

Simulative Bestimmung des Wirtschaftlichkeitspotenzials von Produktionsstrukturen

Simulative Determination of the Economic Feasibility of Production Structures

Günther Schuh, Jan-Philipp Prote, Melanie Luckert, Christiane Müller,
WZL der RWTH Aachen, Aachen (Germany), g.schuh@wzl.rwth-aachen.de,
j.prote@wzl.rwth-aachen.de, m.luckert@wzl.rwth-aachen.de,
ch.mueller@wzl.rwth-aachen.de

Abstract: In a complex and global market environment, suitable production structures enable companies to work economically and stay competitive. Despite frequent changes in the production structure, these restructuring projects are rarely successful due to e.g. the lack of application of discrete event simulation and the possibility to continuously monitor the performance of given production structures. The approach presented in this paper, addresses the development of a holistic, practical methodology for the simulative determination of the economic feasibility of production structures. Based on an algorithm for cell formation, production structures are automatically simulated and the simulation results are visualized transparently.

1 Einführung

Im globalen Wettbewerb ist Wirtschaftlichkeit weiterhin das dominierende Ziel von Unternehmen (Wiendahl 2014). Bezogen auf die Produktion setzt sich die Wirtschaftlichkeit aus den Dimensionen Logistikleistung (hohe Liefertermintreue und kurze Lieferzeiten) und Logistikkosten (Prozesskosten und Kapitalbindungskosten) zusammen (Lödding 2016). Die wichtigste logistische Leistungsgröße produzierender Unternehmen stellt dabei konstant während der letzten Jahre die Erreichung einer hohen Liefertermintreue dar (Schuh et al. 2013; Mayer et al. 2016). Produzierende Unternehmen stehen zudem vor der Herausforderung, die steigende Marktkomplexität durch personalisierte Produkte und kurze Produktlebenszyklen in ihrer Produktion abbilden zu können (Bauernhansl 2014).

Die Gestaltung der Produktionsstruktur wurde als wichtiger Stellhebel identifiziert, um sowohl die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens zu steigern als auch die geforderte Produktflexibilität zu ermöglichen (Dixit und Gupta 2013; Wildemann 1994). Laut einer Studie haben 59 % der befragten Unternehmen in den letzten fünf

Jahren mindestens einmal und 17 % 16-20 Mal ihre Produktionsstruktur verändert. Das wichtigste Ziel der Strukturänderung war dabei die Kostensenkung (70 %), gefolgt von einer Verkürzung der Durchlaufzeit (65 %) und einer Verbesserung der Termintreue (49 %) (Luckert et al. 2016). Im Kontext des vorliegenden Artikels bezeichnet der Begriff Produktionsstruktur die Organisation der Maschinen eines Standortes in Subsysteme, die entweder als Werkstattfertigung mit ungerichtetem oder als Linienfertigung mit unidirektionalem Materialfluss ausgeprägt sein können.

2 Herausforderungen

Die Herausforderung bei der Wahl der wirtschaftlichsten Produktionsstruktur liegt darin, dass einerseits aufgrund des sich ständig ändernden Produktprogramms von Unternehmen eine kontinuierliche Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der vorliegenden Produktionsstruktur und ein Vergleich mit alternativen Strukturen benötigt werden. Andererseits ist aktuell die Gestaltung von Produktionsstrukturen, deren Bewertung und Vergleich mit hohem Aufwand verbunden.

Der hohe Aufwand bei der Gestaltung von Produktionsstrukturen wird durch die hohe Anzahl möglicher Produktionsstrukturen verursacht. Die Anzahl möglicher Produktionsstrukturen, d. h. möglicher Maschinen-Subsystem-Zuordnungen, kann durch die Bell-Zahl beschrieben werden und steigt exponentiell mit der Anzahl Maschinen in der betrachteten Produktion (Harris et al. 2008). Eine Produktion mit 10 Maschinen hat bereits über 10 Millionen mögliche Produktionsstrukturen (Arnold et al. 1999). Eine vollständige Betrachtung aller Strukturen ist daher nicht möglich. Es müssen gezielt die potenziell wirtschaftlichsten erzeugt werden.

Die Bewertung und der Vergleich von Produktionsstrukturen werden entweder analytisch oder mittels einer ereignisdiskreten Simulation vorgenommen. Die analytische Bewertung ist dabei relativ aufwandsarm, weist jedoch auch eine stark begrenzte Abbildungsgenauigkeit auf (Grundig 2015). Die Simulation dagegen erlaubt die bestmögliche Annäherung an die reale Produktion (Cassandras und Lafortune 2008) und wird bereits zur Bewertung von Produktionsstrukturen genutzt (Cassandras und Lafortune 2008; Tako und Robinson 2012; Bangsow 2010). Die Anwendungsbreite in der Praxis ist dabei allerdings eingeschränkt; eine Nutzung findet insbesondere in kleinen und mittleren Unternehmen selten statt (Luckert et al. 2016). Die Ursachen der fehlenden Anwendung von Simulation liegen in den hohen Kosten einer Simulation. Diese werden insbesondere verursacht durch die fehlende Verfügbarkeit schlüsselfertiger Simulationsmodelle, fehlendes Anwendungswissen und einen hohen Zeitbedarf zur Anwendung (McLean und Leong 2001; Hollocks 2003).

3 Stand der Technik

Dem Problem der Gestaltung der potenziell wirtschaftlichsten Produktionsstrukturen, im englischen unter dem Begriff „cell formation“, widmen sich zahlreiche Forscher. Einen Überblick über bestehende, produktionsbasierte Verfahren geben u. a. Papaioannou und Wilson (2010) mit Nennung der Verfahren Clusteranalyse, mathematische Programmierung, Graphpartitionierung, heuristische und metaheuristische Algorithmen und Methoden künstlicher Intelligenz. Die mathematische Programmierung kann aufgrund der NP-Komplexität der Produktionsstrukturierung

nur bei einem unrealistisch kleinen Produktionsumfeld eingesetzt werden und ist daher für die hier vorliegende Zielsetzung nicht geeignet (Papaioannou und Wilson 2010). Ein Beispiel dafür ist in Kia et al. (2013) enthalten, welche ein mathematisches Modell entwickeln und auf ein Beispiel mit vier Produkten und fünf Maschinen anwenden. Das Problem der Heuristiken und Algorithmen liegt in der Zielfunktion, welche mit der Logistikleistung und den Logistikkosten mehrere, teilweise konfliktäre Ziele beinhaltet (Papaioannou und Wilson 2010). Viele Ansätze begrenzen daher die betrachteten Ziele und fokussieren sich z. B. auf die Minimierung der subsystemübergreifenden Materialflüsse (Imran et al. 2014).

Um die Möglichkeit des Simulationseinsatzes von Unternehmen zu erhöhen, wurden die Ansätze der (teil-)automatischen Modellgenerierung entwickelt. Dabei werden Simulationsmodelle aus externen Daten generiert, die über Schnittstellen bereitgestellt werden. Der Datenursprung kann beispielsweise in Enterprise-Resource-Planning-Systemen liegen (Straßburger et al. 2010). Eine Übersicht bestehender Ansätze zur (teil-)automatischen Modellgenerierung geben u. a. Selke (2005) und Straßburger et al. (2010). Bergmann (2013) fokussiert Standards im Datenaustausch als grundlegende Anforderung zur erfolgreichen Umsetzung der automatischen Modellgenerierung. Huang et al. (2011) stellen einen weiteren Ansatz zur datengetriebenen Modellerzeugung vor. Kádár et al. (2010) wenden die automatische Modellgenerierung für die ereignisbasierte Simulation von Produktionssteuerungskonfigurationen an und entwickeln auf dieser Basis ein Entscheidungsunterstützungssystem, welches betriebsbegleitend eingesetzt werden kann. Die Vorteile der automatischen Modellgenerierung liegen in der Reduktion des Aufwands zur Modellerstellung und der Anwendung ohne Simulationsexpertenwissen (Selke 2005).

4 Zielsetzung und Anforderungen an die Lösung

Der Forschungsbedarf des vorliegenden Beitrags ergibt sich aus dem Fehlen einer ganzheitlichen, praxistauglichen Methodik zur simulativen Bewertung des Wirtschaftlichkeitspotenzials von Produktionsstrukturen. Diese Lücke soll mit der präsentierten Methodik geschlossen werden.

Die Praxisanforderungen an diese Methodik ergeben sich aus den genannten Herausforderungen und sind daher eine aufwandsarme Anwendung der Methodik, die Anwendbarkeit für reale Anwendungsfälle und die Bereitstellung einer fundierten Entscheidungsunterstützung. Im Detail bedeutet dies für die Lösung: Verwendung von vorhandenen Daten, automatische Bildung des Simulationsmodells, Integration der potenziell wirtschaftlichsten Strukturen, Integration aller relevanten Zielgrößen, Anwendung der Methodik ohne Expertenwissen und geeignete Visualisierung der Ergebnisse.

Dass fehlende, nutzerfreundliche Software zu einer zu geringen Frequenz der Eignungsüberprüfung führt, haben bereits Jonsson und Mattson am Beispiel der Planvariablen für Materialfluss nachgewiesen (Jonsson und Mattsson 2006). Die hier vorgestellte und in eine Software überführte Methodik soll dieses Problem für die Überprüfung der Struktureignung beheben und kontinuierliche Überwachung ermöglichen.

5 Lösungsansatz

Die entwickelte Methodik zur simulativen Bewertung von Produktionsstrukturen ist ein mehrstufiges Vorgehen. Die Architektur und Elemente der Methodik sind in Abbildung 1 dargestellt.

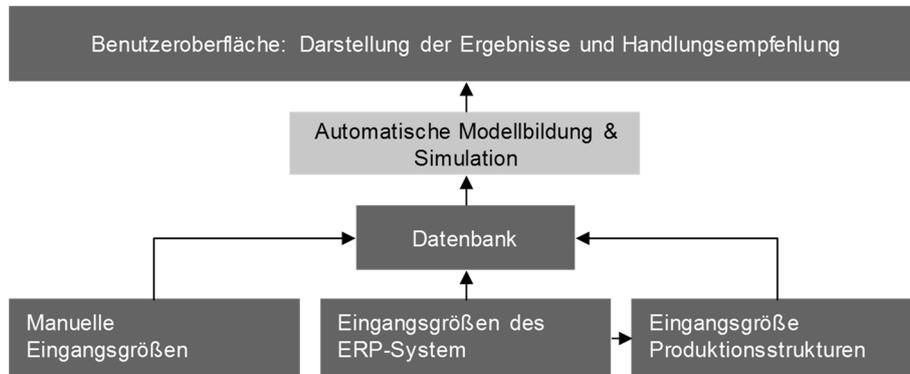


Abbildung 1: Architektur und Elemente der Methodik

Die Methodik basiert auf der Annahme, dass die Erzeugung von Produktionsstrukturen getrennt von der Bewertung zu erfolgen hat. Dadurch kann die Gestaltung von Produktionsstrukturen auf Basis einer Zielgröße erfolgen. Bei der Bewertung durch Simulation können anschließend alle relevanten Zielgrößen aufgenommen werden. In den folgenden Unterkapiteln werden die Elemente der Methodik im Detail erläutert.

5.1 Aufbau der Datenbank für die Simulationsexperimente

Die Simulation alternativer Produktionsstrukturen benötigt drei Eingabeformate: Eingangsgrößen aus dem ERP-System, manuelle Eingangsgrößen und Produktionsstrukturen, welche in eine gemeinsame Datenbank überführt werden.

5.1.1 Eingangsgrößen aus dem ERP-System

Die Eingangsgrößen aus dem ERP-System werden in drei standardisierte Tabellen überführt und beinhalten die in Tabelle 1 bis 3 dargestellten Daten.

Tabelle 1: Eingangsgröße ERP-System: Arbeitspläne (Auszug)

Material	Vorgang	Maschine	Hauptzeit	Rüstzeit
P131530	10	M1464	3:09:00.0000	30:00.0000
P131530	20	M1465	3:09:00.0000	30:00.0000
P131530	30	M5401	1:25:40.8000	45:00.0000
P131530	40	M5753	2:14:49.2000	30:00.0000

Tabelle 2: *Eingangsgröße ERP-System: Fertigungsaufträge (Auszug)*

Auftrag	Materialnr.	Losgröße	Starttermin	Bedarfstermin
A527	P131530	1	20.01.2018	02.02.2018
A783	P157460	5	11.03.2018	18.03.2018
A1202	P715862	2	26.02.2018	03.03.2018

Tabelle 3: *Eingangsgröße ERP-System: Ressourcen (Auszug)*

Maschine	Maschinen- stundensatz	Personal- bindungs- faktor	Schichten/ Tag	Stunden/ Schicht	Tage/ Woche
M1464	86,00 €/h	0,25	3	8	6
M1465	80,00 €/h	0,25	3	8	6
M5401	85,00 €/h	0,7	3	8	6

Zusammenfassend handelt es sich dabei um das geplante Produktionsprogramm mit produktspezifischen Stückzahlen, Arbeitsplänen und vorhandenen Ressourcen.

5.1.2 Manuelle Eingangsgrößen

Da nicht alle benötigten Daten in den ERP-Systemen vorhanden sind, werden als manuelle Eingangsgrößen die folgenden Daten ergänzt: Transportkosten und -zeiten innerhalb von Werkstätten, Transportkosten und -zeiten innerhalb von Linien und Transportkosten und -zeiten bei Segmentwechseln. Die manuellen Eingangsgrößen dienen damit der Modellierung der Unterschiede zwischen Werkstätten und Linien.

5.1.3 Eingangsgröße Produktionsstrukturen

Auf Basis der Eingangsgrößen aus dem ERP-System wird ein Clusteralgorithmus angewendet, welcher eine manuell vorgebbare Anzahl von Produktionsstrukturen erzeugt. Dabei wird, ausgehend von den längsten, möglichen Linien, sukzessive eine Aufspaltung der Linien und Integration der separierten Maschinen in Werkstätten vorgenommen. Die Zielfunktion des Clusteralgorithmus setzt sich aus der mittleren Segmentgröße und der Anzahl der Linien zusammen, da diese beiden Kriterien die angestrebte Verbesserung der logistischen Zielgrößen beeinflussen.

Tabelle 4: *Eingangsgröße Produktionsstrukturen (Auszug)*

Struktur-ID	M1464	M1465	M5401	...
1	30	30	1	...
2	20	20	20	...

Durch die sukzessive Aufspaltung von Linien wird sichergestellt, dass auch bei einer geringen Anzahl betrachteter Strukturen die potenziell erfolgreichsten Strukturen

enthalten sind. Eine ausführliche Beschreibung des Clusteralgorithmus ist in Reuter et al. (2016) enthalten. Das Ergebnis des Clusteralgorithmus stellt eine Matrix analog Tabelle 4 dar, in welcher jede Struktur-ID eine Produktionsstruktur darstellt. Dabei wird für jede Maschine definiert, zu welchem Subsystem sie gehört, z. B. gehören bei Strukturkonzept 2 alle gezeigten Maschinen zu Subsystem 20.

5.2 Automatische Modellbildung und Durchführung der Simulationsexperimente

Das Simulationsmodell wird automatisch durch eine Kombination aus parametrischer und strukturbasierter Modellierung in Tecnomatix Plant Simulation aufgebaut. Diese Software wird gewählt, da sie die Möglichkeit bietet, standardisierte Objektbibliotheken und Methoden individuell durch die enthaltene Programmiersprache SimTalk anzupassen und zu erweitern.

Für den Aufbau des Simulationsmodells werden die beschriebenen Eingangsgrößen importiert und in standardisierte Tabellen des Simulationsmodells überführt. Der Experimentverwalter greift auf die Inputtabelle *Produktionsstrukturen* (Tab. 4) zu und wird durch eine Methode aktiviert, die darin enthaltenen Strukturen vollständig zu simulieren. Die Simulation kann um die Untersuchung von Einflüssen der Produktionssteuerungskonfiguration erweitert werden, indem auf der Benutzeroberfläche alternative Reihenfolgeregeln gewählt und für jede Struktur simuliert werden.

Je Simulationslauf, d. h. je Struktur, werden die logistische Leistungsfähigkeit Z sowie die normierten Gesamtkosten K bestimmt, zur weiteren Verwendung exportiert und zu einem Potenzialwert P gleichgewichtet aggregiert. Die normierten Kosten bestimmen sich gemäß Gleichung 1 (mit k_O als normierte Organisationskosten, k_P als normierte Personalkosten, k_L als normierte Logistikkosten, k_M als normierte Maschinenkosten):

$$K = \frac{k_O}{4} + \frac{k_P}{4} + \frac{k_L}{4} + \frac{k_M}{4} \quad (1)$$

Die einzelnen Kostenarten werden auf das niedrigste Ergebnis der jeweiligen Kostenart normiert. Da sich die Größenordnung der einzelnen Kostenarten teilweise sehr stark unterscheidet, kann durch eine Normierung gewährleistet werden, dass jede Kostenart in gleichem Maße berücksichtigt wird.

Die logistische Leistungsfähigkeit Z bestimmt sich gemäß Gleichung 2 (mit g_n als Gewichtungsfaktor für die Zielgröße n , z_{DLZ} als normierte Durchlaufzeit, z_B als normierter Umlaufbestand, z_A als normierte Auslastung, z_{TT} als normierte Termintreue):

$$Z = g_{DLZ} \times z_{DLZ} + g_B \times z_B + g_A \times z_A + g_{TT} \times z_{TT} \quad (2)$$

Die Durchlaufzeit und der Umlaufbestand werden dabei auf den kleinsten Wert, die Termintreue und die Auslastung auf den größten Wert normiert, um das jeweils angestrebte Ziel abzubilden. Neben der Bewertung der Strukturen wird ein Indikator für den Strukturiertheitsgrad der Konzepte – der Liniengrad – ermittelt, um

anschließend eine übersichtliche Darstellung für den Benutzer zu ermöglichen. Der Liniengrad wird als das Verhältnis von in Linien durchgeführten Vorgängen zu allen Arbeitsvorgängen aufgrund der positiven Korrelation mit dem Potenzialwert definiert.

Für den Simulationsablauf gelten die folgenden Rahmenbedingungen:

- Es werden je Struktur die durch Tabelle 2 vorgegebenen Fertigungsaufträge simuliert. Dadurch sind die zu fertigenden Produkte nach Menge, Arbeitsplan und Starttermin der Produktion vorgegeben.
- Die vorhandenen Ressourcen und die Ressourcenverfügbarkeit werden nach Tabelle 3 konfiguriert. Maschinenausfälle und weitere Störungen werden nicht separat simuliert, sondern in die Maschinenverfügbarkeit integriert.
- Das System *Maschine* besteht aus drei Puffern: Nach Durchführung des Transports treffen Aufträge zuerst im Eingangspuffer vor der Maschine ein. Ab diesem Moment stehen sie zur Bearbeitung zur Verfügung und werden in eine Sortierliste eingetragen, welche entsprechend der eingestellten Reihenfolgeregel darüber entscheidet, wann ein Auftrag auf der Maschine bearbeitet wird. Handelt es sich um einen Auftrag mit mehr als einem Stück, so findet in dem nachfolgenden Maschinenpuffer die Vereinzelnung des Auftrags statt. Der Auftrag wird gemäß seiner Priorität auf der Maschine bearbeitet und anschließend in den Ausgangspuffer verlagert. Im Ausgangspuffer wird bei Bedarf der Auftrag wieder gesammelt und für die vorgegebene Transportzeit gelagert, bevor er an den Eingangspuffer der nachfolgenden Maschine übergeben wird.
- Für die Bestimmung des Personalbedarfs wird jeder Ressource ein Personalbindungsfaktor zugewiesen. Personalbindungsfaktoren innerhalb von Subsystemen werden addiert, womit eine Mehrmaschinenbedienung simuliert wird. So wird z. B. zwei Maschinen mit Personalbindungsfaktoren von 0,4 und 0,6 innerhalb eines Subsystems nur ein Mitarbeiter zugeordnet.
- Der Transport innerhalb von Linien findet in Form eines One-piece-flows, innerhalb von Werkstätten und zwischen Subsystemen auftragsweise statt. Zur Bestimmung der anzuwendenden Transportzeiten wird zu Simulationsbeginn geprüft, welche Subsysteme Linien und welche Werkstätten darstellen. Linien sind hierbei dargestellt als Subsysteme mit unidirektionalem Materialfluss und jeweils einem Ein- und Ausgang. Alle Subsysteme, die dieser Definition nicht entsprechen, stellen Werkstätten dar.

Zur Validierung des Simulationsmodells wird die aktuelle Produktionsstruktur in die Simulation integriert. Anhand des Vergleichs der realen Leistungs- und Kostenwerte mit den Simulationsergebnissen kann die Eignung und Anwendbarkeit des Simulationsmodells überprüft werden.

5.3 Ausgestaltung der Benutzeroberfläche

Die Ergebnisse der Simulation, der Potenzialwert und der Liniengrad, werden anschließend auf der Oberfläche dem Nutzer zur Verfügung gestellt. In Abbildung 2 wird das Ergebnis für die Produktion eines Unternehmens aus dem Maschinen- und Anlagenbau dargestellt, wofür 10.000 Strukturen simuliert wurden.

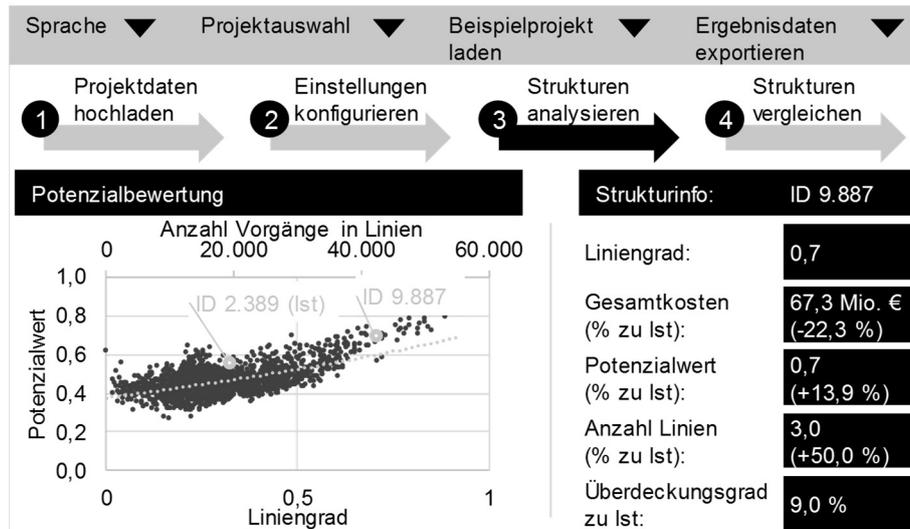


Abbildung 2: Darstellung der Simulationsergebnisse in Form einer Punkteschar

Jeder Punkt stellt dabei eine Struktur und somit ein Simulationsexperiment dar. Im Beispiel ist der Potenzialwert der vorhandenen Struktur mit der ID 2.389 gegenüber einer alternativen, besseren Struktur mit der ID 9.887 aufgetragen. Strukturen können, wie in Abbildung 3 dargestellt, zusätzlich visuell anhand ihres Aufbaus verglichen werden.

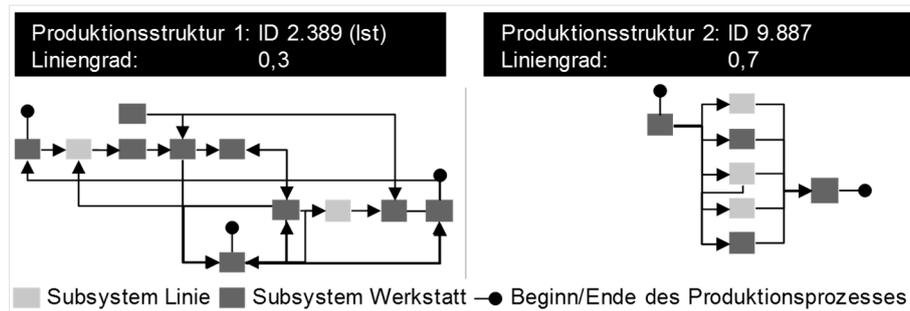


Abbildung 3: Vergleich von zwei Produktionsstrukturen

Die gezeigten Ergebnissichten der Software werden komplettiert durch Ansichten der Verläufe einzelner Kennzahlen des Potenzialwerts. Beispielsweise können die Verläufe der vier logistischen Zielgrößen oder die Verläufe aller Kostenkategorien dargestellt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag präsentierte Methodik ermöglicht eine kontinuierliche Bewertung der Wirtschaftlichkeit der vorhandenen Produktionsstruktur und die

automatische Simulation alternativer Produktionsstrukturen. Auf Basis der beschriebenen Methodik können Unternehmen ohne Expertenwissen im Bereich der ereignisdiskreten Simulation hochwertige Ergebnisse erhalten. Liegt ein hohes Wirtschaftlichkeitspotenzial durch Veränderung der Produktionsstruktur vor, so werden die Entscheider darüber transparent und schnell informiert. Durch die Integration der für Entscheider relevanten Zielgrößen werden objektive Entscheidungen ermöglicht. Die leicht verständliche Visualisierung ermöglicht eine Anwendung ohne lange Einarbeitungsphase. Die vorgestellte Methodik kann damit zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beitragen, indem sie bei der Wahl einer geeigneten Produktionsstruktur unterstützt und eine kontinuierliche Überwachung der Struktureignung ermöglicht. Die Entscheidung über den Beginn von zeit- und kostenintensiven Restrukturierungsprojekten kann damit in Abhängigkeit des vorliegenden Potenzials zielorientiert getroffen werden.

Förderhinweis

Der vorgestellte Ansatz wird vom Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen im Rahmen der Exzellenzcluster Initiative "Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer" (gefördert von der DFG) entwickelt.

Literatur

- Arnold, J.; Fischer, T.; Fröhner, A.: Ein genetischer Algorithmus zur simultanen Dimensionierung und Strukturierung von Fertigungssystemen. KI-Methoden in der simulationsbasierten Optimierung (1999), S. 31–48.
- Bangsow, S.: Manufacturing Simulation with Plant Simulation and SimTalk: Usage and Programming with Examples and Solutions. Berlin, Heidelberg: Springer 2010.
- Bauernhansl, T.: Die Vierte Industrielle Revolution - Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014, S. 5–35.
- Bergmann, S.: Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen. Ilmenau: Univ.-Verl. Ilmenau 2013.
- Cassandras, C.G.; Lafortune, S.: Introduction to discrete event systems. New York: Springer Science+Business Media 2008.
- Dixit, A.R.; Gupta, M.: Current status, enablers & barriers of implementing cellular manufacturing system in Indian industries. Advances in Manufacturing 1 (2013) 4, S. 346–356.
- Grundig, C.-G.: Fabrikplanung: Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. München: Carl Hanser 2015.
- Harris, J.M.; Hirst, J.L.; Mossinghoff, M.J.: Combinatorics and graph theory. New York: Springer 2008.
- Hollocks, B.W.: Guidelines for effective simulation in manufacturing management and control. In: Monostori, L.; Kádár, B.; Morel, G. (Hrsg.): Intelligent manufacturing systems 2003. Oxford: Pergamon for the International Federation of Automatic Control by Pergamon c/o Elsevier 2003, S. 127-132.
- Huang, Y.; Seck, M.D.; Verbraeck, A.: From Data to Simulation Models: Component-based Model Generation with a data-driven Approach. In: Jain, S.; Creasey, R. R.;

- Himmelspach, J.; White, K. P.; Fu, M. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (2011), Phoenix: IEEE, S. 3724–3734.
- Imran, M.; Iqbal, N.; Jahanzaib, M.: Minimization of intercellular movements in cellular manufacturing system using genetic algorithm. *Technical Journal, University of Engineering and Technology Taxila* 19 (2014) 2, S. 16–22.
- Jonsson, P.; Mattsson, S.: A longitudinal study of material planning applications in manufacturing companies. *International Journal of Operations & Production Management* 26 (2006) 9, S. 971–995.
- Kádár, B.; Lengyel, A.; Monostori, L.; Suginishi, Y.; Pfeiffer, A.; Nonaka, Y.: Enhanced control of complex production structures by tight coupling of the digital and the physical worlds. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 1, S. 437–440.
- Kia, R.; Shirazi, H.; Javadian, N.; Tavakkoli-Moghaddam, R.: A multi-objective model for designing a group layout of a dynamic cellular manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering International* 9 (2013) 1, S. 8.
- Lödding, H.: *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Berlin Heidelberg: Springer 2016.
- Luckert, M.; Frankenbach, F.; Reuter, C.; Brambring, F.: *Strukturierung der Produktion: Ergebnisse einer Studie des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen*. Aachen: Apprimus Wissenschaftsverlag 2016.
- Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes, P.; Nyhuis, P.: *Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen: Studienergebnisse*. Garbsen: PHZ 2016.
- McLean, C.; Leong, S.: The Role of Simulation in Strategic Manufacturing. *Proceedings of the 2001 International working Conference on Strategic Manufacturing* (2001), S. 1-12
- Papaioannou, G.; Wilson, J.M.: The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European Journal of Operational Research* 206 (2010) 3, S. 509–521.
- Reuter, C.; Prote, J.P.; Gützlaff, A.; Luckert, M.: Generation of Cellular Manufacturing Variants for the Potential Determination of Production Structures. *Advanced Materials Research* 1140 (2016), S. 489–496.
- Schuh, G.; Stich, V.; Brambring, F.; Hauptvogel, A.; Hempel, T.; Luckert, M.; Hering, N.; Kropp, S.; Maasem, C.; Meißner, J.; Reschke, J.; Schnittler, V.: *Produktion am Standort Deutschland: Ergebnisse der Untersuchung 2013*. Aachen 2013.
- Selke, C.: *Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung*. München: Utz 2005.
- Straßburger, S.; Bergmann, S.; Müller-Sommer, H.: Modellgenerierung im Kontext der Digitalen Fabrik - Stand der Technik und Herausforderungen. In: Zülch, G. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2010, S. 37-44.
- Tako, A.A.; Robinson, S.: The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context. *Decision Support Systems* 52 (2012) 4, S. 802–815.
- Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Hanser 2014.
- Wildemann, H.: *Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung*. München: TCW-Transfer-Centrum GmbH 1994.