

Resilienzereignisse in der Produktion systematisch erfassen, analysieren und bewerten

# Resilienzmessgrößen für Produktionssysteme

L. Sielaff, D. Lucke, T. Adolf, A. Friedmann

Resilienz gewinnt für produzierende Unternehmen immer mehr an Bedeutung. Es fehlen jedoch geeignete Maßzahlen, um ein Produktionssystem auf dessen Resilienzfähigkeit zu analysieren. Dieser Beitrag stellt Resilienzmessgrößen vor, welche es ermöglichen verschiedene Produktionssysteme zu vergleichen und zusätzlich Optimierungsmaßnahmen zu bewerten.

## STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, Strategie

## Resilience Metrics for Production Systems

Resilience is becoming increasingly important for manufacturing companies. However, there is a lack of suitable metrics to analyze the resilience of a production system. This paper presents resilience metrics that enable the comparison of different production systems and the evaluation of optimization measures.

## 1 Einleitung

Unerwartete Ereignisse wie zum Beispiel Unfälle, Pandemien, Konflikte oder Kriege und die daraus resultierenden Verwerfungen stellen produzierende Unternehmen vor ständig wechselnde Herausforderungen. Neben den teilweise globalen Situationen werden Produktionssysteme auch von Lieferkettenunterbrechungen, Maschinenausfällen, erkrankten Mitarbeitenden, Qualitätsproblemen und vielen weiteren Ereignissen gestört. Von Produktionsverantwortlichen werden Strategien und Maßnahmen erwartet, diese Situationen mit möglichst geringen Auswirkungen und wenig Aufwand zu überstehen. In diesem Zusammenhang werden mögliche Störungen oft als Resilienzereignisse bezeichnet und eine resiliente Produktion gefordert.

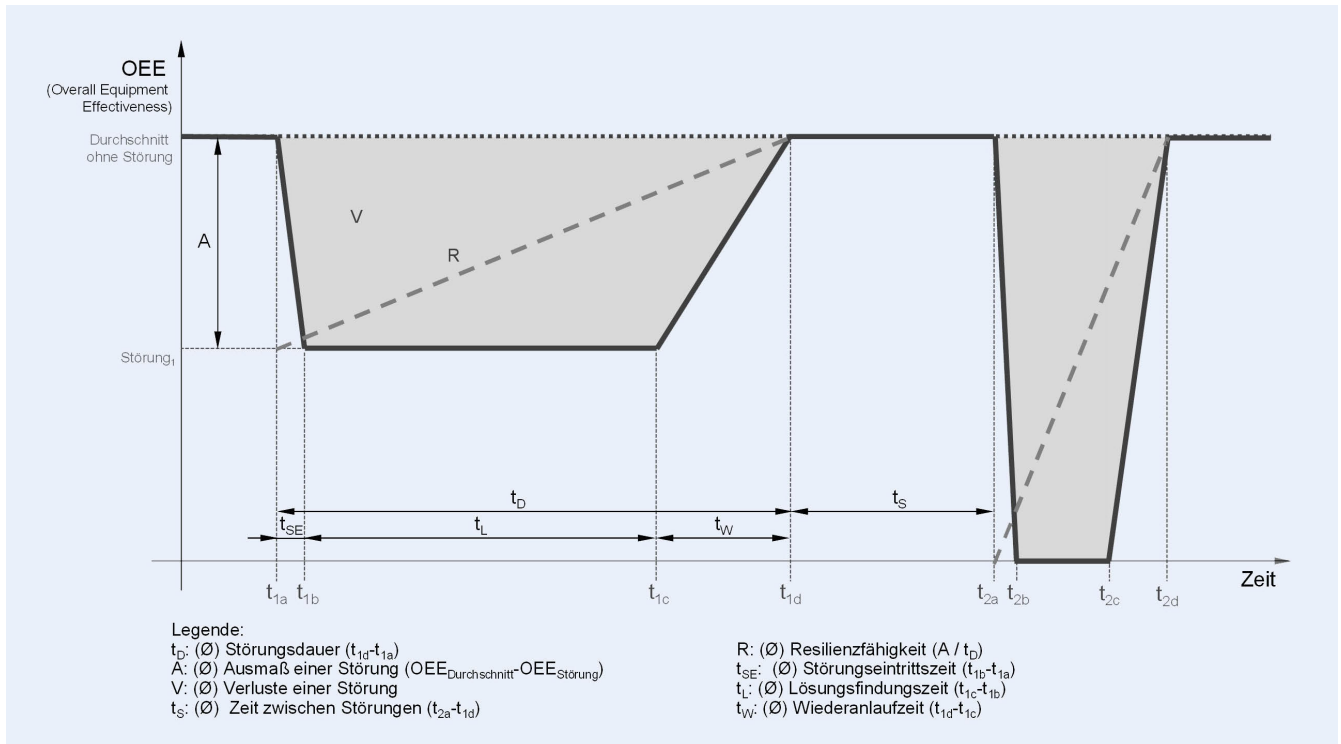
Resilienz beschreibt generell die Fähigkeit, die Auswirkungen von Störsituationen und Krisen zu überstehen und gegebenenfalls sogar gestärkt aus ihnen hervorzugehen. Übertragen auf die Produktion bedeutet dies, dass ein resilientes Produktionssystem möglichst schnell in den ursprünglichen Zustand vor dem Resilienzereignis zurückkehrt oder – noch besser – sich beim Bewältigen der Situation positiv weiterentwickelt. Gößling-Reisemann *et al.* haben 2013 die notwendigen Fähigkeiten eines resilienten Produktionssystems in Abhängigkeit von Stressfaktoren erarbeitet [1]. Nach ihrer Analyse lassen sich Stressfaktoren bezüglich der Eintrittsgeschwindigkeit (langsame/schleichende vs. abrupte/plötzliche) sowie nach Bekanntheit (bekannte vs. unbekannte) kategorisieren. Ist ein Stressfaktor bekannt und tritt langsam auf, kann dem Ereignis durch Anpassungsfähigkeit des Produktionssystems begegnet werden. Widerstandsfähigkeit hilft hingegen bei bekannten, plötzlich auftretenden Ereignissen. Unbekannte, langsame Faktoren benötigen Innovationsfähigkeit und unbekannte plötzliche Faktoren Improvisationsfähigkeit. Wie jedoch ein Resi-

lienzereignis in einem Produktionssystem mit Kennzahlen beschrieben und in eine der Kategorien einsortiert werden kann, wird in bisherigen Veröffentlichungen nicht beschrieben.

Um die Resilienzfähigkeit mithilfe gezielter Maßnahmen zu verbessern, ist es zunächst notwendig die Resilienzereignisse messbar und klassifizierbar zu machen. Nur so können die richtigen Maßnahmen ausgewählt, deren Auswirkungen nachvollzogen und eine Verbesserung der Resilienzfähigkeit überprüft werden. Aus diesem Grund benötigen Produktionsverantwortliche Werkzeuge um Resilienzereignisse beschreiben und analysieren zu können. In diesem Beitrag wird ein Ansatz für ein entsprechendes Werkzeug in Form eines Kennzahlensystems vorgestellt.

## 2 Stand der Technik und Forschung

Das Thema Resilienzmessung in Bezug auf Supply-Chain wird in Forschung und Praxis schon länger diskutiert und es wurden bereits einige Literaturzusammenfassungen zu dem Thema publiziert [2, 3]. Ivanov *et al.* [4] haben eine Meta-Studie über Literaturzusammenfassungen zur Resilienz in der Supply-Chain veröffentlicht. Dagegen stehen die Betrachtung der Resilienz in Bezug auf Produktionssysteme und insbesondere der Versuch der Kennzahlenerhebung noch am Anfang [5, 6]. Alexopoulos *et al.* [5] schlagen zum Beispiel die Veränderungskosten/-strafen („Penalty of Change“) als Messgröße für Resilienz vor, die sich aus den Kosten der notwendigen Veränderung als Antwort auf die Störung und der Wahrscheinlichkeit des Störeintritts berechnet. Um diese Kennzahl zu erfassen, müssen alle möglichen Störungen bewertet werden. Damit eignet sich die Kennzahl nicht, um passiv erfasst zu werden und ohne großen Aufwand verschiedene Systeme zu vergleichen. Cheng *et al.* [6] haben ein Resilienz-Kennzahlensystem erarbeitet, das hauptsächlich über die Leistung



**Bild 1.** Störungen und Resilienz-Kennzahlensystem. Grafik: Eigene Darstellung

in der zu betrachteten Störzeit definiert ist. Sie schlagen verschiedene Resilienz Kennzahlen vor, unter anderem das Verhältnis von tatsächlich erbrachter zu geplanter Leistung oder Leistungsverluste während des Resilienzereignis im Verhältnis zur geplanten Leistung. In einem so erarbeiteten Kennzahlensystem ist es jedoch nicht möglich, die Erholungsrate eines Produktionssystems zu erfassen. Yang *et al.* [7] bauen auf dem von Ceng *et al.* [6] entwickelten System auf, fokussieren sich aber bei ihrer Definition von Resilienz auf die Abgrenzung zu Zuverlässigkeit, Robustheit und Wiederherstellung. Sie beschreiben eine Vorgehensweise, bei der über verschiedene Indikatoren jeweils situationsrelevante Resilienz Werte erfasst werden können. Eine allgemeingültige Definition, wie Resilienz in Produktionssystemen gemessen werden kann, wird nicht gegeben. Caputo *et al.* [8] nutzen für ihre Definition von Resilienz die Leistung, verwenden jedoch als Referenzwert die maximale Ausbringungsmenge des Produktionssystems. So ergeben sich resilienzrelevante Größen, auch wenn das Produktionssystem planmäßig nicht auf voller Kapazität betrieben wird. Dies verfälscht die Aussagekraft durch die fehlende Abgrenzung von Resilienzereignissen und planmäßigem Betrieb. Caputo *et al.* [9] haben in ihrer Vorveröffentlichung einen Überblick über bisherige Artikel zum Thema Resilienzmessung von Produktionssystemen zusammengefasst. Die wenigsten Ansätze basieren auf dem Systemdurchsatz, sondern entweder auf statischen Größen oder auf Wahrscheinlichkeiten. Darüber hinaus berücksichtigen nur wenige Ansätze Kapazitätserholungen. Die bisher erarbeiteten Kennzahlen (-systeme) ermöglichen nur die Erfassung von speziellen Werten, haben relevante Lücken, nicht definierte Bezugsgrößen, keine allgemein anwendbare Definition, beziehen sich auf statische oder Wahrscheinlichkeitswerte oder eignen sich nicht für die zeitnahe Erfassung in Produktionssystemen.

### 3 Resilienz-Kennzahlensystem

Das hier vorgestellte Resilienz-Kennzahlensystem ist ein Werkzeug zur Charakterisierung von Resilienzereignissen in Produktionssystemen. Für deren Charakterisierung und Klassifizierung enthält das vorgeschlagene Kennzahlensystem sowohl störungs- und krisenbeschreibende Kennzahlen als auch Kennzahlen mit Fokus auf die Resilienz. Mithilfe der Kennzahlen können entweder einzelne Ereignisse beschrieben oder eine allgemeinere Beschreibung des Produktionssystems erhalten werden. Um das Resilienz-Kennzahlensystem einfach anwendbar zu gestalten, wird so weit wie möglich auf bekannte Kennzahlen zurückgegriffen. Hauptsächlich wird die Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectiveness OEE) in der Auslegung von Gibbons und Burgess [10] verwendet. Die OEE setzt sich aus den Faktoren der Anlagenverfügbarkeit, -leistung und -qualität zusammen und bildet somit einen guten Überblick über produktionsrelevante Faktoren. Abweichend zur Quelle werden geplante Produktionsunterbrechungen nicht aufgenommen, da sie kein Resilienzereignis darstellen. Wird die OEE, wie in Bild 1 dargestellt, über die Zeit aufgetragen, kann der Verlauf zur Charakterisierung der Resilienzereignisse des Produktionssystems herangezogen werden. Für eine einfache praktische Anwendbarkeit, werden für Beschreibung des Kennzahlensystems eine abschnittsweise definierte lineare Funktion zur Modellierung der OEE gewählt. Folgende Auswertungen sind in der betrieblichen Anwendung auf dem erfassten OEE-Verlauf durchzuführen. Um Abweichungen der OEE vom Normalzustand zu erkennen und so ein Resilienzereignis zu erfassen, muss zunächst ein Durchschnittsniveau der OEE erfasst werden. Dieses sollte sich an Erfahrungswerten orientieren oder mithilfe von Benchmarks aus der Literatur und Praxis ermittelt werden. Sind einzelne Resilienzereignisse über ihren Verlauf beschrieben und klassifiziert, können diese Infor-

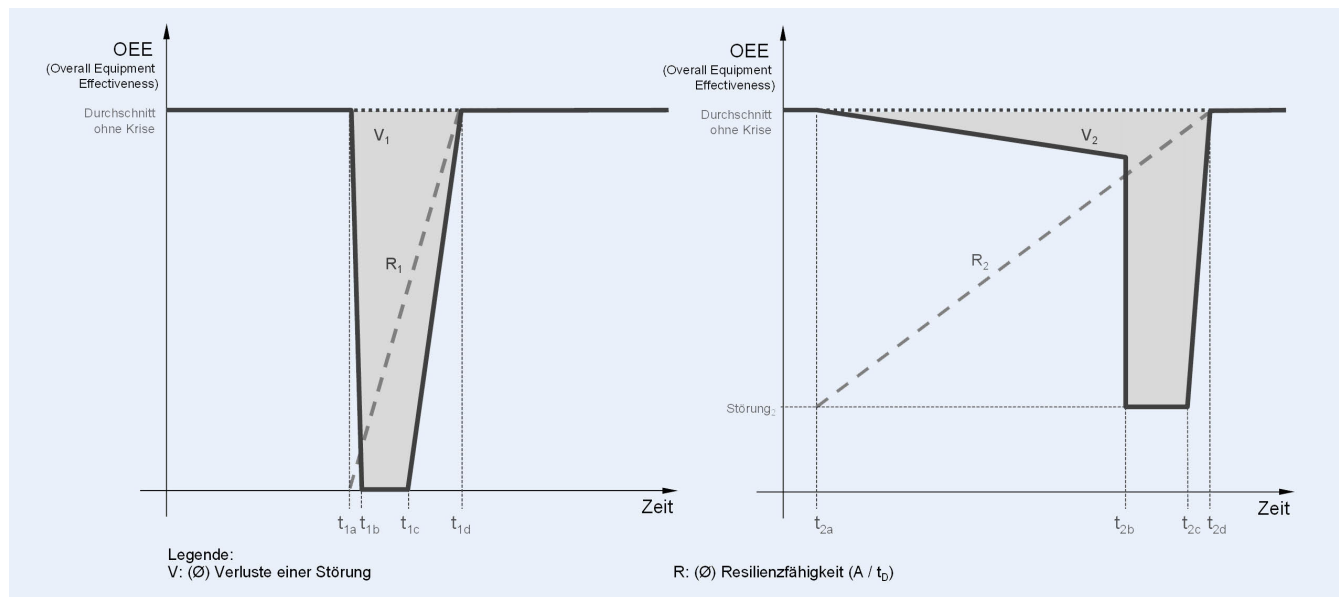


Bild 2. Beispiele von Störungssituationen. Grafik: Eigene Darstellung

mationen genutzt werden, um mithilfe von Durchschnittswerten Aussagen über das betrachtete Produktionssystem allgemein zu verfassen. So können übergreifende Analysen und Vergleiche zwischen Systemen ermöglicht werden.

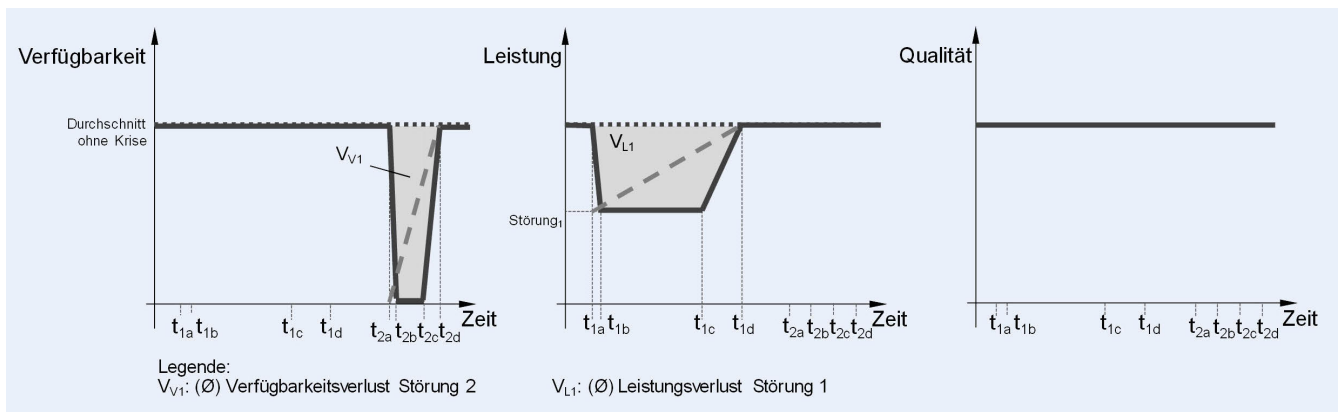
Die störungsbeschreibenden Kennzahlen erlauben einen Überblick über die Resilienzereignisse des Systems und ermöglichen eine Priorisierung der zu analysierenden Situationen. Im Einzelnen werden hier die Störungsdauer ( $t_D$ ), das Störungsausmaß ( $A$ ), die Störungsverluste ( $V$ ) sowie die Zeit zwischen Störungen ( $t_S$ ) verwendet. Das Störungsausmaß beschreibt den Abfall der OEE vom Referenzwert, während die Störungsverluste das Integral des Störungsausmaßes über die Störungsdauer darstellt und im Diagramm durch die Fläche der Störung veranschaulicht wird. So können zum Beispiel Resilienzereignisse mit den größten Gesamtverlusten gegenüber Ereignissen mit längerer Dauer oder großem Ausmaß priorisiert werden. Durch Aufnahme der Zeit zwischen zwei Störungen wird die Häufigkeit von Ereignissen ermittelt, um die Dringlichkeit von Verbesserungsmaßnahmen einzuordnen.

Mithilfe der folgenden resilienzbeschreibenden Kennzahlen lassen sich die Resilienzereignisse in die von Gößling-Reisemann *et al.* vorgestellten Gliederung [1] einsortieren und so Optimierungsmaßnahmen identifizieren. Die Kennzahl Resilienzfähigkeit ( $R$ ) gibt an, wie schnell ein Resilienzereignis bewältigt werden kann. Die Betrachtung der Störungseintrittszeit ( $t_{SE}$ ) ermöglicht die Unterscheidung zwischen einer schleichenden und einer plötzlichen Störung. Die Grenze zwischen schleichenden und plötzlich auftretenden Störungen hängt dabei vom Produktionssystem ab, kann aber einmalig festgelegt werden, um so eine eindeutige und definierte Einteilung in die Kategorien zu ermöglichen. Die Lösungsfindungszeit ( $t_L$ ) dient dazu einzuschätzen, ob ein Resilienzereignis bekannt oder unbekannt ist. Abhängig von der Einteilung in die Kategorien der Störungen können Optimierungsmaßnahmen entweder in der Widerstandsfähigkeit, Improvisationsfähigkeit, Anpassungsfähigkeit oder Innovationsfähigkeit umgesetzt werden. Mit der Wiederanlaufzeit ( $t_W$ ), lässt sich zusätzlich das Potenzial beim Hochfahren des Produktionssystems auf den Normalzustand identifizieren. Durch die Beschreibung

des Resilienzereignisses mithilfe der unterschiedlichen Kennzahlen  $R$ ,  $t_{SE}$ ,  $t_L$  und  $t_W$  ist es möglich jeden einzelnen Wert direkt aus dem Diagramm abzulesen und eindeutige Schlussfolgerungen zu ziehen. Kennzahlensysteme, die diese Werte direkt zusammenführen erlauben in der Regel keine so differenzierten Aussagen bezüglich der Ereignisse.

Im Vergleich von Resilienzereignissen werden die Beschreibungsmöglichkeiten des Resilienz-Kennzahlensystems deutlich. In Bild 2 sind zwei beispielhafte Maschinenstörungen dargestellt. Beide Produktionssysteme haben über den Zeitraum die gleiche Durchschnitts-OEE und den gleichen Verlust. Die linke Störung zeigt eine plötzlichen Maschinenstörung in einer Fertigungslinie ohne Redundanz. Nachdem die Störung sofort erkannt wird, wird die Maschine instandgesetzt und der Wiederanlauf der Linie gestartet. Bei der rechten Störung ist ein Produktionssystem beschrieben, in dem eine redundante Maschine über einen längeren Zeitraum schleichende Verschleiß-, Leistungs- oder Qualitätsverluste aufweist. Der Fehler wird erst nach einiger Zeit erkannt, die Maschine angehalten, instandgesetzt und die Linie wieder hochgefahren. Bei der linken Störung ist die Störungseintrittszeit ( $t_{1b}-t_{1a}$ ) im Vergleich zur rechten Störung kurz. Die Lösungsfindungszeit und Wiederanlaufzeit sind ähnlich groß. Das Produktionssystem der linken Seite zeigt eine hohe Resilienzfähigkeit, da das System schnell wieder in die Normalsituation zurückgeführt wird. Bei der rechten Störung hingegen weist der OEE-Verlauf auf eine schlechtere Resilienzfähigkeit hin, was durch die flachere Gerade  $R_2$  deutlich wird. Aus den Kennzahlen lässt sich erkennen, dass sich die niedrige Resilienzfähigkeit aufgrund der langen Störungseintrittszeit, die nicht für eine Reaktion genutzt wird, ergibt. Durch diese Aufschlüsselung der Resilienzereignisse kann das Kennzahlensystem genutzt werden um gezielte Optimierungsmaßnahmen zu empfehlen.

Durch die Verwendung der zusammengesetzten Kennzahl OEE als Leistungsbeschreibung für das Resilienz-Kennzahlensystem, lassen sich die erarbeiteten Resilienz Kennzahlen auf die einzelnen Faktoren der OEE herunterbrechen und so für eine detaillierte Beschreibung und Analyse nutzen. Dies erlaubt die Erfassung und Beschreibung der Resilienzereignisse nicht nur auf



**Bild 3.** Erweiterte Betrachtungsmöglichkeit des Kennzahlensystems anhand der OEE-Faktoren. Grafik: Eigene Darstellung

einer zusammengefassten Ebene, sondern auch auf den drei Einzelebenen der OEE: der Verfügbarkeit, der Leistung und der Qualität. Hierfür können die oben beschriebenen Resilienzanalysen für die drei einzelnen Kennzahlen durchgeführt werden. Die Klassifizierung der Ergebnisse anhand der einzelnen Kennzahlenverläufe erfolgt analog zur OEE. Diese erweiterte Betrachtung auf der Ebene einzelner Kennzahlen ermöglicht es, dass die Resilienzereignisse bei Bedarf noch detaillierter analysiert und kategorisiert werden können.

In **Bild 3** ist der OEE-Verlauf aus Bild 1, heruntergebrochen auf die drei Aspekte der OEE, dargestellt. Es wird deutlich, dass die zeitlich erste Störung (Bild 3 Mitte) auf einen Einbruch der Leistungsfähigkeit, zum Beispiel auf Probleme in der Lieferkette, zurückzuführen ist. Die zeitlich zweite Störung (Bild 3 links) hingegen hat ihre Ursache in der Verfügbarkeit und kann zum Beispiel durch einen Totalausfall einer Maschine ausgelöst werden, für die keine Redundanz vorhanden ist.

Die oben dargestellten Auswertemöglichkeiten der Gesamtbetrachtung, lassen sich auf die detaillierte Ebene der drei Faktoren übertragen, sodass das System auch die Resilienzfähigkeit der Verfügbarkeit, der Leistung und der Qualität darstellen kann. Damit wird die Möglichkeit geschaffen die Resilienz für das Produktionssystem oder einzelne Facetten zu bewerten. Es erlaubt den Unternehmen, die momentan schon ihre OEE aufnehmen, eine schnelle, unkomplizierte und automatisierte Umsetzung der Resilienzanalyse. Somit eröffnet es die Möglichkeit Resilienzereignisse, wie von Gößling-Reisemann *et al.* [1] beschrieben, nicht nur subjektiv, sondern objektiv zu bewerten.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Resilienz-Kennzahlensystem ermöglicht eine systematische Erfassung von Resilienzereignissen in Produktionssystemen auf der Basis der OEE, die bereits in der Praxis häufig erfasst wird. Durch deren automatisierbare Auswertung über die Zeit, erhalten Produktionsverantwortliche ein Werkzeug mit

begrenztem Implementierungsaufwand zur gezielten Auswahl von Optimierungsmaßnahmen. Auf dieser Basis bietet sich eine Weiterentwicklung hin zu einer Softwarelösung an, die automatisiert Resilienzereignisse erkennen und Maßnahmenempfehlungen ausgeben kann.

## Literatur

- [1] Gößling-Reisemann, S.; Stührmann, S.; Wachsmuth, J. et al.: Vulnerabilität und Resilienz von Energiesystemen. In: Radtke, J.; Henning, B. (Hrsg.): Die deutsche „Energiewende“ nach Fukushima. Der wissenschaftliche Diskurs zwischen Atomausstieg und Wachstumsdebatte. Weimar (Lahn): Metropolis impr. 2013, S. 367–396
- [2] Tukamuhabwa, B. R.; Stevenson, M.; Busby, J. et al.: Supply chain resilience: definition, review and theoretical foundations for further study. *International Journal of Production Research* 53 (2015) 18, S. 5592–5623
- [3] Roque Júnior, L. C.; Frederico, G. F.; Costa, M. L. N.: Maturity and resilience in supply chains: a systematic review of the literature. *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management* 5 (2023) 1, S. 1–25
- [4] Ivanov, D.; Hägele, S.; Grosse, E. H.: Supply chain resilience: a tertiary study. *International Journal of Integrated Supply Management* 16 (2023) 1, S. 1
- [5] Alexopoulos, K.; Anagiannis, I.; Nikolakis, N. et al.: A quantitative approach to resilience in manufacturing systems. *International Journal of Production Research* (2022), S. 1–16
- [6] Cheng, Y.; Elsayed, E. A.; Huang, Z.: Systems resilience assessments: a review, framework and metrics. *International Journal of Production Research* 60 (2022) 2, S. 595–622
- [7] Yang, M.; Sun, H.; Geng, S.: On the quantitative resilience assessment of complex engineered systems. *Process Safety and Environmental Protection* 174 (2023), S. 941–950
- [8] Caputo, A. C.; Pelagagge, P. M.; Salini, P.: A methodology to estimate resilience of manufacturing plants. *IFAC-PapersOnLine* 52 (2019) 13, S. 808–813
- [9] Caputo, A. C.; Donati, L.; Salini, P.: Estimating Resilience of Manufacturing Plants: Model and Application (2023). Internet: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4352124>. Zugriff am 23.05.2023
- [10] Gibbons, P. M.; Burgess, S. C.: Introducing OEE as a measure of lean Six Sigma capability. *International Journal of Lean Six Sigma* 1 (2010) 2, S. 134–156



**Lennard Sielaff**, M. Sc.   
Foto: Autor

Dipl.-Ing. **Thomas Adolf**  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung IPA  
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart  
Tel. +49 711 / 970-1326  
lennard.sielaff@ipa.fraunhofer.de  
thomas.adolf@ipa.fraunhofer.de  
www.ipa.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. **Dominik Lucke**  
ESB Business School Hochschule Reutlingen  
Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen  
Tel. +49 7121 / 271-5005  
dominik.lucke@reutlingen-university.de  
www.esb-business-school.de

**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)