

Logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen der Overall Equipment Effectiveness

Ursachenanalyse geringer Anlagenproduktivität

K. Welzel, B. Kirchhoff, N. Müller, M. Schmidt

ZUSAMMENFASSUNG Zunehmender Kostendruck erfordert von Unternehmen Produktivitätssteigerungen, die sich mit der Overall Equipment Effectiveness (OEE) messen lassen. Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) bietet zwar zahlreiche Stellschrauben, doch aufgrund der hohen Systemkomplexität sind die Ursachen einer geringen OEE schwer zu finden. Eine modellbasierte Ursachenanalyse systematisiert diese anhand logistischer Ursache-Wirkungsbeziehungen und ermöglicht die Identifikation der Primärursache sowie geeigneter Maßnahmen in der PPS.

STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Lean Production

Logistic cause-and-effect relationships of Overall Equipment Effectiveness – Root Cause Analysis of Low Overall Equipment Effectiveness

ABSTRACT Increasing cost pressure demands productivity gains from companies – measured using Overall Equipment Effectiveness (OEE). Production planning and control (PPC) offers numerous improvement options, but the causes of low OEE are difficult to identify due to high system complexity. A model-based root cause analysis systematizes these using logistic cause-and-effect relationships and enables the identification of the primary cause and appropriate measures in PPC.

1 Einleitung

Die zunehmende Individualität, Komplexität und Dynamik heutiger Marktumgebungen stellen produzierende Unternehmen vor die Herausforderung, hoch-effiziente Produktionssysteme aufzubauen, um ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern [1]. Ein effizientes Produktionssystem zeichnet sich durch die Erfüllung hoher Leistungsanforderungen wie einer schnellen, termintreuen Lieferung zu möglichst geringen Kosten aus [2]. Um langfristig eine hohe logistische Effizienz aufrechtzuerhalten, brauchen Unternehmen ein kontinuierliches Produktionscontrolling. Die Aufgabe des Produktionscontrollings ist die Identifikation von Ursachen unzureichender Zielerreichung und die Ableitung von zielgerichteten Verbesserungsmaßnahmen [3]. Oft ist ein Produktionssystem jedoch von so hoher Komplexität, dass Primärursachen unzureichender Zielerreichung nicht direkt ersichtlich sind. Vielmehr treten im Produktionsbetrieb häufig nur Symptome auf, deren Primärursachen durch komplexe logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen verdeckt sind. Härtel hat deswegen eine Methodik zur datenbasierten Identifikation von logistischen Schwachstellen in Produktionsbereichen entwickelt, die die systematische Steigerung der Logistikeffizienz ermöglicht. Dazu werden allgemeingültige logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen in sogenannten Ursachenbäumen systematisiert. Der strukturierte Ansatz trägt nicht nur zu einem besseren Verständnis für logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen in Produktionssystemen bei, sondern ermöglicht es auch, gezielt Verbesserungsmaßnahmen zur Minderung der Primärursache in der Produkti-

onsplanung und -steuerung (PPS) abzuleiten. Eine Fokussierung auf die Primärursache ermöglicht die Priorisierung jener Maßnahmen, die die größte langfristige Effizienzsteigerung versprechen [4]. Härtels Ansatz untersucht Abweichungen jener Zielgrößen, die die logistische Effizienz ausdrücken. Leistungsgrößen sind die Lieferzeit und Liefertermintreue, während die Auslastung und der Work-in-Process (WIP) als logistische Kostengrößen betitelt werden [5]. Der aus den Marktanforderungen resultierende Kostendruck fordert von den Unternehmen jedoch nicht nur einen geringen Work-in-Process und hoch ausgelastete Ressourcen, sondern auch einen hoch-produktiven Betrieb der Produktionssysteme. Die Produktivität misst die Ergiebigkeit betrieblicher Faktorkombinationen wie Arbeit, Anlagen, Material, Fläche und Energie [6, 7]. Durch die PPS können vor allem die Arbeits- und die Anlagenproduktivität beeinflusst werden [8]. Logistische Einflussfaktoren der Arbeitsproduktivität werden umfassend durch Glöckner untersucht [9]. Zur Untersuchung der Anlagenproduktivität existiert eine Vielzahl von Studien, die fallspezifisch Lean-Management-Methoden anwenden oder direkte mathematische Zusammenhänge der Kennzahl untersuchen. Eine Methodik, die logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen zur Steigerung der Anlagenproduktivität untersucht und eine Maßnahmenableitung in der PPS vorsieht, existiert nicht. Daher ist es Ziel dieses Beitrags, einen Ursachenbaum gemäß der Methodik nach Härtel zu entwickeln, der Ursachen unzureichender Anlagenproduktivität aus logistischen Ursache-Wirkungsbeziehungen herleitet. Dafür leitet Kapitel 2 grundlegend in das Produktionscontrolling ein und stellt die Ursachenanalyse logistischer Zielgrößen nach Härtel

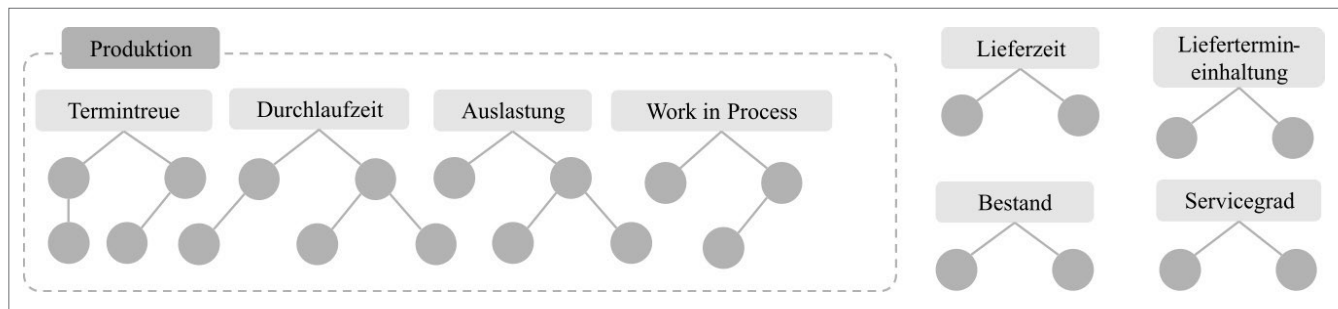


Bild 2 Ursachenbäume logistischer Zielgrößen in der Produktion. Grafik: [4]

Ressourceneinsatzes misst und so eine unternehmensinterne Sicht widerspiegelt, ist sie als Kostengröße einzustufen. Aufgrund des hohen Ressourceneinsatzes hat die Produktivität in der Produktion gegenüber den anderen Kernprozessen der unternehmensinternen Lieferkette (Beschaffung, Lager, Komplettierung und Versand) eine höhere Relevanz [8].

Die vorherrschende Definition der Produktivität sind vielfältig. Während die Gesamtproduktivität einen Ausbringung zu mehreren Faktoreinsätzen in Relation setzt, ist die Teilproduktivität auf die Betrachtung eines einzelnen Faktoreinsatzes begrenzt [14, 15]. Beispielsweise setzt die Arbeitsproduktivität den Produktionswert mit dem notwendigen Arbeitseinsatz in Relation [8]. Günter und Gopp identifizieren und klassifizieren in der Literatur von 1955 bis 2020 37 unterschiedliche Ansätze zur Produktivitätsmessung, wobei sechs Ansätze explizit die Anlagenproduktivität messen. Die geringe Vielfalt von Ansätzen zur Messung der Anlagenproduktivität führen Günter und Gopp auf die weitreichende Anwendung und Akzeptanz der Overall Equipment Effectiveness (OEE) zurück, die 1988 von Seiichi Nakajima entwickelt wurde [16, 17]. Eine Umfrage aus dem Jahr 2014 zeigte auf, dass zu dem Zeitpunkt 70 % der befragten Unternehmen in Deutschland, Österreich und der Schweiz die OEE mindestens teilweise einsetzen. Inzwischen hat sich die OEE als Branchenstandard zur Anlagenverbesserung etabliert [18]. Die OEE aggregiert die Verfügbarkeit, Leistung und die Qualitätsausbringung einer Anlage zu einem einheitlichen Maß der Anlagenproduktivität und ermöglicht die Identifizierung von Verlusten [19]. Grundsätzlich berechnet sich die OEE nach Gleichung 1:

$$OEE = \text{Verfügbarkeitsgrad} * \text{Leistungsgrad} * \text{Qualitätsgrad} \quad (1)$$

Der Verfügbarkeitsgrad gibt an, welcher Anteil der maximal möglichen Produktionszeit einer Anlage innerhalb des Betrachtungszeitraums tatsächlich genutzt wurde (siehe Gleichung 2). Die maximal mögliche Produktionszeit wird durch die Eigenfertigungsplanung festgelegt und entspricht der Arbeitszeit gemindert um Anlagenstillstände durch fehlende Bearbeitungsaufträge oder geplante Instandhaltung [18]. Verfügbarkeitsverluste entstehen also durch ungeplante Anlagenstillstände und können durch die Verbesserung des Störungs- und Wartungsmanagements vermieden werden [11].

$$\text{Verfügbarkeitsgrad} = \frac{\text{Tatsächliche Produktionszeit}}{\text{Mögliche Produktionszeit}} \quad (2)$$

Der Leistungsgrad beschreibt, welcher Anteil der theoretisch möglichen Ausbringung während der tatsächlichen Produktionszeit realisiert wurde (siehe Gleichung 3). Die theoretisch mögliche Ausbringungsmenge ist ebenfalls Resultat der Eigen-

fertigungsplanung, während die tatsächliche Ausbringungsmenge die Anzahl der im Betrachtungszeitraum gefertigten Einheiten umfasst [11]. Leistungsverluste können aus Kurzstillständen, reduzierter Produktionsgeschwindigkeit oder einer hohen Prozessinstabilität resultieren [11].

$$\text{Leistungsgrad} = \frac{\text{Tatsächliche Ausbringungsmenge}}{\text{Mögliche Ausbringungsmenge}} \quad (3)$$

Der Qualitätsgrad misst den Anteil von Gutteilen an der gesamten Ausbringungsmenge. Ein Schlechtteil entsteht, sobald definierte Qualitätsmerkmale des Teils außerhalb der tolerierten Spezifikationen liegen. Folgen von Qualitätsverlusten sind zusätzlicher Aufwand für Nacharbeit oder Ersatzteilherstellung. Teile, die in Folge von Nacharbeit den tolerierten Spezifikationen entsprechen zählen nicht in die Menge der Gutteile [18]. Der Qualitätsgrad zeigt also Verluste durch Prozessfehler auf [11].

$$\text{Qualitätsgrad} = \frac{\text{Gutteilmenge}}{\text{Ausbringungsmenge}} \quad (4)$$

2.3.2 Verlustarten der Anlagenproduktivität

Ein theoretischer OEE-Wert von eins weist die ideale Anlagenproduktivität aus, wo die maximal verfügbare Produktionszeit vollständig ausgeschöpft wird und die höchstmögliche Produktionsmenge in der geforderten Qualität erzielt wird. OEE-Werte kleiner eins weisen Ressourcenverschwendung aus [11]. Eine Reduzierung des OEE-Werts ist auf die „sechs großen Verlustarten“ zurückzuführen, die in Bild 3 grafisch aufbereitet sind. Rüst- und Einrichtungsverluste bezeichnen alle Aufwendungen, die erforderlich sind, um eine Anlage auf einen anderen Bearbeitungsprozess umzustellen. Ungeplante Anlagenstörungen können sowohl anlagenabhängig als auch -unabhängige Ursachen haben [20]. Langsamlauf und Kurzstillstände sind Unterbrechungen des Bearbeitungsprozesses von drei bis fünf Minuten und zählen daher zu den Leistungsverlusten. Häufige kurze Unterbrechungen können zu einem signifikanten Leistungsverlust führen [18]. Langsamlauf liegt vor, wenn die Anlage weniger Output als geplant in einer gegebenen Zeit erzeugt [20]. Ausschuss und Nacharbeit entstehen, wenn Teile geforderte Spezifikationen nicht erfüllen. Ausschuss kann keine weitere Verwendung finden, während Nacharbeit Merkmale eines Teils durch zusätzliche Bearbeitung wieder in die Toleranzgrenzen der Spezifikationen bringt [18]. Anlaufverluste treten bei einem Neustart der Anlage beispielsweise zu Schichtbeginn oder nach Wartungsarbeiten auf, wenn die Anlage noch nicht betriebsbereit ist oder die Teile aufgrund des Anlaufs noch nicht den geforderten Spezifikationen entsprechen [20].

Verfügbare Gesamtzeit					
Planbelegungszeit					Geplanter Stillstand
Tatsächliche Produktionszeit (Soll-Ausbringung)				Rüsten	Störungen
Ist-Ausbringung			Langsamlauf	Kurzstillstand	
i. O.-Ausbringung	Anlauf	Ausschuss	Leistungsverluste		Verfügbarkeitsverluste
	Qualitätsverluste				

Bild 3 Verlustarten der Anlagenproduktivität. Grafik: [21]

2.4 Stand der Forschung zur Ursachenanalyse der Anlagenproduktivität

Mithilfe einer Literaturrecherche wurden systematische Ansätze zur Verbesserung der Anlagenproduktivität identifiziert: *Andrade* und *Dreher Silveira* [22] implementieren die OEE in einer Produktionslinie der Papierindustrie, um Verluste zu erkennen und zu reduzieren. Die Autoren konnten durch eine differenzierte Analyse der OEE-Komponenten auf geeignete Verbesserungsmaßnahmen schließen. Einflussgrößen auf die OEE blieben jedoch unbetrachtet.

Ahmad et al. [23] setzen Total Productive Maintenance (TPM) zur Verbesserung der OEE in einer Garnherstellung ein. Dabei werden die Ursachen für Stillstandsverluste mithilfe eines Ishikawa-Diagramms identifiziert und Verbesserungsmaßnahmen mit Kaizen umgesetzt. *Kapuyanyika und Kinja* [24] implementieren TPM, um Wartungsmaßnahmen zur Reduzierung verschiedener Verlustarten in einer Eisenbahnwerkstatt zu entwickeln. *Fam et al.* [25] untersuchen die Einflussstärke geplanter, autonomer und fokussierter Wartung auf die OEE mithilfe einer Regressionsanalyse. In den beschriebenen Studien werden Verlustursachen im Wartungsmanagement mithilfe von klassischen Lean-Methoden untersucht. *Rozak et al.* [26] und *Hibarkah et al.* [27] kombinieren die Analyse der OEE-Komponenten mit einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), um technologisch bedingte Ursachen einer verminderten OEE bei einem Automobilhersteller und Bekleidungshersteller zu analysieren.

Kang et al. [28] präsentieren eine graphbasierte Visualisierung von Kennzahlenbeziehungen in einem hierarchischen Kennzahlensystem und wenden diese auf die OEE an. Sie berücksichtigen Identitätsbeziehungen, die sich direkt aus der Kennzahlendefinition ergeben, und Relevanzbeziehungen, die aus gemeinsamen Messgrößen resultieren. Graphbasierte Visualisierungen bieten den Vorteil, dass sie allgemeingültige Kennzahlenbeziehungen abbilden, sind jedoch häufig auf eine qualitative Repräsentation von direkten Wirkbeziehungen beschränkt.

Ungermann et al. [29] entwickeln ein Optimierungsvorgehen, dass Prozessparameter mit einem Kennzahlenmodell zur Behebung von Schwachstellen verknüpft. Relevante Prozessparameter, Basis-Kennzahlen und Zielgrößen werden identifiziert. Lernende Methoden werden eingesetzt, um die Beziehungen zwischen Basis-Kennzahlen und Prozessparametern zu identifizieren. Darauf basierend sind Optimierungsmaßnahmen auszuwählen. Für prozessbezogene Maßnahmen lässt sich durch eine Parametervariation im Kennzahlenmodell die Maßnahmenauswirkung quantifizieren. Dieser Ansatz zeichnet sich durch die quantitative Analyse von Ursache-Wirkungsbeziehungen aus, setzt für die Identifizierung von Einflussfaktoren und die Ableitung von Maßnahmen jedoch ein umfassendes Expertenwissen voraus.

Lucantoni et al. [30] stellen ein regelbaisiertes Machine-Learning-Vorgehen zur Verbesserung der OEE vor. Ein ML-Modell kommt zur Anomaliedetektion und zur Identifizierung der Primärursache der gemessenen Plan-Ist-Abweichung der OEE zum Einsatz. In einem ersten Schritt werden signifikante Anomalien der relevanten Verlustarten detektiert und mit Hilfe von Association Rule Mining hinsichtlich ihrer Dringlichkeit und Wichtigkeit klassifiziert. Tritt eine Anomalie A auf, wird aus den Assoziationsregeln deutlich, dass gleichzeitig die Anomalie B und C adressiert werden müssen, da sie in den historischen Daten mit Anomalie A einhergehen. Zur Wissensextraktion werden zusätzlich Netzwerkanalysen eingesetzt, um die Einflussstärke der Anomalien auf die Verlustarten zu bestimmen. Letztlich können proaktiv Verbesserungsmaßnahmen vor der Reduzierung der OEE abgeleitet und implementiert werden [30]. Im Gegensatz zu vorherigen Ansätzen berücksichtigen *Lucantoni et al.* durch die Anomaliedetektion eine große Bandbreite von Einflussfaktoren der Produktion auf die OEE. Die Anwendung von Machine Learning setzt jedoch auch einen umfassende Datengrundlage hoher Qualität voraus und beschränkt sich auf datensatzspezifische Ergebnisse.

Es zeigt sich, dass ein Großteil der Ansätze die fallspezifische Anwendung von klassischen Lean-Management-Methoden zur kontinuierlichen Verbesserung der OEE umfassen. Dabei liegt der Fokus häufig auf technologischen Verbesserungsmaßnahmen. Graphbasierte Visualisierungen von Kennzahlenbeziehungen beschränken mögliche Ursache-Wirkungsbeziehungen auf direkte, mathematisch beschreibbare Beziehungen und lassen somit Verbesserungspotenziale durch indirekte Ursache-Wirkungsbeziehungen außer Acht. Der Einsatz lernender Methoden bietet zwar den Vorteil, Ursache-Wirkungsbeziehungen quantitativ auszuwerten, geht jedoch auch mit einem hohen Aufwand und stark datensatzspezifischen Resultaten einher. Daher bedarf es einer systematischen Methodik zur Ursachenanalyse einer unzureichenden Anlagenproduktivität, die allgemeingültige logistische Ursache-Wirkungs-Beziehungen systematisiert und die zielgerichtete Ableitung von Maßnahmen zur Steigerung der Anlagenproduktivität in der Produktionsplanung und -steuerung ermöglicht.

3 Entwicklung des Ursachenbaums zur Analyse geringer Anlagenproduktivität

Um den aufgezeigten Forschungsbedarf zu decken, wird gemäß der systematischen Methodik von Härtel ein Ursachenbaum für die Anlagenproduktivität entwickelt. Dafür werden die Ursachen einer unzureichenden OEE aus allgemeingültigen Ursache-Wirkungsbeziehungen der Produktionslogistik, den OEE-Komponenten und den sechs Verlustarten hergeleitet und hierarchisch strukturiert. Anschließend werden logistische Analysen verortet, um den wahrscheinlichen Ursachenpfad bestimmen zu können, der zu der Primärursache einer verminderten OEE führt.

Der Ausgangspunkt des Ursachenbaums ist eine gemessene Abweichung zwischen dem Plan- und Ist-Wert der OEE eines Arbeitssystems im eingeschwungenen, stabilen Produktionsbetrieb. Da die OEE eine aggregierte Kennzahl aus dem Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsgrad darstellt, sind die Ursachen erster Ordnung jeweils Plan-Ist-Abweichungen dieser OEE-Komponenten. Dies ermöglicht eine priorisierte Ursachenanalyse jener OEE-Komponente, die die größten Verluste ausweist. Ursachen zweiter Ordnung sind die den OEE-Komponenten zuzuordnenden Verlustarten. Für die Verlustarten werden wiederum tieferliegende Ursachen aus logistischen Ursache-Wirkungsbeziehungen hergeleitet. Der Ursachenbaum weist jenen Detaillierungsgrad auf, der sich aus logistischen Ursache-Wirkungsbeziehungen herleiten lässt und den allgemeingültigen Charakter des Ursachenbaums wart. Zudem werden Einflüsse fokussiert, die einen zentralen Hebel für die Prozessverbesserung durch die Produktionsplanung und -steuerung darstellen.

Bild 4 zeigt den Ursachenbaum eines unzureichenden Verfügbarkeitsgrads. Der Verfügbarkeitsgrad wird maßgeblich durch störungsbedingte Stillstände und Rüstverluste geschmälert, die die nutzbare Produktionszeit reduzieren. Dabei ist zu beachten, dass geplante Stillstände und Stillstände durch Auftragsmangel nicht in die OEE einfließen [19]. Werden Rüstzeiten kürzer angenommen, als sie tatsächlich sind, ist die tatsächlich mögliche Produktionszeit kürzer als für die Bestimmung des Verfügbarkeitsgrad angenommen. Rüstverluste können folglich durch fehlerhafte Plan-Rüstzeiten entstehen. Ebenso führen terminorientierte Auftragsreihenfolgeeregeln wie Frühester-Plan-Endtermin zugunsten einer höheren Termintreue zu längeren Plan-Rüstzeiten gegenüber einer rüstopimalen Auftragsreihenfolgebildung [2]. Ist-Rüstzeiten verlängern sich durch unzureichende Verfügbarkeit von Hilfsmitteln, Hilfs- und Betriebsstoffen. Zudem trägt eine fehlende Trennung zwischen internen und externen Rüstvorgängen zu einer Verlängerung bei, da Tätigkeiten, die als externe Rüstvorgänge vor dem Maschinenstillstand durchgeführt werden könnten erst währenddessen erfolgen [31]. Ebenso verlängern fehlende oder unklare Rüstanweisungen, Rüstreihenfolgen und Verantwortlichkeiten die Ist-Rüstzeit [31]. Störungen entstehen, wenn für den Produktionsbetrieb erforderliche Ressourcen, das heißt Material, Werkzeuge, Hilfsmittel oder -stoffe, Maschinen oder Personal, nicht synchron bereitstehen [21]. Fehlendes Material lässt sich gemäß Härtel durch verspätete Lieferungen durch Lieferanten oder Verzögerungen/Fehler in der internen Materialbereitstellung begründen. Zuzuordnende Primärursachen nach Härtel gehen aus Abbildung X hervor [4]. Auf das Fehlen von Werkzeug oder Hilfsmittel/-stoffen lassen sich die Ursachen fehlenden Materials übertragen. Daher werden diese nicht gesondert aufgeführt. Der Zeitverlust maschinenbedingter ungeplanter Stillstände ergibt sich nicht nur aus der Störung selbst, sondern maßgeblich aus der benötigten Diagnose- und Reparaturzeit [18]. Lange Diagnose- und Reparaturzeiten können aus fehlenden Ersatzteilen [20], ineffizienten Reparaturprozessen [3], unzureichender Störmeldung oder Diagnosefähigkeit [32], fehlender Anlagendokumentation [3] oder fehlendem beziehungsweise unqualifiziertem Personal [33] resultieren. Das Ausfallrisiko einer Maschine nimmt über die Betriebszeit zu. Bleiben Instandhaltungsmaßnahmen aus, führt zunehmender Verschleiß unweigerlich zu vermehrten technischen Störungen und längeren Stillstandszeiten. Demnach stellen auch veraltete Technologien ein mögliche Ursache dar [33]. Unbemerkte Verschleißindikatoren haben zur Folge,

dass Defekte erst nach Eintritt bei Maschinenstillstand erkannt werden [20]. Zudem können Verunreinigungen und zufällige technische Defekte Maschinenstörungen auslösen [31, 33]. Vor allem in der Anlaufphase von Maschinen kommt unsachgemäße Bedienung häufig als Ursache zum Tragen [34]. Ein Grund für fehlendes Personal kann ungeplante Abwesenheit, beispielsweise durch Krankheit, sein. Dauerhaft hohe Abwesenheitsraten lassen strukturelle Probleme sowie Unzufriedenheit vermuten und erhöhen die Unsicherheit in der Personaleinsatzplanung. Ebenso reduzieren Fehler und Ungenauigkeiten in der Personaleinsatzplanung die Personalverfügbarkeit [3]. Ist Personal verfügbar, kann es dennoch sein, dass sich Stillstandszeiten aufgrund fehlender Qualifikation zur Störungsbehebung verlängern [32]. Unkoordinierte Pausen und Schichtwechsel sowie unklare Verantwortlichkeiten verursachen ebenfalls vermeidbare Stillstandszeiten [33].

Ist der Leistungsgrad jene verlustreiche OEE-Komponente, so sind die Verlustarten Langsamlauf und Kurzstillstände näher zu untersuchen. In der Regel werden geringere Prozessgeschwindigkeiten bei dem Anlauf von Maschinen erwartet (siehe **Bild 5**). Im Produktionsbetrieb können sie durch eine fehlerhafte Maschinenparametrierung oder aber fehlerhafte Anlagenbedienung verursacht werden [20]. Gleichzeitig beeinflusst die Arbeitsproduktivität der Mitarbeitenden den Leistungsgrad der Anlage [35]. Der Langsamlauf kommt einer Abweichung zwischen der Plan- und Ist-Durchlaufzeit an der Anlage gleich. Folglich sind nach Härtel Ursachen einer hohen relativen Terminabweichung in Betracht zu ziehen [4]. Da sich Kurzstillstände nur durch ihre Länge von verfügbareitswirksamen Stillständen unterscheiden, sind oben beschriebene Störeinflüsse auch als mögliche Ursachen von Kurzstillständen zu sehen. Darüber hinaus beeinflusst der WIP das Auftreten von Kurzstillständen. Eine mögliche Ursache ist ein gefüllter der Anlage nachgelagerter Puffer [18]. Gründe dafür können unter anderem eine zu geringe Dimensionierung der Puffer oder Störungen im nachgelagerten Produktionsprozess sein. Zur weiteren Untersuchung der Störungen sei nach oben verwiesen. Sind Anlagen in einem Materialfluss schlecht synchronisiert, so kann auch dies zu einem gefüllten Puffer führen [31]. Es kann zudem der spezielle Fall auftreten, dass der nachgelagerte Produktionsprozess den Engpass des Materialflusses darstellt [12]. Ist ein zu hoher WIP die Ursache für gefüllte Puffer, sei auf die Ursachenanalyse nach Härtel verwiesen [4]. Ein Kurzstillstand entsteht ebenfalls durch einen leeren vorgelagerten Puffer [3]. Analog können Störungen im vorgelagerten Produktionsprozess sowie deren beschriebenen Ursachen und eine schlechte Synchronisation der Anlagen [31] Gründe sein. Ist ein zu geringer WIP der Grund, sei auch hier auf Härtel verwiesen [4]. Liegt zwischen zwei Anlagen eine starre Verkettung vor, so ist nicht der Zustand des Puffers entscheidend, sondern der der nächsten Arbeitssystems. Vor allem in diesem Fall ist die Synchronisation der Anlagen von Relevanz. Zudem kommen Störungen und ihre Ursachen zum Tragen und eine hohe relative Terminabweichung, wenn die Plan-Durchlaufzeit an der nachfolgenden Anlage nicht eingehalten werden kann. In dem Fall ist der Ursachenanalyse nach Härtel zu folgen [4]. Zuletzt ist eine hohe Terminabweichung vorgelagerter Produktionsprozesse als mögliche Ursache von Kurzstillständen zu nennen und erneut auf Härtel zu verweisen [4].

Ursachen von Qualitätsverlusten lassen sich in Anlaufverluste und Ausschuss unterteilen (siehe **Bild 6**), die beide Nacharbeit oder Ersatzproduktion zur Folge haben [21]. Anlaufverluste sind



Bild 4 Ursachenbaum eines geringen Verfügbarkeitsgrads. Grafik: IFA

häufig das Resultat von anfänglichen Instabilität der Maschinenparameter [19]. In der Regel kann erst nach einer Justierungsphase eine fehlerfreie Produktion erfolgen [31]. Zudem kann es in der Anlaufphase vermehrt zu Verunreinigungen kommen [3]. Ursachen für Ausschuss werden danach klassifiziert, ob sie maschi-

nen-, material-, handhabungs- oder prüfbedingt sind [3, 12]. Maschinenbedingter Ausschuss subsumiert jene Ursachen, die Schäden bei der Bearbeitung erzeugen. Maschinenverschleiß oder -defekte können das Produkt bei ihrem Auftreten beschädigen. Ebenso kann eine fehlerhafte Maschinenparametrierung die Ursa-

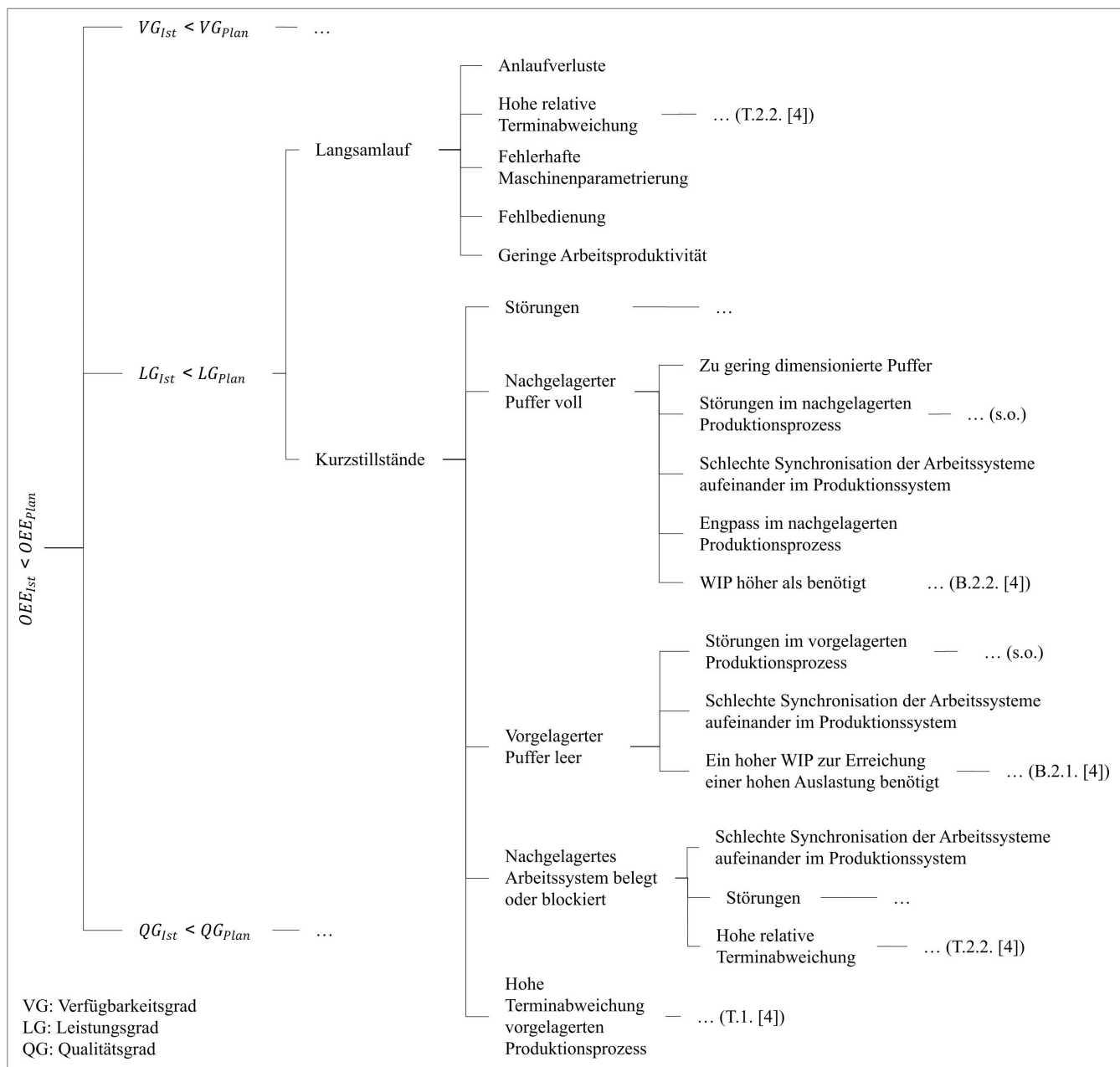


Bild 5 Ursachenbaum eines geringen Leistungsgrad. Grafik: IFA

che darstellen, warum das Produkt Spezifikationen nicht einhalten kann. Es ist noch einmal zu differenzieren, ob Maschinenparameter aufgrund von Prozessinstabilitäten zu Qualitätsmängeln führen [35]. Zudem können Verunreinigungen an der Anlage zu Produktschäden führen. Materialbedingter Ausschuss liegt in der Regel in der Hand der Rohmateriallieferanten. Schwankende Materialbeschaffenheit, Materialfehler oder -verunreinigung resultieren in Ausschuss. Ebenso entsteht Ausschuss, wenn falsches Material verwendet wird. Handhabungsbedingter Ausschuss wird durch Transportschäden, unsachgemäße Handhabung oder ungeeignete Wahl von Werkzeug und Hilfsstoffen verursacht [3]. Prüffehler können dazu führen, dass in Ordnungsteile fälschlicherweise als Ausschuss deklariert werden. In dem Fall sind die Kalibrierung, die Prüf- und Messmethode, die Durchführung der Prüfung oder die Eignung des Prüf- und Messmittels mögliche Ursachen [12].

4 Fallstudie

Zur Erprobung des entwickelten Ursachenbaums der Anlagenproduktivität wird ein Arbeitssystem eines Werkzeugherstellers an 42 Tagen untersucht, dass sich aus 20 Schleifmaschinen zusammensetzt. Das Arbeitssystem hatte einen Gesamtdurchsatz von 55 721 Stück. Die Berechnung des Qualitätsgrads ergibt sich aus dem Verhältnis der täglichen Gutteilmenge und der Tagesausbringungsmenge im Mittel zu 99,4 %. Der Leistungsgrad bestimmt sich aus dem Verhältnis der täglichen Plan-Ausbringungsmenge zu der Ist-Ausbringungsmenge. Die Ausbringungsmenge wird aus Plan- und Ist-Werten der Start- und Endtermine von rückgemeldeten Arbeitsvorgängen auf den Schleifmaschinen bestimmt. Es resultiert ein mittlerer Leistungsgrad von 93,9 %. In den Verfügbarkeitsgrad fließen die tatsächliche Produktionszeit und die mögliche Produktionszeit ein. Als tatsächlichen Produkti-

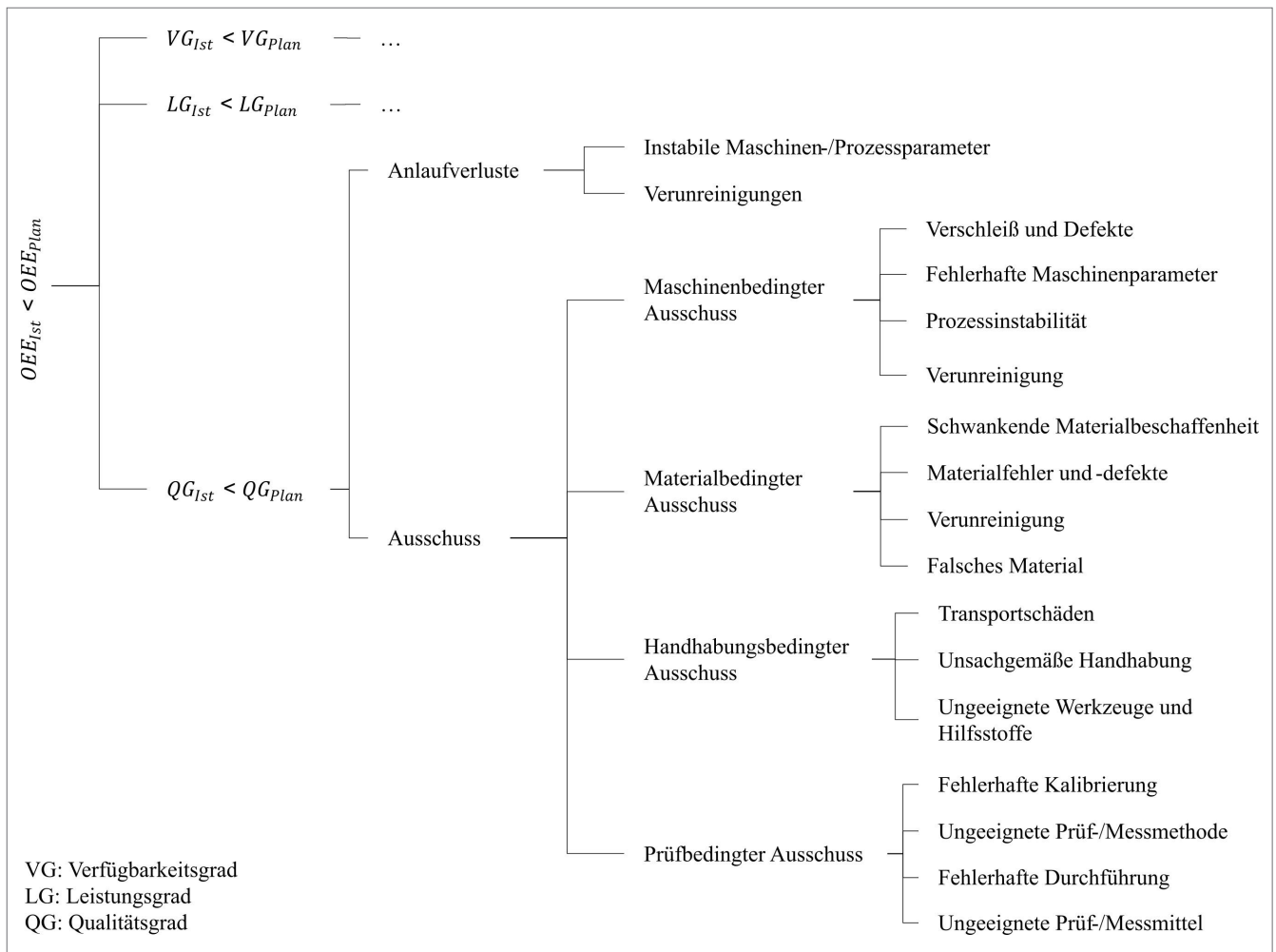


Bild 6 Ursachenbaum eines geringen Qualitätsgrads. Grafik: IFA

onszeit pro Tag wird die Summe der Bearbeitungszeiten der rückgemeldeten Arbeitsvorgänge angenommen. Die mögliche Produktionszeit entspricht einer für das Arbeitssystem als Stammdatum hinterlegten starren Kapazität. Der Verfügbarkeitsgrad des Arbeitssystems berechnet sich im Mittel zu 22,9 %. Letztlich folgt im Mittel daraus eine OEE von 21,3 %, die auf erhebliches Verbesserungspotenzial schließen lässt. Um die im entwickelten Ursachenbaum aufgezeigten Ursache-Wirkungsbeziehungen zu untersuchen, wurde die Spearman-Korrelation zwischen der OEE, ihren Komponenten und aus dem Datensatz bestimmbaren Ursachen höherer Ordnung berechnet. Die Spearman-Korrelation weist monotone Zusammenhänge zwischen zwei Variablen nach. Als Einflussfaktoren konnten der Mittelwert, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient des täglichen Rückstands, der Rüstzeitanteil, die Stillstandsquote und der Ausschuss bestimmt werden. Der Rückstand indiziert als Differenz zwischen Plan- und Ist-Leistung temporäre Störungen oder Kurzstillstände in einem stabilen Produktionsbetrieb [4]. Der Rüstzeitanteil bestimmt sich als das Verhältnis zwischen der Rüstzeiten und des Arbeitsinhalts der rückgemeldeten Arbeitsvorgänge. Die Stillstandsquote ist das Komplement der Auslastung.

Bild 7 zeigt, dass die OEE am stärksten positiv mit dem Verfügbarkeitsgrad korreliert. Die Korrelation mit dem Leistungsgrad ist gering positiv und mit dem Qualitätsgrad liegt nahezu keine Korrelation vor. Wird die geringe Ausprägung des mittleren Ver-

fügarkeitsgrads berücksichtigt, so ist der Verfügbarkeitsgrad für dieses Arbeitssystem als dominante Ursache der geringen OEE zu identifizieren. Der Verfügbarkeitsgrad weist keine signifikante Korrelation mit dem Rüstzeitanteil (im Mittel 16,0 %) auf, jedoch eine hohe negative Korrelation mit der Stillstandsquote. Diese Korrelation weist die Stillstandsquote als dominante Ursache des niedrigen Verfügbarkeitsgrads aus. Die mittlere Stillstandsquote von 35,5 % kann auf vermehrte Störungen an der Anlage hinweisen, wenn kein Unterlastzustand des Arbeitssystems vorliegt. Für die Untersuchung der Störungsursachen bedarf es einer detaillierteren Analyse mit Prozessexperten. Der Leistungsgrad korreliert moderat negativ mit dem Rückstand, sodass Kurzstillstände und Langsamlauf als Ursachen des Leistungsgrads nachgewiesen werden konnten. Der Leistungsgrad stellt aufgrund seiner hohen Ausprägung und nur moderaten Korrelation zur OEE nicht die dominanten Ursache der geringen OEE dar. Auch der Qualitätsgrad ist sehr hoch ausgeprägt und korreliert nahezu kaum mit der OEE, sodass auch hier keine dominante Ursache vorliegt. Der Qualitätsgrad korreliert stark negativ mit dem Ausschuss, sodass dieser als Ursache der Minderung des Qualitätsgrads identifiziert werden konnte. Anlaufverluste können aufgrund einer fehlenden Datengrundlage nicht detaillierter untersucht werden. Da der Rüstzeitanteil jedoch gering ausfällt, lässt sich vermuten, dass diese keine dominante Ursache darstellen. Zwischen den Einflussfaktoren selbst treten monotone Assozia-

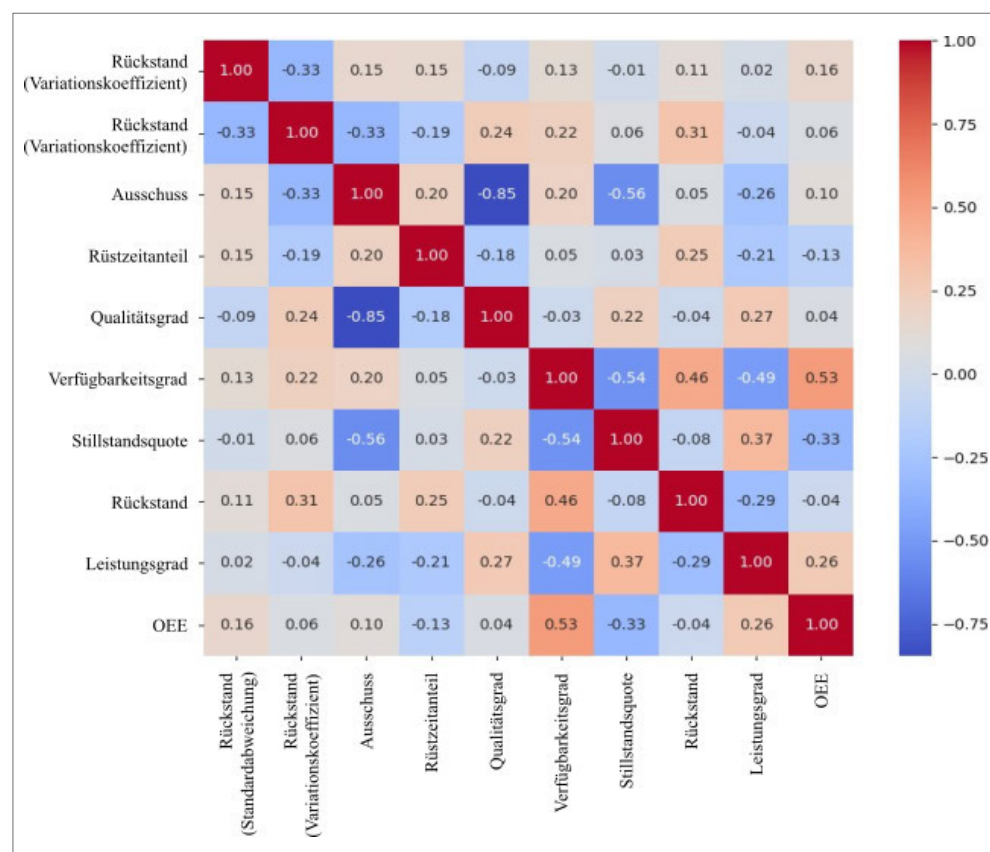


Bild 7 Korrelationsanalyse
Grafik: IFA

tionen auf, die bei Betrachtung des Ursachenbaums jedoch nicht auf kausalen Ursache-Wirkungsbeziehungen basieren. Zusammenfassend konnten also Produktionsstillstände als dominante Ursache der geringen OEE des Arbeitssystems identifiziert werden. Zur detaillierten Untersuchung dominanter Ursachen der Stillstandsquote bedarf es einer umfassenderen Datengrundlage und Prozessexpertenwissen. Ist die Primärursache der hohen Stillstandsquote gefunden, können gemeinsam Maßnahmen erarbeitet werden, um die Primärursache zu mindern und die OEE langfristig zu steigern.

5 Fazit

Zunehmender Kostendruck zwingt Unternehmen dazu, einen hoch-effizienten Produktionsbetrieb zu erreichen, um ihre Wettbewerbsposition langfristig zu sichern. Dafür ist ein kontinuierliches Produktionscontrolling unabdingbar, das Ursachen von Abweichungen relevanter Zielgrößen identifiziert und geeignete Verbesserungsmaßnahmen ableitet. Der Ansatz nach Härtel ermöglicht ein differenziertes Controlling von Zielgrößen aus dem logistischen Zielsystem, welches die Produktivität unberücksichtigt lässt. Existierende Ansätze zur Ursachenanalyse der Anlagenproduktivität setzen häufig fallspezifisch Lean-Management-Methoden ein und fokussieren technologische Einflussfaktoren. Die PPS bietet jedoch ebenfalls eine Vielzahl an Stellschrauben für die Steigerung der Anlagenproduktivität. Daher wurde die Anlagenproduktivität in das logistische Zielsystem eingeordnet. Anschließend wurde ein Ursachenbaum geringer Anlagenproduktivität entwickelt. Die OEE ist eine verbreitete Kennzahl zur Messung der Anlagenproduktivität. Ausgehend von einer Plan-Ist-Abwei-

chung der OEE eines Arbeitssystems wurden Ursachen hierarchisch aufgegliedert. Die Ursachen wurden bis zu jenem Detailgrad herausgearbeitet, auf dem sie sich noch allgemeingültig beschreiben lassen. Auf der ersten Ursachenebenen befinden sich die Komponenten der OEE. Ursachen zweiter Ordnung sind die den Komponenten zugeordneten Verlustarten. Für die Ursachen höherer Grade wurden logistische Ursache-Wirkungsbeziehungen herangezogen. Der Ursachenbaum der Anlagenverfügbarkeit zeichnet sich dadurch aus, dass allgemeingültige Ursache-Wirkungsbeziehungen leicht verständlich aufbereitet sind. Seine hierarchische Struktur vereinfacht die Identifizierung der Primärursache. Zudem zeigt er im Vergleich zu existierenden Ansätzen zentrale Stellschrauben zur Steigerung der OEE in der Produktionsplanung und -steuerung auf. Der entwickelte Ursachenbaum wurde anhand einer Fallstudie an einem Arbeitssystem aus Schleifmaschinen erprobt. Es konnten dominante Ursachen zweiter Ordnung identifiziert werden. Zukünftig bedarf es einer umfassenderen Validierung des Ursachenbaums mit einer umfassenderen Datengrundlage. Zudem sind die Entscheidungspunkte des Ursachenbaums mit einem systematischen Analyseverfahren zu verknüpfen, um standardisiert den wahrscheinlichsten Ursachenpfad zu identifizieren. Zukünftiger Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung der Zielbeziehungen der Produktivität und den logistischen Zielgrößen, um Unternehmen bei der Entscheidung, wie sie sich in dem Spannungsfeld der Zielbeziehungen positionieren sollen, zu unterstützen. Darüber hinaus bietet der Einsatz von Machine Learning die Möglichkeit, die Stärke von Ursache-Wirkungsbeziehungen und Zielbeziehungen zu quantifizieren und so die Priorisierung und Auswahl geeigneter Verbesserungsmaßnahmen zu vereinfachen.



Kofinanziert von der
Europäischen Union



Niedersachsen

FÖRDERHINWEIS

Die Zuwendung besteht aus Mitteln des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) und des Landes Niedersachsen.

LITERATUR

- [1] Kersten, W.; Seiter, M.; See, B. von et al.: Trends and Strategies in Logistics and Supply Chain Management. Digital Transformation Opportunities. Bremen: DVV Media 2017
- [2] Nyhuis, P.; Schmidt, M.: Logistische Modelle der innerbetrieblichen Lieferkette. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2025.
- [3] Gottmann, J.: Produktionscontrolling. Wertströme und Kosten optimieren. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2019
- [4] Haertel, L.: Modellbasierte Datenanalyse zur Identifikation logistischer Schwachstellen in Produktionsbereichen. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, IFA, Hannover 2021.
- [5] Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München: Hanser 2019
- [6] Horváth, P.; Gleich, R.; Seiter, M.: Controlling. München: Verlag Franz Vahlen 2020
- [7] Hannula, M.: Total productivity measurement based on partial productivity ratios. International Journal of Production Economics 78 (2002), Nr. 1, S. 57–67
- [8] Schmidt, M.; Nyhuis, P.: Produktionsplanung und -steuerung im Hannoveraner Lieferkettenmodell. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2021
- [9] Glöckner, R.: Entwicklung eines Gesamtmodells der Arbeitsproduktivität und der logistischen Zielgrößen, Technische Universität Hamburg, Hamburg 2020
- [10] Schnell, H.: Produktionscontrolling: Selbstverständnis, Aufgaben und Instrumente. In: Klein, A. (Hrsg.): Modernes Produktionscontrolling für die Industrie 4.0, S. 21–40. Haufe Lexware 2018
- [11] Steven, M.: Produktionscontrolling. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH 2016
- [12] Helmold, M.; Laub, T.; Flashar, B. et al.: Qualität neu denken. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2023
- [13] Gutenberg, E.: Einführung in die Betriebswirtschaftslehre. Die Wirtschaftswissenschaften (1958), Nr. 15, S. 31–63
- [14] Islam, S.; Syed Shazali, S. T.: Determinants of manufacturing productivity: pilot study on labor-intensive industries. International Journal of Productivity and Performance Management 60 (2011), Nr. 6, S. 567–582
- [15] Rutkauskas, J.; Paulavičienė, E.: Concept of Productivity in Service Sector. Engineering Economics 3 (2005), Nr. 43, S. 29–34
- [16] Günter, A.; Gopp, E.: Overview and classification of approaches -
- [17] to productivity measurement. International Journal of Productivity and Performance Management (2020), S. 1212–1229
- [18] Nakajima, S.: Management der Produktionseinrichtungen. Frankfurt/Main: Campus-Verlag 1995
- [19] Focke, M.; Steinbeck, J.: Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2024.
- [20] Kletti, J.; Rieger, J.: Die perfekte Produktion. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2022
- [21] Al-Radhi, M.: Total Productive Management (TPM). In: Kamiske, G. F. (Hrsg.): Handbuch OM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen, S. 97–130. München: Hanser 2013
- [22] Erlach, K.: Wertstromdesign. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2020
- [23] Andrade, J. J. ; Dreher Silveira, D.: Application of OEE for productivity analysis: a case study of a production line from the pulp and paper industry. DYNA 86 (2019), Nr. 211, S. 9–16
- [24] Ahmad, N.; Hossen, J.; Ali, S. M.: Improvement of overall equipment efficiency of ring frame through total productive maintenance: a textile case. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94 (2018), 1–4, S. 239–256
- [25] Kapuyanyika, M.; Suthar, K.: To Improve the Overall Equipment Effectiveness of Wheel Surface Machining Plant of Railway Using Total Productive Maintenance (2018), S. 1860–1874
- [26] Fam, S.-F.; Loh, S. L.; Haslinda, M. et al.: Overall Equipment Efficiency (OEE) Enhancement in Manufacture of Electronic Components & Boards Industry through Total Productive Maintenance Practices. MATEC Web of Conferences 150 (2018), S. 5037
- [27] Rozak, A.; Jaqin, C.; Hasbullah, H.: Increasing Overall Equipment Effectiveness in Automotive Company Using DMAIC and FMEA Method. Journal Européen des Systèmes Automatisés 53 (2020), Nr. 1, S. 55–60
- [28] Hibarkah Kurnia, Choesnul Jaqin, Humiras Hardi Purba: The PDCA Approach with OEE Methods for Increasing Productivity in the Garment Industry The PDCA Approach with OEE Methods for Increasing Productivity in the Garment Industry (2022), Vol. 10, S. 57–68
- [29] Kang, N.; Zhao, C.; Li, J. et al.: A Hierarchical structure of key performance indicators for operation management and continuous improvement in production systems. International journal of production research 54 (2016), Nr. 21, S. 6333–6350
- [30] Ungermann, F.; Kuhnle, A.; Stricker, N. et al.: Data Analytics for Manufacturing Systems – A Data-Driven Approach for Process Optimization. Procedia CIRP 81 (2019), S. 369–374
- [31] Lucantoni, L.; Antomarioni, S.; Ciarapica, F. E. et al.: A rule-based machine learning methodology for the proactive improvement of OEE: a real case study. International Journal of Quality & Reliability Management 41 (2024), Nr. 5, S. 1356–1376
- [32] Freibichler, W.; Stiehl, A.: Praxishandbuch Operative Wertsteigerung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [33] Koether, R.; Meier, K.-J.: Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2020
- [34] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012
- [35] Reichel, J.; Müller, G.; Haeffs, J.: Betriebliche Instandhaltung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2018
- [36] Benes, G.; Groh, P.: Grundlagen des Qualitätsmanagements. 5., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2022

Kira Welzel 
welzel@ifa.uni-hannover.de

Bendix Kirchhoff

Niklas Müller

Prof. Dr.-Ing. Matthias Schmidt 

Leibniz Universität Hannover
Institut für Fabrikanlagen und Logistik
An der Universität 2, 308223 Garbsen
www.ifa.uni-hannover.de

LIZENZ



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