Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68

Systemdynamische Simulation von Optimierungsmaßnahmen in einem Produktionssystem

Wirkbeziehungen: Resilienz, Ressourcen und Leistung

T. Schulz, L. Reichsthaler, D. Toth, L. Sielaff, A. Friedmann

Dieser Beitrag konzentriert sich auf den Zielkonflikt für Produktionsanlagen und stellt einen ganzheitlichen Rahmen vor, der hilft, die voneinander abhängigen Attribute von Resilienz, Ressourceneffizienz und Leistung anhand eines systemdynamischen Modells zu optimieren.

STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, Nachhaltigkeit, Simulation

Interdependencies: Resilience, resources and performance

This paper focuses on the different conflicting goals of manufacturing facilities and presents a holistic framework to help optimizing the interdependent attributes of resilience, resource efficiency, and performance, using a system dynamics model.

1 Einleitung

Bedingt durch die Notwendigkeit zur permanenten Effizienz- und Leistungssteigerung, die Dynamisierung der Kunden- und Marktbedarfe sowie die zunehmende Digitalisierung, wird das Gesamtsystem „Produktion“ stetig komplexer. Zusätzliche Anforderungen an moderne Produktionssysteme entstehen durch die veränderte Relevanz der Nachhaltigkeit und das Streben nach ressourcenschonender und klimaneutraler Produktion. Angetrieben durch die Erfahrungen der letzten Krisenjahre wird auch die Steigerung der Resilienz von Wertschöpfungssystemen zu einem zentralen Ziel der Optimierung. In der Vergangenheit fokussierten Optimierungsmaßnahmen meist nur auf eine Zieldimension, wie etwa der Kostenreduktion oder der Servicegraderhöhung. Wechselwirkungen auf andere Zieldimensionen wurden häufig vernachlässigt. Die resultierenden negativen Auswirkungen, zum Beispiel auf die Resilienzfähigkeit, blieben intransparent. Um den Geschäftserfolg von produzierenden Unternehmen langfristig sichern zu können, ist eine gesamtheitliche Betrachtung und gemeinsame Optimierung der drei Faktoren Resilienz, Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit („OR²L“) unumgänglich.

Auf Grundlage des von *Reichsthaler et al.* [1] entwickelten Bewertungsmodells zur gesamtheitlichen unternehmensindividuellen Ist- und Soll-Auswertung der drei Zielgrößen Resilienz, Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit, zeigt dieser Beitrag, wie Auswirkungen und Wechselwirkungen von Optimierungsmethoden simulativ für alle Zieldimensionen bewertet werden können. Bei der simultanen Umsetzung mehrerer Maßnahmen in Form von Maßnahmenpaketen ergeben sich komplexe Wechselwirkungen, welche für die operative und strategische Planung nicht oder nur in Teilansätzen nachvollziehbar sind. Die Umsetzung mehrerer Maßnahmen in komplexe Produktionssysteme kann a priori sinnvoll erscheinen, jedoch rückblickend zu stark abweichenden Resultaten und ungeplanten Auswirkungen führen. Um den Einfluss der Maßnahmen ganzheitlich über die Zielgrößen aller Dimensionen des Bewertungsmodells zu erfassen, sollen die Wirkzusammenhänge in einem systemdynamischen Wirkmodell dargestellt werden.

2 Modellmotivation und -hintergrund

Produktionssysteme sind komplexe Systeme, welche abhängig vom Produkt oder Produktionsschritt sehr unterschiedlich sein können. Eine unternehmerische Gewinnmaximierung über monetär wirksame Größen wie Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit oder Termintreue zu erreichen, ist eine wesentliche Herausforderung, die bereits eingehend untersucht wurde [2]. Verflochten hiermit ist die Feststellung, dass Entscheidungstragende die Relevanz jeder dieser Größen aufgrund ihrer (antizipierten) monetären Wirkung sehr unterschiedlich wahrnehmen [3]. Zusätzlich werden ergänzend zu diesen Größen immer häufiger Ansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Unternehmen in die Zielsysteme integriert.

Für jedes Produktionssystem ergibt sich so eine individuelle unternehmerische Zielgewichtung, welche bei der Konzeption von Maßnahmen zur Optimierung berücksichtigt werden muss. Angetrieben durch Veränderungen der Managementparadigmen rückt zunehmend eine ganzheitliche Betrachtung von Wettbewerbsfaktoren in den Vordergrund [4–6]. Durch den steigenden Bedarf an Flexibilität in der Produktion, steigende spezifische Kundenwünsche und Qualitätserwartungen sowie Kosten- und Leistungsdruck werden Produktionssysteme immer komplexer und somit auch anfälliger für interne und externe Störgrößen [7]. Daher nehmen auch die Bestrebungen zu, produktionslogistische Systeme widerstandsfähiger gegenüber dem Einfluss aus externen Störungen zu machen. Die Fähigkeit, Störungen im Allgemeinen zu widerstehen und sich anzupassen, um das eigene Fortbestehen zu garantieren, wird Resilienz genannt [8, 9]. Die Synthese der

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

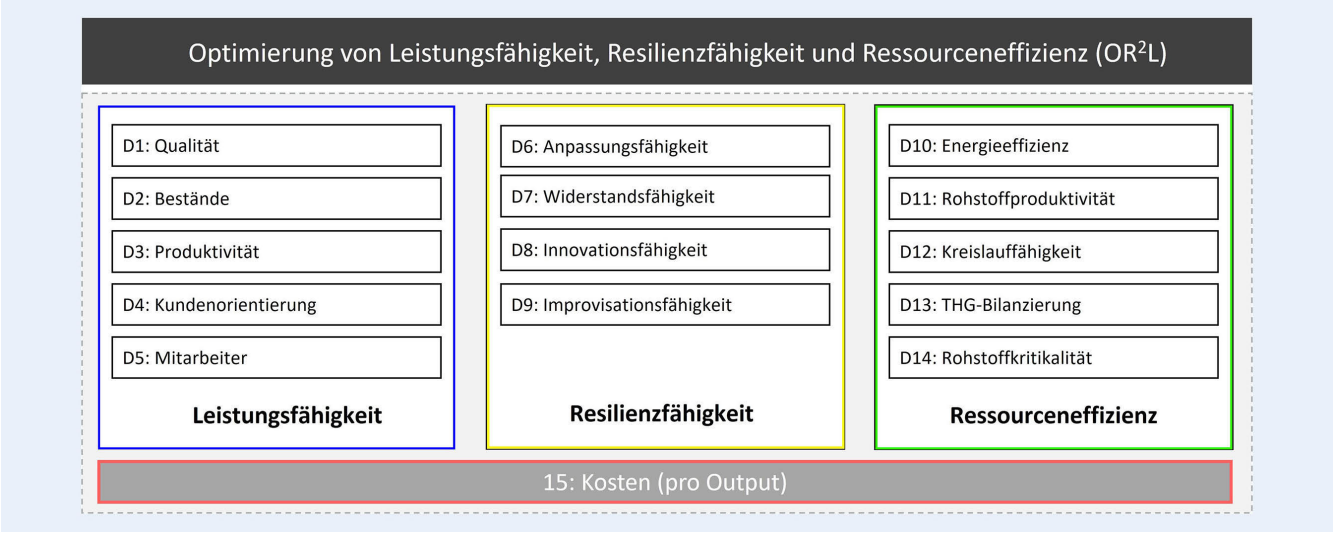

Bild 1. Dimensionen des OR²L-Frameworks. *Grafik: eigene Darstellung in Anlehnung an [1]*

vorhandenen Ansätze, um ein ganzheitliches Vorgehen zur Optimierung herauszubilden, ist Grundlage für das Vorhaben OR²L. Trotz weitgehend ausgereifter Ansätze zur Optimierung der einzelnen Faktoren fehlt ein Bild der gegenseitigen Abhängigkeiten, mit teilweise konträren Zielfunktionen, zur Ermöglichung einer ganzheitlichen Bewertung und Optimierung [1, 10].

Für die Generierung eines geeigneten Ansatzes zur ganzheitlichen Optimierung (O) und Bewertung der drei Zielfaktoren
- Resilienzfähigkeit (R),
- Ressourceneffizienz (R) und
- Leistungsfähigkeit (L)

im Rahmen von OR²L wurden existierende Bewertungsansätze, welche diese Zielfaktoren tangieren, mit dem TISM (Total Interpretive Structural Modeling)-Ansatz strukturiert, identifiziert und zusammengeführt [11–15]. Ergebnis dieser Synthese sind 15 Dimensionen für das OR²L-Framework (**Bild 1**).

Durch die Zusammenführung verschiedener Ansätze wurde so ein ganzheitliches Bild der OR²L Zielfaktoren – unter Berücksichtigung allgemeingültiger, produktionslogistischer Systemgrößen und Systemwirkungen – auf einer qualitativen Basis möglich. Die synthetisierten Bewertungsansätze, insbesondere zu Resilienz und Ressourceneffizienz, umfassen auch Systemgrößen und Wirkungen, die grundsätzlich nicht oder nur unter sehr hohen Aufwendungen quantifiziert werden können (beispielsweise Mitarbeiterflexibilität).

Die Erhebung der Ausprägung dieser Größen innerhalb des Frameworks erfolgte durch systematische Erfassung anhand eines 59 Attribute umfassenden Fragebogens zur Evaluierung des Ist-Reifelevels des untersuchten Produktionssystems. Das Ergebnis ist eine ordinal skalierte, qualitative Bewertung der Dimensionen, die eine zentrale Komponente für das simulative Modell darstellt [1]. Bei der Anwendung des OR²L-Framework wird ein Sollzustand für die 15 Dimensionen (siehe Bild 1) ermittelt, welcher als Referenz für den im Folgenden dargestellten Ansatz zur ganzheitlichen Erfassung von Maßnahmenwirkungen dient.

3 Konzeption des simulativen Wirkmodells

Um auf Basis der Framework-Daten die Auswirkung von Maßnahmen zur Systemoptimierung ganzheitlich zu erfassen, ist ein Ansatz notwendig, der auf vorhandenes, systemspezifisches Erfahrungswissen und übertragbare Expertise zurückgreifen kann. Dies muss unmittelbar für Parametervariationen möglich sein, ohne auf die Integration von systemspezifischen Entitäten (beispielsweise Arbeitssysteme in Prozessketten „System“; Auftragsdaten „Systemlast“) angewiesen zu sein [16]. Ein geeigneter Ansatz, um diese Problemstellung zu lösen, ist der kausale, systemdynamische (SD) Ansatz.

Der SD-Ansatz basiert auf der Identifikation und Abstraktion von Feedbackschleifen, die als Regelkreise innerhalb eines Systems implementiert sind, wodurch sich Systemzustände aufgrund des systeminhärenten Verhaltens (zeitabhängig in quantitativen SD-Modellen) verändern und neue Gleichgewichte einstellen [17]. Durch die Abgrenzung eines Systems und die Identifikation von relevanten Systemgrößen sowie deren Wirkungen aufeinander wird das Verständnis über das abgebildete System verbessert. Die Bildung eines herkömmlichen SD-Modells nach dem zentralen »Stock-and-Flow-Prinzip« ist aufgrund der notwendigen Verfügbarkeit numerischer Größen für diese Zielstellung jedoch eingeschränkt sinnvoll, weshalb der systemdynamische Ansatz hier auf einer qualitativeren Ebene zu verfolgen ist.

Daher wurde ein Modell unter Nutzung des Ansatzes dynamischer „Fuzzy Cognitive Maps“ (FCM) entwickelt. FCM sind simulative fuzzyfizierte Digraphen, welche zur Darstellung von kausalen Zusammenhängen dienen [18]. Sie definieren Variablen als Konzepte, die keiner Quantifizierung bedürfen und aus Erfahrungswissen von Systemexperten generiert werden können [19]. Die Verbindungen zwischen diesen Konzepten wird durch Kanten wiedergegeben, die kausale Zusammenhänge repräsentieren [19]. Das entwickelte Modell bezieht sich auf den dynamischen Ansatz, welcher unter der Faktorisierung der Kanten den Grad des Einflusses als Wirkintensität versteht [19, 20]. FCM-Modelle werden zur Verbesserung des Systemverständnisses eingesetzt, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Den Anwendungsfeldern diesen Modelltyps sind allgemein keine Limitationen gesetzt. Daher wird dieser unter anderem in der Produktplanung, in Managementsystemen oder Entscheidungsunterstützungssystemen genutzt [21–23].

Die Herangehensweise zur Bildung eines FCM-Modells für OR²L ist in **Bild 2** dargestellt und zeigt die stufenabhängigen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

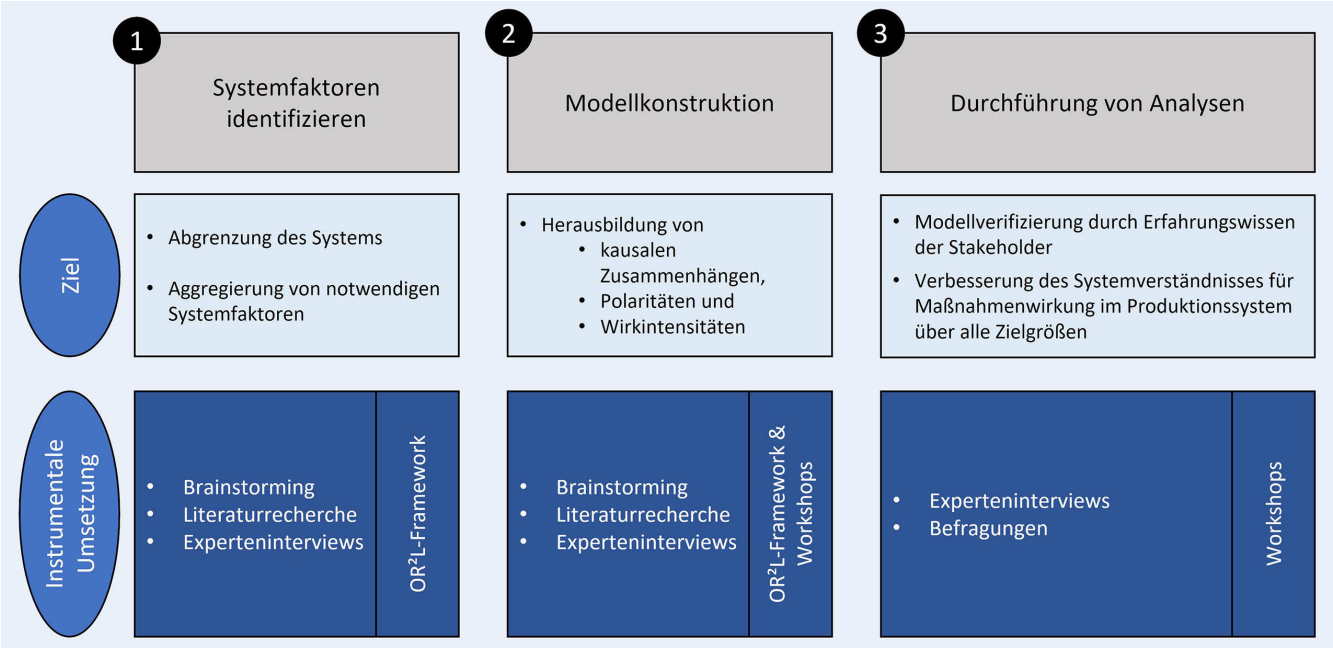

Bild 2. FCM (Fuzzy Cognitive Maps)-Entwicklungsschritte für OR²L. *Grafik: eigene Darstellung in Anlehnung an [19]*

Tabelle 1. Ausschnitt der Adjazenzmatrix der Systemgrößen.

Beeinflussende Systemgröße	Beeinflusste Systemgröße					
	Ausschussrate	Lagerbestand	Wieder-beschaffungszeit	Anlagen-verfügbarkeit	Durch-laufzeit	Material-ausbeute
Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad	-1		-2	-1		1
WorkInProgress		1			1	
Mitarbeiterflexibilität	-1		-1	-1		1

Instrumente, welche für die Entwicklung und Anwendung des Ansatzes notwendig oder hilfreich sind.

Der erste Schritt der Identifikation der Systemfaktoren wurde durch das OR²L-Framework bereits durchgeführt. Die Konstruktion des Modells erfordert die Identifikation der kausalen Zusammenhänge und ihrer Wirkrichtungen (Polaritäten) sowie Wirkintensitäten. Bei FCM-Modellen werden Wirkintensitäten angegeben und in Wirkmatrizen, sogenannte Adjazenzmatrizen, aggregiert, wie in **Tabelle 1** dargestellt.

Die Erstellung der Adjazenzmatrix basiert auf den in Bild 2 dargestellten Methoden. Die Nutzung eines Simulationstools wie „AnyLogic“ erlaubt die bewusst zeitabhängige Beeinflussung von Wirkgrößen (beispielsweise durch zeitabhängige LookUpTables), sodass temporale Entwicklungen der Systemgrößen über die Ausprägung der durch die Maßnahmen angetriebenen Größen transparent werden.

Die Generierung von kausalen Zusammenhängen und deren Wirkintensitäten erfolgte durch die Recherche grundsätzlicher Wirkzusammenhänge in produzierenden Unternehmen und Produktionssystemen, unter Abgleich mit Expertenwissen. Vor allem die Quantifizierung der Wirkintensitäten ist eine große Herausforderung für FCM-Modelle. Die Bewertung einer Wirkintensität, beispielsweise aus einem Interview heraus, kann durch die Zuordnung einer wörtlichen Beschreibung (zum Beispiel: stark, schwach) in einen numerischen Wert (zum Beispiel: 0,7; 0,3) erfolgen. Da die Erfassung einer Wirkung je nach Betrachtungsperspektive der befragten Person und des betrachteten Systems variieren kann, ist es notwendig und sinnvoll mehrere Wirkmatrizen zu aggregieren, zu gewichten und zu mitteln [24] sowie die Modifikation der Wirkintensitäten während der Modellnutzung zu ermöglichen. Beispielsweise kann der Einfluss der kapazitativen Flexibilität auf leistungsspezifische Größen, je nach Produktionssystem, sehr unterschiedlich bewertet werden [2, 25]. Aufgrund dieser Herausforderung wurde für das OR²L-FCM-Modell eine Referenz-Adjazenzmatrix entworfen. Ein Auszug dieser Matrix ist Tabelle 1 zu entnehmen.

4 Anwendungsbeispiel

Der Ansatz soll an einem Beispielsystem in einem mittelständischen Unternehmen veranschaulicht werden. Für dieses wurde aus dem Fragebogen des OR²L -Frameworks ermittelt, dass es Defizite vor allem im Bereich der Resilienz und der Leistungsfähigkeit besitzt. Aufgrund unzureichender Digitalisierung und Automatisierung der Prozesse ergibt sich ein Optimierungspotenzial, das durch verschiedene Maßnahmen potenziell erschlossen werden kann. Zu den identifizierten Maßnahmen zählen die in **Tabelle 2** zugeordneten Maßnahmen.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Tabelle 2. Maßnahmen zur Produktionssystemoptimierung (Auswahl).

Empfohlene Maßnahmen	Beeinflusste Zieldimensionen		
	Leistungssteigerung	Resilienz	Ressourceneffizienz
Schulungen & Fortbildungen	X	X	X
Job Enlargement	X		X
Leistungsbezogenes Retrofitting der Anlage	X		
Visualisierung der aktuellen Betriebszustände zur Transparenzerhöhung	X	X	
Einführung von MTM-AUS zur optimierten Arbeitsplatzgestaltung	X		
Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung	X		
Auswahl und Konzeption von Assistenzsystemen zur Komplexitätsreduktion und gezielte Informationsbereitstellung	X	X	

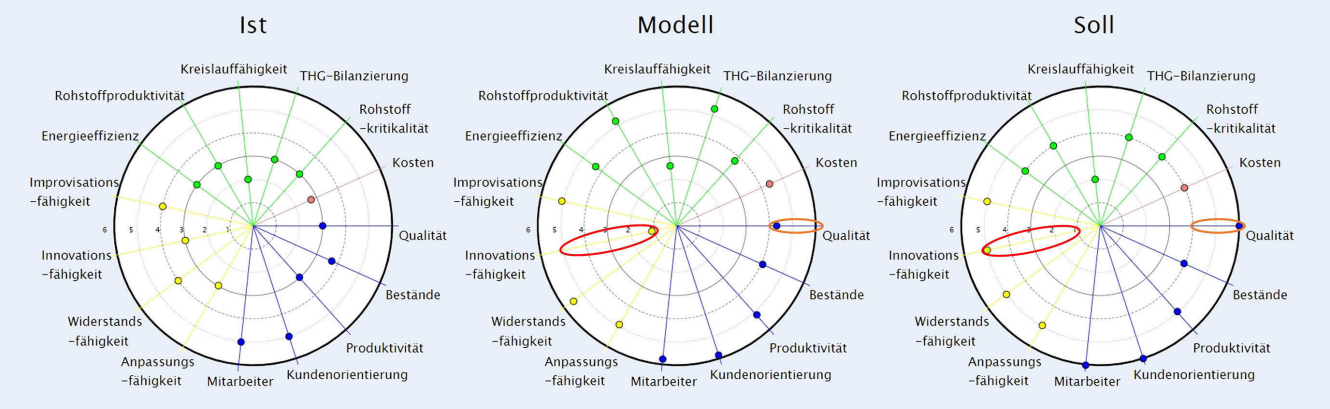

Bild 3. Modellierte Wirkung eines Maßnahmenpakets auf Reifegrade eines Beispielproduktionssystems. *Grafik: eigene Darstellung*

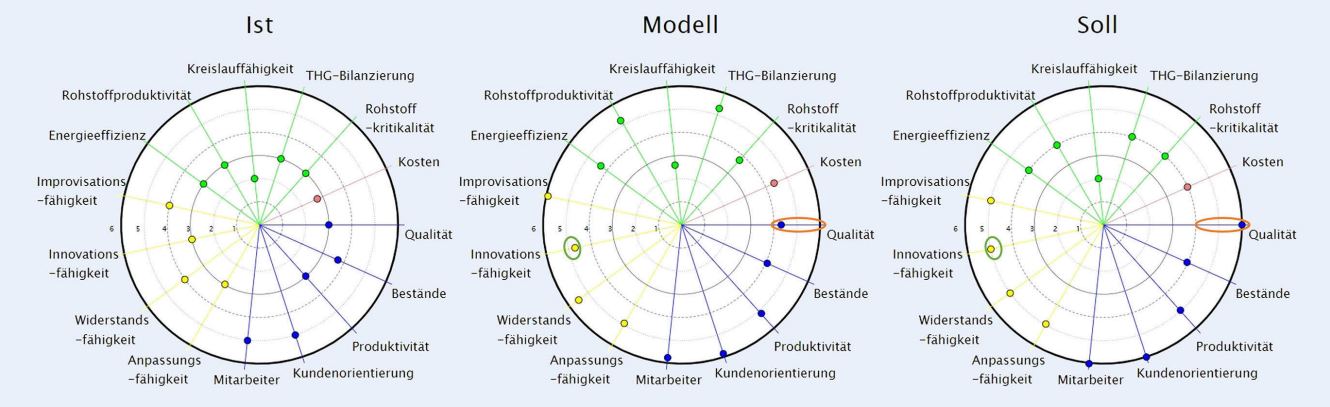

Bild 4. Modellierte Wirkung des optimierten Maßnahmenpakets auf Reifegrade eines Beispielproduktionssystems. *Grafik: eigene Darstellung*

Bild 3 stellt die Ausprägung der Reifegrade über die 15 Zieldimensionen des Produktionssystems dar, wie sie gegenwärtig (Ist) unter Anwendung des Maßnahmenpaketes zu erwarten (Modell) und angestrebt (Soll) sind.

Durch die Zuhilfenahme des OR²L-FCM-Modells konnte ermittelt werden, dass das gewählte Maßnahmenpaket in 13 der 15 Zieldimensionen eine (nahezu) vollständige Erreichung des Sollzustandes umgesetzt werden kann (Bild 3). Auch wird deutlich, dass die Erreichung der angestrebten Reifegrade in den Dimensionen »Innovationsfähigkeit« deutlich sowie »Qualität« merklich verfehlt wird. Auf Basis dieser Feststellung kann in der Maßnahmenplanung eine weitere Iteration unter Veränderung des Maßnahmenpaketes durchgeführt werden. Um die Innovationsfähigkeit als Resilienzeigenschaft zur Beherrschung von schleichenden, unbekannten Stressoren zu steigern, wurden die Maßnahmen »Creative Labs« und »Intensivierung von Messeaktivitäten« in das Maßnahmenpaket integriert.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Durch das ergänzte Maßnahmenpaket können 14 der 15 Zieldimensionen den angestrebten Zustand aus der Modelllogik (nahezu) erreichen (**Bild 4**). Einzig die Dimension »Qualität«, die beispielsweise auf Indikatoren wie der Ausschussrate des Systems beruht, konnte nicht vollständig erschlossen werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das OR²L-Framework ist ein methodischer Ansatz zur ganzheitlichen Optimierung von Resilienz, Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit. Das darin enthaltene Bewertungsmodell wurde bereits in *Reichsthaler et al.* [1] beschrieben. In diesem Beitrag wurde geschildert, wie aus den nach dem ersten Schritt vorliegenden unternehmensindividuellen Ist- und Soll-Bewertungen der drei Zielgrößen Resilienz, Ressourceneffizienz und Leistungsfähigkeit passende Maßnahmen ausgewählt werden. Problematisch ist dabei, dass Maßnahmen, die eine der Zielgrößen positiv beeinflussen, direkt oder indirekt andere Zielgrößen negativ beeinflussen können. Ein systemdynamisches Wirkmodell, mit dem diese Einflüsse a priori abgeschätzt werden können, wurde vorgestellt.

Die zur Anwendung des Wirkmodells nötige Parametrierung sowie erste, als Eingangsgrößen dienende Maßnahmen mit ihren jeweiligen Parametern wurden eingeführt. Ein fiktives Beispiel für die Anwendung des Modells zeigte, wie ein Maßnahmenpaket zusammengestellt werden kann, um eine bestmögliche Zielerreichung zu bewirken.

Als nächsten Schritt hat sich das OR²L-Konsortium aus Fraunhofer-Instituten vorgenommen, die vorliegenden Schritte des OR²L-Frameworks im Austausch mit produzierenden Unternehmen zu erproben, zu verfeinern und weiterzuentwickeln.

Literatur

[1] Reichsthaler, L.; Toth, D.; Glawar, R. et al.: Ansatz zur ganzheitlichen Optimierung des Anlagenmanagements nach den drei Zielgrößen der Ressourceneffizienz, Resilienz- und Leistungsfähigkeit. Framework zur ganzheitlichen Bewertung aus Sicht des Anlagenmanagements. 36. Internationales Forum für industrielle Instandhaltung, ÖVIA 2022, Leoben, Österreich, 2022, noch nicht veröffentlicht

[2] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Heidelberg: Springer Vieweg 2012

[3] Wiendahl, H.-P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Carl Hanser Verlag 2014

[4] Gardner, L.; Colwill, J.: A Framework for the Resilient use of Critical Materials in Sustainable Manufacturing Systems. Procedia CIRP 41 (2016), pp. 282–288

[5] Rosário Cabrita, M. d.; Duarte, S.; Carvalho, H. et al.: Integration of Lean, Agile, Resilient and Green Paradigms in a Business Model Perspective: Theoretical Foundations. IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 12, pp. 1306–1311

[6] [Sindhwani, R.; Mittal, V. K.; Singh, P. L. et al.: Modelling and analysis of barriers affecting the implementation of lean green agile manufacturing system (LGAMS). Benchmarking: An International Journal 26 (2019) 2, pp. 498–529

[7] Bauernhansl, T. (Hrsg.): Fabrikbetriebslehre 1. Management in der Produktion. Heidelberg: Springer Vieweg Verlag 2020

[8] ISO 22301: Security and resilience – Business continuity management systems — Requirements. Ausgabe 10/2019

[9] [Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (Hrsg.): BSI-Standard 100–4: Notfallmanagement. Stand: 2008. Internet: www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/ITGrundschutzstandards/BSI-Standard_1004.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am 07.02.2023

[10] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.: White Paper »RESYST« Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest. Stand: 2021. Internet: www.fraunhofer.de/s/ePaper/Whitepaper/RESYST/index.html#0. Zugriff am 07.02.2023

[11] Aslanova, I. V.; Kulichkina, A. I.: Digital Maturity: Definition and Model. Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Modern Management Trends and the Digital Economy: from Regional Development to Global Economic Growth" (MTDE 2020), Yekaterinburg, Russia, 2020, pp. 443–449

[12] Carvalho, H.; Duarte, S.; Cruz Machado, V.: Lean, agile, resilient and green: divergencies and synergies. International Journal of Lean Six Sigma 2 (2011) 2, pp. 151–179

[13] Dietrich, E.; Schulze, A.; Weber, S.: Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion. Q-DAS CAMERA Konzept. München: Carl Hanser Verlag 2007

[14] Chaple, A. P.; Narkhede, B. E.; Akarte, M. M. et al.: Modeling the lean barriers for successful lean implementation: TISM approach. International Journal of Lean Six Sigma 12 (2021) 1, pp. 98–119

[15] Choudhury, A.; Behl, A.; Sheorey, P. A. et al.: Digital supply chain to unlock new agility: a TISM approach. Benchmarking: An International Journal 28 (2021) 6, pp. 2075–2109

[16] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3633 Blatt 3. Simulation von Logistik-, Materialfluß und Produktionssystemen. Berlin: Beuth Verlag 1997

[17] Sterman, J. D.: Business dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Irwin/McGraw-Hill 2000

[18] Kosko, B.: Fuzzy cognitive maps. International Journal of Man-Machine Studies 24 (1986) 1, pp. 65–75

[19] Barbrook-Johnson, P.; Penn, A. S.: Fuzzy Cognitive Mapping. In: Barbrook-Johnson, P.; Penn, A. S. (Hrsg.): Systems Mapping: How to build and use causal models of systems. Cham: Springer International Publishing 2022, pp. 79–95

[20] Helfgott, A.; Lord, S.; Bean, N. et al.: Clarifying Fuzziness: Fuzzy Cognitive Maps, Neural Networks and System Dynamics Models in Participatory Social and Environmental Decision-aiding Processes. Processes EUFP7 TRANSMANGO Working Paper 1, 2015

[21] Jetter, A.: Produktplanung im Fuzzy Front End. Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von Fuzzy Cognitive Maps. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2005

[22] Salmeron, J. L.: Supporting Decision Makers with Fuzzy Cognitive Maps. Research-Technology Management 52 (2009) 3, pp. 53–59

[23] Papageorgiou, E. I.; Stylios, C. D.; Groumpos, P. P.: An integrated two-level hierarchical system for decision making in radiation therapy based on fuzzy cognitive maps. IEEE transactions on bio-medical engineering 50 (2003) 12, pp. 1326–1339

[24] Groumpos, P. P.: Fuzzy Cognitive Maps: Basic Theories and Their Application to Complex Systems. In: Glykas, M. (Hrsg.): Fuzzy Cognitive Maps: Advances in Theory, Methodologies, Tools and Applications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2010, pp. 1–22

[25] Jeske, T.; Garrel, J. von; Starke, J.: Erfolgsfaktor Flexibilität. Ergebnisse einer deutschlandweiten Unternehmensbefragung. Industrial Engineering 64 (2011) 1, S. 20–23

Tim Schulz, M. Sc.
Foto: Autor

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb
und -automatisierung IFF
Sandtorstr. 22, 39106 Magdeburg
Tel. +49 67 / 58158
tim.schulz@ovgu.de
www.iff.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. **Luisa Reichsthaler**

Dipl.-Ing. **Daniel Toth**

Fraunhofer Austria Research GmbH
Theresianumgasse 7, 1040 Wien
Tel. +43 1 / 504-6906
luisa.reichsthaler@fraunhofer.at
www.fraunhofer.at

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Lennard Sielaff, M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1326
lennard.sielaff@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. **Andreas Friedmann**
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt
Tel. +49 6151 / 705-492
andreas.friedmann@lbf.fraunhofer.de
www.lbf.fraunhofer.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-03-68 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY