

Grundlagen einer Methode für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung

Basics for a quality-based job-shop scheduling

Henrik Prinzhorn
Philip Rochow
Peter Nyhuis

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

In der Produktion lassen sich durch den optimalen Einsatz des Produktionsfaktors „Mensch“ produktbezogene Fehlerkosten reduzieren und die Qualität erhöhen. Hierfür müssen menschliche Leistungsschwankungen im Tagesverlauf in der Produktionsplanung und -steuerung berücksichtigt werden. Dieser Artikel stellt die Grundlagen einer Methode für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung unter Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen im Tagesverlauf vor.

[Schlüsselwörter: Produktionsplanung und -steuerung, Belegungsplanung, Qualität, menschliche Leistungskurve]

In production, product-based failure costs can be reduced by focusing the production factor „human“. Therefore, human performance fluctuations during the course of day have to be considered in the production planning and control. This paper presents an approach for quality-orientated flexible job shop scheduling, taking into account human performance fluctuations during the day.

[Keywords: production planning and control, flexible job shop scheduling, quality, human performance fluctuation]

1 EINLEITUNG

Zur Sicherung des Unternehmenserfolges müssen produzierende Unternehmen vorhandene Kunden binden und neue gewinnen. Dies ist eine große Herausforderung in Zeiten eines globalisierten Wettbewerbs und stetigen Wandels durch immer kürzere Produktlebenszyklen [1]. Um die Wettbewerbsposition zu stärken bauen viele europäische Unternehmen auf dem Image einer hohen Produktqualität [2]. Die Qualität produzierter Produkte hat somit für Unternehmen eine hohe Bedeutung [3] und sichert langfristig den Erfolg eines Unternehmens gegenüber Wettbewerbern [4]. Sofern ein Unternehmen die erforderlichen Qualitätsanforderungen nicht erreichen kann, entstehen Fehlerkosten durch bspw. Ausschuss, Nacharbeit, Wiederholprüfungen, Problemuntersuchungen oder Wertminderungen [5].

Laut ROTHLAUF führen Qualitätsdefizite in deutschen produzierenden Unternehmen zu Fehlerkosten von 8 % bis 30 % des Jahresumsatzes [6].

Zur Reduzierung von produktbezogenen Fehlerkosten, also zur Verbesserung der Produktqualität, kommen vielfach Qualitätsmanagementmethoden zum Einsatz (z. B. Total Quality Management (TQM), Total Productive Maintenance, kontinuierliche Verbesserung und KAIZEN) [7]. Anwendungsbereiche dieser Maßnahmen zur Verbesserung der Produktqualität sind die Konstruktion (z. B. durch Poka Yoke), das Qualitätsmanagement und die Produktionsprozessplanung (bspw. Prozess-FMEA) sowie die Optimierung von Maschinen und Prozessen [8]. Der optimale Einsatz des Produktionsfaktors „Mensch“ steht dagegen noch am Anfang, obwohl der Mensch einen unmittelbaren Einfluss auf die Produktqualität hat [9] [10]. Grundlegend hierfür sind Leistungsschwankungen im Tagesverlauf. Also in Zeiten, in denen sich das operative Personal in einem Leistungstief befindet, die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Durchführung eines Fertigungsschrittes (Arbeitsgangs) steigt und folglich höhere Fehlerkosten entstehen. In einem Leistungshoch ist die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Durchführung geringer.

Die Belegungsplanung als Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung hat die Funktion, zu bearbeitende Fertigungsaufträge bzw. Arbeitsgänge zu terminieren (Reihenfolgebildung) und einem Arbeitssystem (z. B. Maschine, Arbeitsplatz, Personal) zuzuordnen. In Anbetracht menschlicher Leistungsschwankungen beinhaltet die Belegungsplanung daher hohes Potenzial produktbezogene Fehlerkosten zu reduzieren bzw. die Produktqualität zu erhöhen. Unter produktbezogenen Fehlerkosten wird Nacharbeit, Ausschuss, Wiederholprüfung und Wertminderung verstanden [9]. Für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung ist eine qualitätsorientierte Bestimmung der menschlichen Leistung unter deutschen Datenschutzrichtlinien erforderlich. Ferner müssen Arbeitsgänge hinsichtlich der für dessen Durchführung benötigten menschlichen Leistung (z. B. Konzentration und Aufmerksamkeit) charakterisiert werden. Die Zusammenführung der leistungsorientierten

Charakterisierung von Arbeitsgängen und der qualitätsorientierten Bestimmung der menschlichen Leistung stellt die Grundlage einer qualitätsorientierten Belegungsplanung dar und beschreibt den Inhalt dieses Beitrags.

2 STAND VON FORSCHUNG UND TECHNIK

Im Folgenden soll das Defizit bzgl. der Berücksichtigung von qualitätsorientierten Leistungskurven in der Belegungsplanung aufgezeigt werden. Daher werden zunächst bisherige Ansätze zur Bestimmung menschlicher Leistungskurven beschrieben. Darauf folgt die Betrachtung von Ansätzen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungskurven in der Belegungsplanung.

2.1 ANSÄTZE ZUR BESTIMMUNG MENSCHLICHER LEISTUNGSKURVEN

Die menschliche Leistung schwankt im Tagesverlauf [11] [12]. Organfunktionen des Menschen (z. B. Körpertemperatur oder Blutdruck) unterliegen in gleichen Abständen wiederkehrenden Mustern, die in etwa der Dauer eines Tages entsprechen [13]. Für solche Muster wird daher auch der Begriff zirkadiane Rhythmik verwendet [14]. Hieraus folgt, dass das operative Personal tageszeitabhängigen Leistungsschwankungen unterliegt, wodurch ihr Aufmerksamkeits- und Konzentrationsvermögen schwankt [15]. Der Einfluss der zirkadianen Rhythmik auf die menschliche Leistung wurde im Rahmen einer Studie von MONK und EMBREY nachgewiesen, indem sie tageszeitabhängige Mundtemperaturen mit der subjektiven Aufmerksamkeit verglichen haben [13].

Aussagen zu tageszeitabhängigen Schwankungen der Leistungsfähigkeit basieren auf einer von BJERNER ET AL. durchgeführten Studie [16] und der von GRAF aufgestellten physiologischen Arbeitskurve bzw. physiologischen Leistungskurve (siehe Abbildung 1) [12]. Anhand dieser Leistungskurve steigt die Leistung des Menschen ab 6 Uhr morgens stark an, erreicht zwischen 9 Uhr und 11 Uhr ein Maximum und fällt wieder bis knapp 15 Uhr zu einem Tiefpunkt ab. Nachmittags steigt die Kurve bis zu einem erneuten, jedoch flacherem Maximum an. Im Anschluss sinkt die Leistungskurve nochmals und erreicht zwischen 2 Uhr und 4 Uhr nachts ihr Minimum [17] [18]. Nach POTTHAST berücksichtigt die physiologische Leistungskurve jedoch keine zentralen körperlichen Tätigkeiten, sondern nur geistige Tätigkeiten. Es kann demnach nur auf eine verminderte psychische Leistungsbereitschaft des Menschen geschlossen werden [18]. Weiterhin sind durch Mittelwertbildung über den langen Betrachtungszeitraum existierende Unterschiede zwischen Personen nicht ersichtlich [19]. Des Weiteren werden produktionslogistische bzw. qualitätsorientierte Aspekte wie Ausschuss, Nacharbeit usw. nicht berücksichtigt. Die Übertragbarkeit der physiologischen Leistungskurve von GRAF auf Tätigkeiten in der Produktion ist demnach nicht gegeben.

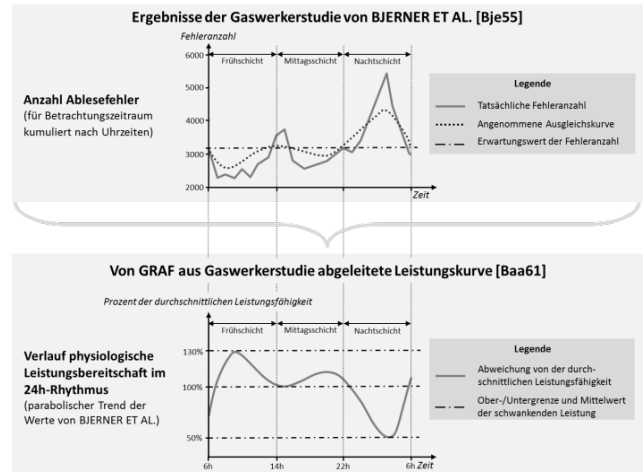


Abbildung 1. Herleitung der Leistungskurve von Graf

Zirkadiane Leistungsschwankungen des operativen Personals in der industriellen Produktion wurden erstmals von POTTHAST nachgewiesen [18]. Die Auffassung menschlicher Leistung basiert hierbei auf dem von REFA (Arbeitsleistung pro Zeit) sowie der Gliederung der Arbeitsleistung in extrapersonelle und intrapersonelle Einflussgrößen [20]. Hierbei ist anzumerken, dass die Grundlage von REFA die physiologische Leistungskurve von GRAF ist. Laut POTTHAST müssen bei der Bestimmung der menschlichen Leistungskurve sowohl geistige als auch manuelle Tätigkeiten betrachtet werden sowie konstante Rahmenbedingungen während der Untersuchung vorliegen. Grundlage der Leistungskurve ist die Bestimmung von Leistungsgraden des operativen Personals. Ein Leistungsgrad stellt das Verhältnis der Soll- zur Ist-Bearbeitungszeit eines Arbeitsgangs zu einem Zeitpunkt dar. Anhand der Darstellung der Leistungsgrade über der Zeit lässt sich durch Interpolation bzw. Polynombildung die Leistungskurve ableiten. Bei der Bestimmung der Leistungskurve bzw. den Leistungsgraden werden demnach keine qualitätsorientierten Aspekte berücksichtigt. Zudem kann das Vorgehen nach POTTHAST aufgrund deutscher Datenschutzrichtlinien nicht eingesetzt werden, weil auf die menschliche Leistung einer einzelnen Person geschlossen werden kann.

2.2 ANSÄTZE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG MENSCHLICHER LEISTUNGSKURVEN IN DER BELEGUNGSPLANUNG

Unter der Prämisse, die Qualitätssicherung zu verbessern, entwickelte RAUCH-GEBBENSLEBEN ET AL. ein Simulationsmodell, indem Eingangsdaten für Data-Mining-Verfahren erstellt werden [21]. In dem Simulationsmodell dienen der Werkzeugverschleiß und die Leistungsbereitschaft der Mitarbeiter als Parameter, um den Einfluss auf die Entstehung von Produktfehlern vor der Auslieferung zu bestimmen. Mit Hilfe des Simulationsmodells kann anhand der aktuellen Tageszeit die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Produktfehlers durch den Mitarbeiter beschrieben

ben werden. Allerdings wurden für den Parameter der Leistungsbereitschaft nicht eigens erhobene Daten verwendet. Innerhalb des Simulationsmodells wird ebenfalls kein Belegungsplan erstellt.

BUARQUE DE MACEDO GUIMARÃES ET AL. haben eine Methode zur Berücksichtigung zirkadianer Leistungsschwankungen in der Arbeitsorganisation entwickelt [22]. Anwendungsbereich der Methode ist die Arbeitsplanung von Elektrikern für die Wartung und Ersetzung von Hochleistungsspannungsleitungen. Hierbei werden Arbeitsinhalte von einzelnen Tätigkeiten nach der Intensität des Stresses zugeordnet. Unter Berücksichtigung der Leistungskurve werden besonders stressvolle Tätigkeiten im Leistungshoch durchgeführt. Allerdings wurden keine elektrikerspezifischen Leistungskurven zu Grunde gelegt, sondern die Kurvenverläufe von MONK und EMBREY berücksichtigt. Die zu Grunde gelegte Leistungskurve folgt demnach keiner qualitätsorientierten Bestimmung.

Im Forschungsprojekt BioTakt werden Taktzeiten an Montagefließsystemen an die im Tagesverlauf schwankende Leistung des operativen Personals angepasst [23]. Durch dieses Vorgehen sollen Über- und Unterforderungen des operativen Personals verringert werden. Innerhalb des Forschungsprojektes wurde jedoch kein Verfahren für die Belegungsplanung entwickelt. Auf diesem Forschungsprojekt aufbauend hat sich GLONEGGER mit der Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Planung von Montagefließsystemen beschäftigt [24]. Hierbei wurden analog zu POTTHAST Ist-Bearbeitungszeiten erhoben sowie zeitpunktabhängige Leistungsgrade, bezogen auf die Soll-Bearbeitungszeit, ermittelt. Die Leistungskurve wurde durch Polynombildung der zeitbezogenen Auftragung der Leistungsgrade abgeleitet. Der Fokus liegt hierbei auf der Untersuchung des Einflusses der Variantenvielfalt der Produkte auf die menschliche Leistung an Montagefließsystemen [25]. Aufgrund des Fließprinzips hängen die Arbeitsabläufe bzw. die menschliche Leistung mitunter jedoch voneinander ab. Aufgrund der festgelegten Reihenfolge der Arbeitsabläufe im Fließprinzip ist das Potenzial einer qualitätsorientierten Belegungsplanung eingeschränkt. Zudem erfolgt die Bestimmung des Leistungsgrads bzw. der Leistungskurven nicht qualitätsorientiert.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass aus wissenschaftlicher Sicht der Nachweis zirkadianer Leistungsschwankungen in der industriellen Produktion erbracht wurde. Eine qualitätsorientierte Bestimmung der menschlichen Leistungskurve unter deutschen Datenschutzrichtlinien ist gegenwärtig aber noch nicht möglich. Ferner existiert keine Methode für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung. Im Folgenden sollen daher die Grundlagen für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung beschrieben werden.

3 ANSATZ EINER QUALITÄTSORIENTIERTEN BELEGUNGSPLANUNG

Das Ziel einer qualitätsorientierten Belegungsplanung ist, Produktionsaufträge bzw. Arbeitsgänge mit einem hohen Bedarf an menschlicher Leistung in Zeiträumen durchzuführen, in denen sich das operative Personal im Leistungshoch befindet. Im Vergleich zu einer Durchführung von Produktionsaufträgen bzw. Arbeitsgängen mit geringem Bedarf an menschlicher Leistung in Leistungstiefs. Aus logistischer Sicht führt dies unter Umständen zu einer Erhöhung des Bestands sowie zu einer Erhöhung der Durchlaufzeiten von Produktionsaufträgen.

Im Folgenden werden zunächst die Annahmen beschrieben, unter denen eine qualitätsorientierte Belegungsplanung möglich ist (siehe Abbildung 3). Im Anschluss wird eine Berechnungsvorschrift für einen qualitätsorientierten Leistungsgrad erläutert. Danach erfolgt die Erläuterung eines Vorgehens zur Charakterisierung von Arbeitsgängen hinsichtlich des Bedarfs an menschlicher Leistung. Die Zusammenführung qualitätsorientierter Leistungsgrade und leistungsorientierter Charakterisierung ermöglicht schließlich eine qualitätsorientierte Belegungsplanung.

3.1 BEGRIFFLICHKEITEN UND ANNAHMEN FÜR EINE QUALITÄTSORIENTIERTE BELEGUNGSPLANUNG

Ein Produktions- bzw. Fertigungsauftrag besteht aus einem oder mehreren Arbeitsgängen (AG). Für die qualitätsorientierte Belegungsplanung werden lediglich Arbeitsgänge betrachtet, bei denen „Fehler“ durch menschliches Verhalten verursacht werden können. In Anbetracht dessen wird angenommen, dass im Falle eines Fehlers durch das operative Personal die „Qualität“ eines Halbproduktes bzw. Produktes reduziert wird. Unter einer Reduzierung der Qualität wird ein fehlendes (Ausschuss) oder fehlerhaftes (Nacharbeit) Halbprodukt bzw. Produkt verstanden. Halbprodukte oder Produkte, welche kein Ausschuss sind, können daher auch als Gutteile bezeichnet werden. Ausschuss beschreibt die Nichteinhaltung der Qualitätsanforderungen eines Produktes, wobei unter Nacharbeit Tätigkeiten zur Wiederherstellung der Qualitätsanforderungen verstanden werden. Die Wirkung eines Fehlers (Ausschuss oder Nacharbeit) ist demjenigen Arbeitsgang zuzuordnen, welcher für die Entstehung verantwortlich ist (Verursachungsprinzip). Zulieferkomponenten, welche nicht den geforderten Qualitätsanforderungen entsprechen und im Herstellungsprozess in der Qualitätsprüfung ein Ausschuss bewirkt, werden nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für Reklamationen aufgrund von Zulieferkomponenten, welche nachweislich nicht den Qualitätsanforderungen entsprechen haben. Die Bestimmung der menschlichen Leistung beinhaltet qualitätsorientierte Aspekte, welche letztlich die Definition von produktbezogenen Fehlerkosten ermöglicht.

Für die Bestimmung der menschlichen Leistung im Tagesverlauf existieren unterschiedliche Ansätze. Unter Vernachlässigung subjektiver Empfindungen des operativen Personals (Morgen- bzw. Abendmensch) kann bspw. eine allgemeingültige qualitätsorientierte menschliche Leistungskurve, ähnlich dem Verlauf von POTTHAST, angenommen werden (siehe Abbildung 2). Durch Approximation dieser angenommenen qualitätsorientierten menschlichen Leistungskurve durch eine hinreichend große Zahl von Approximationspunkten lässt sich diese mathematisch beschreiben. Für den Verlauf der angenommenen qualitätsorientierten Leistungskurve kann ferner davon ausgegangen werden, dass die tageszeitliche Leistung um den Mittelwert schwankt und die Schwankung insgesamt umso höher ist, umso höher die Aufmerksamkeits- bzw. Konzentrationsanforderungen (Komplexität) des Produktionsauftrags bzw. Arbeitsgangs ist. Innerhalb der Approximationsfunktion lässt sich dies mit einem normierten Dämpfungsfaktor zwischen 0 und 1 berücksichtigen.

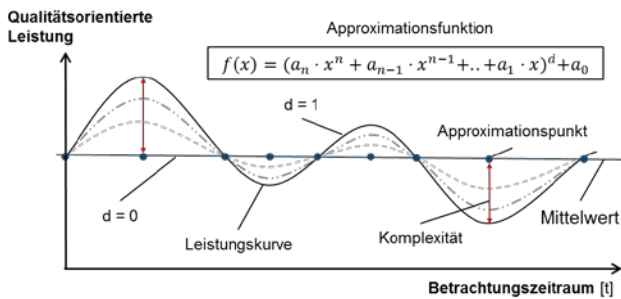


Abbildung 2. Approximation der menschlichen Leistungskurve

Entgegen diesem Vorgehen wird in diesem Beitrag ein Ansatz vorgestellt, welcher eine qualitätsorientierte Leistungskurve durch die Bestimmung qualitätsorientierter Leistungsgrade von Produktionsaufträgen bzw. Arbeitsgängen über den Tagesverlauf ermöglicht. Ein Leistungsgrad beschreibt dabei das Angebot bzw. die verfügbare menschliche Leistung zu einem Zeitpunkt. Bei der Bestimmung eines Leistungsgrades werden alle qualitätsorientierten Fertigungsereignisse berücksichtigt, welche bis zum Erreichen der Sollmenge eines Produktionsauftrags auftreten. Ferner wird für die Identifizierung bzw. Behebung eines Fehlers (Qualitätsprüfung) Zeit benötigt. Die Behebung erfolgt entweder direkt am Arbeitsplatz, wo der Arbeitsgang durchgeführt wird oder in einem gesonderten Nacharbeitsbereich (z. B. vorherige Kommissionierung fehlerhafter Produkte). Aufgrund des Verursachungsprinzips wird die zusätzlich benötigte Zeit zur Identifizierung und Behebung eines Fehlers demjenigen Arbeitsgang zugeschrieben wird, welcher ursächlich für den Fehler ist. Der Wertebereich des qualitätsorientierten Leistungsgrads ist positiv und nicht auf 100% beschränkt.

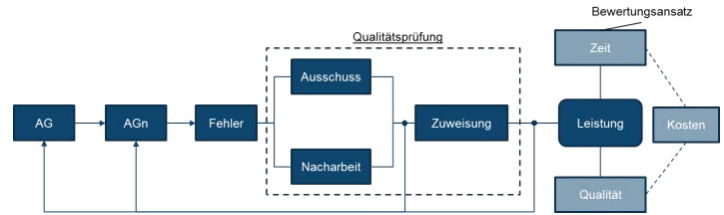


Abbildung 3. Rahmenbedingungen einer qualitätsorientierten Belegungsplanung

3.2 BESTIMMUNG QUALITÄTSORIENTIERTER LEISTUNGSGRAD

Der qualitätsorientierte Leistungsgrad setzt sich wie folgt zusammen (siehe Gleichung (1)).

$$LG_{ijt}^q = \sum_{n=1}^N \frac{SOLL - Zeit_{ijn}}{IST - Zeit_{ijnt}} \quad (1)$$

- mit
- LG_{ijt}^q Qualitätsorientierter Leistungsgrad
 - i Produktionsauftrag
 - j Arbeitsgang
 - n : Anzahl Messungen zum Zeitpunkt t
 - t : Zeitpunkt Datenaufnahme

Die Summe in Gleichung (1) beschreibt den qualitätsorientierten Leistungsgrad als Quotient von zeitpunktunabhängiger SOLL-Zeit (Vorgabezeit) und zeitpunktabhängiger IST-Zeit eines Arbeitsgangs. Die IST-Zeit umfasst die Zeit für die Bearbeitung eines Arbeitsgangs sowie die Zeit zur Fehleridentifikation und Behebung. Diese Komponente beinhaltet demnach den qualitätsorientierten Aspekt „Nacharbeit“. Die Zeit zur Fehleridentifizierung und Behebung wird im Folgenden auch als Extrazeit verstanden. Daraus folgt, dass die Extrazeit gleich 0 ist, wenn kein Fehler verursacht wird. In diesem Fall werden Leistungsschwankungen analog zum Vorgehen von Potthast über das Verhältnis von Soll-Bearbeitungszeit und Ist-Bearbeitungszeit bestimmt. Der Wertebereich des qualitätsorientierten Leistungsgrads kann folglich größer als 1 und kleiner gleich 1 sein. Letztlich werden qualitätsorientierte Leistungsgrade zeitpunktabhängig (z. B. Startzeitpunkt eines Arbeitsgangs) durch Summenbildung ermittelt.

3.3 LEISTUNGSORIENTIERTE CHARAKTERISIERUNG VON PRODUKTIONSAUFTRÄGEN /ARBEITSGÄNGEN

Für die Vergleichbarkeit von Arbeitsgängen hinsichtlich der für die Durchführung benötigten menschlichen Leistung werden nachfolgend fünf Merkmale (M1 bis M5) beschrieben. Diese Merkmale müssen unabhängig von der Berechnungsvorschrift des qualitätsorientierten Leistungsgrads sein, um eine transparente leistungsorientierte Charakterisierung zu ermöglichen.

Das erste Merkmal zur Charakterisierung eines Arbeitsgangs hinsichtlich des Bedarfs an menschlicher Leistung ist der Anteil an manuellen Tätigkeiten im Vergleich zu maschinellen Tätigkeiten (M1). Als zweites Merkmal werden die Fehlerkosten zu Grunde gelegt (M2). Die Fehlerkosten eines Arbeitsgangs setzen sich aus den anteiligen Lohnkosten des operativen Personals, den Materialkosten und Maschinenkosten sowie den Gemeinkosten zusammen. Weiterhin ist der Individualitätsgrad eines Arbeitsgangs für den Bedarf an menschlicher Leistung entscheidend (M3). Hierbei wird die Annahme getroffen, dass eine geringe Individualität mit einem hohen Standardisierungsgrad gleichzusetzen ist. Ein hoher Individualitätsgrad steht für eine geringe Vertrautheit des operativen Personals mit einem Arbeitsgang. Ein weiteres Charakterisierungsmerkmal ist die sogenannte Bedeutsamkeit eines Arbeitsgangs (M4). Ein Arbeitsgang ist sehr bedeutend, wenn für die Herstellung vieler Produkte die Durchführung dieses Arbeitsgangs unumgänglich ist, also häufig benötigt wird. Eine hohe Bedeutsamkeit eines Arbeitsgangs äußert sich unter anderem auch darin, dass eine Vielzahl an nachfolgenden Arbeitsgängen auf den betrachteten Arbeitsgang aufbauen. Das fünfte Merkmal beschreibt die Fehleranfälligkeit eines Arbeitsgangs (M5). Die Handhabung unhandlicher Bauteile bzw. fehlende Vorrichtungen an Maschinen, welche falsches Einlegen von Komponenten verhindern (Poka Yoke), stellen potenzielle Quellen für Fehlerursachen durch das operative Personal dar.

3.4 KONZEPT EINER QUALITÄTSORIENTIERTEN BELEGUNGSPLANUNG

Die Grundlage einer qualitätsorientierten Belegungsplanung ist die Zusammenführung der qualitätsorientierten menschlichen Leistungskurve mit einer leistungsorientierten Charakterisierung von Arbeitsgängen. Für die leistungsorientierte Charakterisierung eines Arbeitsgangs wird jedes Merkmal in eine Morphologie überführt und individuell auf einer Skala, bspw. zwischen 1 und 10, bewertet. Die subjektive Bewertung der Merkmale eines Arbeitsgangs erfolgt im Vergleich zu den anderen Arbeitsgängen. Eine hohe Bewertung bedeutet, dass ein Merkmal besonders hoch ausgeprägt ist. Die Summe der bewerteten Merkmale eines Arbeitsgangs wird im Weiteren als Anspruchskennzahl verstanden (siehe Abbildung 4). In dem in Abbildung 4 dargestellten Beispiel wird für die Durchfüh-

rung des ersten Arbeitsgangs folglich eine hohe menschliche Leistung benötigt. Zur weiteren leistungsorientierten Differenzierung wird eine Anzahl an sogenannten Anspruchsbereichen festgelegt (bspw. fünf). Durch Multiplikation der Anzahl an definierten Merkmalen zur Charakterisierung eines Arbeitsgangs und dem Maximalwert der Bewertungsskala ergibt sich die maximal erreichbare Anspruchskennzahl (hier: $5 \cdot 10 = 50$). Unter der Annahme, dass alle Anspruchskennzahlen, welcher ein Arbeitsgang haben kann, gleichverteilt den Anspruchsbereichen zugeordnet werden, lässt sich ein Arbeitsgang anhand der entsprechenden Anspruchskennzahl einem Anspruchsbereich zuordnen.

Arbeitsgang (AG)	Merkmalsausprägung					Anspruchskennzahl
	M1	M2	M3	M4	M5	
AG1	7	5	10	9	10	41
AG2	4	6	7	4	8	29
AG3	3	2	3	8	4	20

Abbildung 4. Beispielhafte leistungsorientierte Charakterisierung von Arbeitsgängen

Nachfolgend werden qualitätsorientierte Leistungsgrade eines Arbeitsgangs anhand von Gleichung (1) bestimmt. Die hierfür benötigten Leistungsdaten werden mitarbeiteranonymisiert aufgenommen. Für die weitere Anonymisierung der Leistungsdaten wird der mittlere qualitätsorientierte Leistungsgrad über den Betrachtungszeitraum ermittelt. Jeder qualitätsorientierte Leistungsgrad wird im Anschluss mit dem mittleren qualitätsorientierten Leistungsgrad normiert. Die gemittelten qualitätsorientierten Leistungsgrade werden schließlich über der Zeit, also dem Zeitpunkt der Datenaufnahme, aufgetragen. Das Ergebnis ist eine mitarbeiteranonymisierte, qualitätsorientierte, menschliche Leistungskurve, welche den deutschen Datenschutzrichtlinien entspricht. Die Leistungskurve stellt folglich das zeitpunktbezogene Angebot an qualitätsorientierter menschlicher Leistung dar. Die Leistungskurve lässt sich dann in unterschiedliche Leistungsangebotsbereiche (hier 1 bis 5) differenzieren. Dabei grenzt jeder Leistungsangebotsbereich einen Abschnitt ab, in denen das operative Personal eine bestimmte Leistung bereitstellt. Die globalen Extrempunkte (Minimum, Maximum) der qualitätsorientierten Leistungskurve dienen nachfolgend

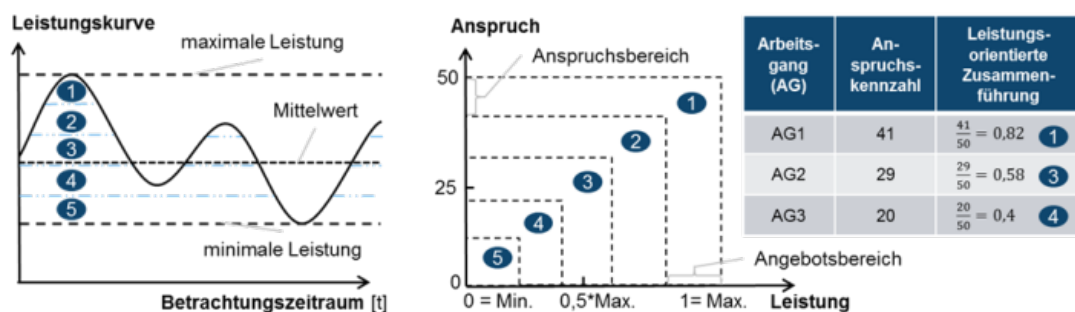


Abbildung 1: Anwendungsbeispiel

als Grenzwerte. Wie zuvor wird auch hier eine Gleichverteilung des Leistungsangebots über die Leistungsangebotsbereiche angenommen. Vereinfachung halber entspricht die Anzahl an Leistungsangebotsbereichen der Anzahl an Anspruchsbereichen. Bezogen auf die beispielhaften Arbeitsgänge aus Abbildung 4 ist das Ergebnis dieser beiden Differenzierungen in Abbildung 5 dargestellt. Arbeitsgang 1 hat beispielsweise eine Anspruchskennzahl von 41. Bezogen auf den Maximalwert ergibt sich ein Quotient von 0,82. Dieser kann dem Angebotsbereich 1 zugeordnet werden. Arbeitsgang 1 sollte demnach in einem Zeitraum durchgeführt werden, in dem die menschliche Leistung mindestens 80% der maximalen Leistung beträgt, um Fehlerkosten zu reduzieren.

Anhand von Abbildung 5 ist ersichtlich, dass durch die leistungsorientierte Charakterisierung eines Arbeitsgangs und unter Berücksichtigung der Leistungskurve qualitätsorientierte Zuordnungen von Arbeitsgängen zu einem Zeitbereich durchgeführt werden können (Belegungsplanung). Je nach zeitlicher Zuordnung der Arbeitsgänge entsteht eine bestimmte Reihenfolge. Letztlich ist innerhalb der Belegungsplanung eine qualitätsorientierte Annahme zu definieren. Hierunter ist zu verstehen, ob das operative Personal einen Arbeitsgang in einem Zeitraum durchführen kann, obwohl der Leistungsbedarf höher als das Leistungsangebot ist. Falls nicht, können Überlastungen des operativen Personals vermieden werden. Solch eine qualitätsorientierte Annahme würde jedoch vermutlich eine Verschlechterung der logistischen Leistungsfähigkeit bewirken. Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass das Potenzial für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung umso höher ist, umso höher die Freiheitsgrade bzgl. der Aufgabenzuordnung in der Produktion sind (z. B. Werkstattfertigung vs. Fließfertigung). Gemäß dem Verlauf der menschlichen Leistung können kleine Losgrößen als Anwendungsvoraussetzungen formuliert werden.

4 ZUSAMMENFASSUNG, NUTZEN UND AUSBLICK

Innerhalb der PPS beinhaltet der Produktionsfaktor „Mensch“ hohes Potenzial produktbezogene Fehlerkosten zu reduzieren bzw. die Produktqualität zu erhöhen, indem in der Belegungsplanung menschliche Leistungsschwankungen im Tagesverlauf berücksichtigt werden. Dieser Artikel stellt die Grundlage für eine qualitätsorientierte Belegungsplanung vor. Bestandteile der Methode sind eine qualitätsorientierte Berechnungsvorschrift der menschlichen Leistung (Leistungskurve) sowie ein Vorgehen zur leistungsorientierten Charakterisierung von Arbeitsgängen. Mit Hilfe einer Morphologie und Zusammenführung dieser Bestandteile wird schließlich die Grundlage für ein qualitätsorientiertes Planungsmodell der Belegungsplanung geschaffen.

Ein wesentlicher Nutzen dieses Ansatzes besteht in der qualitätsorientierten Bestimmung der menschlichen Leistung unter Berücksichtigung einer unternehmerischen Priorisierung. Zudem wird eine leistungsorientierte Charakterisierung von Arbeitsgängen geschaffen. Zur praxisnahen Anwendung

einer qualitätsorientierten Belegungsplanung wird im nächsten Schritt die Problemstellung einer qualitätsorientierten Belegungsplanung als mathematisches Optimierungsproblem formuliert. Daraufhin erfolgt die Entwicklung eines Verfahrens zur Lösung des Optimierungsproblems, um letztlich Erkenntnisse über den Einfluss von qualitätsorientierten Leistungsschwankungen auf die produktionslogistischen Zielgrößen zu erlangen.

FÖRDERHINWEIS

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsprojekts *Qualitätsorientierte Belegungsplanung*. Das IGF-Vorhaben 18312 N der Forschungsgemeinschaft Qualität e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] H.-P. Wiendahl, *Betriebsorganisation für Ingenieure*, München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2010.
- [2] H. D. Seghezzi und J. R. Hansen, *Qualitätsstrategien - Anforderungen an das Management der Zukunft*, München und Wien: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [3] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V., *Leitthesen für Qualität in Deutschland*, München: Carl-Hanser-Verlag, 2012.
- [4] G. F. Kaminske und J.-P. Brauer, *Qualitätsmanagement von A bis Z: Erläuterung moderner Begriffe des Qualitätsmanagements*, München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2008.
- [5] W. Geiger und K. W., *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements - Systeme und Perspektiven*, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2008.
- [6] J. Rothlauf, *Total Quality Management in Theorie und Praxis: Zum ganzheitlichen Unternehmensverständnis*, München: Oldenburg Wissenschaftsverlag, 2010.
- [7] T. Pfeiffer, *Qualitätsmanagement Strategien, Methoden und Techniken*, München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2001.

- [8] E. H. Hartmann, TPM - Effiziente Instandhaltung und Maschinenmanagement, München: mi-Fachverlag, 2007.
- [9] P. Rochow, C. Böning und H. Prinzhorn, „Qualitätsorientierte Belegungsplanung,“ *Zeitung für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Nr. 10, pp. 599-602, 2015.
- [10] E. Hering, J. Triemel und H.-P. Blank, Qualitätsmanagement für Ingenieure, Berlin u. a.: Springer Verlag, 2003.
- [11] H. O. Günther und H. Tempelmeier, Supply Chain und Operationsmanagement, Norderstedt, 2014.
- [12] O. Graf, Arbeitsablauf und Arbeitsrhythmus - Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, Bd. 1, Berlin, München und Wien: Verlag Urban & Schwarzenberg, 1961.
- [13] T. H. Monk und D. E. Embrey, A field study of circadian rhythms in actual and interpolated task performance, Oxford: Pergamon Press, 1981.
- [14] J. Gärtner, Handbuch Schichtpläne - Planungstechnik, Entwicklung, Ergonomie und Umfeld, Zürich: vdf Hochschulverlag, 1998.
- [15] W. H. Spriggs, Essentials of Polysomnography, London: Jones & Bartlett Publishers, 2009.
- [16] B. Bjerner, A. Holm und A. Swensson, „Diurnal Variation in Mental Performance,“ *British Journal of Industrial Medicine*, Bd. 12, p. S. 103 ff, 1955.
- [17] C. Schlick, R. Bruder und H. Luczak, Arbeitswissenschaften, Heidelberg u. a.: Springer Verlag, 2010.
- [18] J.-M. Potthast, Nachweis zirkadianer Leistungsschwankungen bei manuellen Montagetätigkeiten, Hannover: Dissertation, Universität Hannover, 2013.
- [19] H.-V. Ulmer, „Graf-concept of circadian rhythms of working capacity - paradigmatical error by wrong generalization,“ *Pflügers Archiv - European Journal of Physiology*, Nr. 447, p. 153, 2004.
- [20] H.-O. Günter und H. Tempelmeier, Produktion und Logistik, Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, 2012.
- [21] B. Rauch-Gebbensleben, F. Kähne, G. Horton, N. Schlitter, S. Schilz und M. Neike, „Ein Simulationsmodell zur Nachbildung von unternehmensübergreifenden Produktionsfehlern,“ *Advances in simulation for production and logistics applications*, pp. 309-318, 2008.
- [22] L. Guimaraes, J. Ribeiro, T. Saurin und P. Homem de Bittencourt, „Circadian rhythms as a basis of work organization. A study with live line electricians,“ *The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, Bd. 55, Nr. 1, pp. 204-217, 2013.
- [23] G. Reinhart, M. Glonegger, J. Egbers, J. Schilp, A. Göritz und J. Weikamp, „Taktzeitadaption unter Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik,“ *wt Werkstatttechnik online*, Nr. 9, pp. 595-599, 2011.
- [24] M. Glonegger, Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen, München : Technische Universität München, Dissertation, 2014.
- [25] Betriebsorganisation, Verband für Arbeitsstudien und, Arbeitsgestaltung in der Produktion, München: Hanser Verlag, 1991.

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis, Jahrgang 1957, ist Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik (IFA) der Leibniz Universität Hannover und geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH.

M. Sc. Philip Rochow Jahrgang 1986, war Projektingenieur am IPH – Institut für Integrierte Produktion gemeinnützige GmbH bis Januar 2016.

M. Sc. Henrik Prinzhorn Jahrgang 1987, ist Projektingenieur am IPH – Institut für Integrierte Produktion gemeinnützige GmbH.

Adresse: Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: + 49 511 / 279 76-446, E-Mail: prinzhorn@iph-hannover.de, URL: <http://www.iph-hannover.de>