

Classification of Robustness and Resilience in Changeability

Einordnung der Robustheit und Resilienz in die Veränderungsfähigkeit

Lennart Hingst¹, Lena Wecken¹, Eric Brunotte¹, Peter Nyhuis¹

¹Leibniz University Hannover, Institute of Production Systems and Logistics (IFA), Germany

Abstract

Turbulences in the factory environment have represented permanent structural transformation since the nineteen nineties through continuous changes that are intensified by megatrends such as digitalization. As the ability to forecast developments is practically non-existent, factory planning is based on assumptions and is associated with planning risks, in contrast to decisions made under certainty. In order to compete successfully on the market in this uncertain environment, companies need changeable factories. Due to the increasing organization of factories in production networks and a growing complexity of production processes, uncertainty in factory operation is increasingly associated with risks. The number of disturbing events has increased, which can lead to a business disruption. Therefore, the concepts of robustness and resilience have increasingly entered the production context. Currently, it remains unclear how exactly factory planning can take formative measures to give factory operation the necessary scope for action. Therefore, the goal of this article is to classify robustness and resilience in the context of changeability, whose concepts have been sufficient so far to adapt factories as an elementary structural element of a production network to handle turbulent influences.

Zusammenfassung

Turbulenzen im Fabrikumfeld stehen seit den Neunzigerjahren für einen permanenten Strukturwandel durch kontinuierliche Veränderungen, die Megatrends wie die Digitalisierung verstärken. Da die Prognosefähigkeit von Entwicklungen praktisch nicht mehr gegeben ist, basiert die Fabrikplanung auf Annahmen und geht im Gegensatz zu Entscheidungen unter Sicherheit mit Planungsrisiken einher. Um in diesem unsicheren Umfeld erfolgreich am Markt zu bestehen, benötigen Unternehmen veränderungsfähige Fabriken. Aufgrund der zunehmenden Organisation von Fabriken in Produktionsnetzwerken und einer steigenden Komplexität von Produktionsprozessen ist die Unsicherheit im Fabrikbetrieb zunehmend mit Risiken verbunden. Die Anzahl an störenden Ereignissen hat zugenommen, die zu einer Betriebsunterbrechung führen können. Deshalb haben vermehrt die Begriffe Robustheit und Resilienz Einzug in den Produktionskontext gehalten. Aktuell bleibt es unklar, wie genau die Fabrikplanung gestalterisch tätig werden kann, um dem Fabrikbetrieb den notwendigen Handlungsspielraum zu übertragen. Das Ziel dieses Artikels ist es deshalb, die Robustheit und Resilienz in den Kontext der Veränderungsfähigkeit einzuordnen, deren Konzepte bisher ausreichten, um Fabriken als elementares Strukturelement eines Produktionsnetzwerkes auf den Umgang mit turbulenten Einflüssen einzustellen.

Keywords

Factory planning; changeability; change drivers; resilience; robustness; risks

This Paper has been reviewed by the Certified Reviewer Community of publish-Ing. – 1 review – single blind

1. Einführung

Seit jeher wird die menschliche, gesellschaftliche und industrielle Entwicklung durch Veränderungen und Wandel maßgeblich beeinflusst [1]. Das Umfeld von Produktionssystemen gilt seit Beginn der globalen Informationsvernetzung als turbulente Zone, in der die Unvorhersehbarkeit von wirtschaftlichen, technischen und politischen Ereignissen eine Phase des plötzlichen Wandels und hoher Veränderungsgeschwindigkeit kennzeichnet [2]. Megatrends wie die Digitalisierung, Urbanisierung und Mass-Customization verstärken die kontinuierlich zu beherrschenden Veränderungen. Eine verlässliche Aussage über die konkrete Ausprägung der Zukunft ist nicht möglich [3]. Damit Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit trotzdem langfristig sichern können, benötigen sie veränderungsfähige Fabriken, die zielgerichtet an die sich verändernden Rahmenbedingungen angepasst werden. Aus fabrikplanerischer Sicht können verschiedene Arten der Veränderungsfähigkeit unterschieden werden, wobei Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von besonderer Bedeutung sind [4]. Jüngste Krisensituationen wie die Corona-Pandemie oder der anhaltende Halbleiter-Engpass zeigen, dass das turbulente Umfeld zusätzlich durch unvorhersehbare Schocks geprägt ist. Singuläre Ereignisse wie die Suezkanal-Blockade im März 2021 beeinflussen den operativen Betrieb zunehmend durch ihre impulsartige, störende Wirkung [5]. Vor Allem in der Vergangenheit betriebene Effizienzsteigerungen sowie die zunehmende Komplexität von Produktionsprozessen und der zugehörigen Organisation führen gleichzeitig zu einer erhöhten Störanfälligkeit [6,7]. Auch deshalb stufen 50 % aller Unternehmen in einer diesjährigen Befragung eine Betriebsunterbrechung als das schwerwiegendste Geschäftsrisiko ein [8]. Dies zeigt die Anfälligkeit von Unternehmen und ihren globalen Produktionsnetzwerken, in denen Unternehmen aller Größenordnungen heutzutage agieren [9]. Die Betriebsunterbrechungen prägen sich in der jeweiligen Fabrik des Unternehmens aus, deren Leistungsfähigkeit und Kostenstruktur maßgeblich im Rahmen der Fabrikplanung festgelegt werden [10]. Hier werden die Voraussetzungen für einen reibungslosen Fabrikbetrieb geschaffen. Die Veränderungsfähigkeit nach ihrem aktuellen Verständnis reicht für den Umgang mit den Risiken nicht aus [11], um die Kurzfristigkeit und Unvorhersehbarkeit der Risiken beherrschen und weiterhin erfolgreich am Markt bestehen zu können. Deshalb werden die Konzepte Robustheit und Resilienz im Kontext der Fabrikplanung zunehmend als mögliche Ergänzung der Veränderungsfähigkeit diskutiert, um dem Fabrikbetrieb adäquate Gegenmaßnahmen zur Verfügung zu stellen und somit seinen Wirkungsgrad im Umgang mit den Risiken zu erhöhen [8,11,7,9,5]. In diesem Artikel werden deshalb bestehende Ansätze der Veränderungsfähigkeit sowie der Robustheit und Resilienz untersucht, um eine Einordnung der Konzepte in die bisherige Veränderungsfähigkeit vorzunehmen und so die Grundlage für die ganzheitliche Betrachtung der turbulenten Einflüsse in der Fabrikplanung zu schaffen.

2. Anforderungen an die Fabrikplanung

Die VDI Richtlinie 5200 definiert die Fabrik als einen „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ [12]. Als Produktionsfaktoren werden dabei die benötigten Betriebsmittel, Materialien, Energie, Informationen und Personal zusammengefasst, welche zur Versorgung der Produktion bedarfsgerecht bereitzustellen sind [13]. Fabriken werden aufgrund des komplexen Zusammenspiels der Produktionsfaktoren als sozio-technische Systeme bezeichnet, weshalb eine Analyse der Fabrik als ein alleinstehendes Untersuchungsobjekt nicht zweckmäßig ist [14]. Vielmehr erfolgt eine Unterteilung des Gesamtsystems Fabrik in einzelne Fabrikobjekte anhand der Gestaltungsfelder Technik, Raum und Organisation. Als Metaziel einer Fabrik gilt die Wirtschaftlichkeit, die mithilfe von Zielfeldern der Fabrikplanung realisiert werden soll [15,13]. Es ist Aufgabe der Fabrikplanung, die für den jeweiligen Planungsfall übergeordneten Fabrikziele durch die Gestaltung der Fabrikobjekte bestmöglich zu erreichen [16,13]. Das Zusammenspiel der Fabrikobjekte innerhalb der Fabrik wird entscheidend durch das Produktions- und Logistikkonzept beeinflusst, ebenso wie die konzeptionelle Zusammenarbeit mit Lieferanten und Kunden im Produktionsnetzwerk [15]. Deshalb muss die

Fabrikplanung umfassender verstanden werden, zumal eine zunehmende organisatorische Verflechtung von Fabriken in mehrstufigen, internationalen Produktionsnetzwerken zu erkennen ist [9]. Fabriken und Produktionsnetzwerke werden deshalb im Folgenden als Produktionssysteme zusammengefasst. Die Fabrikplanung stellt die Fabrik auf die zu erwartenden Rahmenbedingungen während des Fabrikbetriebs ein, welcher die Aufgaben Betreiben, Lenken, Steuern, Instandhalten sowie weitere Serviceleistungen umfasst [17]. Neben kontinuierlichen Veränderungen sind die Turbulenzen im Fabrikbetrieb zunehmend durch Störungen charakterisiert, sodass die Fabrikplanung auf eine gewisse Instabilität und Unkontrollierbarkeit im Fabrikbetrieb vorbereiten muss, weshalb das Risiko- und Störungsmanagement im Planungsprozess an Bedeutung gewinnen. Fabrikplanende müssen aufgrund der breiten Streuung der turbulenten Einflüsse von kurzfristig eintretenden Risiken bis langfristig wirkenden Veränderungstreibern bei deren Bewertung und der Auswahl zielgerichteter Maßnahmen unterstützt werden, um eine richtungssichere Positionierung des jeweiligen Produktionssystems im Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Turbulenzbeherrschung zu ermöglichen.

3. Stand der Forschung

3.1 Veränderungstreiber und Regelkreis der Veränderungsfähigkeit

Veränderungstreiber sind Einflüsse, welche mittel- bis langfristig auf das Produktionssystem wirken und eine Veränderung als „vereinbarte Festlegung eines neuen anstelle des bisherigen Zustandes“ durch neue Anforderungen erwirken [18,19]. Grundsätzlich wird zwischen externen Veränderungstreibern, wie etwa der fortschreitenden Produktindividualisierung, und internen Veränderungstreibern, wie bspw. einer Strategieänderung, unterschieden [13]. Beide Arten von Veränderungstreibern sind das Ergebnis von Megatrends, sodass Beobachtungen und Vorhersagen langfristiger Entwicklungen möglich und präventive Maßnahmen somit planbar sind [18]. Veränderungsfähigkeit ist demnach die Eigenschaft eines Systems, sich an die neuen Anforderungen anpassen zu können [13]. Seit den 1990er-Jahren werden in diesem Kontext die beiden Konzepte Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit diskutiert [20]. Flexibilität ist das Vermögen eines Produktionssystems, sich in kurzer Zeit auf Veränderungen von Produktionsfaktoren innerhalb eines festgelegten Funktionsbereichs, auch Flexibilitätskorridor genannt, einzustellen [21]. Als Ergebnis des vielseitigen Begriffsverständnisses von Flexibilität als ursprüngliche Art der Veränderungsfähigkeit ist die Unterscheidung zwischen einer statischen und dynamischen Flexibilität hervorgegangen [22]. Die dynamische Flexibilität wurde sukzessive weiterentwickelt und schließlich unter dem Begriff der Wandlungsfähigkeit zusammengefasst. Im Gegensatz zur Flexibilität werden bei der Wandlungsfähigkeit mehrdimensionale Veränderungen über den ursprünglichen Flexibilitätskorridor hinaus durch neue Strukturen vollzogen [21]. Wandlungsfähigkeit als eine weitere Art der Veränderungsfähigkeit sieht demnach einen Lösungsraum vor, um das Produktionssystem organisatorisch, technisch, räumlich und logistisch durch Wandlungsbefähiger an die neuen Anforderungen der Veränderungstreiber anzupassen [13], weshalb die Rekonfigurierbarkeit als technische Veränderungsfähigkeit durch die Wandlungsfähigkeit subsummiert wurde [13]. Bei den Wandlungsbefähigern handelt es sich um Eigenschaften für Fabrikobjekte, um ein System wandlungsfähig gestalten zu können. Hierbei wird den Eigenschaften Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität seit Jahrzehnten eine beständige Relevanz zugesprochen [1,13]. Die je nach Anwendungsfall geeignetste Art der Veränderungsfähigkeit für den Umgang mit Veränderungstreibern kann mittels des Regelkreises der Veränderungsfähigkeit bestimmt werden (siehe Abbildung 1) [18]. Den Ausgangspunkt stellt der Ist-Wert einer betrachteten Kennzahl eines Produktionssystems dar. Aufgrund der Beeinflussung durch Veränderungstreiber bedarf es einer Veränderung hin zu einem Soll-Wert. Sollte für die angestrebte Veränderung der Flexibilitätskorridor nicht ausreichen, kann das Wandlungspotenzial aktiviert werden [13]. Ist die Wandlungsfähigkeit als Veränderungsfähigkeit ebenfalls nicht ausreichend bzw. aus zeit- oder kostentechnischen Gründen nicht

abrufbar, muss die Fabrikplanung geeignete Maßnahmen für das Produktionssystem definieren, um es bestmöglich auf die internen und externen Einflüsse vorzubereiten [18].

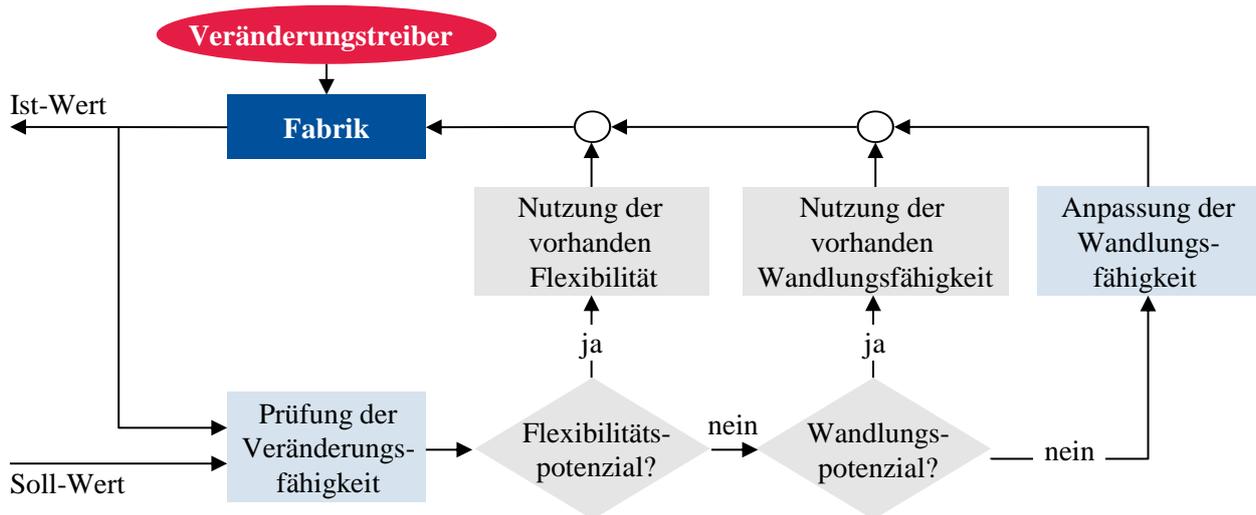


Abbildung 1: Regelkreis der Veränderungsfähigkeit [18]

3.2 Risiken und Risikomanagement

Ein Risiko ist die Beschreibung von Unsicherheit als „Mangel an Wissen oder Informationen, der das Eintreten eines zukünftigen Umweltzustandes oder Ereignisses nicht mit Sicherheit vorhersehbar macht“ [23]. Umweltzustände bestimmen das Ergebnis einer Entscheidung mit, können jedoch von der Entscheidung fallenden Person nicht beeinflusst werden [24]. Im Gegensatz zu Entscheidungen unter Sicherheit auf Basis vollständiger Informationen gehen zukunftsbezogene Planungsaktivitäten wie die Fabrikplanung grundsätzlich mit Unsicherheiten als Planungsrisiken einher [25]. Treten Risiken als unvorhersehbare Ereignisse anschließend im zukünftigen Fabrikbetrieb auf, handelt es sich um Betriebsrisiken, die zu einer Zielverfehlung führen [26,27]. Die unterschiedlichen Umweltzustände oder Ausprägungen von Ereignissen werden als Risiken bezeichnet, sofern Entscheidung fallende Personen subjektive oder objektive Eintrittswahrscheinlichkeiten abschätzen können [28]. Die Aufgabe des Risikomanagements ist es, basierend auf dieser Abschätzung alle möglichen kurzfristig eintretenden Risiken eines Unternehmens zu steuern, um letztendlich die Unternehmensziele positiv zu beeinflussen [27]. Hierbei handelt es sich um einen ursachenbezogenen Ansatz, der den Ursprung des Risikos und damit die Unvollkommenheit von Informationen im Zusammenhang mit Unternehmensentscheidungen fokussiert [29]. Risiken sollen systematisch identifiziert, analysiert, bewertet, gesteuert und überwacht werden (siehe Abbildung 2). Die Risikosteuerung sieht entweder eine aktive Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit oder Auswirkungen und andernfalls eine passive Kompensation der Auswirkungen im Risikofall vor [30]. Im Zuge einer Priorisierung werden insbesondere Risiken betrachtet, für die weitreichenden Auswirkungen abgeschätzt wurden, entweder als schockartiges oder impulsartig wirkendes Ereignis, dessen Wirkung sich über die Prozesskette verstärkt [31]. Deren Eintritt kann eine Störung verursachen, die zu einer Unterbrechung des Betriebsablaufs und einer Zielverfehlung führen kann, weshalb sich das Resilienz- bzw. Störungsmanagement als wirkungsbezogener Ansatz mit den Folgen eines Risikos befasst [29]. Hierbei werden Prozesse analysiert, die von einer Störung betroffen sein können [32]. In der Literatur wird zwischen einem proaktiven und reaktiven Störungsmanagement unterschieden [33]. Die Robustheit eines Systems steht für eine proaktive Strategie, da Störungen nachhaltig vermieden oder im Fall einer eintretenden Störung die Funktion des Systems weiter gewährleistet werden kann. Demgegenüber wird Resilienz als reaktive Wiederherstellungskapazität bezeichnet, welche nach Eintritt einer Störung für das schnellstmögliche Erreichen des Ausgangszustands oder eines neuen Gleichgewichtszustands sorgt [34,35].

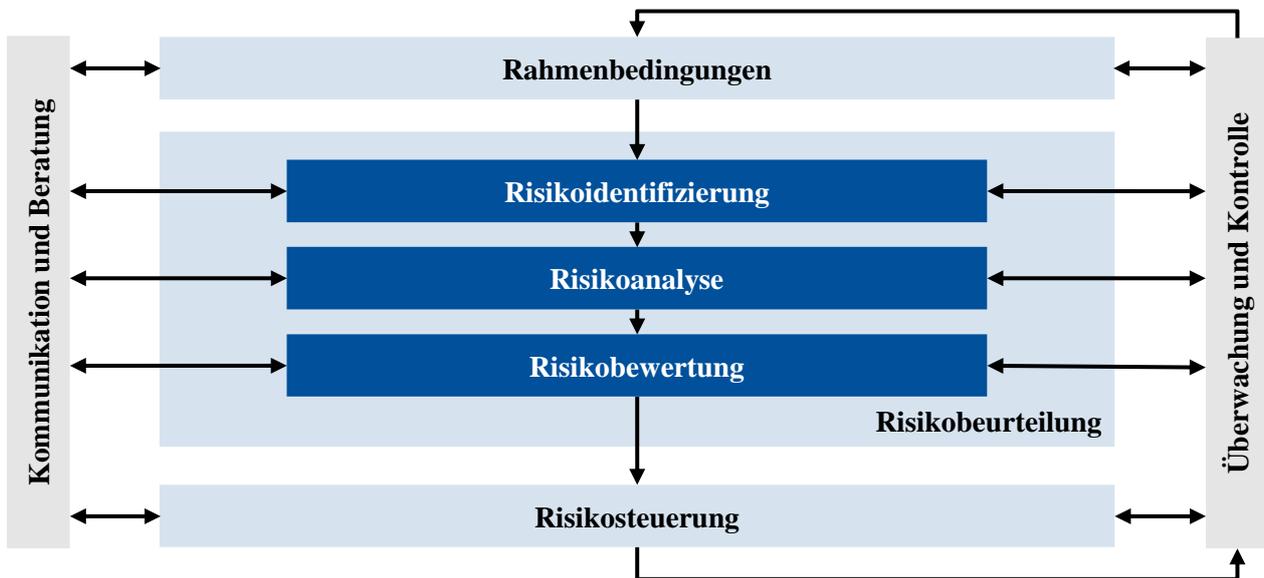


Abbildung 2: Risikomanagement nach ISO Norm 31000 [30]

3.3 Umgang mit Veränderungstreibern und Risiken in Produktionssystemen

Sowohl kurzfristig wirkende Risiken als auch mittel- bis langfristige Veränderungstreiber zählen zu den turbulenten Einflüssen, die auf ein Produktionssystem wirken [11]. Die Fabrikplanung muss sich somit der Herausforderung stellen, Produktionssysteme bestmöglich auf den Umgang mit diesen Einflüssen vorzubereiten. Wenn eine anwendungsfallspezifisch bestmögliche Positionierung im Spannungsfeld zwischen Turbulenzbeherrschung und wirtschaftlichem Fabrikbetrieb nicht gelingt, ist kurzfristig die Produktionsleistung und mittel- bis langfristig der Fortbestand der Wettbewerbsfähigkeit bedroht [36]. Deshalb sollen nachfolgend bestehende Ansätze vorgestellt werden, die sich mit der Bewertung turbulenter Einflüsse und der entsprechenden Ausgestaltung von Produktionssystemen entweder auf der Fabrik- oder Netzwerkebene beschäftigen.

3.3.1 Fabrikebene

Diverse Ansätze in der Literatur befassen sich mit der Quantifizierung von Unsicherheiten in der Fabrikplanung, um bereits in einer frühen Projektphase belastbare Entscheidungen treffen zu können. Ein möglicher Ansatz besteht hierbei in der Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation, die eine gewisse Unschärfe in den Planungsparametern (z.B. Behälterfüllmenge, Anlagenkapazität) abbildet und daraus resultierende Planungskosten abschätzt [38,37]. Durch die monetäre Bewertung der Stückzahl- und Variantenflexibilität parallel zur Produktentwicklung kann das Risiko für die Budgeteinhaltung in der Fabrikplanung betrachtet werden [39]. Sofern Unsicherheiten in der Fabrikplanung als möglicher Wandel einer Fabrik nach Abschluss der Planungen interpretiert werden, wird der Wandlungsprozess und damit einhergehende Umbaukosten adressiert. Der dafür notwendige Grad an Wandlungsfähigkeit kann bereits in der Fabrikplanung, bspw. durch die Anwendung des Szenario-Managements, bestimmt und mittels der unter Anwendung der Systemtheorie entwickelten Wandlungsbefähiger umgesetzt werden [1]. Hierauf aufbauende Ansätze konzentrieren sich auf die alternative Bestimmung der Soll- bzw. Ist-Wandlungsfähigkeit zur Ableitung des Wandlungsbedarfs und die monetäre Bewertung bspw. über den Kapitalwert [15,40] oder die Realoptionstheorie [41]. Eine Weiterentwicklung stellt die Modellierung von Unsicherheiten in einer Monte-Carlo-Simulation und die Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen unscharfen Planungsparametern in der Analyse des Kapitalwerts dar [42]. Weitere Ansätze im Bereich der Wandlungsfähigkeit behandeln lediglich einzelne Wandlungsbefähiger, bspw. die Skalierbarkeit oder die Modularität, zur Ableitung von fabrikplanerischen Maßnahmen und analytischen Bewertung der

Kosten [45,44,43]. Mit dem weiterentwickelten Regelkreis der Wandlungsfähigkeit sowie dem Veränderungstreiberkatalog liegt für die mittel- bis langfristigen Einflüsse ein ähnliches Rahmenwerk wie für die kurzfristig wirkenden Risiken vor [18]. Risikomanagement-Ansätze zur Beurteilung des Fabrikbetriebs systematisieren z. B. leistungswirtschaftliche Risiken und stellen Methoden zur Unterstützung des Risikomanagementprozesses vor [46]. Die FMEA-Methode zur Risikobeurteilung wurde in diversen Ansätzen aufgegriffen, z. B. für die Bewertung von Fehlerrisiken in der Produktion [47,48]. Allerdings überwiegen die Ansätze zur wirkungsbezogenen Analyse von Risiken während des Fabrikbetriebs. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Betrachtung der Robustheit zur Handhabung von Störungen, bspw. in Form von Kennzahlen-Toleranzbereichen in einem mathematischen Modell [49] oder als Quotienten ausgewählter Leistungskennzahlen in einem exemplarischen ereignisdiskreten Simulationsmodell [50]. Notwendige Maßnahmen können in einem Optimierungsansatz zur Bestimmung des Robustheitsmaßes anhand eines umfangreichen Kennzahlennetzes abgeleitet werden [51]. Demgegenüber kann das Systemverständnis durch eine systemdynamische Modellierung der Wirkbeziehungen von Störgrößen verbessert werden [7]. Neben der Robustheit liegt ein Ansatz zur Bewertung der leistungsorientierten Resilienz und ihrer Gesamtkosten simulierter Produktionsstrukturen im Kontext von Stückzahlschwankungen oder Störungen vor [35].

3.3.2 Netzwerkebene

Bei der Planung von Produktionssystemen auf der Netzwerkebene wird das Risikomanagement überwiegend beim Aufbau und zur Verwaltung von Logistikketten im Supply Chain Management angewendet. Es existieren zahlreiche Ansätze des Supply Chain Risk Managements, die unterschiedliche Planungsphasen adressieren. Umfangreichen bestehenden Literaturübersichten kann entnommen werden, dass in der jüngsten Vergangenheit ein Trend hin zu quantitativen Ansätzen zu beobachten ist [52–54], wovon ausgewählte Ansätze unterschiedlicher Modellierungstechniken nachfolgend vorgestellt werden. In einzelnen mathematischen Modellen werden bspw. die Auswirkungen unterschiedlicher Flexibilitätsgrade für die drei Risikokategorien Beschaffung, Prozess und Nachfrage untersucht, um Flexibilitätsstrategien zur Verringerung des Ausmaßes von Risiken festzulegen [55]. Mittels Monte-Carlo-Simulation können z. B. die Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Risiken in einer multimodalen Logistikkette basierend auf einer empirischen Studie modelliert und das Gesamtrisiko für eine Verspätung simuliert werden [56]. Wechselwirkungen von Risiken und Kennzahlen können in einem System Dynamics-Modell abgebildet werden, um z. B. als Bestandteil eines ganzheitlichen Vorgehensmodells anhand von Leistungskennzahlen Vorhersagen über die Risikoausbreitung in einem Lieferantennetzwerk zu treffen und mögliche Strategien zur Risikominderung abzuleiten und zu bewerten [57]. Ein Ansatz zur Integration von Simulationsstudien in den Risikomanagement-Prozess zeigt in einem beispielhaften ereignisdiskreten Simulationsmodell auf, dass bisherige Ansätze nur unzureichend auf das zeitliche Systemverhalten nach einer Störung eingehen [58]. Da für das Resilienz- und Störungsmanagement ebenfalls zahlreiche Ansätze existieren, wird der Schwerpunkt im weiteren Verlauf auf simulationsbasierte Ansätze gelegt. Es ist jedoch darauf zu verweisen, dass viele weitere Ansätze in der Literatur existieren und an anderer Stelle bereits ausführlich diskutiert wurden [59,33,60,61]. Die ausgewählten Ansätze konzentrieren sich jeweils auf einzelne Störungsarten, leiten geeignete Maßnahmen ab und untersuchen das Systemverhalten anhand von Leistungskennzahlen im Rahmen von beispielhaften Anwendungsfällen [62–66]. Im Gegensatz dazu basiert das entwickelte Metamodell eines Produktionsnetzwerks mit der einzelnen Fabrik als Netzwerkelement auf einem Störungskatalog aus Produktions- und Logistiksicht. Durch die ereignisdiskrete Simulation werden Auswirkungen identifizierter Maßnahmen bewertet, um vorteilhafte Konfigurationen und deren Robustheitsgrad zu bestimmen [67]. Ein weiterer Ansatz untersucht die Robustheit in einer Supply Chain mittels der Warteschlangentheorie, indem ein Stabilitätsradius bestimmt wird [68].

4. Zusammenfassung und Forschungslücke

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass in der Literatur die vermehrt auftretenden störenden Ereignisse insbesondere auf der Netzwerkebene untersucht wurden. Hier wurde das Systemverhalten resultierend aus dem Zusammenspiel zwischen verschiedenen Risiken und möglicher Maßnahmen ausführlich dynamisch simuliert. Die Methodik hat sich als vorteilhaft herausgestellt, da Ereignisse wie der Beginn einer Unterbrechung, Wiederherstellungsmaßnahmen und die Stabilisierung des Systems zeitlich verteilt sind [33]. Allerdings werden mittel- bis langfristige Veränderungen nicht einbezogen, sodass eine differenzierte Betrachtung der turbulenten Einflüsse ausbleibt. Unterschiedliche Konzepte für den Umgang mit den Einflüssen werden deshalb nur vereinzelt gegenübergestellt. Die Mehrheit der Ansätze stellt individuelle Maßnahmenkataloge auf und propagiert entweder Robustheit oder Resilienz. Auf Fabrikebene liegt der Fokus vor allem auf der Wandlungsfähigkeit und dem Umgang mit den mittel- bis langfristigen Veränderungstreibern. Auswirkungen von kurzfristigen, störenden Ereignissen werden nur bedingt untersucht und mögliche fabrikplanerische Gegenmaßnahmen nicht in die Bewertung miteinbezogen. Es mangelt an adäquaten quantitativen Ansätzen zur Untersuchung der Wechselwirkungen eines Produktionssystems mit seinen turbulenten Einflüssen. Eine dynamische Berücksichtigung sowohl von Risiken als auch Veränderungstreibern als Unsicherheiten ist bisher nicht erfolgt. Der in Abbildung 3 skizzierte Zusammenhang zwischen den bewährten Arten der Veränderungsfähigkeit und den aktuell diskutierten Konzepten der Resilienz und Robustheit ist nicht bekannt, sodass es an einer Entscheidungsunterstützung zur anforderungsgerechten Auswahl geeigneter fabrikplanerischer Maßnahmen in Abhängigkeit der vorliegenden Risiken oder Veränderungstreiber mangelt.

| | | | | | |
|------------------|--------------------|--------------|---------------|---------------|--------------------|
| Eigene Vorarbeit | | Robustheit | Resilienz | Flexibilität | Wandlungsfähigkeit |
| | Robustheit | Definition | Ähnlichkeiten | Ähnlichkeiten | Ähnlichkeiten |
| | Resilienz | Unterschiede | Definition | Ähnlichkeiten | Ähnlichkeiten |
| | Flexibilität | Unterschiede | Unterschiede | Definition | Ähnlichkeiten |
| | Wandlungsfähigkeit | Unterschiede | Unterschiede | Unterschiede | Definition |

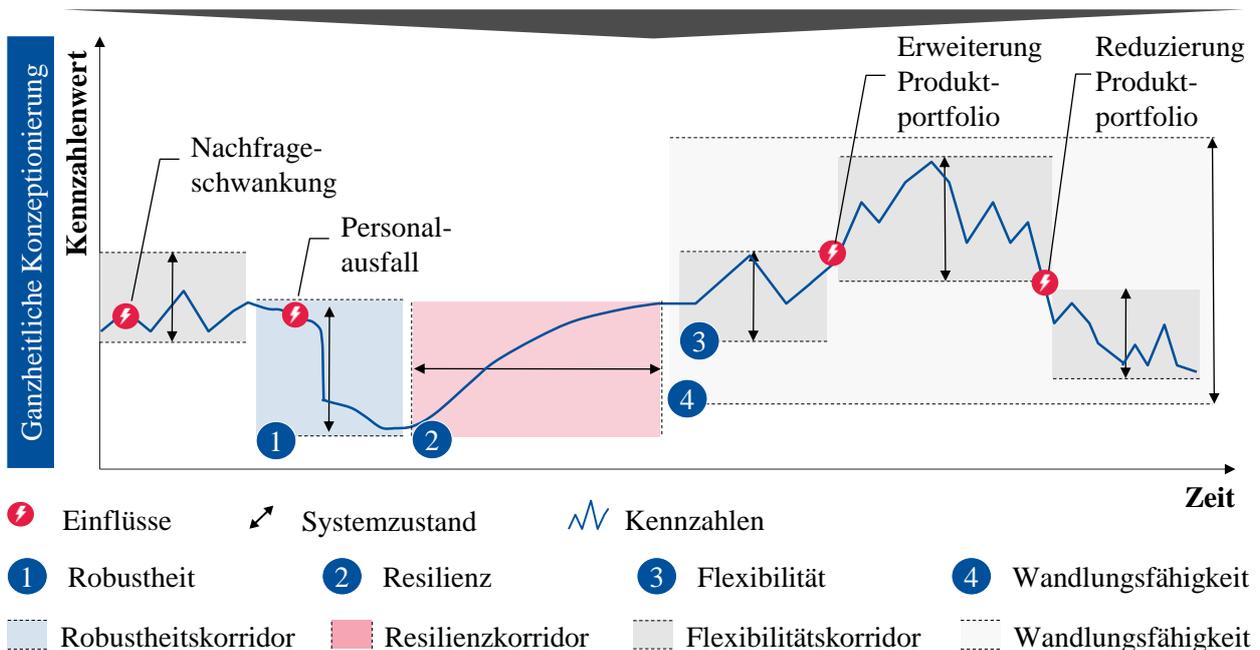


Abbildung 3: Überführung der eigenen Vorarbeit [11] in die ganzheitliche Konzeptionierung der Veränderungsfähigkeit durch die Einordnung der Robustheit und Resilienz

Die erweiterte Literaturrecherche basierend auf der eigenen Vorarbeit belegt, dass die Wandlungsfähigkeit (4) für mittel- bis langfristige Veränderungstreiber prädestiniert ist. Es handelt sich um strukturelle Maßnahmen, die im Bedarfsfall mittels Investitionskosten aktiviert werden können, um bspw. eine zusätzliche Produktvariante in der Fabrik zu ermöglichen. Wie in Abbildung 3 angedeutet, weisen die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche auf Netzwerkebene darauf hin, dass Robustheit (1) und Resilienz (2) sich für den Umgang mit kurzfristig wirkenden Risiken eignen. Durch eine proaktive Ausrichtung des Systems im Sinne der Robustheit kann der Funktionserhalt im Falle einer Störung sichergestellt werden. Sollte es zu einem Leistungsverlust kommen, gewährleisten hinterlegte Fähigkeiten der Resilienz als Reaktion nach der Überwindung des Störfalles eine schnellstmögliche Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit. Allerdings ist die konkrete Ausgestaltung beider Konzepte im Produktionskontext unklar. Generische Gestaltungsprinzipien wie bei der Wandlungsfähigkeit liegen nicht vor, die beständig gegenüber der Weiterentwicklung von Produktionssystemen sind und die Grundlage zur Ableitung anwendungsspezifischer Maßnahmen bilden. Die Flexibilität (3) kann sowohl bei kurzfristig eintretenden Risiken als auch bei mittel- bis langfristig wirkenden Veränderungstreibern von Nutzen sein. Sofern die Flexibilität für eine Veränderung ausreicht (z. B. veränderte Nachfrage), muss das Wandlungspotenzial nicht aktiviert werden. Gleichzeitig kann eine mit erhöhten Betriebskosten einhergehende Kapazitätsflexibilität die Folgen einer Störung zu einem gewissen Grad abfedern. Die detaillierten Wirkzusammenhänge zwischen den Einflüssen und Kennzahlen in Abhängigkeit der durch die verschiedenen Konzepte hergestellten Systemzustände sind allerdings nicht bekannt. Dafür sind die bisherigen Modelle zu spezifisch für einen konkreten Anwendungsfall und schließen nicht alle Ebenen eines Produktionssystems ausreichend mit ein. Bestehende Ansätze führen dadurch lediglich isolierte Betrachtungen einzelner Einflussarten durch, sodass gegenseitige Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen den Konzepten außen vor bleiben. Sowohl die relative Wirkung einzelner Einflüsse als auch die der dazugehörigen Maßnahmen auf das Kosten- und Leistungsniveau eines Produktionssystems sind nicht bekannt. Die genauen Einsatzbedingungen in der Fabrikplanung können deshalb nicht mit ausreichender Sicherheit bestimmt werden.

5. Ausblick

Da bisher kein Ansatz existiert, der neben mittel- bis langfristig absehbaren Veränderungstreibern auch unerwartete, kurzfristig wirkende Risiken im Rahmen der Fabrikplanung berücksichtigt, werden Fabrikplanende nicht adäquat bei der Einstellung der Fabrik als elementares Strukturelement eines Produktionsnetzwerkes auf die vermehrt auftretenden und impulsartig störenden Einflüsse unterstützt. Um Produktionssysteme richtungssicher im Spannungsfeld Wirtschaftlichkeit und Turbulenzbeherrschung positionieren zu können, müssen die Fabrikplanenden zielgerichtete Maßnahmen auswählen, die neben den herkömmlichen Arten der Veränderungsfähigkeit ebenfalls die vielseitig diskutierten Konzepte Robustheit und Resilienz berücksichtigen. Die Grundlage wurde durch die grundsätzliche Einordnung in die bewährte Veränderungsfähigkeit geschaffen. Zukünftige Forschungsaktivitäten des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) werden die Ausgestaltung der Robustheit und Resilienz in Abhängigkeit der bestehenden Arten der Veränderungsfähigkeit thematisieren, um konsistente Gestaltungsprinzipien ableiten zu können. Gleichzeitig soll ein Verständnis der Wirkzusammenhänge zwischen den turbulenten Einflüssen und den zur Verfügung stehenden Konzepten geschaffen werden, um Fabrikplanenden die Möglichkeit zu bieten, für den spezifischen Anwendungsfall geeignete Maßnahmen ableiten zu können.

References

- [1] Hernández, R., 2002. Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Hannover.
- [2] Spur, G., Stöferle, T., 1994. Fabrikbetrieb. Hanser, München, 385 pp.
- [3] Lanza, G., Nyhuis, P., Fisel, J., Jacob, A., Nielsen, L., 2018. Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0. acatech Studie. Herbert Utz Verlag, München.

- [4] Westkämper, E., Zahn, E., Balve, P., Tilebein, M., 2000. Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen: Ein Bezugsrahmen für die Unternehmensentwicklung im turbulenten Umfeld. *wt Werkstattstechnik online* 90 (1/2), 22–26.
- [5] Stich, V., Schröer, T., Linnartz, M., Marek, S., Herkenrath, C., 2021. Wertschöpfungsnetzwerke in Zeiten von Infektionskrisen.
- [6] Ivanov, D., Sokolov, B., Dolgui, A., 2014. The Ripple effect in supply chains: trade-off ‘efficiency-flexibility-resilience’ in disruption management. *International Journal of Production Research* 52 (7), 2154–2172.
- [7] Knüppel, K.M., 2016. Modellbasiertes Störungsmanagement in Produktionssystemen. Dissertation, Hannover.
- [8] Allianz, 2021. Allianz Risiko Barometer 2021: Covid-19-Trio an der Spitze der Unternehmensrisiken. <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/allianz-risk-barometer-2021-de.html>.
- [9] Lanza, G., 2019. Global Production Networks: Design and Operation. *CIRP Annals* (68), 823–841.
- [10] Pawellek, G., 2014. Ganzheitliche Fabrikplanung. Springer, Berlin, Heidelberg, 457 pp.
- [11] Hingst, L., Park, Y., Nyhuis, P., 2021. Life Cycle Oriented Planning Of Changeability In Factory Planning Under Uncertainty: Proceedings of the 2nd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2021).
- [12] VDI-Richtlinie 5200, 2011. Fabrikplanung: Planungsvorgehen.
- [13] Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., Nyhuis, P., 2014. Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, 2., überarb. und erw. Aufl., ed. Hanser, München.
- [14] Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., Lentes, J., 2013. *Digitale Produktion*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 328 pp.
- [15] Heger, C.L., 2006. Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation, Hannover.
- [16] Nyhuis, P., Kolakowski, M., Heger, C.L., 2006. Evaluation of Factory Transformability - a Systematic Approach. *Production Engineering - Annals of the WGP* 13 (1), 147–152.
- [17] Schenk, M., Wirth, S., Müller, E., 2014. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [18] Klemke, T., 2014. Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Dissertation, Hannover.
- [19] Lindemann, U., Reichwald, R., 1998. *Integriertes Änderungsmanagement*, 1st ed. ed. Springer, Berlin.
- [20] Sethi, A.K., Sethi, S.P., 1990. Flexibility in manufacturing: A survey. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 289–328.
- [21] Nyhuis, P. (Ed.), 2008. *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*. PZH, Garbsen.
- [22] Toni, A. de, Tonchia, S., 1998. Manufacturing flexibility: a literature review. *International Journal of Production Research*, 1587–1617.
- [23] Schneeweiß, C., 1991. *Planung: Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [24] Laux, H., Gillenkirch, R., Schenk-Mathes, H., 2014. *Entscheidungstheorie*, 9., vollst. überarb. Aufl. ed. Springer Berlin Heidelberg.
- [25] Wöhe, G., Döring, U., Brösel, G., 2016. *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. Auflage ed. Verlag Franz Vahlen, München.
- [26] Buzacott, J.A., Corsten, H., Gössinger, R., Schneider, H., 2013. *Production planning and control: Basics and concepts*. Oldenbourg Verlag, München.
- [27] Rogler, S., 2002. *Risikomanagement im Industriebetrieb*. Dissertation, Wiesbaden.
- [28] Knight, F., 1921. *Risk, Uncertainty and Profit*.
- [29] Vahrenkamp, R., Amann, M. (Eds.), 2007. *Risikomanagement in Supply Chains: Gefahren abwehren, Chancen nutzen, Erfolg generieren*. Schmidt, Berlin.
- [30] Oliveira, U., Marins, F., Rocha, H., Salomon, V., 2017. The ISO 31000 standard in supply chain risk management. *Journal of Cleaner Production* 151 (1), 616–633.
- [31] Tummala, R., Schoenherr, T., 2011. Assessing and managing risks using the Supply Chain Risk Management Process (SCRMP). *Supp Chain Mngmnt* 16 (6), 474–483.
- [32] Linkov, I., Palma-Oliveira, J.M., 2017. *Resilience and Risk: Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [33] Ivanov, D., Dolgui, A., Sokolov, B., Ivanova, M., 2017. Literature review on disruption recovery in the supply chain. *International Journal of Production Research* 55 (20), 6158–6174.
- [34] Behzadi, G., O’Sullivan, M.J., Olsen, T.L., Zhang, A., 2018. Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega* 79, 21–42.

- [35] Heinicke, M., 2017. Resilienzorientierte Beurteilung von Produktionsstrukturen. Dissertation, Magdeburg.
- [36] Galaske, N., Anderl, R., 2016. Disruption Management for Resilient Processes in Cyber-physical Production Systems. *Procedia CIRP* 50, 442–447.
- [37] Weig, S., 2008. Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten. Dissertation, München.
- [38] Unzeitig, W., 2014. Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten. Dissertation, Graz.
- [39] Rühl, J., 2010. Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung: Stochastische Simulation von Produktionssystemen während der Produktentwicklungsphase.
- [40] Koch, J., Plehn, C., Reinhart, G., Zäh, M.F., 2014. Cycle Management for Continuous Manufacturing Planning, in: Zäh, M. (Ed.), *Enabling manufacturing competitiveness and economic sustainability*. Springer, Cham, pp. 9–12.
- [41] Möller, N., 2007. Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Dissertation, München.
- [42] Hawer, S., 2020. Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten. Dissertation, München.
- [43] Wagner, C., 2012. Kontinuierliche Gestaltung skalierbarer Produktionsstufen. Dissertation, Hannover.
- [44] Löffler, C., 2011. Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Dissertation, Stuttgart.
- [45] Benkamoun, N., 2017. Systemic design methodology for Changeable Manufacturing Systems. Dissertation, Aubière.
- [46] Wildemann, H., 2005. Management leistungswirtschaftlicher Risiken in der Produktion. *ZWF* 100, 187–191.
- [47] Meiser, M., 2014. Resilienz in soziotechnischen Systemen: Eine systemtheoretische Analyse der Produktion am Beispiel eines Motorenbaus der BMW AG, München.
- [48] Schmitt, R., Kostyszyn, K., 2015. Fehlerrisiken in der Produktion. *wt Werkstatttechnik online* 105 (11/12), 775–780.
- [49] Ali, S., Maciejewski, A.A., Siegel, H.J., Kim, J.-K., 2003. Definition of a robustness metric for resource allocation, in: *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2003. Proceedings. International. International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS 2003), Nice, France. 22-26 April 2003*. IEEE Comput. Soc, s.l., p. 10.
- [50] Meyer, M., Apostu, M.-V., Windt, K., 2013. Analyzing the Influence of Capacity Adjustments on Performance Robustness in Dynamic Job-shop Environments. *Procedia CIRP* 7, 449–454.
- [51] Stricker, N., 2016. Robustheit verketteter Produktionssysteme. Dissertation, Karlsruhe.
- [52] Fan, Y., Stevenson, M., 2018. A review of supply chain risk management: definition, theory, and research agenda. *IJPDLM* 48 (3), 205–230.
- [53] Ho, W., Zheng, T., Yildiz, H., Talluri, S., 2015. Supply chain risk management: a literature review. *International Journal of Production Research* 53 (16), 5031–5069.
- [54] Pournader, M., Kach, A., Talluri, S.S., 2020. A Review of the Existing and Emerging Topics in the Supply Chain Risk Management Literature. *Decision sciences : journal of innovative education*.
- [55] Tang, C., Tomlin, B., 2008. The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics* 116 (1), 12–27.
- [56] Vilko, J.P., Hallikas, J.M., 2012. Risk assessment in multimodal supply chains. *International Journal of Production Economics* 140 (2), 586–595.
- [57] Ghadge, A., Dani, S., Chester, M., Kalawsky, R., 2013. A systems approach for modelling supply chain risks. *Supp Chain Mngmnt* 18 (5), 523–538.
- [58] Güller, M., Koc, E., Henke, M., Noche, B., Hingst, L., 2014. A Simulation-based Analysis of Supply Chain Resilience. *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, 533–556.
- [59] Hosseini, S., Ivanov, D., Dolgui, A., 2019. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 125, 285–307.
- [60] Shekarian, M., Mellat Parast, M., 2020. An Integrative approach to supply chain disruption risk and resilience management: a literature review. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1–29.
- [61] Xu, S., Zhang, X., Feng, L., Yang, W., 2020. Disruption risks in supply chain management: a literature review based on bibliometric analysis. *International Journal of Production Research* 58 (11), 3508–3526.

- [62] Carvalho, H., Barroso, A.P., Machado, V.H., Azevedo, S., Cruz-Machado, V., 2012. Supply chain redesign for resilience using simulation. *Computers & Industrial Engineering* 62 (1), 329–341.
- [63] Ivanov, D., 2017. Simulation-based ripple effect modelling in the supply chain. *International Journal of Production Research* 55 (7), 2083–2101.
- [64] Macdonald, J.R., Zobel, C.W., Melnyk, S.A., Griffis, S.E., 2018. Supply chain risk and resilience: theory building through structured experiments and simulation. *International Journal of Production Research* 56 (12), 4337–4355.
- [65] Schmitt, A.J., Singh, M., 2012. A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain. *International Journal of Production Economics* 139 (1), 22–32.
- [66] Xu, M., Wang, X., Zhao, L., 2014. Predicted supply chain resilience based on structural evolution against random supply disruptions. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics* 1 (2), 105–117.
- [67] Peukert, S., Lohmann, J., Haefner, B., Lanza, G., 2020. Towards Increasing Robustness in Global Production Networks by Means of an Integrated Disruption Management. *Procedia CIRP* 93, 706–711.
- [68] Schönlein, M., Makuschewitz, T., Wirth, F., Scholz-Reiter, B., 2013. Measurement and optimization of robust stability of multiclass queueing networks: Applications in dynamic supply chains. *European Journal of Operational Research* 229 (1), 179–189.

Autoren



Lennart Hingst, M.Sc. (*1989) studierte Technische Logistik an der Universität Duisburg-Essen und arbeitete von 2015 bis 2019 als Intralogistik- und Materialflussplaner. Seit 2019 ist er als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover in der Forschungsgruppe Fabrikplanung tätig.



Lena Wecken, M.Sc. (*1995) studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit dem Schwerpunkt Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2021 ist sie als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover in der Forschungsgruppe Fabrikplanung tätig.



Eric Brunotte, B.Sc. (*1998) studiert Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und arbeitet als studentische Hilfskraft am Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover.



Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis (*1957) studierte Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover und arbeitete anschließend als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fabrikanlagen und Logistik. Nach der Promotion zum Dr.-Ing. folgte die Habilitation und die Tätigkeit als Manager im Bereich Supply Chain Management in der Elektronik- und Maschinenbaubranche. Seit 2003 ist er Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik an der Leibniz Universität Hannover.