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

doi.org/10.37544/1436–4980–2023–04–53

Gelingt Nachhaltigkeit nur mit einem anderen Mindset?

Nachhaltigkeit versus Produktion?

M. Öfele, H.-M. Braun, N. Warkotsch, S. Braunreuther

Nachhaltigkeit ist ein Schlüsselthema für die Zukunft der Produktion. Dabei birgt insbesondere die Produktionslogistik hohe Nachhaltigkeitspotenziale, welche bisher kaum beleuchtet wurden. In diesem Beitrag werden Synergien und Widersprüche zwischen Nachhaltigkeit und produktionslogistischen Zielgrößen aufgezeigt. Zudem werden Nachhaltigkeitszielgrößen für die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) definiert, ihre Wechselwirkungen diskutiert und Handlungsempfehlungen für eine nachhaltigkeitsorientierte PPS gegeben.

STICHWÖRTER

Nachhaltigkeit, PPS (Produktionsplanung/-steuerung)

Does sustainability only succeed with a different mind-set? – Sustainability versus production?

Sustainability is a key factor for the future of production. In particular, production logistics has considerable potential for a more sustainable future, which has been insufficiently considered so far. In this article, synergies and contradictions between sustainability and production logistics targets are highlighted. In addition, sustainability KPIs for production logistics are defined, their interactions are discussed and recommendations for a sustainability-oriented PPC are given.

1 Ausgangslage

Nachhaltigkeit ist eines der Schlüsselthemen für die Zukunft der Wirtschaft. Sowohl gesellschaftlich als auch politisch rückt das Thema zunehmend stärker in den Fokus. Dies führt zu Änderungen im Verhalten der Konsumenten und zu neuen Regularien und Gesetzen, wie beispielsweise der Verschärfung der EU-Abfallrahmenrichtlinie [1]. Um unter diesen Bedingungen weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen produzierende Unternehmen Nachhaltigkeitsthemen zukünftig stärker in den Fokus rücken.

Trotz der zunehmenden Wichtigkeit der Nachhaltigkeit wird sie im Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung (PPS, siehe **Bild**) nicht berücksichtigt. Die PPS fokussiert sich typischerweise auf die Wirtschaftlichkeit, welche durch kosteneffiziente Produktionssysteme erreicht wird. Um diesen wirtschaftlichen Betrieb zu realisieren, konzentriert sich die PPS dabei auf die vier Hauptziele: geringe Durchlaufzeiten, hohe Termintreue, hohe Auslastung und geringe Bestände [2].

Die Aktualität von Nachhaltigkeitshemen für die Produktion zeigt sich in der Fülle an hierzu veröffentlichten Publikationen [3–5]. Konkrete Ansätze fokussieren sich dabei jedoch nur auf Teilaspekte der Nachhaltigkeit, wie die energieorientierten Produktionsplanung [6], die Vermeidung von Abfällen [7], Reduzierung des Wasserverbrauchs [8] oder die Einbeziehung der Ergonomie [9]. Die exklusive Betrachtung einzelner Nachhaltigkeitsziele ist jedoch unzureichend, um Produktionssysteme themenübergreifend nachhaltiger zu gestalten. Zudem lässt sich die Frage, ob Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit Widersprüche in der Produktion darstellen, ohne eine ganzheitliche Betrachtung nicht klären. Dieser Artikel beschäftigt sich mit ebendieser Frage und zeigt Synergien und widersprüchliche Tendenzen zwischen den Nachhaltigkeitsthemen und den produktionslogistischen Zielen auf. Um diese Effekte in Zukunft quantifizierbar zu machen, werden zusätzlich Nachhaltigkeitskennzahlen definiert.

Tabelle 1. Nachhaltigkeitsthemen für produzierende Unternehmen (basierend auf [11]).

ökonomisch	ökologisch	sozial
Produktqualität	**Energie**	**Arbeitssicherheit**
Lieferanten	**Emissionen**	**Arbeitsbedingungen**
Kunden	**Wasser**	Grundversorgung
Investitionen	**Abfälle**	Gleichberechtigung
Rechtskonformität	**Materialien**	Mitarbeiter
Anti-Korruption	Biodiversität	Produktsicherheit

2 Wechselwirkungen zwischen PPS und Nachhaltigkeit

Aufgrund der Verwendung des Nachhaltigkeitsbegriffs in verschiedenen Bereichen ist eine einheitliche Definition schwierig. Häufig werden jedoch die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales zur Beschreibung nachhaltigen Handelns aufgeführt [10, 11]. Basierend auf diesen Dimensionen lassen sich die in **Tabelle 1** dargestellten Nachhaltigkeitsthemen für produzierende Unternehmen identifizieren [11], wovon die hervorgehobenen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Bild. Zielsystem der Produktionslogistik. *Grafik nach [2]*

mit den vier produktionslogistischen Zielgrößen interagieren, wie in den folgenden Abschnitten dargestellt wird. Die hierbei aufgezeigten Einschätzungen erfolgten aufgrund von Gesprächen mit Partnern der Lebensmittel-, Automobil-, Luftfahrt-, und Chemieindustrie und werden in **Tabelle 2** zusammengefasst.

2.1 Durchlaufzeit

Aus Sicht der PPS sind kurze Durchlaufzeiten anzustreben. Diese können sich jedoch negativ auf die Produktqualität auswirken. Dies kann eintreten, wenn eine Verkürzung der Durchlaufzeit durch höhere Prozessgeschwindigkeiten erreicht wird [12]. Insgesamt erschwert dies die Prozessführung und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit von Störungen. Bei stark schwankender Durchlaufzeit aufgrund von einer hohen Variabilität im Auftragseingang, kann eine häufig wiederkehrende temporäre Verkürzung der Durchlaufzeit nötig sein. In diesem Szenario kann das Bereithalten von zusätzlichen Maschinen zum Abfangen dieser Spitzen eine sinnvolle Strategie sein [12]. Allerdings erschwert dieses Vorgehen die Aufrechterhaltung einer gleichbleibenden Produktqualität durch die Häufung von meist instabilen Anfahr- und Auslaufphasen der Maschinen.

Eine Beschleunigung der Fertigungsprozesse führt meist zusätzlich zu einem erhöhten Energieverbrauch und Emissionsausstoß. Auch eine Verkürzung der Durchlaufzeit durch die Einführung kleinerer Losgrößen führt durch die dadurch induzierten erhöhten Transportaufwände zu einer Steigerung des Energieverbrauchs und der Emissionen. Der Wandel der Energieerzeugung hin zu erneuerbaren Energiequellen bietet weitere Einflussmöglichkeiten auf die Nachhaltigkeit der Produktion. Mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien am deutschen Energiemix steigt auch die Volatilität des Energieangebots. Eine Flexibilisierung der Produktion hinsichtlich ihres Energiebedarfs ist neben dem monetären Aspekt auch aus Sicht der Nachhaltigkeit sinnvoll. Durch eine energieflexible Produktion können die durchschnittlichen passiven CO_2-Emissionen vermindert und die Menge an Energie, die aufwendig gespeichert werden muss, verringert werden. Eine energieflexible Produktion bedeutet aber auch, dass in Zeiten mit niedrigem Energieangebot längere Durchlaufzeiten akzeptiert werden müssen. Generell erhöht ein energieflexibler Ansatz die Varianz der Durchlaufzeiten.

Der Verbrauch von Wasser, Materialien, wie beispielsweise Betriebsmittel, und die Entstehung von Abfällen wird generell vorrangig durch die Losgröße beeinflusst. Kleine Losgrößen führen zu höheren Rüstaufwänden, die in der Regel auch Reini-

Tabelle 2. Wechselwirkungen zwischen produktionslogistischen und Nachhaltigkeitszielen.

Nachhaltigkeitsthemen	Nachhaltigkeitsziele	Durchlaufzeit (↓)	Termintreue (↑)	Auslastung (↑)	Bestand (↓
Produktqualität	Produktqualität (↑)	–	+	+	X
Energie	Energieverbrauch (↓)	–	+	+	+
	Flexibiltät des Energieverbrauchs (↑)	–	–	–	–
Emissionen	Emissionsausstoß (↓)	–	+	+	+
Wasser	Wasserverbrauch (↓)	–	–	+	X
	Flexibilität des Wasserverbrauchs (↑)	–	–	–	–
Abfälle	Abfallaufkommen (↓)	–	+ –	+	X
Materialien	Betriebsmittelverbrauch (↓)	–	–	+	X
	Anteil erneuerbarer / recycelter Materialien (↑)	–	X	X	–
Arbeitssicherheit	Arbeitssicherheit (↑)	–	+ –	+ –	+
Arbeitsbedingungen	Arbeitsbedingungen (↑)	–	+ –	+ –	X
Lieferanten	Lieferantenbeziehungen (↑)	X	X	X	+
	Liefererantenzuverlässigkeit (↑)	+	+	X	+
Kunden	Kundenzufriedenheit (↑)	+	+	+	–

+ positiver Einfluss – negativer Einfluss + – positiver und negativer Einfluss X kein Einfluss (↓) zu minimieren (↑) zu maximieren

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

gungsprozesse einschließen, und damit zu einem höheren Verbrauch an Wasser und Chemikalien. Weiterhin führen sie zu mehr Anfahr- und Auslaufphasen, die zusätzlichen Ausschuss erzeugen können. Kleine Losgrößen werden häufig eingesetzt, um kurze Durchlaufzeit zu erreichen [13]. Sollen diese im Sinne der Nachhaltigkeit vermieden werden, muss eine längere Durchlaufzeit in Kauf genommen werden. Analog zur Energieversorgung kann auch die Wasserversorgung zu einem begrenzenden Faktor für die Durchlaufzeit werden, da durch den Klimawandel Dürren auch in Europa zunehmen werden [14]. Insbesondere bei Prozessen mit hohem Wasserverbrauch kann dies zu Phasen mit höheren Durchlaufzeiten führen, wenn die Produktion verlangsamt werden muss. Darüber hinaus kann die Verwendung von recycelten oder umweltfreundlicheren Materialien die Fertigungsprozesse verkomplizieren und somit die Prozessgeschwindigkeit verlangsamen und die Durchlaufzeit erhöhen.

Auf die Arbeitssicherheit und Arbeitsbedingungen kann sich eine sehr kurze Durchlaufzeit, welche durch eine Verkürzung der Bearbeitungszeiten erreicht wird, negativ auswirken. So können kurze Bearbeitungszeiten zusätzlichen Stress für die Arbeiter erzeugen und das Unfallrisiko steigern. Darüber hinaus können Sicherheitsvorschriften die Verringerung der Bearbeitungszeiten begrenzen.

Lieferanten können die Durchlaufzeit durch ihre Zuverlässigkeit beeinflussen. Für Kunden führen kurze Durchlaufzeiten zu kürzeren Lieferzeiten und damit zu einer höheren Zufriedenheit.

2.2 Termintreue

Eine Verbesserung der Termintreue kann sich indirekt positiv auf die Produktqualität auswirken. Dies ist der Fall, wenn die Erhöhung der Termintreue durch eine Steigerung der Prozessqualität erreicht wird, die in der Regel auch zu einer besseren Produktqualität führt. Umgekehrt führt die Umsetzung des Verbraucherwunsch nach langlebigeren Produkten [15] langfristig zu einem Rückgang des Produktionsvolumens. Dies kann die Bedeutung der Termintreue für die Produktion noch weiter steigern, da dadurch Verzögerungen bei einzelnen Aufträgen stärkere Auswirkungen haben.

Eine hohe Termintreue kann ebenfalls zu einem effizienten Energieverbrauch beitragen und unnötige Emissionen vermeiden. Jeder Rückstand führt zu zusätzlichem Energieverbrauch und Emissionen durch den längeren Einsatz von Produktionsmitteln und zusätzlichen Transporten für Nachlieferungen. Andererseits wird die Flexibilität, die Termintreue vorübergehend zu senken, benötigt, um eine energieflexible Produktionssteuerung umzusetzen.

Ähnlich zur Volatilität bei der Energieversorgung kann Wasserknappheit, mit Wasser als Ressource, die Termintreue negativ beeinflussen. Ein auf hohe Termintreue abgestimmtes Produktionssystem führt zudem meist zu vielen Produktwechseln und damit zu einem höheren Abfallaufkommen und Betriebsmittelverbrauch durch häufige An- und Auslaufphasen der Maschinen. Des Weiteren gehen Produktwechsel mit Reinigungsprozessen einher, die wiederum den Wasserverbrauch erhöhen. Eine zu niedrige Termintreue hingegen erhöht das Risiko einer Nichtabnahme des Produkts durch den Kunden aufgrund der langen Lieferverzögerung, was wiederum das Abfallaufkommen erhöhen kann, insbesondere bei individualisierten Produkten. Folglich ist eine moderate Termintreue ideal für ein niedriges Abfallaufkommen.

Mit Blick auf die Arbeitsbedingungen und die Arbeitssicherheit erscheint ein moderater Ansatz für die Termintreue ebenfalls sinnvoll. Enge Fristen und der Druck, sie einzuhalten, können das Stresslevel der Mitarbeiter erhöhen und dazu führen, dass Sicherheitsstandards wegen der Erhöhung des Arbeitstempos nicht eingehalten werden. Eine niedrige Termintreue führt dagegen zu einem hohen Rückstand, der beim Versuch des Aufholens zu den gleichen Problematiken führen kann.

Eine Voraussetzung zur Erreichung einer hohen Liefertreue sind zuverlässige Lieferanten. Verspätete Lieferungen können Verzögerungen im Produktionsprozess nach sich ziehen und so die Termintreue negativ beeinflussen. Für Kunden bedeutet eine hohe Termintreue die rechtzeitige Lieferung ihrer Produkte, was zur Aufrechterhaltung einer hohen Kundenzufriedenheit beiträgt. [13]

2.3 Auslastung

Der mit einer hohen Auslastung einhergehenden kontinuierliche Ablauf der Fertigungsprozesse [13] wirkt sich positiv auf die Produktqualität aus. Störung sowie An- und Auslaufphasen von Maschinen führen meist zu vorübergehenden qualitativen Einbußen. Eine hohe Auslastung trägt gleichzeitig zu einer hohen Energieeffizienz bei, da jeder Leerlauf oder Stillstand von Maschinen Energie verbraucht und indirekt Emissionen erzeugt, die nicht zur Wertschöpfung beitragen. Dennoch kann eine energieflexible Ausrichtung der Produktion Zeiten mit geringerer Auslastung erfordern, wenn das Energieangebot niedrig ist.

Die Wechselwirkungen der Auslastung mit dem Wasser- und Materialverbrauch und der Entstehung von Abfällen sind analog zum Energieverbrauch. Eine höhere Auslastung führt zu weniger Rüstaufwänden und folglich zu weniger Wasser- und Betriebsmittelverbrauch sowie Abfallaufkommen. Die Wasserverfügbarkeit kann ein begrenzender Faktor für die Auslastung werden, falls der Wasserbedarf der Produktion nicht gedeckt werden kann.

Im Hinblick auf die Arbeitssicherheit und die Arbeitsbedingungen kann eine übermäßig hohe Auslastung über einen längeren Zeitraum den Stresspegel der Arbeiter erhöhen. Andererseits kann eine niedrige Auslastung zu Langeweile führen. Folglich ist eine moderate Auslastung anzustreben. Sich verändernde Arbeitsbedingungen hin zu einer geringeren Wochenarbeitszeit und der sinkenden Bereitschaft zur Schichtarbeit und der zunehmende Fachkräftemangel können zudem eine hohe Auslastung von Produktionssystemen verhindern.

Mit Blick auf die Kundenzufriedenheit ist eine hohe Auslastung wiederum vorteilhaft, da sie zu geringeren Stückkosten und damit zu niedrigeren Preisen führen kann.

2.4 Bestand

Niedrige Bestände können dazu beitragen den Energieverbrauch und die Emissionen zu senken, da übermäßige Lagerbestände einerseits, je nach Art des Gutes, Energie während der Lagerung verbrauchen und im Extremfall zu zusätzlichem Transportaufwand führen. Eine energieflexible Produktion benötigt andererseits größere Pufferbestände, die als Energiespeicher dienen. Diese Bestände können in Zeiten eines hohen Energiean-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

gebots aufgebaut werden, während in Phasen eines geringen Angebots die Bestände zur Aufrechterhaltung der normalen Produktion verwendet werden. Dies kann besonders für energieintensive Prozesse interessant sein. Ebenso kann der Bestand als Puffer für Schwankungen in der Wasser- oder Materialversorgung dienen.

Für die Arbeitssicherheit können sehr hohe Bestände problematisch werden. Ist nicht ausreichen Lagerplatz für die Bestände zur Verfügung, kann dies zur Blockierung von Fuß- und Transportwegen bis hin zu Flucht- und Rettungswegen führen.

Niedrige Lagerbestände erfordern eine hohe Zuverlässigkeit der Lieferanten. Darüber hinaus stärken viele Strategien zur Senkung der Bestände, wie Abrufaufträge oder das Konsignationsprinzip, die Beziehungen zu den Lieferanten. Für Kunden führt ein hoher Lagerbestand in der Regel zu kürzeren Lieferzeiten [13].

3 Integration von Nachhaltigkeit in die Produktionslogistik

Die Frage, ob Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit in der Produktion konträre Ziele sind lässt sich, wie Tabelle 2 zeigt, nicht allgemeingültig klären. Die Antwort hängt von der Stärke der jeweiligen Effekte ab und ist damit für jede Produktion individuell zu ermitteln. Um dies zu ermöglichen, werden im Folgenden leicht bestimmbare Kennzahlen für die Nachhaltigkeitsthemen in der Produktionslogistik eingeführt.

Die Produktqualität lässt sich direkt nur schwer quantifizieren. Alternativ kann die Qualität jedoch durch den Anteil an Retouren aufgrund von Mängeln abgeschätzt werden [16]. Hierbei ist ein möglichst geringer Rückläuferanteil anzustreben.

Für die Quantifizierung eines nachhaltigen Umgangs mit Energie werden zwei verschiedene Kennzahlen benötigt, um den Gesamtverbrauch und die Flexibilität des Energieeinsatzes abbilden zu können. Der Verbrauch kann mit der verbrauchten Energiemenge pro Produktionsmenge (PM) beziffert werden, die im Sinne der Nachhaltigkeit zu minimieren ist. Die Flexibilität des Energieverbrauchs kann indirekt durch den durchschnittlichen gezahlten Preis pro Energiemenge oder den Anteil der erneuerbaren Energie gemessen werden. Beide Kennzahlen geben die Energieflexibilität nur annähernd wieder. Der Energiepreis korreliert in der Regel mit dem Energieangebot, wird aber auch von anderen Marktdynamiken beeinflusst. Der Anteil der erneuerbaren Energie ist ebenfalls tendenziell größer in Phasen eines hohen Energieangebots. Somit stehen ein niedriger durchschnittlicher Energiepreis und ein hoher Anteil an erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch für eine hohe Energieflexibilität und damit für Nachhaltigkeit in diesem Bereich. Bei den Emissionen spielen vor allem die Treibhausgas-, NO_x- und SO_2-Emissionen eine große Rolle [17]. Um diese zu bewerten, kann die jeweilige Ausstoßmenge pro PM sinnvoll sein. Ziel ist es diese Ausstoßmengen zu minimieren.

Ähnlich zum Energieverbrauch können für Wasser zwei Kennzahlen definiert werden, um den Gesamtverbrauch und die Flexibilität der Nutzung zu erfassen. Der Gesamtverbrauch kann durch den Wasserverbrauch pro PM gemessen werden und ist zu minimieren. Die Flexibilität ist derzeit schwer zu bestimmen, da der Wasserpreis in der Regel nicht mit dem aktuellen Angebot korreliert und somit eine Proxy-Variable für die Flexibilität fehlt. Dies könnte sich jedoch in Zukunft durch eine Zunahme der Wasserknappheit als Folge des Klimawandels ändern, was eine Messung der Flexibilität durch den durchschnittlichen gezahlten Preis pro verbrauchter Wassermenge ermöglichen würde. Dann wäre ein geringer durchschnittlicher Wasserpreis Indikator für eine nachhaltige Wassernutzung. Auch das Abfallaufkommen lässt sich am einfachsten durch die Menge der entstehenden Abfälle pro PM abbilden. Hierbei sind geringe Abfallmengen anzustreben. Hinsichtlich der verwendeten Materialien kann ein hoher Anteil an recycelten und/oder erneuerbaren Materialien und ein geringer Betriebsmittelverbrauch pro PM die Nachhaltigkeit der Produktion ausdrücken.

Die Sicherheit eines Produktionssystems kann durch die Summe der Unfälle und arbeitsbedingten Verletzungen pro Zeiteinheit, eventuell gewichtet mit deren Schwere, gemessen werden. Die Summe soll möglichst gering ausfallen. Die Arbeitsbedingungen sind schwieriger zu erfassen, da die Daten speziell zu diesem Zweck mit Fragebögen oder ähnlichen Methoden erhoben werden müssen. Anhand dieser kann dann die zu maximierende Zufriedenheit der Mitarbeiter quantifiziert werden.

Kunden- und Lieferantenbeziehungen können auf die gleiche Weise durch Umfragen gemessen werden. Zudem kann die Lieferantenzuverlässigkeit separat durch den Anteil der termingerechten Lieferungen gemessen werden. Im Sinne der Nachhaltigkeit sind diese drei Kennzahlen zu maximieren.

4 Fazit

Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit sind nicht zwingend konträre Zieldimensionen der Produktion. So führen die produktionslogistischen Ziele einer hohen Liefertreue und Auslastung auch zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit. Die Nachhaltigkeitsziele guter Lieferantenbeziehungen und einer hohen Kundenzufriedenheit wirken sich zudem positiv auf die PPS-Kennzahlen aus. Der Widerspruch der beiden Zieldimensionen zeigt sich vor allem in den Zielen der kurzen Durchlaufzeiten und einer hinsichtlich Energie- und Wasserverbrauch flexiblen Produktion.

Neben diesen eindeutigen Interaktionen erlaubt die Vielzahl an ambivalenten Wechselbeziehungen zwischen Nachhaltigkeitszielen und dem PPS-Zielsystem keine generelle Ermittlung von Synergien und Widersprüchen. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit kann nur quantitativ anhand von Kennzahlen getroffen werden. Hierfür können die in diesem Beitrag eingeführten Nachhaltigkeitskennzahlen genutzt werden.

Abschließend ist anzumerken, dass eine nachhaltigere Produktion nur durch eine Weitung des Fokus bei der Bewertung von Produktionssystemen gelingen kann.

Literatur

[1] Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle

[2] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 2020

[3] Gbededo, M. A.; Liyanage, K.; Garza-Reyes, J. A.: Towards a Life Cycle Sustainability Analysis: A systematic review of approaches to sustainable manufacturing. Journal of Cleaner Production 184 (2018), S. 1002–1015

[4] Eslami, Y.; Dassisti, M.; Lezoche, M. et al.: A survey on sustainability in manufacturing organisations: dimensions and future insights. International Journal of Production Research 57 (2019) 15–16, S. 5194–5214

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

[5] Bhatt, Y.; Ghuman, K.; Dhir, A.: Sustainable manufacturing. Bibliometrics and content analysis. Journal of Cleaner Production 260 (2020) 120988
[6] Schultz, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for an Energy-oriented Production Control. Procedia CIRP 48 (2016), S. 248–253
[7] Le Hesran, C.; Ladier, A.-L.; Botta-Genoulaz, V. et al.: Reducing waste in manufacturing operations: a mixed integer linear program for bi-objective scheduling on a single-machine with coupled-tasks. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 1695–1700
[8] Pulluru, S. J.; Akkerman, R.; Hottenrott, A.: Integrated production planning and water management in the food industry: A cheese production case study. In: 27th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Elsevier 2017, S. 2677–2682
[9] Otto, A.; Scholl, A.: Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. OR Spectrum 35 (2013) 3, S. 711–733
[10] Rosen, M. A.; Kishawy, H. A.: Sustainable Manufacturing and Design: Concepts, Practices and Needs. Sustainability 4 (2012) 2, S. 154–174
[11] Rusche, S.; Rockstuhl, S.; Wenninger, S.: Quantifizierung unternehmerischer Nachhaltigkeit in der Fertigungsindustrie: Entwicklung eines zielorientierten Nachhaltigkeitsindex. Zeitschrift für Energiewirtschaft 45 (2021) 4, S. 317–343
[12] IFA – Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover: QuantiLoPe. Internet: www.quantilope-ifa.de. Zugriff am 08.03.2023
[13] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012
[14] Spinoni, J.; Naumann, G.; Vogt, J.: Spatial patterns of European droughts under a moderate emission scenario. Advances in Science and Research 12 (2015) 1, S. 179–186
[15] Gnanapragasam, A.; Cole, C.; Singh, J. et al.: Consumer Perspectives on Longevity and Reliability: A National Study of Purchasing Factors Across Eighteen Product Categories. Procedia CIRP 69 (2018), S. 910–915
[16] Shuaib, M.; Seevers, D.; Zhang, X. et al.: Product Sustainability Index (ProdSI). Journal of Industrial Ecology 18 (2014) 4, S. 491–507
[17] Sachs, J.; Schmidt-Traub, G.; Kroll, C. et al.: The Sustainable Development Goals and Covid-19. Sustainable Development Report 2020. Cambridge: Cambridge University Press 2020

Marcel Öfele, M. Sc.
Foto: Autor

Hans-Martin Braun, M. Sc.

Prof. Dr. **Nadine Warkotsch**

Prof. Dr.-Ing. **Stefan Braunreuther**

Technische Hochschule Augsburg
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg
Tel. +49 821 5586-2944
marcel.oefele@hs-augsburg.de
www.hs-augsburg.de

LIZENZ

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

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2023-04-53 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY