodule ermöglichen die individuelle räumliche Anordnung in diesem Raster. Die Prozessmodule sind logistisch voneinander entkoppelt und individuell anfahrbar. Die einzelnen Produktionsressourcen können unterschiedliche Automatisierungsgrade aufweisen. Der Materialfluss ist grundsätzlich ein gerichteter Fluss, es sind aber Rückflüsse im System möglich (anders als bei einer Linienorganisation).

Der modulare Aufbau bietet entscheidende Vorteile gegenüber klassischen Produktionssystemen [5, 18, 19]. Durch den prozessorientierten Aufbau der Bearbeitungsmodule können beispielsweise mehrere Produkte beziehungsweise Produktvarianten eine gemeinsame Produktionsstruktur nutzen, bei der jede Variante ihren eigenen Weg durch das Produktionssystem findet. Dies führt zu einer besseren Ressourcennutzung. Für die Steuerung hingegen bedeutet dies häufig einen höheren Aufwand. [5, 19]

2.3 Methodische Vorgehensweise

Bei der Erarbeitung des Konzeptes für die Auslegung der Steuerungskriterien für Matrixproduktionssysteme sind sowohl steuerungsrelevante Kennzahlen als auch relevante Störgrößen zu beachten. Daher erfolgt im ersten Schritt eine Kennzahlenanalyse, die grafisch in einem Harvey-Ball-Diagramm abgebildet wird. Ziel ist es, steuerungsrelevante Kennzahlen einer Matrixproduktion zu identifizieren. Im zweiten Schritt wird eine Störgrößenanalyse durchgeführt. Dabei sollen Störgrößen identifiziert werden, die einen starken Einfluss auf die Matrixproduktion haben. Bei der Ausarbeitung des Konzeptes werden für die grafische Darstellung Spinnennetzdiagramme verwendet. So entsteht am Ende ein Spinnennetzdiagramm, das die relevanten Kennzahlen und Störgrößen berücksichtigt und das Konzept für die Auslegung von Steuerungskriterien einer Matrixproduktion darstellt. Es wurde vorwiegend die grafische Darstellungsform gewählt, da eine Messbarkeit in Zahlenwerten nicht für alle Kriterien gegeben ist. **Bild 1** zeigt die Vorgehensweise bei der Ausarbeitung des Konzepts in drei Teilschritten.

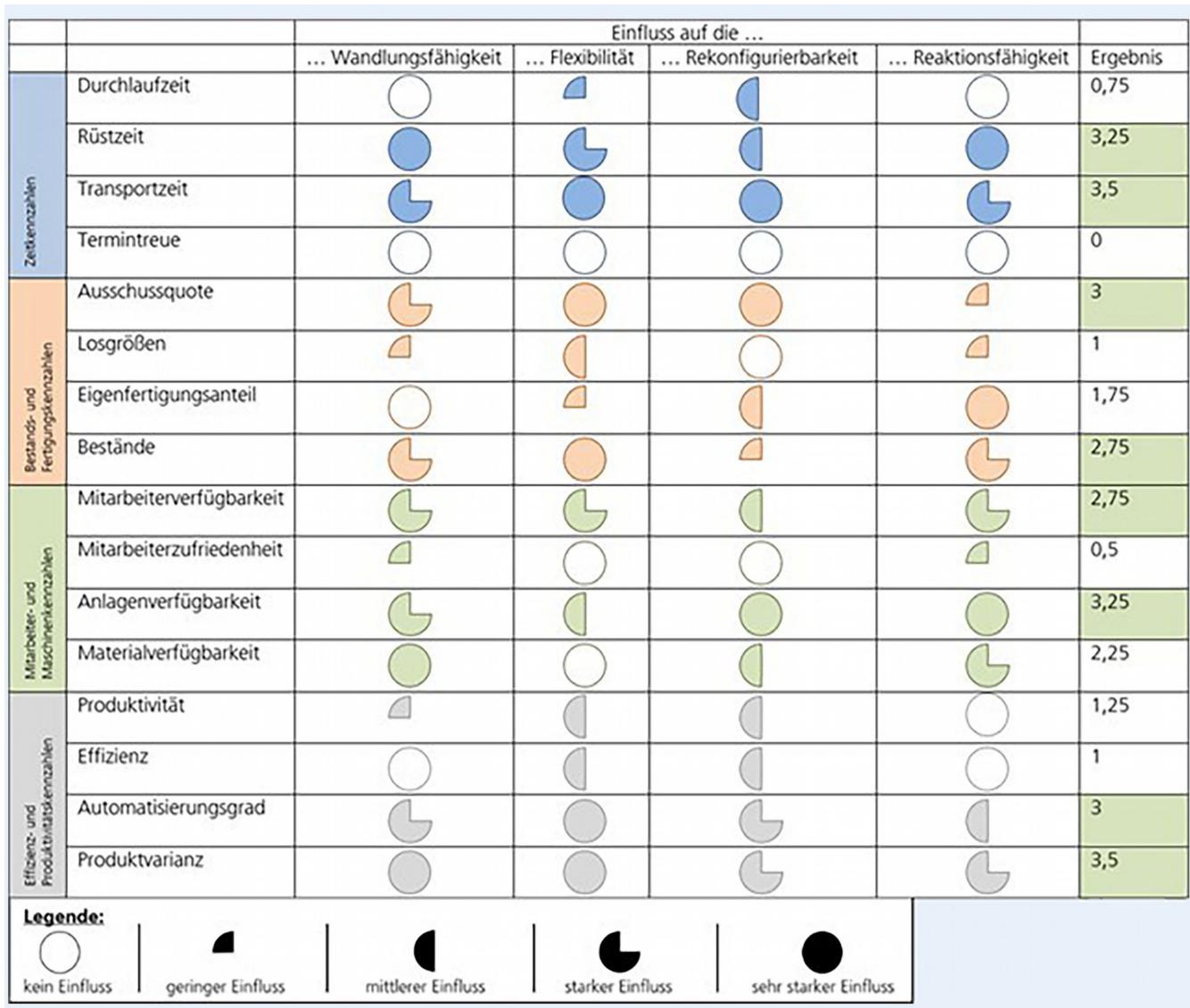


Bild 2. Harvey-Ball-Diagramm zur Analyse steuerungsrelevanter Kennzahlen einer Matrixproduktion. Grafik: Fraunhofer IPA

Zunächst werden steuerungsrelevante Kennzahlen für Matrixproduktionssysteme identifiziert. Dann werden Störgrößen identifiziert und nach ihrer Bedeutung für Matrixproduktionssysteme bewertet. Abschließend werden beide Kriterien in einem Spinnennetzdiagramm überlagert. Zur Identifikation der optimalen Auslegung der steuerungsrelevanten Kennzahlen werden diese für mehrere wesentliche Störgrößen kombiniert betrachtet.

3 Ausarbeitung des Konzepts

In diesem Kapitel wird das oben beschriebene Konzept schrittweise ausgearbeitet. Wesentliche Punkte sind die Kennzahlanalyse und die Störgrößenbewertung sowie die Auslegung des Konzepts in Form eines Spinnennetzdiagramms. Abgeschlossen wird das Kapitel mit einer kurzen kritischen Reflexion.

3.1 Kennzahlanalyse

Die Kennzahlanalyse dient der Ermittlung steuerungsrelevanter Kennzahlen in Matrixproduktionssystemen. Für die grafi-

sche Darstellung wird ein Harvey-Ball-Diagramm (Bild 2) verwendet.

Es bietet eine gute Übersichtlichkeit und die Möglichkeit einer klaren Abgrenzung zwischen verschiedenen Kennzahlen, sodass eine eindeutige Auswertung stattfinden kann. Die Skala (Füllgrad der Bälle) wird in fünf verschiedene Ausprägungsstufen unterteilt (ausgefüllter Ball, 3/4 gefüllter Ball, 1/2 gefüllter Ball, 1/4 gefüllter Ball, leerer Ball). Je größer der Füllgrad eines Balls, desto größer ist der Einfluss der betrachteten Kennzahl auf das betroffene Kriterium. So lässt sich ableiten, wie stark die Matrixproduktion von den jeweiligen Kennzahlen beeinflusst wird. Es werden aus der Literatur identifizierte Kennzahlen hinsichtlich ihres Einflusses auf ausgewählte Kriterien der Matrixproduktion (Wandlungsfähigkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, Reaktionsfähigkeit) bewertet.

Die Wandlungsfähigkeit ist eine wesentliche taktische Fähigkeit einer ganzen Fabrik. Sie ist entscheidend für die Skalierbarkeit und ermöglicht es, das gesamte Produktionssystem an neue Produktgruppen und Mengen anzupassen [20]. Die Rekonfigurierbarkeit ist ebenfalls eine taktische Fähigkeit einer Matrixpro-

duktion. Ziel ist es, die Integration neuer oder ähnlicher Produkt- und Mengenanforderungen mit möglichst geringem Aufwand umsetzen zu können [20]. Die Flexibilität ist eine wichtige operative Fähigkeit. Durch die Realisierung verschiedener Systemzustände innerhalb eines Produktionssystems und die Möglichkeit, sich kurzfristig an geänderte Bedingungen anzupassen, können sowohl Kosten als auch Zeitaufwand minimiert werden [20–22]. Dies erfordert eine rasche Reaktionsfähigkeit. Matrixproduktionssysteme haben das Ziel einer hohen Produktivität bei gleichzeitiger Flexibilität [5]. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, mit einer hohen Reaktionsgeschwindigkeit auf Störungen reagieren zu können. Nur so können Matrixproduktionssysteme ihre Vorteile gegenüber anderen Produktionssystemen bestmöglich ausspielen. Daher wurde die Reaktionsfähigkeit als wichtiges Kriterium ergänzend aufgenommen. Es wird angenommen, dass die Steuerung eines Matrixproduktionssystems und deren Komplexität davon beeinflusst wird, wie stark der Einfluss einer Kennzahl auf die Kriterien der Wandlungsfähigkeit, Rekonfiguration, Flexibilität und Reaktionsfähigkeit ist.

Nachdem die Kriterien für die Bewertung festgelegt sind, müssen Kennzahlen zur Betrachtung herangezogen werden. Dazu werden, basierend auf einer Literaturrecherche gängiger Produktionskennzahlen, vier Cluster gebildet. Im ersten Cluster werden Zeitkennzahlen betrachtet. Dazu zählen Durchlaufzeit, Rüstzeit, Transportzeit und Termintreue. Im zweiten Cluster werden die Bestands- und Fertigungskennzahlen Ausschussquote, Losgrößen und Eigenfertigungsanteil betrachtet. Das dritte Cluster enthält Mitarbeiter- und Maschinenkennzahlen. Diese sind die Mitarbeiterverfügbarkeit, die Mitarbeiterzufriedenheit, die Anlagenverfügbarkeit und die Materialverfügbarkeit. Das vierte Cluster besteht aus Effizienz- und Produktivitätskennzahlen. Dazu gehören die Kennzahlen Produktivität, Effizienz, Automatisierungsgrad und Produktvarianz.

Basierend darauf wird jede Kennzahl anhand der definierten Bewertungskriterien (Wandlungsfähigkeit, Rekonfigurierbarkeit, Flexibilität, Reaktionsfähigkeit) bewertet. Anschließend wird, auf Grundlage des Einflusses der Kennzahlen auf die Kriterien, die Kritizität aller Kennzahlen errechnet. Beispielsweise entspricht ein Viertel des Füllgrades eines Balls 0,25 Punkten bei der Summenbildung. Je höher die Summe, desto relevanter ist die betrachtete Kennzahl für die Steuerung von Matrixproduktionssystemen. Die zwei einflussreichsten Kennzahlen je Cluster wurden als steuerungsrelevant definiert. Diese sind die Transportzeit, die Rüstzeit, die Ausschussquote, die Bestände, die Mitarbeiterverfügbarkeit, die Anlagenverfügbarkeit, der Automatisierungsgrad und die Produktvarianz. Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Bild 2 grafisch dargestellt.

3.2 Störgrößenbewertung

Störungen beeinflussen die Matrixproduktion in unterschiedlichem Ausmaß. Auch die dadurch verursachten Produktivitäts-einbußen sind unterschiedlich stark. Ebenso sind die möglichen (präventiv und reaktiv) zu ergreifenden Maßnahmen sehr breit gefächert. Zur Untersuchung der einflussreichsten Störgrößen auf ein Matrixproduktionssystem wird ein Punktraster (Bild 3) erstellt.

Darin wird der Einfluss einer Störgröße auf die Matrixproduktion und die Dauer ihrer zeitlichen Beeinträchtigung für das Matrixproduktionssystem unterschieden. Ziel ist eine Klassifi-

zierung der Störgrößen. Für die Auswahl der betrachteten Störgrößen wurden die in der Literatur am häufigsten genannten verwendet. Hierzu zählen die Unterdeckung von Mitarbeitenden, der Werkzeugausfall, qualitativ schlechte Teile, ein Bedienfehler des Mitarbeitenden, der Betriebsstoffmangel, der Ausfall von Betriebsmitteln, Lieferantenprobleme, das Fehlen von qualifizierten Mitarbeitenden und der Rohstoffmangel [15, 23, 24].

Die Stärke der Auswirkungen einzelner Störgrößen wird im Folgenden klassifiziert. Bei einer sehr geringen Beeinflussung des Matrixproduktionssystems durch die Störgröße bleibt die Produktion ungestört. Nötige Anpassungen können im Hintergrund ablaufen. Wenn kleinere Anpassungen zu einer leichten Produktivitätsminderung führen, ist der Einfluss der Störgröße gering. Sind aktive Eingriffe in das Matrixproduktionssystem notwendig, um die Produktivität zu sichern, so ist die Beeinflussung durch die Störgröße mittelstark. Bei starkem Einfluss der Störgröße muss die Produktion teilweise rekonfiguriert und Prozessmodule angepasst werden. Ein Produktionsstillstand ist möglich. Ein sehr starker Einfluss der Störgröße bewirkt längere Unterbrechungen der Produktion und erfordert umfassende strukturelle Änderungen, die einen hohen Aufwand verursachen. Diese Ausprägungen finden sich auf der horizontalen Achse des Rasters wieder.

Auf der vertikalen Achse des Rasters wird die Dauer der Auswirkung der Beeinträchtigung des Matrixproduktionssystems durch die jeweilige Störgröße bewertet. Störgrößen werden anhand ihrer Auswirkungen auf die Matrixproduktion in verschiedene zeitliche Kategorien eingeteilt. Die im Folgenden aufgelistete Einteilung, basierend auf Kalenderwochen, wurde als übersichtliche erste Annäherung zur Einordnung der Störgrößen gewählt: Beeinträchtigungen bis zu zwei Kalenderwochen (KW), bis zu vier KW, bis zu acht KW sowie mehr als acht KW. Im Punktediagramm erhält jede Störgröße einen Punktewert, der sowohl die Dauer der Beeinträchtigung als auch den Einfluss auf die Produktion widerspiegelt. Auf beiden Achsen können komplexe Störgrößen mehrere Ausprägungen umfassen. Das Diagramm des Punkterasters mit der Einordnung der Störgrößen ist in Bild 3 dargestellt. Die Punktewerte einer komplexen Störgröße werden summiert, um eine Gesamtbewertung zu ermöglichen.

Die fünf einflussreichsten Störgrößen für ein Matrixproduktionssystem sind fehlende Ausgangsstoffe beziehungsweise fehlende Teile für die Produktion (in der Grafik als Rohstoffmangel bezeichnet), fehlende qualifizierte Mitarbeitende, der Werkzeugausfall sowie der Ausfall von Betriebsmitteln und Lieferantenprobleme. Diese werden für die Auslegung des Konzepts berücksichtigt.

3.3 Spinnennetzdiagramm

Zur Verknüpfung der steuerungsrelevanten Kennzahlen mit den einflussreichsten Störgrößen für Matrixproduktionssysteme wurden Spinnennetzdiagramme ausgewählt. In diesem Konzept bilden die zwei als relevant identifizierten Kennzahlen aus jedem der vier definierten Cluster die Ausprägungen des Spinnennetzdiagrammes (Bild 4).

Die Ausprägungsstufen (siehe unten Bild 7) der acht Kennzahlen sind nicht identisch. Sie sind jeweils von innen nach außen aufsteigend im Spinnennetzdiagramm angeordnet. Die fünf einflussreichsten Störgrößen für Matrixproduktionssysteme wurden jeweils als Szenario betrachtet. Um eine Anwendbarkeit des Konzepts zu gewährleisten, müssen die Ausprägungen der Kennzahlen

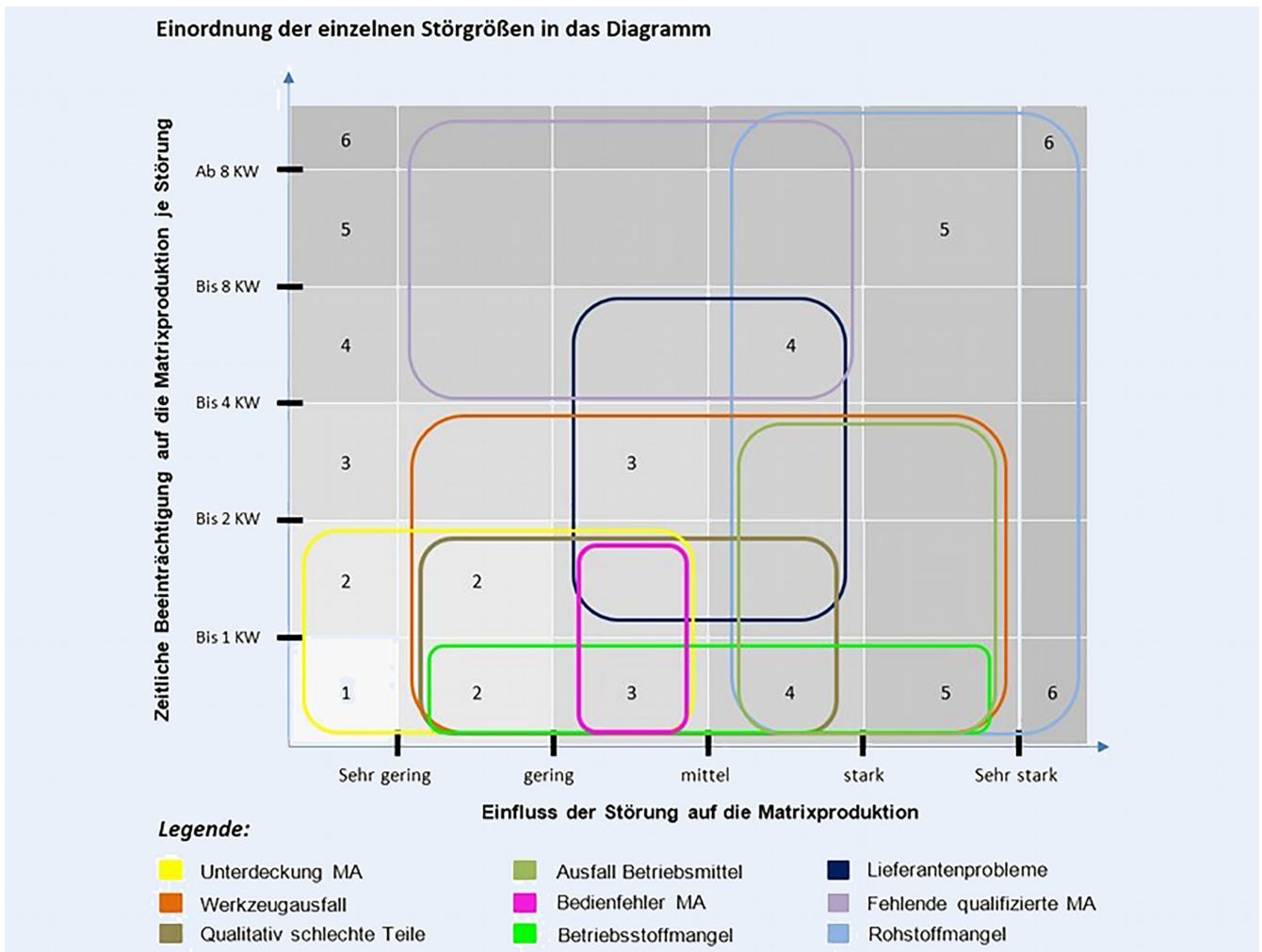


Bild 3. Einordnung der Störgrößen in das Punktzahldiagramm. *Grafik: Fraunhofer IPA*

im Zusammenhang mit den Kriterien (Rekonfigurierbarkeit, Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Umrüstbarkeit) stehen. Daher müssen die einzelnen Ausprägungsstufen der steuerungsrelevanten Kennzahlen definiert werden.

Bei den Zeitkennzahlen sind die Rüstzeit und die Transportzeit relevant. Die Rüstzeit umfasst die Umrüstung von Maschinen und Anlagen. Besonders der Werkzeugwechsel hat einen großen Einfluss auf die Produktionsflexibilität und -effizienz. Ziel ist eine möglichst kurze Rüstzeit. Unterschiedliche Rüstmethoden verursachen verschiedene Zeitaufwände. Der manuelle Werkzeugwechsel ist zeitaufwendig und erfordert qualifiziertes Personal. Durch die Bindung der Mitarbeitenden wird die Flexibilität eingeschränkt. Halbautomatische Systeme zum Werkzeugwechsel verringern die Rüstzeit deutlich, da nur die Werkzeugaufnahme gewechselt wird. Ein automatischer Werkzeugwechsel minimiert die Rüstzeit erheblich und erfordert kein Personal. Dies ist vor allem bei hoher Variantenvielfalt und häufigen Wechseln vorteilhaft. Automatisierte Methoden des Werkzeugwechsels können die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Produktion steigern. [25]

Weiter wird die Transportzeit betrachtet. Sie umfasst den Materialfluss zwischen den Prozessmodulen sowie den Transport von Rohstoffen und Waren zu den einzelnen Prozessmodulen. Der Transport lässt sich in vier Ausprägungen kategorisieren, die

eine unterschiedliche Transportzeit zur Folge haben. Der manuelle Transport erfolgt durch Mitarbeitende oder eine einfache Fördertechnik wie Rollbahnen. Vor allem der Transport durch Mitarbeitende ist zeit- und kostenintensiv. Einfache Fördertechnik, wie Rollbahnen, schränken die Flexibilität und die Wandlungsfähigkeit sowie die Rekonfigurierbarkeit der Produktion ein. Der elektrische Transport nutzt hingegen elektrisch betriebene Geräte wie Gabelstapler oder Förderbänder. So wird die Transportzeit reduziert, jedoch ist weiterhin geschultes Personal erforderlich. Auch Förderbänder wirken einschränkend auf Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit. Der automatische Transport erfolgt über fahrerlose Transportsysteme (FTF). Diese erlauben eine erhebliche Steigerung der Effizienz, erfordern aber hohe Investitionen und fortschrittliche technische Infrastrukturen. Die höchste Automatisierungsstufe bietet der autonome Transport durch mobile Roboter (AMR). Diese bewegen sich unabhängig und führen zu einer weiteren Optimierung des Materialflusses. Auch hier sind hohe Investitionskosten und eine moderne technische Ausstattung nötig. FTF und AMR ermöglichen Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit. Es wird deutlich, dass die unterschiedlichen Transportmethoden die Effizienz, Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Matrixproduktion entscheidend beeinflussen. Bei Rekonfigurationen (langer Zeitraum) wie auch bei kurzfristigen Änderungen müssen diese

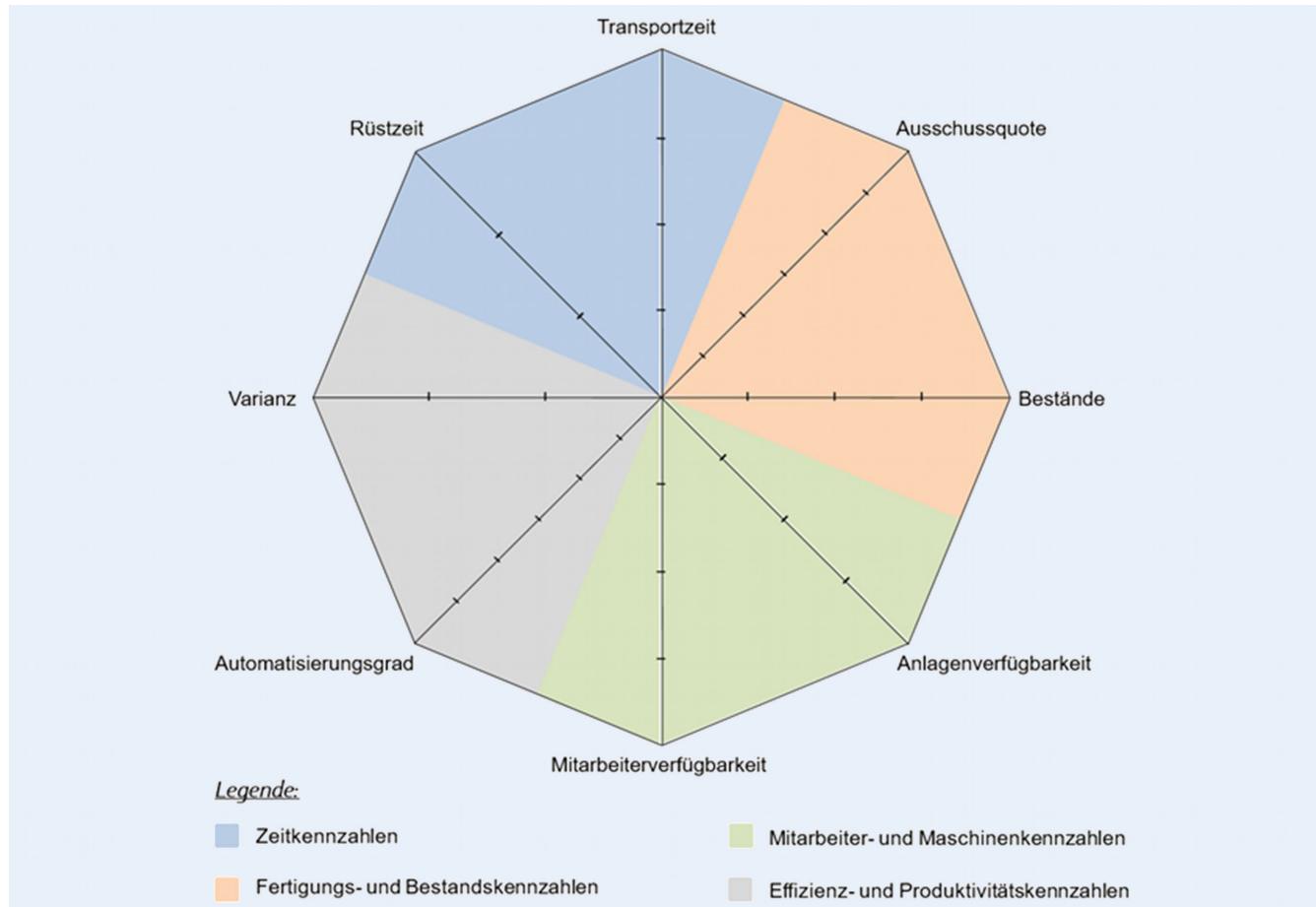


Bild 4. Grundgerüst des Spinnennetzdiagramms. Grafik: Fraunhofer IPA

entsprechend mit angepasst beziehungsweise gesteuert werden. [26, 27]

Bei den Bestands- und Fertigungskennzahlen wird zunächst die Ausschussquote betrachtet. Sie beeinflusst die Effizienz und Flexibilität von Matrixproduktionssystemen. Ziel ist eine Null-Fehler-Rate. Für die Ausschussquote gibt es keine standardisierten Vorgaben zur Definition von Ausprägungen. Daher wird als Annäherung das Six-Sigma-Modell verwendet. Die verschiedenen Sigma-Stufen kennzeichnen die Ausschussquote: Bei 1-Sigma liegt der Ausschuss bei 69 %, bei 2-Sigma bei 30,86 %. Diese Werte sind für die Industrie unakzeptabel. Bei 3-Sigma sinkt die Ausschussquote auf 6,68 %. Dies ermöglicht eine gute Flexibilität, da wenige Ressourcen für Nacharbeit eingesetzt werden müssen. 4-Sigma (0,62 %) und 5-Sigma (0,023 %) gelten als effizient. Das 6-Sigma-Niveau (0,00034 %) gilt als nahezu unerreichbar. Diese Ausprägungen verdeutlichen, dass die Ausschussquote vor allem die Flexibilität in der Matrixproduktion beeinflusst und zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Produktionsprozesse zwingt. [28]

Die Bestände sind entscheidend für die Effizienz der Matrixproduktion und umfassen sowohl Lagerbestände als auch Produktionsbestände. Verschiedene Ansätze im Bestandsmanagement erlauben die Definition unterschiedlicher Ausprägungsstufen. Die erste Ausprägung betrifft Lagerbestände, die Sicherheitsbestände für bis zu einer Woche bereitstellen, wodurch Produktionsstillstände vermieden werden können. Dies führt jedoch zu hohen Lagerkosten und kann die Flexibilität der Matrixproduktion be-

einträchtigen. Die zweite Ausprägung gewährleistet eine Versorgung über ein bis zwei Werkstage, was eine schnellere Reaktion auf Änderungen ermöglicht und die Produktionsvorteile besser nutzt. Bei einer Just-In-Time-Belieferung (JIT) werden Materialien in der richtigen Menge und zur richtigen Zeit bereitgestellt. Dies minimiert die Bestände und erhöht die Flexibilität der Produktion. Allerdings kann es im Störungsfall aufgrund fehlender Materialien zu Produktionsstillständen kommen. Die vierte Ausprägung, die Just-In-Sequence (JIS)-Belieferung, optimiert die Materialanlieferung in der korrekten Reihenfolge für hohe Stückzahlen, ohne interne Bestände. Dies erlaubt eine hohe Effizienz, erfordert aber gleichzeitig einen hohen organisatorischen Aufwand. Die unterschiedlichen Bestandsausprägungen beeinflussen die spezifischen Eigenschaften der Matrixproduktion erheblich. Eine gezielte, strategische Planung im Bestandsmanagement kann helfen, hier bessere Voraussetzungen zu schaffen. [29, 30]

Bei den Anlagen- und Mitarbeiterkennzahlen wird zuerst die Anlagenverfügbarkeit betrachtet. Sie wird stark von Rüstzeiten beeinflusst und ist entscheidend für die Effizienz von Produktionssystemen. Eine umfassende Metrik, die Verfügbarkeit, Leistung und Qualität bewertet, ist erforderlich. Aufgrund der Schwankungen in der Einordnung der Anlagenverfügbarkeit wird die Overall Equipment Effectiveness (OEE) herangezogen. In der ersten Ausprägungsstufe liegt die Anlagenverfügbarkeit bei 65 %. Dies ist für eine Produktion zu gering, um wettbewerbsfähig zu sein. Zudem können die Flexibilität, die Wandlungsfähigkeit und die Rekonfigurierbarkeit einer Matrixproduktion nicht optimal

genutzt werden. Nicht verfügbare Maschinen und Anlagen können nicht flexibel eingesetzt werden. Auch bei einer Anlagenverfügbarkeit zwischen 65 % und 75 % können die Vorteile der Matrixproduktion noch nicht optimal greifen. Werte von über 85 % werden als sehr gut eingestuft. In produzierenden Unternehmen wird häufig eine Anlagenverfügbarkeit von 75 % bis 85 % angestrebt. Matrixproduktionssysteme bieten durch ihre Eigenschaften die Möglichkeit, eine geringere Anlagenverfügbarkeit kurzfristig abfangen zu können. Maßnahmen und Handlungsempfehlungen zum Umgang mit einer geringen Anlagenverfügbarkeit oder Maschinenausfall können davon ausgehend erarbeitet werden. [31, 32]

Die zweite steuerungsrelevante Kennzahl in diesem Cluster ist die Mitarbeiterverfügbarkeit. Sie misst die Verfügbarkeit aller Mitarbeitenden in einem Unternehmen und kann auf täglicher, monatlicher oder jährlicher Basis betrachtet werden. Aufgrund fehlender spezifischer Ausprägungsstufen in der Literatur wird die Anlagenverfügbarkeit als Orientierung herangezogen, da sie die Aspekte Verfügbarkeit, Leistung und Qualität abdeckt. Im Jahr 2022 lag die durchschnittliche Mitarbeiterverfügbarkeit im verarbeitenden Gewerbe bei 80,48 %, was die Anwendbarkeit der Overall Equipment Effectiveness (OEE)-Methodik unterstützt [33]. Die Mitarbeiterverfügbarkeit lässt sich in vier Ausprägungen klassifizieren: Eine geringe Verfügbarkeit von unter 65 % tritt häufig in Krisensituationen auf und schränkt die Flexibilität von Matrixproduktionssystemen erheblich ein. Eine mittlere Verfügbarkeit von 65 % bis 75 % ist typisch für regelmäßige Schichtwechsel, während eine hohe Verfügbarkeit von 75 % bis 85 % durch moderne Arbeitszeitmodelle gefördert wird. Eine sehr hohe Verfügbarkeit von über 85 % ist in hochautomatisierten Betrieben zu beobachten und erfordert stabile Belegschaften sowie eine hohe Mitarbeiterzufriedenheit. Die Mitarbeiterverfügbarkeit ist für eine umfassende Analyse von Bedeutung. Matrixproduktionssysteme bieten aufgrund ihrer Flexibilität die Möglichkeit, Mitarbeitende flexibel einzusetzen und eine geringe Mitarbeiterverfügbarkeit bis zu einem gewissen Grad abzufangen.

Die Effizienz- und Produktivitätskennzahlen zeigen den Automatisierungsgrad. Dieser beschreibt den Anteil automatisierter Prozesse im Herstellungsprozess und beeinflusst die Effizienz und Produktivität der Matrixproduktion. Der Automatisierungsgrad kann in sechs Ausprägungsstufen unterteilt werden. In der ersten Stufe werden alle Tätigkeiten manuell, ohne Automatisierung, durchgeführt. In der zweiten Stufe unterstützen Assistenzsysteme die Mitarbeitenden bei bestimmten Teilprozessen ihrer manuellen Tätigkeiten. Die dritte Stufe umfasst eine Teilautomatisierung, bei der Maschinen definierte Aufgaben übernehmen. Der Mensch spielt aber weiterhin eine zentrale Rolle. In der vierten Stufe ist die Produktion vollautomatisiert. Maschinen übernehmen die Verantwortung für Teilprozesse, auch die Prozessüberwachung findet automatisiert statt. Die fünfte Stufe umfasst teilautonome Systeme. Diese können Entscheidungen innerhalb der Prozesse selbstständig treffen. Die sechste Stufe beschreibt die vollständig autonome Produktion. Dabei führen Maschinen sämtliche Aufgaben selbstständig und ohne menschliches Eingreifen aus. Der Automatisierungsgrad beeinflusst entscheidend die Flexibilität sowie die Wandlungsfähigkeit und Rekonfigurierbarkeit der Matrixproduktion. Ein Hauptgrund liegt in der Umrüstbarkeit. Somit sind die verschiedenen Ausprägungsstufen des Automatisierungsgrads für die Analyse und Gestaltung effizienter Produktionsprozesse in Matrixproduktionssystemen von zentraler Bedeutung. [34, 35]

Abschließend wird die Varianz als steuerungsrelevante Kennzahl betrachtet. Sie kann in drei Ausprägungsstufen eingeteilt werden. Die erste Stufe bedeutet, dass für jede Varianz ein eigener Prozess geplant wird. In der zweiten Stufe können mehrere Varianten mit einem gemeinsamen Prozess gefertigt werden. Die dritte Stufe bedeutet, dass alle Varianten mit demselben Prozess oder derselben Prozessfolge gefertigt werden können. Dies bedeutet maximale Effizienz und Flexibilität im Prozess, während in der zweiten Stufe die größte Flexibilität vom Produktionssystem verlangt wird. Die Übersicht aller als steuerungsrelevant identifizierten Kennzahlen mit ihren dazugehörigen Ausprägungsstufen ist in **Bild 5** dargestellt.

Zur Darlegung des Zusammenwirkens der Kennzahlen und Störgrößen werden Spinnennetzdiagramme gebildet. Dazu werden die fünf einflussreichsten Störgrößen zur weiteren Betrachtung ausgewählt. Diese bilden jeweils ein Szenario ab. Für jedes Szenario wird ein eigenes Spinnennetzdiagramm erstellt. Dabei wird für jede steuerungsrelevante Kennzahl eine der bereits beschriebenen Ausprägungen (Bild 5) ausgewählt und begründet. Diese Auswahl ist so zu treffen, dass eine mögliche Störung bestmöglich und aufwandsarm bewältigt werden kann. Im nächsten Schritt sollen gleiche oder ähnliche erforderliche Ausprägungsstufen der Kennzahlen für die Bewältigung unterschiedlicher Störungsursachen erkannt werden. Die erkannten Muster, Trends und Auffälligkeiten aus den fünf einzelnen Spinnennetzdiagrammen werden für die Erstellung des Konzepts überlagert (**Bild 6**). Das Konzept ist unten in Bild 8 dargestellt.

Auf dieser Basis erfolgt im Rahmen der Konzeptauslegung eine gezielte, einheitliche Definition der gewünschten Ausprägungen der steuerungsrelevanten Kennzahlen für Matrixproduktionssysteme. Sind unterschiedliche Ausprägungsstufen einer Kennzahl erforderlich, um die durch verschiedene Störgrößen verursachten Störungen zu bewältigen, so muss für die Auslegung des Konzepts eine Ausprägungsstufe als Mindestanforderung definiert werden. Die in **Bild 7** gezeigte Auslegung der Mindestanforderungen ist als ein erster generalisierter Vorschlag zu verstehen, der entsprechend den individuellen Gegebenheiten des jeweiligen Matrixproduktionssystems und den unternehmensspezifischen Anforderungen angepasst werden muss.

Im Folgenden werden die Kennzahlen so definiert, dass sie eine effektive, aufwandsarme und kostengünstige Bewältigung von Störungen in der Matrixproduktion ermöglichen. Innerhalb der Zeitkennzahlen wird für die Rüstzeit die Ausprägung des halbautomatischen Werkzeugwechsels definiert. Dies ist die Mindestanforderung für die Matrixproduktion zur Bewältigung möglicher Störungen. Ein vollautomatischer Werkzeugwechsel ist zu empfehlen, wenn die Störgrößen fehlende qualifizierte Mitarbeitende beziehungsweise der Ausfall von Betriebsmitteln häufig auftreten. Der halbautomatische Werkzeugwechsel ist in den meisten Fällen ausreichend. Zudem sind die Kostenunterschiede zwischen halbautomatisch und vollautomatisch zu beachten, ebenso die Dimension und Komplexität der Werkzeuge. Für die Transportzeit wird ein elektrischer Transport empfohlen. Elektrische Transportmittel beschleunigen die Produkt- und Rohstoffbewegung gegenüber einem manuellen Transport signifikant. Automatisierte und autonome Transportausprägungen sind effizient und fördern die Flexibilität in Matrixproduktionssystemen, sind jedoch mit hohen Kosten verbunden. Zudem erfordern kurzfristig getroffene Entscheidungen gegebenenfalls manuelle Eingriffe, die mit der Steuerung solcher Systeme kompatibel gemacht werden

Cluster		Zeitkennzahlen	
Kennzahl	Stufen	Rüstzeit	Transportzeit
Ausprägungsstufen		3	
Ausprägungen	1	manueller Werkzeugwechsel	manueller Transport
	2	halbautomatischer Werkzeugwechsel	elektrischer Transport
	3	automatischer Werkzeugwechsel	automatisierter Transport
	4		autonomer Transport
		Mitarbeiter- und Maschinenkennzahlen	
		Anlagenverfügbarkeit	Mitarbeiterverfügbarkeit
Ausprägungsstufen		4	
Ausprägungen	1	<65%	<65%
	2	65%- 75%	65%- 75%
	3	75%- 85%	75%- 85%
	4	>85%	>85%
		Bestands- und Fertigungskennzahlen	
		Ausschussquote	Bestände
Ausprägungsstufen		6	
Ausprägungen	1	69%	1 Woche Bestand
	2	30,8587%	1-2 Werkstage
	3	6,6807%	Just-In-Time
	4	0,621%	Just-In-Sequence
	5	0,0233%	
	6	0,00034%	
		Effizienz- und Produktivitätskennzahlen	
		Automatisierungsgrad	Varianz
Ausprägungsstufen		6	
Ausprägungen	1	manuelle Produktion	Produktvarianz = Prozessvarianz
	2	Einsatz von Asisstenzsystemen	Produktvarianz > Prozessvarianz
	3	teilautomatisierte Produktion	Produktvarianz durch einen Prozess
	4	automatisierte Produktion	
	5	teilautonome Produktion	
	6	autonome Produktion	

Bild 5. Übersicht der Ausprägungsstufen der steuerungsrelevanten Kennzahlen einer Matrixproduktion. Grafik: Fraunhofer IPA

müssen. Dies ist Teil der in Kapitel 1 angesprochenen höheren Komplexität. Elektrische, automatisierte oder autonome Transporte sind in Matrixproduktionssystemen häufig vorteilhaft. Allerdings ist dies auch von zurückzulegenden Distanzen, infrastrukturellen Voraussetzungen und dem Gesamtlayout abhängig und daher individuell zu planen. Auch manuelle Transportlösungen können unter gewissen Voraussetzungen sinnvoll und kostengünstig sein.

Im Rahmen der Bestands- und Fertigungskennzahlen wird für die Ausschussquote die Einhaltung der Drei-Sigma-Regel definiert. Das Ziel ist jedoch eine Null-Fehler-Quote. Eine realistische Ausschussquote in der Praxis liegt häufig bei maximal 6,6807 % pro Million produzierter Teile. Eine möglichst geringe Ausschussquote ist entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit. Für die Be-

stände zeigt sich im Zusammenhang mit der Bewältigung von Störungen ein sehr heterogenes Bild. Bestände sind aus wirtschaftlicher Sicht zu vermeiden, da sie Kosten verursachen. Ein JIT (Just in Time)-System birgt jedoch das Risiko von Produktionsstillständen bei Lieferengpässen. Die hohe Produktvarianz in der Matrixproduktion ermöglicht es, Störungen bei einer Variante durch die Produktion alternativer Produktvarianten zu kompensieren. Dies erfordert jedoch einen erhöhten organisatorischen Aufwand. Bei der Auslegung des Konzepts wurde ein Bestand von ein bis zwei Werktagen festgelegt. Dies scheint eine geeignete Zwischenlösung, um Herausforderungen in der Produktion zu bewältigen und kurzfristige Störungen abfangen zu können.

Bei den Anlagen- und Mitarbeiterkennzahlen zeigt das Spinennetzdiagramm in Bild 6 eine deutliche Tendenz zu einer ho-

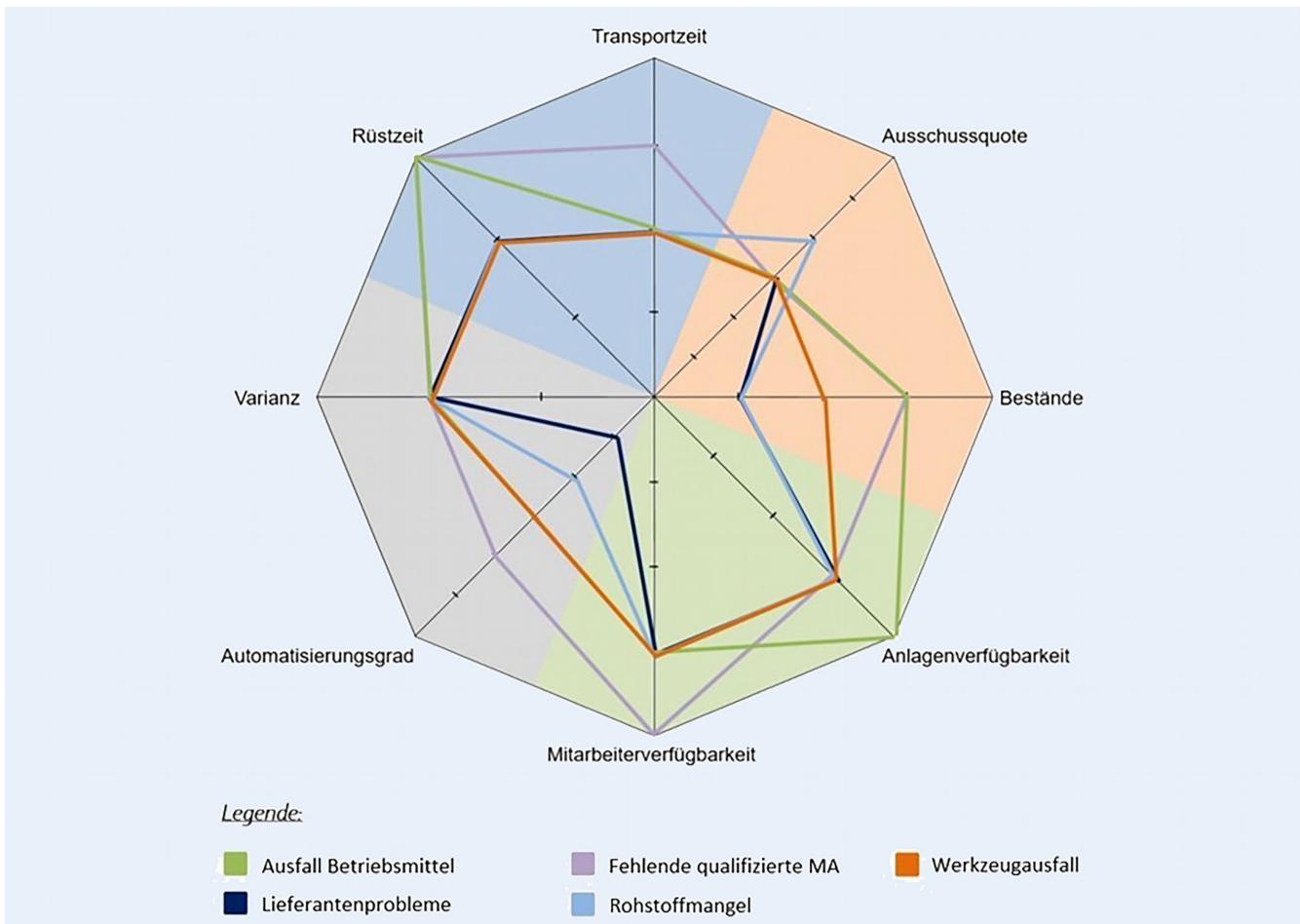


Bild 6. Spinnennetzdiagramm mit allen Störgrößen. *Grafik: Fraunhofer IPA*

hen Anlagenverfügbarkeit. Vier der fünf Störgrößen erfordern zu ihrer bestmöglichen Bewältigung eine Anlagenverfügbarkeit von 75 % bis 85 %. Diese Werte entsprechen dem Branchendurchschnitt und sind auch in Matrixproduktionssystemen entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit. Die flexible Anordnung und die spezifischen Eigenschaften der Matrixproduktion ermöglichen es, mit Störungen bei der Anlagenverfügbarkeit bestmöglich und ohne Produktionsstillstand umzugehen. Die Mitarbeiterverfügbarkeit ist teilweise an die Anlagenverfügbarkeit gebunden, da die Bedienung der Maschinen je nach Automatisierungsgrad Personal erfordert. In Matrixproduktionssystemen mit einem hohen Anteil an manuellen Tätigkeiten ist eine gleichwertige Verfügbarkeit von Anlagen und Mitarbeitern unerlässlich, um die gewünschten Stückzahlen zu erreichen. Folglich ist eine Mitarbeiterverfügbarkeit von mindestens 75 % bis 85 % notwendig, um im Störungsfall reaktionsfähig zu sein.

Bei den Effizienz- und Produktivitätskennzahlen zeigt die grafische Darstellung im Spinnennetzdiagramm (siehe Bild 6), dass der Automatisierungsgrad von einigen Störgrößen unbeeinflusst bleibt. Manche Störgrößen können erst mit der Implementierung von Assistenzsystemen oder einer Teilautomatisierung wirksam werden. Gleichzeitig können diese Systeme und Technologien auch bei der Bewältigung von Störungen unterstützen. Der Automatisierungsgrad ist eng mit den jeweiligen Produkten verknüpft. Produkte, die einen hohen Automatisierungsgrad ermöglichen, stehen im Kontrast zu solchen, bei denen eine Automatisierung

nicht realisierbar ist. Teilautomatisierte Produktionsprozesse, bei denen der Mensch weiterhin eine wichtige Rolle einnimmt, sind in der Praxis häufig anzutreffen. Störungen durch vier der fünf identifizierten Störgrößen können mit einer teilautomatisierten Produktion effizient bewältigt werden. Gleichzeitig bleiben die Kosten überschaubar, da die einzelnen Anlagen nicht untereinander vernetzt werden. Für die Varianz zeigt die Analyse des Spinnennetzdiagramms (Bild 6), dass es vorteilhaft ist, gemeinsame Prozesse für unterschiedliche Varianten im Produktionssystem zu haben. So können durch alle fünf betrachteten Störgrößen verursachte Störungen bestmöglich bewältigt werden. Beispielsweise lässt sich die Anzahl der Werkzeugwechsel reduzieren. Die Vorteile, insbesondere die Flexibilität der Matrixproduktion werden damit optimal genutzt. Dies führt zu einer höheren Produktivität und Effizienz in der Fertigung.

Das Konzept (Spinnennetzdiagramm mit einheitlich definierter Ausprägungen) zur bestmöglichen Bewältigung von Störungen durch die fünf einflussreichsten Störgrößen von Matrixproduktionssystemen ist in **Bild 8** grafisch dargestellt.

3.4 Kritische Reflexion

Das erarbeitete Konzept ist ein erster generalisierter Vorschlag zur Definition von Mindestanforderungen für die Auslegung steuerungsrelevanter Kennzahlen in Matrixproduktionssystemen. Es dient als Orientierung für die Gestaltung der Steuerung von

Cluster		Zeitkennzahlen	
Kennzahl	Stufen	Rüstzeit	Transportzeit
Ausprägungsstufen		3	4
Ausprägungen	1	manueller Werkzeugwechsel	manueller Transport
	2	halbautomatischer Werkzeugwechsel	elektrischer Transport
	3	automatischer Werkzeugwechsel	automatisierter Transport
	4		autonomer Transport
		Mitarbeiter- und Maschinenkennzahlen	
		Anlagenverfügbarkeit	
Ausprägungsstufen		4	4
Ausprägungen	1	<65%	<65%
	2	65%- 75%	65%- 75%
	3	75%- 85%	75%- 85%
	4	>85%	>85%
		Bestands- und Fertigungskennzahlen	
		Ausschussquote	
Ausprägungsstufen		6	4
Ausprägungen	1	69%	1 Woche Bestand
	2	30,8587%	1-2 Werkstage
	3	6,6807%	Just-In-Time
	4	0,621%	Just-In-Sequence
	5	0,0233%	
	6	0,00034%	
		Effizienz- und Produktivitätskennzahlen	
		Automatisierungsgrad	
Ausprägungsstufen		6	3
Ausprägungen	1	manuelle Produktion	Produktvarianz = Prozessvarianz
	2	Einsatz von Asistenzsystemen	Produktvarianz > Prozessvarianz
	3	teilautomatisierte Produktion	Produktvarianz durch einen Prozess
	4	automatisierte Produktion	
	5	teilautonome Produktion	
	6	autonome Produktion	

Bild 7. Erste Auslegung der Ausprägungen steuerungsrelevanter Kennzahlen einer Matrixproduktion. Grafik: Fraunhofer IPA

Matrixproduktionssystemen und ist entsprechend der spezifischen Anforderungen für einzelne Matrixproduktionssysteme anzupassen. Die hier festgelegten Kennzahlen und die betrachteten Störgrößen erheben nicht den Anspruch auf Vollständigkeit und können beziehungsweise müssen unternehmensspezifisch individuell betrachtet werden. Gegebenenfalls ist auch die Granularität der Betrachtung der Störgrößen unternehmensspezifisch anzupassen (beispielsweise Erfassen von Störungsauswirkungen im Stunden- oder Minutenbereich).

Das Ziel dieses Konzeptes ist es, eine methodische Vorgehensweise aufzuzeigen, wie für Matrixproduktionssysteme steuerungsrelevante Kennzahlen und Störgrößen identifiziert und in einen

sinnvollen Zusammenhang gesetzt werden können. Weiterhin wird abgeleitet, welche Kennzahlen und Störgrößen die Matrixproduktion maßgeblich beeinflussen und welche Eigenschaften und Mindestanforderungen bevorzugt ausgewählt werden sollten, um eine Matrixproduktion störungsfrei zu betreiben.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Matrixproduktionssysteme bieten eine vielversprechende Lösung für aktuelle industrielle Herausforderungen. Der Beitrag identifiziert entscheidende Kennzahlen zur effizienten Steuerung von Matrixproduktionssystemen: darunter Rüst- und Transport-

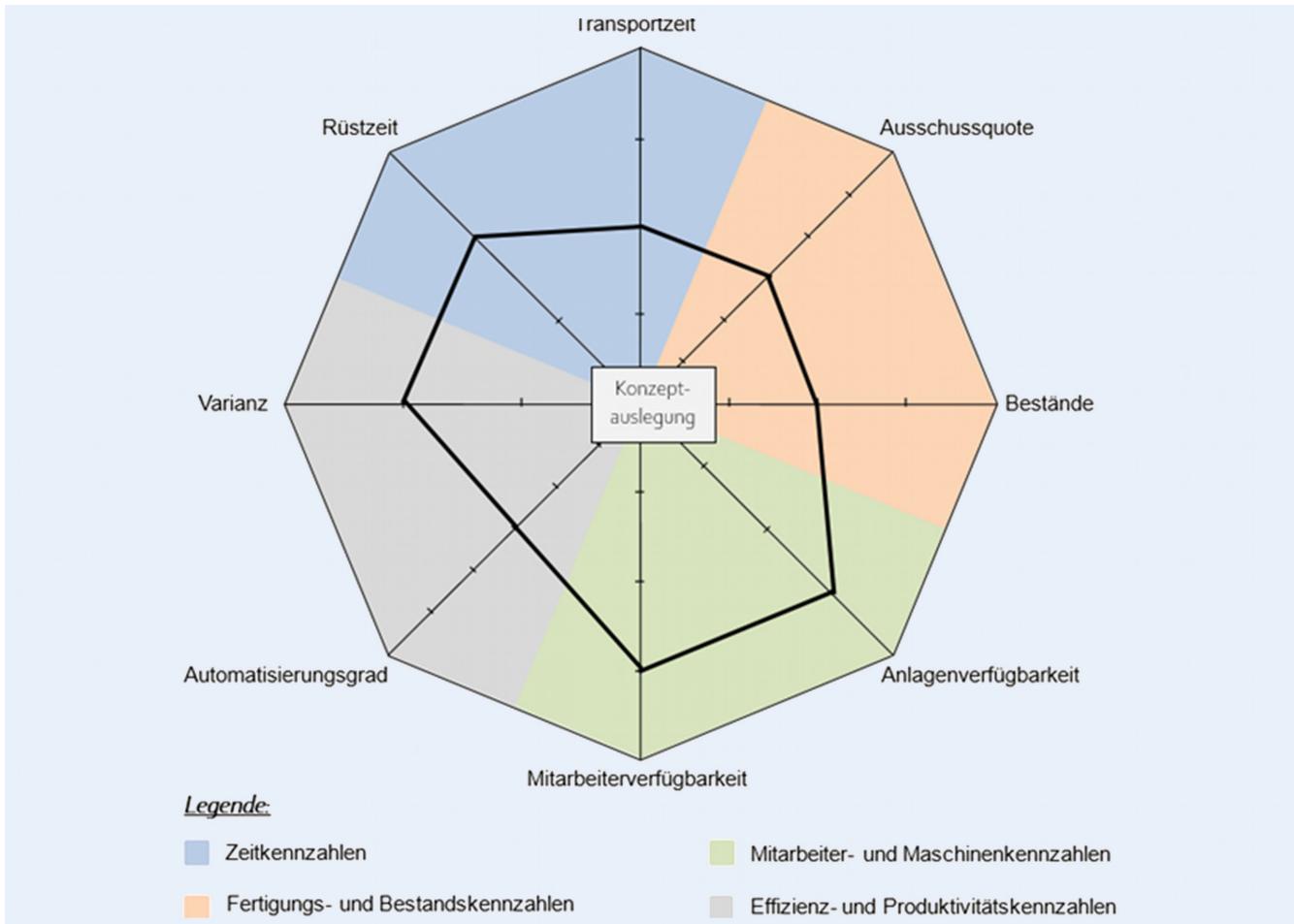


Bild 8. Spinnennetzdiagramm des ausgearbeiteten Konzepts steuerungsrelevanter Kennzahlen und einflussreicher Störgrößen einer Matrixproduktion.
Grafik: Fraunhofer IPA

zeiten, Ausschussquoten, Bestände, Anlagen- und Mitarbeiterverfügbarkeit, Automatisierungsgrad sowie Produktionsvarianz. Es werden exemplarisch generalisierte Empfehlungen formuliert: Ein halbautomatischer Werkzeugwechsel kann die Rüstzeiten reduzieren, während eine elektrische Transportinfrastruktur einen guten Kompromiss der Transportgeschwindigkeit und Kosten darstellt.

Eine Ausschussquote von höchstens drei Sigma sichert die Produktqualität. Ein Lagerbestand von ein bis zwei Tagen bietet eine gute Lösung mit ausreichend Flexibilität und Reaktionsfähigkeit, ohne übermäßige Kosten zu verursachen. Die Anlagen- und Mitarbeiterverfügbarkeit sollten 75 % bis 85 % betragen, um einen reibungslosen Produktionsablauf zu gewährleisten und im Störungsfall reaktionsfähig zu sein. Eine teilautomatisierte Produktion kombiniert menschliche Fähigkeiten mit automatisierten Prozessen und fördert somit die Effizienz. Gemeinsame Prozesse für mehrere Varianten ermöglichen ebenfalls Flexibilität und Reaktionsfähigkeit und tragen zur Effizienz des Produktionssystems bei. Diese Auslegung der Kennzahlen ist ein erster generalisierter Vorschlag, der für einzelne Matrixproduktionssysteme individuell zu bewerten und anzupassen ist.

Die Identifikation und Einordnung relevanter Kennzahlen und einflussreicher Störgrößen ist essenziell für eine erfolgreiche Steuerung von Matrixproduktionssystemen. In der weiteren Forschung gilt es, aus dem Zusammenspiel der gewünschten Ausprägungen der steuerungsrelevanten Kennzahlen und den möglichen

Störereignissen konkrete Handlungsoptionen für die Steuerung zu definieren.

DANKSAGUNG

Vielen Dank an *Patricia Berkhan*, die während ihrer Tätigkeit am Fraunhofer IPA die Betreuung der Masterarbeit von *Marvin Kunze* mit Rat und Tat unterstützt hat.

LITERATUR

- [1] Schenk, M. (Hrsg.): Produktion und Logistik mit Zukunft. Digital Engineering and Operation. Heidelberg: Springer Vieweg 2015
- [2] Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C. et al: Digitale Produktion. Heidelberg: Springer 2013
- [3] Kletti, J.; Rieger, J.: Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence in der Smart Factory. Heidelberg: Springer Vieweg 2022
- [4] Bauernhansl, T.; Fechter, M.; Dietz, T. (Hrsg.): Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion. Berlin: Springer Vieweg 2020 (Arena2036)
- [5] Nordwig, K.; Kärcher, S.; Bauernhansl, T.: Steuerungsbedarfe im operativen Betrieb von Matrixproduktionssystemen. *wt Werkstatttechnik online*, 114 (2024) 9, S. 555–561. Internet: www.werkstatttechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien

- [6] Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement der industriellen Produktion: Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Heidelberg: Springer 2011
- [7] Gottmann, J.: Produktionscontrolling: Wertströme und Kosten Optimieren. Wiesbaden: Springer Gabler 2019
- [8] Kempkes, J. A.; Suprano, F.; Wömpener, A.: Produktion 4.0 mit den richtigen Kennzahlen steuern. *Controlling & Management Review* 62 (2018) 4, S. 56–61
- [9] Hofmann, C. C.: Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021
- [10] Müller, D.: Flexibilitätsorientierte Selbststeuerung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2020
- [11] Bochmann, L. S.: Entwicklung und Bewertung eines flexiblen und dezentral gesteuerten Fertigungssystems für variantenreiche Produkte. Dissertation, ETH Zürich, 2018
- [12] Echsler Minguillon, F.: Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020
- [13] Göppert, A.; Hüttemann, G.; Jung, S. et al.: Frei verkettete Montagesysteme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018) 3, S. 151–155
- [14] Kletti, J.: MES – Manufacturing Execution System. Heidelberg: Springer-Verlag 2015
- [15] Gronau, N.; Kern, E.-M.; Jonitz, H.: Herausforderungen im Umgang mit Produktionsstörungen. *Industrie 4.0 Management* 35 (2019) 6, S. 33–36, doi.org/10.30844/I40M_19-6_S29-32
- [16] Brackel, T. van: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen. Wiesbaden: Gabler Verlag 2009
- [17] Wagner, J.; Burggräf, P.; Bäumers, Y. et al.: Störungsrelevante Montageprozesse erkennen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 110 (2015) 12, S. 787–790
- [18] Siebel, T.: Matrixproduktion vereint Wirtschaftlichkeit und Flexibilität. Stand: 2022. Internet: www.springerprofessional.de/en/produktionstechnik/industrie-4-0/matrixproduktion-vereint-wirtschaftlichkeit-und-flexibilität/23281702. Zugriff am 31.01.2025
- [19] Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech (Hrsg.): Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen. Internet: www.acatech.de/publikation/umsetzung-von-cyber-physischen-matrixproduktionssystemen/. Zugriff am 31.01.2025
- [20] Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Carl Hanser Verlag 2014
- [21] De Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: A literature review. *International Journal of Production Research* 36 (1998) 6, pp. 1587–1617
- [22] Zäh, M.F.; Moller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success?. In: Zäh, M. (Hrsg.): International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005), München: Utz Verlag 2005, pp. 3–10
- [23] Meyer, G.; Knüppel, K.; Schmidt, M. et al.: Störgrößenmanagement-Systematik. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 109 (10), S. 704–707, doi.org/10.3139/104.111215
- [24] Butollo, F.; Staritz, C.: Deglobalisierung, Rekonfiguration oder Business as Usual? COVID-19 und die Grenzen der Rückverlagerung globalisierter Produktion. *Berliner Journal für Soziologie* 32 (2022) 3, S. 393–425, doi.org/10.1007/s11609-022-00479-5
- [25] Hirsch, A.; Regel, J.: Werkzeugmaschinen und Vorrichtungen. Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. Wiesbaden: Springer Vieweg 2022
- [26] Ullrich, G.; Albrecht, T.: Die Welt des FTS. In: Ullrich, G.; Albrecht, T. (Hrsg.): Fahrerlose Transportssysteme. Wiesbaden: Springer Vieweg 2023, S. 1–32, doi.org/10.1007/978-3-658-38738-9_1

- [27] Martin, H.: Grundlagen Transportlogistik. In: Martin, H. (Hrsg.): Transport- und Lagerlogistik. Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 99–133
- [28] Kumar, V.; Verma, P.; Muthukumaar, V.: The Performances of Process Capability Indices in the Six-Sigma Competitiveness Levels. *Proceedings 8th IEOM Industrial Engineering and Operations Management*, 2018, Bandung, pp. 1945–1951
- [29] Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik. München: Carl Hanser Verlag 2018
- [30] Werner, S.; Kellner, M.; Schenk, E.: Just-in-sequence material supply – a simulation-based solution in electronics production. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 19 (2003) 1–2, pp. 107–111, doi.org/10.1016/S0736-5845(02)00067-4
- [31] Helmold, M.; Terry, B.: Operations and supply management 4.0. *Industry insights, case studies and best practices*. Cham: Springer-Verlag 2021
- [32] Sandengen, O. C.; Estensen, L. A.; Raoslash, H. et al.: High Performance Manufacturing – An Innovative Contribution towards Industry 4.0. *Proceedings of the 6th International Workshop of Advanced Manufacturing and Automation Conference*, Manchester/UK, 2016, pp. 14–20
- [33] Badura, B.; Ducki, A.; Baumgardt, J. et al.: Fehlzeiten-Report 2023. Zeitenwende – Arbeit gesund gestalten. Heidelberg: Springer-Verlag 2023
- [34] Schuler, H.: Zum Automatisierungsgrad von verfahrenstechnischen Prozessen. In: *Chemic Ingenieur Technik* 67 (1995) 5, S. 545–552, doi.org/10.1002/cite.330670503
- [35] Clauer, D.; Fottner, J.; Rauch, E. et al.: Usage of Autonomous Mobile Robots Outdoors – an Axiomatic Design Approach. *Procedia CIRP* 96 (2021), pp. 242–247, doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.081



Kristina Nordwig, M.Sc.

kristina.nordwig@ipa.fraunhofer.de

Tel. +49 711 / 970-3534

Foto: Fraunhofer IPA

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

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

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

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

Marvin Kunze, M.Sc.

Prof. Dr. rer. pol.
Wolfram Sophie

Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen
Fakultät für Wirtschaft und Recht (FWR)
Campus Geislingen Pa4
Parkstr. 4, 73312 Geislingen a. d. Steige

LIZENZ



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