

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für

Betriebswissenschaften und Montagetechnik

**Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der
Planung von Variantenfließmontagesystemen**

Matthias Glonegger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis
(Leibniz Universität Hannover)

Die Dissertation wurde am 20.05.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.08.2014 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis, dem Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik an der Leibniz Universität Hannover, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts sowie Industrie- und Forschungspartnern für die stets angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Besonders hervorheben möchte ich dabei Herrn Dr.-Ing. Jörg Egbers, der mich erstmals für das Thema „Mensch in der Fabrik“ begeistern konnte. Wolfgang Ottmann, Julia Weikamp und Dr.-Ing. Bernd Britzke haben durch umfangreiche Gespräche auch lange nach Feierabend viel zum Gelingen des Forschungsprojekts und somit dieser Dissertation beigetragen. Vielen Dank für die zielgerichtete aber trotzdem lockere Arbeitsatmosphäre! Des Weiteren gilt mein Dank Jakob Lutz, Markus Pröpster und Dr.-Ing. Jörg Egbers, die das Manuskript kritisch begutachtet und viele wertvolle Anregungen beigesteuert haben. Bei den Studierenden, die meine Forschung in Form von Studienarbeiten und hilfswissenschaftlichen Tätigkeiten begleitet haben, bedanke ich mich für ihr Interesse und Engagement. Darüber hinaus möchte ich dem Freistaat Bayern danken, der anwendungsorientierte Forschung in diesem Umfang fördert.

Ein besonderer Dank gilt Johanna, die mir als Unbekannte, Bekannte, Partnerin, Verlobte und schließlich als Ehefrau Rückhalt in den unterschiedlichen Phasen des Promotionsvorhabens gegeben hat.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Irene und Peter, die Bildung als höchstes Gut betrachten und mich stets ermutigt haben, den nächsten Schritt zu gehen. Ohne ihre wohlwollende Unterstützung wäre diese Dissertation nie zustande gekommen. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

Garching b. München, im September 2014

Matthias Glonegger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	ix
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Handlungsbedarf.....	4
1.3 Zielsetzung dieser Arbeit.....	7
1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs	9
1.4.1 Leistungserstellungsprozess.....	9
1.4.2 Fließmontage als Element des Leistungserstellungsprozesses ..	12
1.4.3 Abgrenzung der Variantenfließmontage.....	14
1.5 Aufbau der Arbeit	15
2 Grundlagen dieser Arbeit.....	19
2.1 Kapitelüberblick.....	19
2.2 Menschliche Leistung	19
2.2.1 Reale Bearbeitungszeit als wesentlicher Leistungsfaktor.....	20
2.2.2 Normleistung und Leistungsgrad	21
2.2.3 Menschliche Leistungsvoraussetzungen.....	23
2.2.4 Anpassungsmerkmale des menschlichen Leistungsangebots	26
2.2.5 Fazit: Leistung	27

2.3	Menschliche Leistungsschwankungen	28
2.3.1	Inter- und intraindividuelle Leistungsschwankungen	28
2.3.2	Periodische Einflüsse auf das menschliche Leistungsangebot..	29
2.3.3	Fazit: Leistungsschwankungen.....	31
2.4	Systembedingte Stellhebel zur Beeinflussung menschlicher Leistungsschwankungen.....	32
2.4.1	Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung	33
2.4.2	Leistungsabstimmung als relevante Phase der PPS.....	35
2.4.3	Fazit: Stellhebel der Leistungsabstimmung.....	39
2.5	Fehlbeanspruchungen in der Variantenfließmontage.....	40
2.5.1	Belastungs-Beanspruchungs-Konzept.....	40
2.5.2	Belastungssituation in der heutigen Variantenfließmontage.....	41
2.5.3	Folgen erhöhter Beanspruchung für den Montagemitarbeiter...	43
2.5.4	Fazit: Beanspruchungen	44
2.6	Fazit	45
3	Stand der Erkenntnisse und Handlungsbedarf.....	47
3.1	Kapitelüberblick	47
3.2	Ergonomie als Planungsgrundlage manueller Montagearbeitsplätze...	48
3.3	Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge	50
3.3.1	Möglichkeiten zur Erhebung und Beeinflussung der Mitarbeiterbelastung im Produktionsumfeld	50
3.3.2	Planung der Bearbeitungszeit	53
3.3.3	Aufbereitung erhobener Bearbeitungszeiten	57

3.3.4	Analyse erhobener Bearbeitungszeiten.....	58
3.4	Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage.....	59
3.4.1	Flexibilisierung des Personaleinsatzes.....	60
3.4.2	Entkopplung der Bearbeitungszeit.....	61
3.4.3	Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen	62
3.4.4	Planung von organisatorischen Unterbrechungen des Arbeitsrhythmus.....	64
3.5	Defizite bestehender Ansätze und Handlungsbedarf.....	65
3.5.1	Defizite bestehender Ansätze.....	65
3.5.2	Konkretisierung des Handlungsbedarfs	69
4	Anforderungen an die Methode und Lösungsansatz.....	71
4.1	Grundlegende Anforderungen an die Methode	71
4.2	Lösungsansatz.....	72
4.2.1	Methode 1: Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten.....	72
4.2.2	Methode 2: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen	73
4.3	Fazit.....	73
5	Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten	75
5.1	Überblick über die Methode	75
5.2	Vorbereitende Erläuterung: Beschreibung der grundlegenden Datenstruktur.....	76
5.3	Anforderungsermittlung an die Erhebung von Bearbeitungszeiten	77

5.3.1	Grundlegende Anforderungen	77
5.3.2	Anforderungen an die Arbeitsstation.....	78
5.3.3	Anforderungen an die Bauteilvariante.....	80
5.3.4	Anforderungen an die Zeitmessung.....	82
5.3.5	Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit manueller Montagetätigkeiten	86
5.4	Statistische Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten	87
5.4.1	Variantenhäufigkeits-basierte Datensatz-Eliminierung.....	89
5.4.2	Zeitpunkt-basierte Datensatz-Eliminierung.....	90
5.4.3	Bearbeitungszeiten-basierte Datensatz-Eliminierung	94
5.5	Fazit	96
6	Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage	97
6.1	Überblick über die Methode	97
6.2	Spezifizierung der Untersuchungsmerkmale.....	98
6.2.1	Zeitmerkmale.....	98
6.2.2	Leistungsmerkmale.....	101
6.2.3	Tätigkeitsmerkmale	103
6.2.4	Zwischenfazit: Untersuchungsmerkmale	105
6.3	Umsetzung von Handlungsempfehlungen durch logische Verknüpfung von Untersuchungsmerkmalen.....	106
6.3.1	Handlungsempfehlung zur Bearbeitungszeit aus logischer Verknüpfung von Leistungs- und Zeitmerkmalen	107

6.3.2	Handlungsempfehlung zum Tätigkeitsmix aus logischer Verknüpfung von Tätigkeits- und Leistungsmerkmalen	115
6.4	Fazit.....	123
7	Umsetzung, Anwendung und Bewertung der Methoden	125
7.1	Kapitelüberblick.....	125
7.2	Umsetzung in einem Software-Tool für den Anwender	125
7.3	Anwendung der entwickelten Methoden in einer Feldstudie bei einem Motorenhersteller	126
7.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung.....	127
7.3.2	Methodenschritt 1: Datenstruktur, Erhebung von t_{Ist} und Aufbereitung von t_{Ist}	127
7.3.3	Methodenschritt 2: Berücksichtigung von menschlichen Leistungsschwankungen	131
7.3.4	Kritische Betrachtung der Feldstudie	137
7.4	Bewertung der entwickelten Methoden	138
7.4.1	Bewertung in Bezug auf die Anforderungen an die Methode	138
7.4.2	Bewertung des Verhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen	140
7.5	Fazit.....	142
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	143
8.1	Zusammenfassung	143
8.2	Ausblick	144

9	Literaturverzeichnis.....	147
10	Anhang	167
10.1	Anhang A: Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	167
10.2	Anhang B: Inhaltliche Ausführungen.....	169
10.2.1	Schema der menschlichen Leistungsbereiche	169
10.2.2	Altersbedingte Zunahme mitarbeiterabhängiger Leistungsunterschiede	170
10.2.3	Engpassarbeitsplatz	172
10.2.4	Grundlagen der deskriptiven Statistik	173
10.2.5	Anforderungen an die Zeitmessung: Fall 2	176
10.2.6	Visualisierung erhobener aber fehlerbehafteter Rohdatensätze der Bearbeitungszeit.....	177
10.2.7	Visualisierung des Software-Tools zu Implementierung der entwickelten Methoden	179
10.3	Anhang C: Genannte Firmen und Verbände	180

Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme

AG	Aktiengesellschaft
ANOVA	Analysis of variance
AP	Arbeitsplatz
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
BAUA	Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BG	Baugruppe
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures (Internationales Büro für Maß und Gewicht)
BMI	Bundesministerium des Inneren
BMW	Bayerische Motorenwerke
CIRP	College International pour la Recherche en Productique (Internationale Akademie für Produktionstechnik)
DAK	Deutsche Angestellten-Krankenkasse
DB	Datenbank
Def.	Definition
DIN	Deutsche Industrienorm
EN	Europäische Norm
et al.	et alii/aliae/alia (und andere)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GUI	Graphical User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
h	Stunde(n)
IBM	International Business Machines

ID	Identifikationsnummer
ISO	International Organization for Standardization
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Kfz	Kraftfahrzeug
Min.	Minute(n)
Nr.	Nummer
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung (heute: Verband für Arbeitsstudien)
RVAGAnpG	Rentenversicherung-Altersgrenzenanpassungsgesetz
S.	Seite(n)
Sek.	Sekunde(n)
SPSS	Statistic Package for Social Sciences (Statistik- und Analysier-Software)
SQL	Standard Query Language
SvZ	System vorbestimmter Zeiten
TUM	Technische Universität München
UAS	Universelles Analysiersystem
Ü50	Über-50-Jährige
Var	Variante
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Verzeichnis der Formelzeichen

3σ	Konfidenzintervall mit 99,73 % innerhalb des zu untersuchenden Bereichs
α	Standardtätigkeit „Auspacken“
β	Standardtätigkeit „Behandeln“
γ	Standardtätigkeit „Festspannen und Lösen“
δ	Standardtätigkeit „Klebearbeiten“
ε	Standardtätigkeit „Elektrik / Leitungen verlegen“
ζ	Standardtätigkeit „Markieren“
η	Standardtätigkeit „Normteile montieren“
θ	Standardtätigkeit „Prüfen oder Messen“
ι	Standardtätigkeit „Schraubarbeiten“
σ_j	Abweichung der Untersuchungsgröße vom Mittelwert einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
A	Produktionsphase A
a	Phasenabschnitt a
B	Produktionsphase B
b	Phasenabschnitt b
C	Produktionsphase C
c	Phasenabschnitt c
D	Produktionsphase D
d	Phasenabschnitt d
E	Produktionsphase E

EW	Erwartungswert
EW_A	Erwartungswert der Produktionsphase A
EW_a	Erwartungswert des Phasenabschnittes a
EW_B	Erwartungswert der Produktionsphase B
EW_b	Erwartungswert des Phasenabschnittes b
EW_C	Erwartungswert der Produktionsphase C
EW_c	Erwartungswert des Phasenabschnittes c
EW_D	Erwartungswert der Produktionsphase D
EW_d	Erwartungswert des Phasenabschnittes d
EW_E	Erwartungswert der Produktionsphase E
EW_F	Erwartungswert der Produktionsphase F
EW_m	Erwartungswert des Phasenabschnittes m
EW_p	Erwartungswert eines Zeitabschnittes p
EW_r	Erwartungswert einer Produktionsphase r
EW_s	Erwartungswert eines Phasenabschnittes s
EW_u	Erwartungswert einer Merkmalsausprägung u
EW_w	Erwartungswert des Phasenabschnittes w
EW_x	Erwartungswert des Phasenabschnittes x
EW_y	Erwartungswert des Phasenabschnittes y
EW_z	Erwartungswert des Phasenabschnittes z
F	Produktionsphase F
H_0	Nullhypothese einer Teststatistik
H_A	Alternativhypothese einer Teststatistik

h	Laufvariable einer Merkmalsausprägung [1,2,...,n]
i	Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]
i_c	Datensätze des Phasenabschnittes c
i_D	Datensätze der Produktionsphase D
j	Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]
k	Standardtätigkeit
k_j	Anteil einer Standardtätigkeit k an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [α,β,\dots,n]
$k_{j,Neu}$	Neuer Anteil einer Standardtätigkeit k an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [α,β,\dots,n]
LG	Leistungsgrad
LG_\emptyset	Durchschnittlicher Leistungsgrad
LN_{Ist}	IST-Leistungsniveau
$LN_{Ist,D,i}$	IST-Leistungsniveau einer Datensatz-Nr. i der Produktionsphase D
$LN_{Ist,i,j}$	IST-Leistungsniveau einer Datensatz-Nr. i einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$LN_{Ist,j}$	IST-Leistungsniveau einer Arbeitsplatz- und Varianten-Kombination j
$LN_{Ist,k}$	IST-Leistungsniveau einer Standardtätigkeit
$LN_{Ist,p}$	IST-Leistungsniveau eines Zeitabschnittes p
$LN_{Ist,r,i}$	IST-Leistungsniveau einer Datensatz-Nr. i einer Produktionsphase r
$LN_{Ist,s,i}$	IST-Leistungsniveau einer Datensatz-Nr. i eines Phasenabschnittes s

$LN_{\emptyset,p}$	Durchschnittliches Leistungsniveau des betrachteten Zeitabschnittes p
m	Phasenabschnitt m
n	Anzahl
P_{Mensch}	Menschliches Leistungsangebot
P_{Phys}	Physikalische Leistung
p	Zeitabschnitt
Q_{Arbeit}	Arbeitsqualität
R	Aufgabenerfüllung
r	Laufvariable für das Zeitmerkmal Produktionsphase [A,B,...,n]
s	Laufvariable für das Zeitmerkmal Phasenabschnitt [a,b,c,d,m,w,x,y,z]
s_u	Standardabweichung einer Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägung u
s_{EW}	Standardabweichung eines Erwartungswertes
T	Aufgabenstellung
t	Zeitdauer
t_A	Bearbeitungszeit der Produktionsphase A
t_a	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes a
t_B	Bearbeitungszeit der Produktionsphase B
t_b	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes b
t_C	Bearbeitungszeit der Produktionsphase C
t_c	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes c
t_D	Bearbeitungszeit der Produktionsphase D

t_d	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes d
t_E	Bearbeitungszeit der Produktionsphase E
t_F	Bearbeitungszeit der Produktionsphase F
t_{Ist}	Reale erhobene Bearbeitungszeit
$t_{Ist,j}$	Reale erhobene Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$t_{Ist,j,i}$	Reale erhobene Bearbeitungszeit einer Datensatz-Nr. i einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
t_m	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes m
t_n	Reale erhobene Bearbeitungszeit nach Messzeitpunkt
$t_{n,Var}$	Anteil der realen erhobenen variablen Bearbeitungszeit nach Messzeitpunkt
t_{Plan}	Geplante Bearbeitungszeit
$t_{Plan,AP2,VarA}$	Geplante Bearbeitungszeit der Variante A montiert auf Arbeitsplatz 2
$t_{Plan,AP2,VarB}$	Geplante Bearbeitungszeit der Variante B montiert auf Arbeitsplatz 2
$t_{Plan,j}$	Geplante Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$t_{Plan,k,j}$	Geplante Bearbeitungszeit einer Standardtätigkeit k einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$t_{Plan,p}$	Geplante Bearbeitungszeit eines Zeitabschnittes p
t_r	Bearbeitungszeit einer Produktionsphase r
t_s	Zeitdauer eines Phasenabschnittes s
t_v	Reale erhobene Bearbeitungszeit vor Messzeitpunkt

$t_{v,Var}$	Anteil der realen erhobenen variablen Bearbeitungszeit vor Messzeitpunkt
t_w	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes w
t_x	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes x
t_y	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes y
t_z	Bearbeitungszeit des Phasenabschnittes z
$t_{\emptyset j}$	Durchschnittliche Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$t_{\emptyset,AP2,VarA}$	Durchschnittliche Bearbeitungszeit von Variante A montiert auf Arbeitsplatz 2
u	Merkmalsausprägung
\bar{u}	Arithmetisches Mittel
u_i	i -te Merkmalsausprägung
VK	Variationskoeffizient
VK_1	Variationskoeffizient der Arbeitsplatz-Varianten-Kombination 1
VK_2	Variationskoeffizient der Arbeitsplatz-Varianten-Kombination 2
VK_{EW}	Variationskoeffizient eines Erwartungswertes
VK_j	Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$VK_{j,initial}$	Initialer Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$VK_{j,neu}$	Neuer Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$\overline{VK_{j,Neu}}$	Arithmetischer Mittelwert eines neuen Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
VK_k	Variationskoeffizient einer Standardtätigkeit k

VK_u	Variationskoeffizient einer Merkmalsausprägung u
W	Arbeit
w	Phasenabschnitt w
x	Phasenabschnitt x
x_j	Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebotes einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$x_{j,initial}$	Initiale Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebotes einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$x_{j,neu}$	Neue Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebotes einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
y	Phasenabschnitt y
z	Phasenabschnitt z

1 Einleitung

*„Ein jeder trägt eine produktive Einzigkeit in sich,
als den Kern seines Wesens.“*

Friedrich Nietzsche (1844 - 1900), Philosoph

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Das Verarbeitende Gewerbe¹ gilt als Konjunkturmotor hochentwickelter Länder (WIENERT 2009). Im Jahre 2010 erarbeiteten in Deutschland 209.000 Unternehmen dieses Sektors einen Umsatz von 1,75 Billionen Euro (STATISTISCHES BUNDESAMT 2012). Grundsätzlich beruhen der Wohlstand und die wirtschaftliche Stellung Deutschlands auf Produktivität und technischem Fortschritt (VDI 2012). Die produktionstechnische Forschung ist deshalb von ausschlaggebender Bedeutung für die Beschäftigung und die Zukunft Deutschlands, weshalb die Bundesregierung sie zu einer der tragenden Säulen ihrer Hightech-Strategie gemacht hat (ABELE & REINHART 2011).

Die Anforderungen an die produzierenden Unternehmen haben sich durch einen steigenden Konkurrenzdruck und eine Globalisierung der Märkte in den letzten Jahren stark gewandelt (MAZZOLA ET AL. 2008). Neben wachsenden Ansprüchen (z. B. sinkende Lieferzeiten bei gleichzeitig steigendem Rationalisierungsdruck) stehen Unternehmen den Herausforderungen eines immer weiter zunehmenden internationalen Wettbewerbs durch neue Produkte und Varianten bei immer kürzeren Produktlebenszyklen gegenüber (WIENDAHL ET AL. 2004).

Zur Reaktion auf diese Entwicklungen setzen Betriebe u. a. auf eine verstärkte Kundenorientierung und eine Besetzung von Marktnischen durch eine Ausweitung des Produktspektrums. Dies hat in den letzten Jahren zu einer erheblichen Zunahme der Prozess- und Produktionssystemkomplexität in Unternehmen geführt (ELMARAGHY & URBANIC 2003, WIENDAHL ET AL. 2004). „Wo früher noch ein Mindestmaß an Stabilität und Kontinuität prävalent war, sind heute Dynamik und Diskontinuität an der Tagesordnung.“ (WESTKÄMPER ET AL. 2001)

¹ Das Verarbeitende Gewerbe umfasst die Herstellung von Waren, die nach ihrer Fertigung als Vorleistungsgüter, Investitionsgüter, Gebrauchs- und Verbrauchsgüter verwendet werden. Dabei wird sowohl die industrielle als auch die handwerkliche Fertigung sowie die Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen einbezogen (DESTATIS 2012). Der Automobil- und Maschinenbau sowie die Herstellung von Metallerzeugnissen repräsentieren dabei den Kern der Produktionsunternehmen.

Da die Struktur industrieller Produktion vorwiegend von technischen Entwicklungen bestimmt wird, haben Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen im Bereich der Produktionstechnik im Wesentlichen auf die zunehmende Automatisierung verschiedener Produktionsprozesse abgezielt. Dadurch entwickelten sich, basierend auf der 1908 von Henry Ford entworfenen Produktion nach dem Fließprinzip, komplexe und auf kostengünstige Massenfertigung ausgelegte Fabrikstrukturen (WIENDAHL ET AL. 2004)

Von den im Jahre 2011 insgesamt 6,9 Mio. im Verarbeitenden Gewerbe erwerbstätigen Bundesbürgern (STATISTISCHES BUNDESAMT 2012) wurde ein substantieller Anteil innerhalb der Strukturen einer Fließproduktion beschäftigt. Doch obwohl Unternehmen erkannt haben, dass der Mitarbeiter² die relevanteste Wertquelle darstellt und sich Investitionen in das Humankapital³ in einer langfristigen Verbesserung der Unternehmensergebnisse widerspiegeln, hat sich in der Fließproduktion in den letzten Jahrzehnten hinsichtlich der Mitarbeiterbelastung im Wesentlichen nichts geändert (LOTTER & SCHILLING 1994, BULLINGER ET AL. 2009) (siehe Abbildung 1-1).

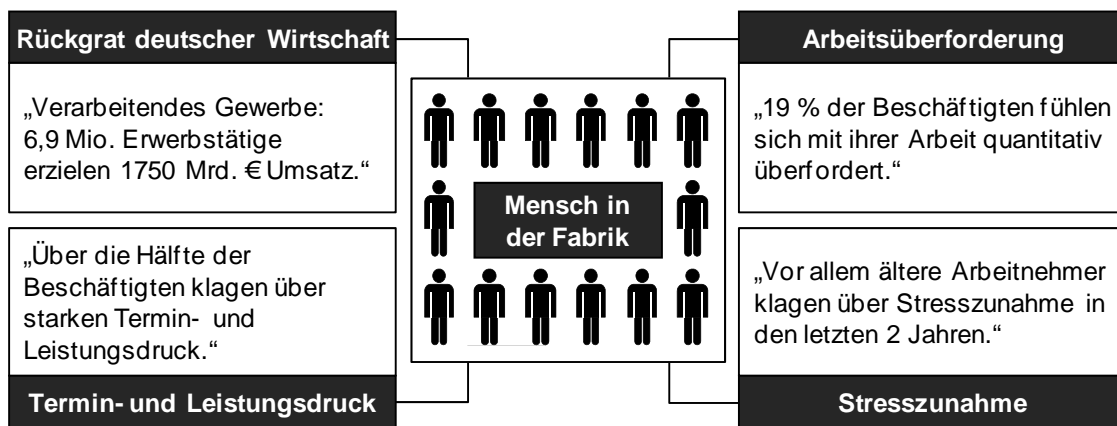


Abbildung 1-1: Der Mensch als zentrales Element in der Fabrik und seine aktuellen Belastungsmerkmale (in Anlehnung an STATISTISCHES BUNDESAMT 2012, BAUA 2012, GLONEGGER & OTTMANN 2013)

² Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird hier und im Folgenden auf die Verwendung von Paarformen verzichtet. Stattdessen wird die grammatikalisch maskuline Form verallgemeinernd verwendet (generisches Maskulinum). Diese Bezeichnungsform umfasst gleichermaßen weibliche und männliche Personen, die damit selbstverständlich gleichberechtigt angesprochen sind.

³ Als Humankapital wird die Summe der einem Unternehmen durch den Arbeitsvertrag zur Verfügung gestellten Leistungspotenziale seiner Mitarbeiter verstanden (ASCHOFF 1978).

Nach Ergebnissen einer Befragung des „Stressreports Deutschland 2012“ beklagen Arbeitnehmer vor allem die fortlaufende Beschleunigung von Produktionsprozessen bei steigender Komplexität der Aufgaben und zunehmenden Lernanforderungen (BAUA 2012). Das Gefühl, immer mehr Aufgaben immer rascher erledigen zu müssen, kennzeichnet gegenwärtig die Befindlichkeit vieler Erwerbstätiger, wobei eine Arbeit unter Termin- und Leistungsdruck zur zentralen Arbeitsbelastung in der heutigen Arbeitswelt zählt (BAUA 2012). In dem in dieser Dissertation zu untersuchenden Tätigkeitsfeld des Montagemitarbeiters fallen die Merkmale „hohe Verantwortung“ und „hoher Zeitdruck“ mit jeweils 42 % stark belasteter Beschäftigter besonders ins Gewicht (FIGGEN & SEILER 2009). In diesem Zusammenhang bemängeln knapp ein Fünftel aller befragten Beschäftigten eine Zunahme der mengenmäßigen Arbeitsüberforderung (BAUA 2012). Vor allem ständig wiederkehrende Arbeitsvorgänge mit vorgegebener Stückzahl und Zeit, wie sie in der Fließproduktion überwiegend zu finden sind, müssen im Fokus zukünftiger Betrachtungen hinsichtlich der Belastungen im Verarbeitenden Gewerbe stehen (BAUA 2012).

Den altersabhängigen Zusammenhang zwischen Fließproduktion und Belastung stellen u. a. die Ergebnisse zum Stressempfinden dar (BAUA 2012). Denn repetitive Arbeitstätigkeiten bei einem von automatisierten Arbeitsprozessen bestimmten Arbeitstempo als wesentliche Merkmale einer Fließmontage gelten als besonders belastende Aufgaben für ältere Personen (SCHLICK ET AL. 2009). Vor allem bei langfristigem Anhalten einer Überforderung kann dies zu Beschwerden und zu Erkrankungen führen (BAUA 2012). Der Erhalt der Arbeitsfähigkeit gilt als Schlüsselfaktor für den Umgang mit dem Megatrend Demografischer Wandel⁴ (KNAUTH ET AL. 2009, ABELE & REINHART 2011).

⁴ Unter dem demografischen Wandel werden Tendenzen in der Bevölkerungsentwicklung verstanden, die eine grundlegende Änderung der Altersstruktur einer Gesellschaft beschreiben (Abele & Reinhart 2011). Im Volksmund wird damit die derzeit in Deutschland stattfindende Veralterung der Bevölkerung bezeichnet.

1.2 Handlungsbedarf

Aus den Entwicklungen produzierender Unternehmen in den vergangenen Jahren lässt sich erkennen, dass Flexibilität⁵, z. B. hinsichtlich des Personaleinsatzes, das zentrale Anforderungskriterium industrieller Produktion darstellt (BEACH ET AL. 2000, WESTKÄMPER ET AL. 2001, BAINES & KAY 2002, WIENDAHL ET AL. 2004, DENKENA ET AL. 2012). Damit Unternehmen mit einem variantenreichen Produktspektrum den Marktanforderungen genügen können, müssen sie mit einer dafür geeigneten betrieblichen Technologie von ausreichender Flexibilität ausgestattet sein. Dabei ist Variantenvielfalt gekennzeichnet durch die Anzahl der unterschiedlichen Ausführungsformen eines Teiles, einer Baugruppe oder eines Produktes (WIENDAHL ET AL. 2004) und erhöht die Flexibilitätsanforderungen an die Produktion. Eine flexible Montage zeichnet sich durch eine kurze Reaktions- und Anpassungsfähigkeit auf Mengen-, Varianten-, und Terminänderungen sowie Produktwechsel aus (WESTKÄMPER ET AL. 2001).

Insbesondere im Bereich der manuellen Montage liegt der Schlüssel für ein leistungsstarkes Montagesystem in der flexiblen Gestaltung der menschlichen Arbeit (WILLNECKER 2000). So muss der Mensch bei der Entwicklung von Arbeitsbereichen als Hauptfaktor und integraler Bestandteil des zu gestaltenden Systems, einschließlich des Arbeitsablaufs und der Arbeitsumgebung, gelten (DIN EN ISO 6385 (2004)). Denn er stellt einen der Grundpfeiler der Leistungsfähigkeit eines Montagesystems dar (BAINES & KAY 2002).

Die Produktion nach dem Fließprinzip hat sich seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts durch Pioniere wie Frederick Winslow Taylor oder Henry Ford stetig weiterentwickelt (BECKER & SCHOLL 2006). Jedoch haben bessere Fließbandsysteme, mechanisierte Werkzeuge, nach ergonomischen Gesichtspunkten gestaltete Arbeitsplätze und teilweise Automatisierung kraftaufwendiger Vorgänge die Arbeit in der Montage nur zu einem relativ geringen Grad erleichtert (LOTTER & SCHILLING 1994). Freiheitsgrade der Arbeitspersonen hinsichtlich Arbeitsweise,

⁵ „Unter Flexibilität wird die Fähigkeit verstanden, ein System schnell und mit geringen Zusatzkosten reversibel innerhalb eines durch bekannte Maßnahmen vorgegeben Korridors an sich ändernde Randbedingungen anzupassen.“ (REINHART & SCHELLMANN 2012) Die obere und die untere Flexibilitäts-grenze beschränken den Flexibilitätskorridor, innerhalb dessen eine wirtschaftliche Produktion durch vorgeplante Anpassungsmaßnahmen möglich ist (REINHART & SCHELLMANN 2012). Die Flexibilität in der Produktion kann definiert werden als die Anpassbarkeit eines Systems an die Veränderungen hinsichtlich Art und Menge der zu produzierenden Produkte, der Produktionsanforderungen sowie der Produktionsbedingungen (LOTTER & WIENDAHL 2006).

Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitspausen zeigen sich nach wie vor deutlich eingeschränkt (SCHLICK ET AL. 2009).

Arbeit innerhalb einer Fließproduktion wird aus sozial-humaner Sicht aufgrund hoher Monotonie und einseitigen Belastungen vielfach abgelehnt, da der Tätigkeits- und Handlungsspielraum der Mitarbeiter sowie deren Möglichkeit zur individuellen Leistungsentfaltung relativ gering sind (KRATZSCH 2000). Starre Verkettungen ohne Entkopplungsmöglichkeiten zwischen aufeinanderfolgenden Arbeitsstationen resultieren in kurzzyklischen Arbeitsabläufen, die unter hochgradigen Zeit- und Verhaltenszwängen ausgeführt werden müssen (WIENDAHL 1989, HETTINGER & WOBBE 1993, BLOHM ET AL. 1997).

In Abbildung 1-2 wird auf der linken Seite eine in Unternehmen typische systembedingte Leistungsnachfrage visualisiert. Dabei resultieren starre Taktzeiten⁶ aus der gleichmäßigen Verteilung von SOLL-Stückzahlen über den gesamten Tag (BULLINGER 1986, REFA 1990). Zur Durchführung eines oder mehrerer Arbeitsgänge⁷ für Werkstücke an einem Arbeitsplatz wird eine maximale Bearbeitungszeit dispositiv festgelegt, nach deren Ablauf die Bauteile an die folgende Station weitergegeben werden (BOYSEN 2005, CIRP 2012).

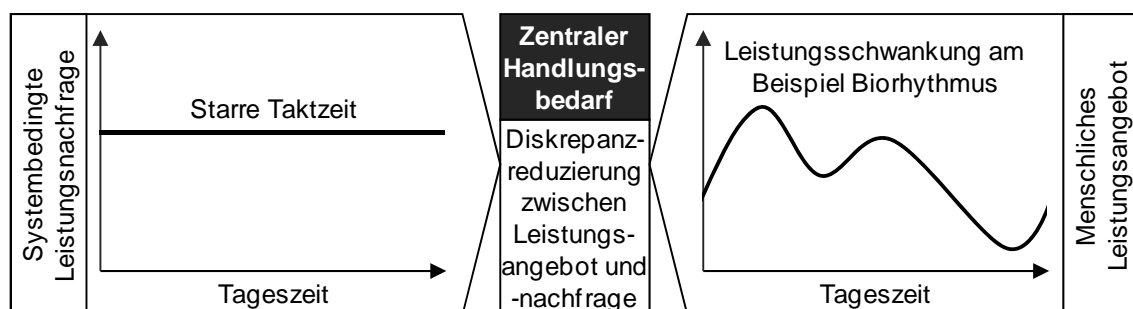


Abbildung 1-2: *Diskrepanz zwischen starrer systembedingter Leistungsnachfrage und schwankendem menschlichem Leistungsangebot (in Anlehnung an BJERNER ET AL. 1955, GRAF 1960)*

⁶ Der Arbeitsplatz mit der längsten Zykluszeit bestimmt die sog. „Taktzeit“, die eine feste Zeitspanne zwischen dem Eintritt eines Produktes in die Station bis zu dessen Austritt beschreibt (LEOPOLD 1997, BECKER & SCHOLL 2006, BOYSEN ET AL. 2007, ARNOLD ET AL. 2008, CIRP 2012).

⁷ „An einem im Fließsystem zu bearbeitenden Werkstück müssen mehrere Arbeitsgänge vollzogen werden, bis es als fertiges Produkt das Fließsystem verlässt. Diese Arbeitsgänge werden auch Elementartätigkeiten genannt, wenn sie als kleinste Einheiten des Produktionsprozesses aus ökonomischen oder technischen Gründen nicht weiter zerlegt werden können.“ (BOYSEN 2005)

Auf der anderen Seite gilt das menschliche Leistungsangebot als flexibel (siehe Abbildung 1-2, rechte Seite). Fast alle menschlichen Körperfunktionen verändern sich innerhalb eines gewissen Bezugszeitraums mehr oder weniger stark um einen Mittelwert (SCHLICK ET AL. 2009). Neben vielen weiteren periodischen Einflüssen auf das menschliche Leistungsangebot stellt die zirkadiane Rhythmik den für die Arbeitsgestaltung wichtigsten Zyklus dar (SCHLICK ET AL. 2009). Sie beschreibt Leistungsschwankungen innerhalb einer Dauer von etwa 24 Stunden (BJERNER ET AL. 1955, GRAF 1960), wobei das Arbeiten nach diesem Rhythmus als besonders natürlich empfunden wird (SCHLICK ET AL. 2009).

Eine stochastische Zeitabbildung der Arbeitsgeschwindigkeit würde es ermöglichen, Mitarbeiter-Leistungsschwankungen in Form variabler Ausführungszeiten durch z. B. Lerneffekte, periodische Rhythmen oder Verbesserungen im Produktionsprozess umsetzen zu können (KRATZSCH 2000, BOYSEN 2005). Jedoch werden menschliche Leistungsschwankungen weder in der Planung⁸ noch im Betrieb heutiger Fließmontagesysteme berücksichtigt (FLETCHER ET AL. 2008). Bearbeitungszeiten einzelner Arbeitsgänge manueller Montagetätigkeiten werden deterministisch geplant und fließen als konstante Standardzeit in die Kapazitätsplanung ein (BOYSEN 2005, FLETCHER ET AL. 2008). Folglich müssen sich Mitarbeiter zum Zwecke der Gesamtsystemstabilität an die durch die Taktzeit induzierte einheitliche Arbeitsgeschwindigkeit anpassen, damit das initial geplante Fließsystem in der Realität umsetzbar ist (DENNIS 2007).

Um die im Produktionssystem zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit produktiv nutzen zu können, wurde diese von den natürlichen Rhythmen der Natur abgekoppelt (BRAUN 2011). Relativ langsame Monteure müssen entgegen ihres Leistungsangebots schneller arbeiten, während relativ schnelle Werker ihre Arbeitsgeschwindigkeit verlangsamen müssen (DENNIS 2007). Demzufolge führen Leistungsminima von Montagemitarbeitern zu deren Überforderung während bei Leistungsmaxima deren Unterforderung bei gleichzeitigen Produktivitätsverlusten eintritt (LUCZAK 1998, BOYSEN ET AL. 2009).

Somit gilt die Reduzierung der Diskrepanz zwischen der starren systembedingten Leistungsnachfrage und dem schwankenden menschlichen Leistungsangebot als zentraler Handlungsbedarf dieser Dissertation (siehe Abbildung 1-2). Dies soll einen Beitrag zur Verminderung der Fehlbelastung von Montagemitarbeitern in

⁸ Planung bedeutet die geistige Vorwegnahme zukünftiger Handlungsalternativen sowie deren Bewertung und Auswahl entsprechend einer Zielsetzung (PFOHL 1981).

Form von Termin- und Leistungsdruck leisten. Denn die Entwicklung neuer Strategien im Umgang mit diesem zentralen Belastungsfaktor unserer heutigen Arbeitswelt ist von besonderem Interesse und es bedarf dazu weiterer Forschung, Entwicklung und Erprobung auf dem Gebiet der Produktionstechnik (BAUA 2012). „Im Kontext produktionstechnischer Forschung muss gefragt werden, wie die Belastung [...] einer gesamten Gruppe von Montagemitarbeitern reduziert werden kann, mit dem Ziel, aus den gewonnenen Erkenntnissen konkrete Arbeitsgestaltungsmaßnahmen ableiten zu können.“ (HETTINGER & WOBBE 1993)

1.3 Zielsetzung dieser Arbeit

Der beschriebene Handlungsbedarf verdeutlicht, dass die einerseits starre systembedingte Leistungsnachfrage und das andererseits flexible menschliche Leistungsangebot⁹ zu Fehlbelastungen vor allem in Form von Termin- und Leistungsdruck von Werkern im Tagesverlauf führen können. Grundsätzlich können in diesem Zusammenhang menschliche Leistungsschwankungen durch eine reale und variable Bearbeitungszeit eines Mitarbeiters im Montagesystem gemessen werden¹⁰. Jedoch werden menschliche Leistungsschwankungen in der Planung heutiger Fließmontagesysteme nicht berücksichtigt, da Bearbeitungszeiten einzelner Arbeitsgänge manueller Montagetätigkeiten deterministisch geplant werden und als konstante Standardzeit in die Kapazitätsplanung einfließen (siehe Abbildung 1-3, oben).

Das übergeordnete wissenschaftliche Ziel dieser Arbeit besteht somit in der Entwicklung einer Methode¹¹ zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Planung einer Variantenfließmontage. Durch eine verbesserte Anpassung der systembedingten Leistungsnachfrage an das menschliche Leistungsangebot sollen über den Tagesverlauf auftretende Belastungsspitzen (z. B. in Form von Termin- und Leistungsdruck) von Montagemitarbeitern verringert werden können.

⁹ Das „flexible menschliche Leistungsangebot“ wird in der Folge gleichgesetzt mit einer „menschlichen Leistungsschwankung“.

¹⁰ In Abschnitt 2.2.1 (siehe S. 20) wird die Bearbeitungszeit in Anlehnung an die Grundgleichung des physikalischen Leistungsbegriffes als wesentlicher Leistungsfaktor in einem Variantenfließmontagesystem definiert. Tendenziell geringere Bearbeitungszeiten entsprechen dabei einer höheren Leistung und umgekehrt.

¹¹ Eine Methode (griech. *méthodos* = „Weg zu etwas hin“) ist ein auf einem Regelsystem aufbauendes Verfahren zur Erlangung von (wissenschaftlichen) Erkenntnissen oder praktischen Ergebnissen (DUDEN 2013).

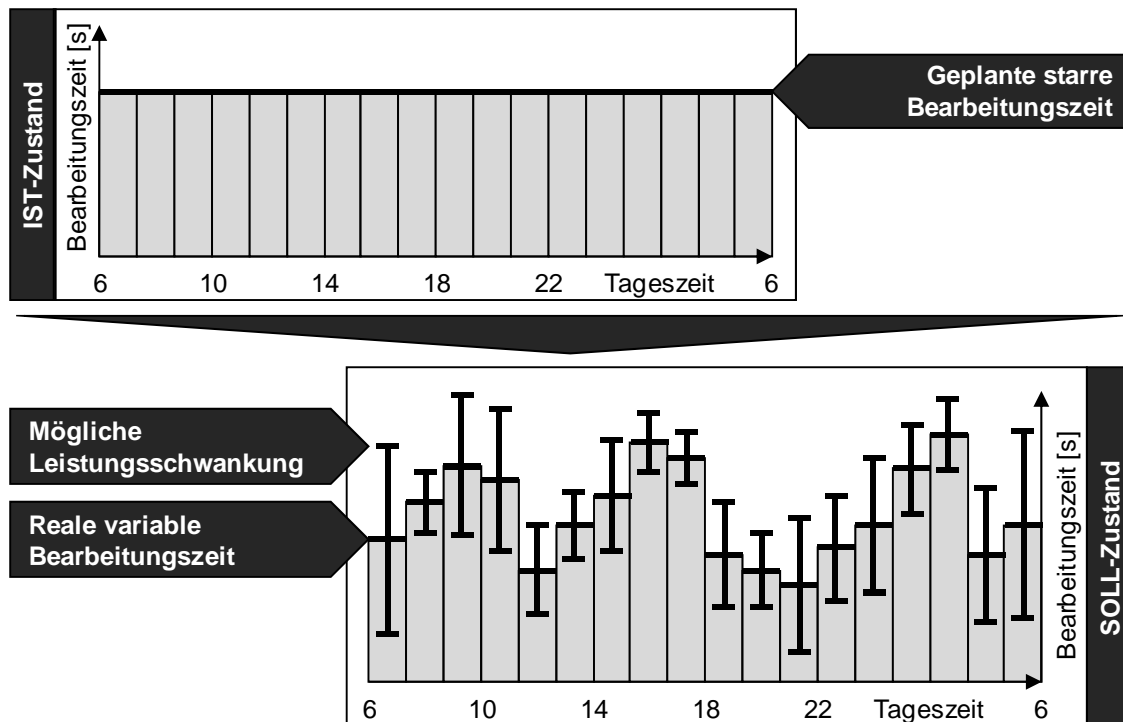


Abbildung 1-3: Kernidee dieser Dissertation

Durch die zu entwickelnde Methode soll ermöglicht werden, reale variable Bearbeitungszeiten in einem Variantenfließmontagesystem zu erheben und statistisch aufbereiten zu können. Darauf aufbauend sollen relevante Stellhebel zur Beeinflussung menschlicher Leistungsschwankungen abgeleitet und über die Analyse und Interpretation erhobener und aufbereiteter Bearbeitungszeiten im Rahmen einer Verhältnisprävention¹² Handlungsempfehlungen für die Montageplanung zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage umgesetzt werden können.

Dabei sollen die geforderte Stückzahl pro Schicht sowie die Reihenfolge der im Montagesystem eingesteuerten Varianten konstant sein. In Abbildung 1-3 (unten) wird plakativ eine sich im Tagesverlauf verändernde Bearbeitungszeit mit möglichen Leistungsschwankungen visualisiert. So soll zu einer nachhaltigen Gesunderhaltung des Humankapitals im Unternehmen beigetragen werden können. Da keine Einzelphänomene wie z. B. ausschließlich die Tagesperiodik untersucht werden, soll der Fokus dieser Arbeit auf der Verbesserung der Situation ganzer Schichtgruppen und nicht auf der des Individuums liegen.

¹² Im Gegensatz zur Verhaltensprävention wird bei der Verhältnisprävention das Arbeitssystem an den Nutzer angepasst, um beeinträchtigende Auswirkungen der Umgebung auf den darin arbeitenden Menschen reduzieren zu können (DIN EN ISO 10075-2 (2000)).

1.4 Spezifizierung des Betrachtungsbereichs

Diese Arbeit richtet sich an produzierende Unternehmen, die Mitarbeiter innerhalb der Struktur einer Variantenfließmontage beschäftigen. Dieser Betrachtungsbereich wird nachfolgend mittels eines deduktiven Ansatzes hergeleitet, indem zunächst der Leistungserstellungsprozess in der Produktion als größte Abstraktionsebene erläutert wird. Darauf aufbauend wird die Fließmontage als Element des Leistungserstellungsprozesses definiert sowie die Relevanz der Variantenfließmontage für diese Arbeit erläutert. Im Speziellen richtet sich die zu entwickelnde Methode an Spezialisten in Montageplanungsabteilungen von Unternehmen, Ergonomie- und Arbeitssicherheitsabteilungen, Betriebsärzte sowie Berater mit einem produktionstechnischen Hintergrund, die in Projekte zur Planung und Umsetzung von Variantenfließmontagesystemen eingebunden sind.

1.4.1 Leistungserstellungsprozess

Überblick

Als grundsätzliches Ziel produzierender Unternehmen kann eine marktorientierte, effiziente und zeitökonomische Verbesserung der Leistungserstellungsprozesse innerhalb der Organisation formuliert werden (FABAUER 2008). In deren Zentrum steht die Produktion (siehe Abbildung 1-4), die grundsätzlich als die methodische Erzeugung von Ausbringungsgütern aus (nicht-)materiellen Einsatzgütern nach bestimmten technischen Verfahrensweisen definiert wird (BLOHM ET AL. 1997, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011). In diesem Input-Leistungserstellungsprozess-Output-System werden die eingehenden Produktionsfaktoren durch den Produktionsprozess miteinander kombiniert und in das Ergebnis der Produktion, die Produkte, transformiert (GUTENBERG 1983).

Produktionsfaktoren umfassen das eingesetzte Material, verwendete Betriebsmittel und die benötigte Information. Das Material wird im Produktionsprozess verbraucht. Dazu zählen vor allem die Rohstoffe sowie Bau- und Einzelteile, aber auch Energie und Betriebsstoffe (GUTENBERG 1983). Arbeits- oder Betriebsmittel (wie z. B. Anlagen, Werkzeuge, Einrichtungen und Gebäude) sind all jene Güter, die im Vollzug der Produktion benutzt werden, ohne dass sie im Produkt aufgehen (GUTENBERG 1983, DIN EN ISO 6385 (2004)). Grund- und Planungsdaten informieren über Ausführung und Termini der Produktion (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011).

Im Zentrum des Leistungserstellungsprozesses wirkt der arbeitende Mensch innerhalb mehrerer Arbeitsgänge mittels definierter Arbeitsmethoden einerseits im Arbeitssystem ein und verändert den Zustand einer Arbeitsaufgabe¹³ unter vorgegebenen Bedingungen (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, REFA 1984, DIN EN ISO 6385 (2004), BOYSEN 2005, CIRP 2012). Andererseits werden für das Lösen einer Arbeitstätigkeit Anforderungen an den arbeitenden Menschen durch die Arbeitsaufgabe gestellt (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). Diese stellen eine Rückwirkung in Form einer Belastung dar. Als Ergebnis dieses Wertschöpfungsprozesses gelten im Wert gesteigerte Produkte in Form von Sachgütern oder Dienstleistungen, die in Qualität und Quantität den Anforderungen des Kunden entsprechen (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, GUTENBERG 1983, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011).

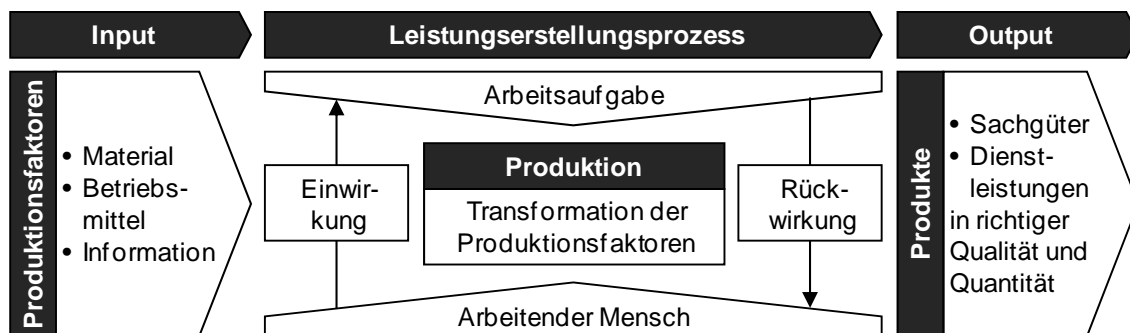


Abbildung 1-4: *Produktionssystem als Grundmodell menschlicher Arbeit (in Anlehnung an GUTENBERG 1983, ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, BLOHM ET AL. 1997, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011)*

Produktion und manuelle Montage

Das zentrale Element Produktion kann in die Teilbereiche Fertigung und Montage untergliedert werden (siehe Abbildung 1-5). Einerseits umfasst die Fertigung alle Verfahren und Einrichtungen, um eine Gruppe von Werkstücken von einem Ausgangs- in einen Endzustand zu überführen (CIRP 2012). Die Montage beschreibt andererseits die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen (VDI 1990), wobei zusätzlich formlose Stoffe wie z. B. Kleber zur Verwendung kommen können. Aufgaben der Monta-

¹³ Die Arbeitsaufgabe umfasst ein Bündel von Einzelvorgängen, deren Ausführung einer einzelnen Arbeitskraft oder einer Gruppe von Arbeitskräften in einer bestimmten Zeiteinheit übertragen wird (CIRP 2012).

ge bestehen im Wesentlichen aus Vorgängen des Fügen nach DIN 8593-0 (2003) sowie Funktionen der Werkstückhandhabung nach VDI (1990) (LOTTER & WIENDAHL 2006). Sie umfasst zusätzlich Tätigkeiten des Kontrollierens nach VDI (1990), des Justierens nach DIN 8580 (2003) sowie Sonderoperationen (LOTTER & WIENDAHL 2006, CIRP 2012).

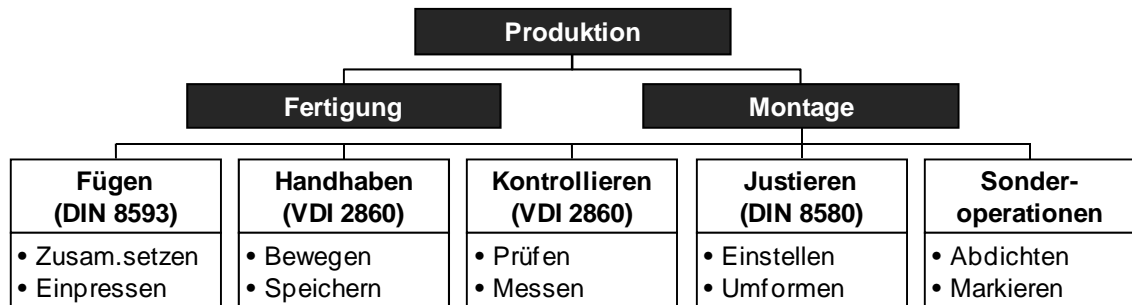


Abbildung 1-5: *Einordnung der Montage als Teil der Produktion (in Anlehnung an DIN 8593-0 (2003), VDI 1990, DIN 8580 (2003), LOTTER & WIENDAHL 2006)*

Der Wertschöpfungsanteil der Montage gemessen an der Gesamtwertschöpfung erreicht, je nach Branche, bis zu 60 %, obwohl die anteiligen Durchlaufzeiten bezüglich der Gesamtproduktion im Maschinen- und Fahrzeugbau nur bei durchschnittlich 25-50 % liegen (LOTTER & SCHILLING 1994, LOTTER & WIENDAHL 2006). Eine Montagestation wird als Teil eines Montagesystems definiert, an dem eine oder mehrere Arbeitsperson(en) an einem bestimmten Ort mit bestimmten Arbeits- und Betriebsmitteln bestimmte Arbeitsobjekte montieren (CIRP 2012). Manuelle Montagesysteme zeichnen sich durch eine Realisierung aller ausführenden Bewegungen sowie der Steuerung bzw. Regelung der Prozesse durch den Menschen aus. Montageaufgaben werden von Werkern manuell, evtl. unter Einbeziehung mechanischer Hilfsmittel, ausgeführt (CIRP 2012). Vor allem bei deutschen Automobilherstellern sind Produktionsarbeitsplätze geprägt von manuellen Montagetätigkeiten (FELDMANN ET AL. 1999).

Es zeigt sich eine große Relevanz der manuellen Montage innerhalb des Leistungserstellungsprozesses produzierender Unternehmen. Der arbeitende Mensch stellt hierbei ein Element zur Erfüllung einer Arbeitsaufgabe und der Realisierung des Input-Leistungserstellungsprozess-Output-Systems dar. Darauf aufbauend wird der Betrachtungsbereich im nächsten Abschnitt auf die Fließmontage eingegrenzt.

1.4.2 Fließmontage als Element des Leistungserstellungsprozesses

Grundlegend stellt die Fließmontage eine Organisationsform der Produktion dar, bei der die Produktiveinheiten entsprechend des technologischen Fertigungsablaufs der Werkstücke hintereinander angeordnet sind und ein Transportsystem die Bearbeitung der Werkstücke im Durchschnitt innerhalb einer vorgegebenen Taktzeit an den Stationen erzwingt (BOYSEN 2005). Sie ist gekennzeichnet durch eine arbeitsteilige Montage an mehreren Stationen, wobei die Anordnung der Betriebsmittel der Arbeitsgangfolge entspricht. Ein- und derselbe Arbeitsprozess wird an einer Station für einen überschaubaren Zeitraum wiederholt (BLOHM ET AL. 1997, KRATZSCH 2000, CIRP 2012).

Eine Montagelinie verbindet Arbeitsmittel mit Hilfe technischer Einrichtungen zur Erzielung eines sequentiellen Werkstückflusses (KRATZSCH 2000, CARNAHAN & NORMAN 2001, BOYSEN ET AL. 2007, CIRP 2012). Die einzelnen Arbeitsstationen können durch Pufferstationen so voneinander entkoppelt sein, dass bei kleineren Störungen an einer Produktiveinheit nicht die ganze Montageanlage zum Stillstand kommt (WIENDAHL 1989). Der Aufbau und der Betrieb von Montagelinien verursachen sehr große Investitionen und sie stellen eine zentrale Einheit eines produzierenden Unternehmens dar (KALLIO ET AL. 2012).

Das Fließprinzip findet in der Praxis in unterschiedlichen Ausprägungen Anwendung. Eine Reihenmontage liegt vor, wenn die einzelnen Arbeitsgänge zeitlich, z. B. durch Pufferlager, voneinander entkoppelt sind (BLOHM ET AL. 1997). Die Weitergabe der Werkstücke zum nachfolgenden Arbeitsgang erfolgt erst nach Beendigung der Bearbeitung bzw. nach Bedarf (BOYSEN 2005). Durch die fehlende zeitliche Bindung des Montageobjektes wird diese Form des Fließprinzips für die weitere Betrachtung ausgeschlossen. Besteht eine zeitliche Bindung des Materialflusses in Form einer definierten Taktzeit (LEOPOLD 1997), können drei Formen unterschieden werden (siehe Abbildung 1-6).

Zum Ersten erfolgt bei der Taktstraßenmontage die Weitergabe des Montageobjektes intermittierend (CIRP 2012). Hierbei steht das Montageobjekt für die Dauer der Taktzeit still. Nach deren Ablauf erfolgt eine synchronisierte und vollautomatische Weitergabe aller Werkstücke zur nächsten Station durch das System (WIENDAHL 1989, BOYSEN 2005). Beispiele für Taktstraßenmontagesysteme aus der Praxis finden sich u. a. im Werkzeugmaschinenbau oder im Nutzfahrzeugbau. Besteht eine kontinuierliche zeitliche Bindung des Montageobjek-

tes, also eine Verkettung von mehreren Montagearbeitsplätzen bei definierter Zeitvorgabe, können zwei weitere Montagesystemformen unterschieden werden (KRATZSCH 2000).

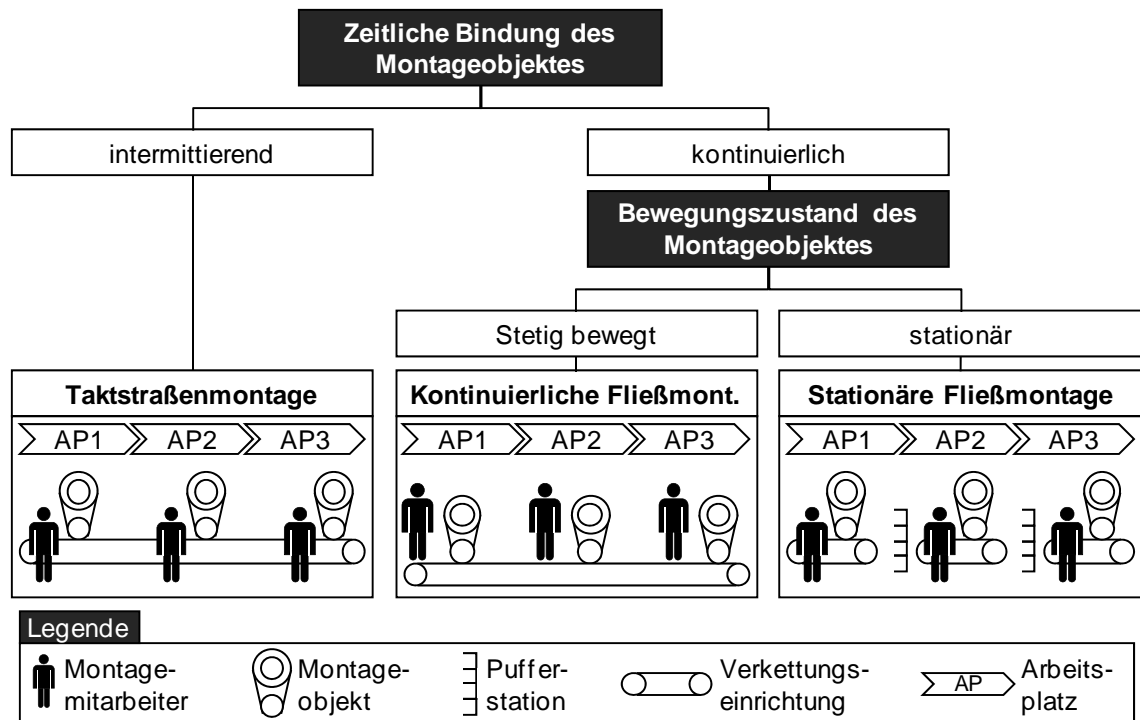


Abbildung 1-6: Unterscheidung der Montageformen nach zeitlicher Bindung sowie Bewegungszustand des Montageobjektes (in Anlehnung an SPUR & STÖFERLE 1986)

Bei der kontinuierlichen Fließmontage wird zum Zweiten das Objekt während des Montagevorganges ununterbrochen verfahren. Die Montagemittel und das Montagepersonal bewegen sich synchron zum Werkstück (LOTTER & SCHILLING 1994). Hierbei bekommt die Station zusätzlich eine räumliche Ausdehnung. Nach Erreichen der Stationsgrenze mit Ablauf der Taktzeit kehren Mitarbeiter entgegen der Bandlaufrichtung an den Stationsbeginn zurück und beginnen die Arbeit am Werkstück des folgenden Taktes (BOYSEN 2005). Ein Beispiel für eine kontinuierliche Fließmontage findet sich z. B. in der Karosserie-Endmontage. Zum Dritten kann die stationäre Fließmontage abgegrenzt werden, bei der das Montageobjekt für die Zeit der Montagevorgänge an der Arbeitsstation stehen bleibt (LOTTER & SCHILLING 1994). Alle notwendigen Produktionsfaktoren (Material, Betriebsmittel, Information) werden dem Mitarbeiter stationär zur Verfügung gestellt. Der wesentliche Unterschied zur Taktstraßenmontage besteht in der geringfügigen Entkopplung der einzelnen Arbeitsstationen durch Puffer und

der daraus folgenden, innerhalb definierter Grenzen, selbstbestimmten Weitergabe des Montageobjekts durch den Werker. Dieses Prinzip findet sich u. a. in vielen Komponentenwerken deutscher Automobilhersteller wie beispielsweise der Motorenendmontage wieder.

Eine gut abgestimmte Fließmontage verbindet den Vorteil kurzer Durchlaufzeiten mit einer hohen Kapazitätsauslastung der Betriebsmittel. Durch den mit der räumlichen und zeitlichen Verkettung einhergehenden „Banddruck“ ergibt sich für Fließmontagesysteme in der Regel eine hohe Produktivität mit zuverlässig planbaren Stückzahlen (BLOHM ET AL. 1997, KRATZSCH 2000). Jedoch gilt der Umgang mit einer mangelnden Flexibilität bei Stückzahl- oder Produktionsschwankungen als wesentliche Herausforderung. Aufgrund des synchronen Arbeitens in getakteten Systemen gelten der Tätigkeits- und Handlungsspielraum der Mitarbeiter sowie die Möglichkeit zur individuellen Leistungsentfaltung als sehr eingeschränkt (LOTTER & SCHILLING 1994, KRATZSCH 2000).

Aufbauend auf der Definition des Produktionsbegriffes wurde die Fließmontage als ein Element des Leistungserstellungsprozesses fokussiert. In Abhängigkeit der zeitlichen Bindung sowie des Bewegungszustandes des Montageobjektes können die Taktstraßenmontage, die kontinuierliche und die stationäre Fließmontage voneinander abgegrenzt werden. Alle drei Formen der Montage gelten u. a. aufgrund ihrer starken Taktabhängigkeit als hochbelastend für den Mitarbeiter und sollen in dieser Arbeit betrachtet werden.

1.4.3 Abgrenzung der Variantenfließmontage

Eine Sonderform von Produktionssystemen nach dem Fließprinzip stellen Variantenfließmontagen dar, auf denen der Fokus dieser Arbeit liegt. Im Allgemeinen werden Varianten als Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Teile definiert (DIN 199 (2002)). Im Speziellen stellt eine Variante „ein Produkt dar, dessen Merkmalsausprägungen im Vergleich zu einer Grundausführung so spezifiziert sind, dass die resultierende, produktionstechnische Ähnlichkeit zu den anderen auf einem Fließsystem zu montierenden Varianten eine wahlfreie Produktionsreihenfolge in der Losgröße Eins gewährleistet“ (BOYSEN 2005). Es ergibt sich ein Konflikt zwischen den verfolgten Effizienzgewinnen einer hohen Kapazitätsauslastung und Produktivität sowie den Verlusten und Aufwänden der Variantenflexibilität (MEDO 2010).

Dieser Zusammenhang stellt Unternehmen vor große Herausforderungen (HU ET AL. 2008). Während unternehmensexterne Gründe für Variantenvielfalt, wie bereits erläutert, vor allem im steigenden Kundenwunsch nach individualisierten Produkten zu finden sind, sind unternehmensinterne Ursachen häufig organisatorischer Art. Dabei repräsentiert die innere Variantenvielfalt die in der Produktion auftretende Anzahl an unterschiedlichen Baugruppen und Teilen und ist in den meisten Betrieben aufgrund ausbleibender Programmbereinigungen historisch gewachsen. An dieser Stelle werden die Unterschiede in den Abläufen der Prozessvarianten unmittelbar durch die Verschiedenartigkeit der Produktvarianten ausgelöst (WIENDAHL ET AL. 2004).

Um die Herausforderungen für Unternehmen durch eine steigende externe und interne Variantenvielfalt zu bewältigen, wurde die spezifische Organisationsform der Variantenfließmontage entwickelt. Hierbei werden eine Anzahl verschiedener Varianten, die auf ein einheitliches Grundsystem zurückführbar sind, ökonomisch sinnvoll in wahlloser Reihenfolge (= Losgröße Eins) auf einer Anlage verarbeitet (BOYSEN 2005, CIRP 2012). Auf diese Weise wird auch der effizienten Fließmontage eine kundenindividuelle Anpassung ihrer Produkte zugänglich gemacht (BOYSEN ET AL. 2006).

Für diese Arbeit relevante Organisationsformen der Produktion umfassen Systeme mit zeitlicher Bindung des Montageobjektes. Auf dieser Basis wird die Variantenfließmontage, die als Taktstraßenmontage, als kontinuierliche und als stationäre Fließmontage realisiert werden kann, als „Organisationsform der Wahl“ im Maschinen- und Anlagenbau (VÖLKER ET AL. 2010) induziert. Sie kombiniert Vorteile klassischer Produktionsformen mit Prinzipien der kundenindividuellen Massenproduktion.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt acht Kapitel (siehe Abbildung 1-7). Nachdem in Kapitel 1 die Motivation und die Zielsetzung dieser Arbeit erläutert wurden, wurde der Betrachtungsrahmen spezifiziert und dabei die Variantenfließmontage mit Fokus auf manuelle Arbeitsprozesse als zu untersuchende Organisationsform hergeleitet.

In Kapitel 2 werden die zum Verständnis dieser Arbeit relevanten Grundlagen erläutert. Einerseits beschreiben Hintergründe zur menschlichen Leistung sowie

Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern das menschliche Leistungsangebot. Andererseits muss die systembedingte Leistungsnachfrage erläutert werden. Hierzu werden deren Planung sowie relevante Stellhebel für deren Beeinflussung untersucht.

In Kapitel 3 werden wissenschaftliche Arbeiten aus den Forschungsgebieten der Produktionstechnik sowie der Arbeitswissenschaft hinsichtlich ihrer Eignung zur Erfüllung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit untersucht. Es werden neben der Definition der Ergonomie als Planungsgrundlage Ansätze zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten sowie zur Berücksichtigung von Leistungsschwankungen in Variantenfließmontagesystemen analysiert.

Aus der Schlussfolgerung von Defiziten bestehender Ansätze ergibt sich ein konkreter Handlungsbedarf, aus dem sich Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden sowie ein konkreter Lösungsansatz herleiten lassen (Kapitel 4).

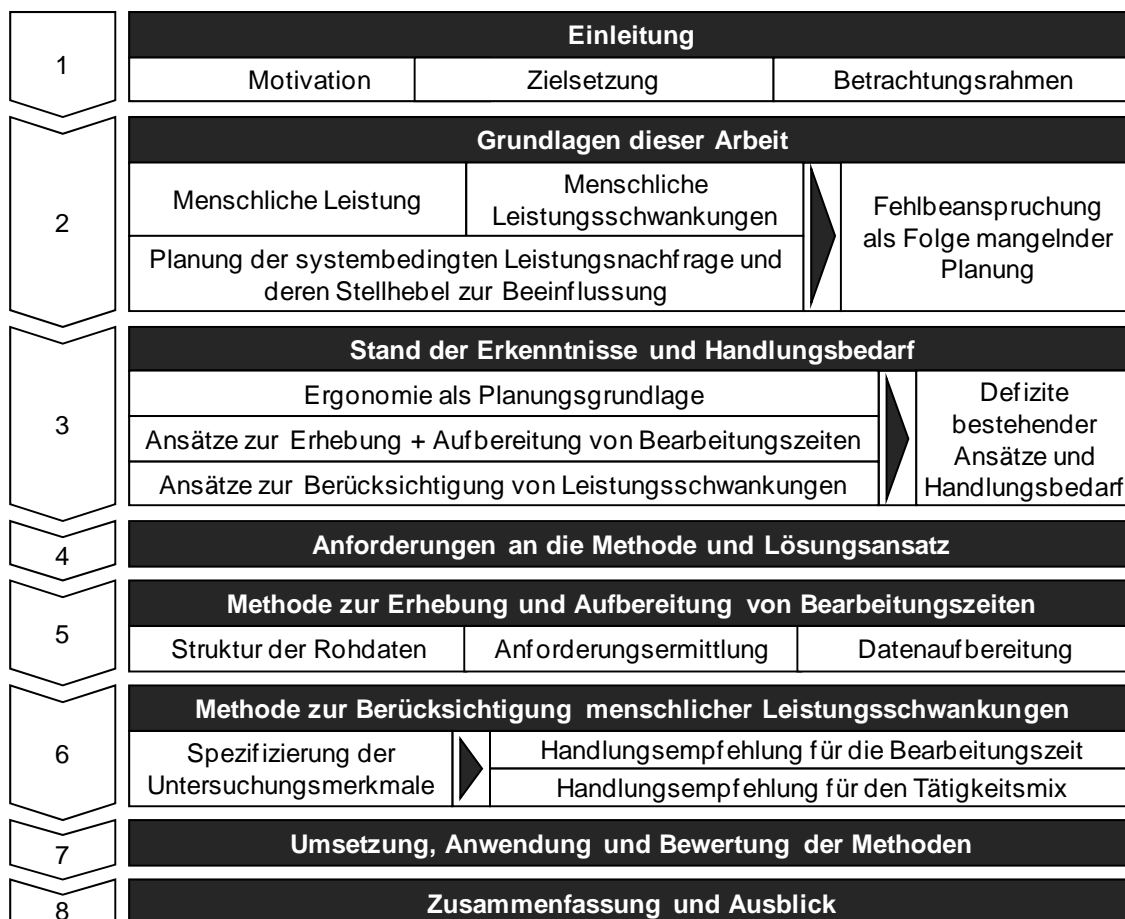


Abbildung 1-7: Aufbau der Arbeit

In der ersten Methode wird in einem deduktiven Ansatz erklärt, wie Bearbeitungszeiten in einem laufenden Systembetrieb erhoben und aufbereitet werden müssen (Kapitel 5). Dies umfasst die Definition einer grundlegenden Struktur an Rohdaten. In der Anforderungsermittlung wird spezifiziert, welche Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, damit Datensätze erhoben werden können. Das Ziel der statistischen Datenaufbereitung ist es, den betrachteten Rohdatensatz hinsichtlich der gewählten Untersuchungsgröße interpretierbar zu machen.

Dieses Wissen wird in der zweiten Methode verwendet, um Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in einem Variantenfließmontagesystem definieren zu können (Kapitel 6). Hierzu werden die konkreten Untersuchungsmerkmale in Bezug auf die grundlegende Datenstruktur spezifiziert, um Handlungsempfehlungen für die wesentlichen Stellhebel generieren zu können.

In Kapitel 7 werden die entwickelten Methoden praktisch umgesetzt, angewendet und bewertet. Die Umsetzung erfolgt mittels einer geeigneten Software-Umgebung. Das Ziel besteht dabei darin, dem Anwender der Methode ein mathematisch korrektes und benutzerfreundliches Tool an die Hand zu geben, um die erläuterten Methodenschritte intuitiv und zeiteffizient durchführen zu können. Die Anwendung findet in einer Feldstudie innerhalb einer Motorenmontage eines deutschen Automobilherstellers statt. Die Bewertung erfolgt durch eine Validierung der aus der Anwendung gewonnenen Erfahrungen bzgl. der definierten Anforderungen sowie hinsichtlich Aufwand und Nutzen.

Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst. Darüber hinaus werden im Ausblick mögliche Weiterentwicklungen und auf die Ergebnisse aufbauende Forschungsfragen vorgezeichnet.

2 Grundlagen dieser Arbeit

2.1 Kapitelüberblick

Aus den beiden im zentralen Handlungsbedarf beschriebenen Blickwinkeln auf das Thema ergibt sich die Zweiteilung dieses Grundlagenkapitels. Hierzu wird einerseits in Abschnitt 2.2 die menschliche Leistung definiert. Um zu erkennen, wie flexibel diese grundsätzlich gestaltet werden kann, werden auf dieser Basis menschliche Leistungsschwankungen näher erläutert (siehe Abschnitt 2.3). Andererseits werden Grundlagen der systembedingten Leistungsnachfrage beleuchtet und dabei insbesondere die Planung moderner Variantenfließmontagesysteme sowie deren Stellhebel zur Beeinflussung menschlicher Leistungsschwankungen betrachtet (siehe Abschnitt 2.4). Zum weiteren Verständnis und um die Relevanz der Thematik zu unterstreichen, werden überdies die Folgen aus der Diskrepanz des menschlichen Leistungsangebotes und der systembedingten Leistungsnachfrage für den Mitarbeiter in einem gesonderten Abschnitt (siehe 2.5) erörtert (siehe Abbildung 2-1).

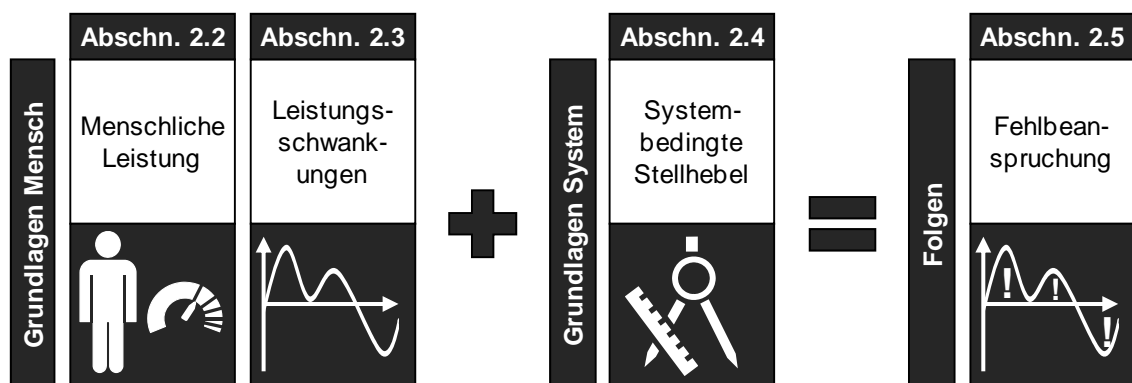


Abbildung 2-1: Überblick über Kapitel 2

2.2 Menschliche Leistung

Generell existiert eine Fülle an Begriffen zum Thema Leistung, wovon in dieser Arbeit einige Verwendung finden. Nach DREITZEL (1974) ist der Begriff „Leistung“ mit so vielen Mehrdeutigkeit behaftet, dass sich seine wissenschaftliche Verwendung fast verbietet. Dies unterstreicht die Bedeutung einer fundierten Definition des Leistungsbegriffes. Darauf aufbauend wird der Bedarf einer

Normleistung dargelegt, um über den Leistungsgrad auf das menschliche Leistungsangebot rückschließen zu können. Desweiteren wird über die Unterscheidung menschlicher und sachlicher Leistungsvoraussetzungen sowie durch eine Definition vor allem kurzfristig beeinflussbarer Bestandteile menschlicher Leistung der Betrachtungsrahmen abschließend weiter eingegrenzt.

2.2.1 Reale Bearbeitungszeit als wesentlicher Leistungsfaktor

Der Grundgleichung des physikalischen Leistungsbegriffes folgend berechnet sich die physikalische Leistung P_{Phys} aus dem Quotienten aus verrichteter Arbeit W und dafür benötigter Zeit t (BIPM 2006). Während der ökonomische Leistungsbegriff die Beurteilung eines Leistungsergebnisses anhand dessen Ausmaßes des Markterfolges (z. B. Ertrag oder Gewinn) beinhaltet, liefert der sachliche Leistungsbegriff als Ergebnis eine bestimmte Menge in bestimmter Qualität (FABAUER 2008). Grundsätzlich ist der körperlich und geistig gesunde und ausgeruhte Mensch in der Lage, Leistungen zu erbringen und damit den durch eine Arbeitsaufgabe gesetzten Leistungsanspruch zu erfüllen (SCHMIDTKE 1993).

Von Leistung aus Sicht des arbeitenden Menschen wird gesprochen, wenn die Tätigkeit zur Erfüllung einer Aufgabe innerhalb einer gewissen Zeit zu einem Arbeitsergebnis führt (REFA 1984). Da die menschliche Leistung als variable Größe zwischen Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung steht, muss diese Variable bestimmt werden. Ganz allgemein ist hierbei festzustellen, dass der Grad der Übereinstimmung zwischen Aufgabenstellung T und Aufgabenerfüllung R ein Maß für die Arbeitsqualität Q_{Arbeit} ist (SCHMIDTKE 1993). Die „absolute“ Qualität Q_{Arbeit} des Wertes 1 wird dann als gegeben unterstellt, wenn Aufgabenerfüllung mit Aufgabenstellung vollkommen übereinstimmt (SCHMIDTKE 1993). Denn Leistungsanforderungen umfassen auch die Güte der gelieferten Ergebnisse (REFA 1984). Wird nach SCHMIDTKE (1993) die im Rahmen der physikalischen Leistung P_{Phys} definierte Arbeit W der Arbeitsqualität Q_{Arbeit} gleichgesetzt, so kann das menschliche Leistungsangebot P_{Mensch} als Quotient aus der Arbeitsqualität Q_{Arbeit} und der Zeit t beschrieben werden (siehe Formel (2-1)).

Die Einheit des menschlichen Leistungsangebotes ergibt sich somit aus der Anzahl erfüllter Aufgaben R in Abhängigkeit der gestellten Aufgaben T sowie der dafür benötigten Zeit t . Die Anzahl der erfüllten Aufgaben ist nicht ausschließlich durch Vorgaben aus dem Variantenfließsystem direkt beeinflussbar. Sie hängt stets von der individuellen Konstitution des jeweiligen Mitarbeiters ab und

ist eng mit der Anzahl der gestellten Aufgaben sowie der dafür zur Verfügung stehenden Zeit verknüpft. In eigenen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die messbare Arbeitsqualität Q_{Arbeit} in modernen und stückzahlintensiven Variantenfließmontagesystem gegen den Wert 1 strebt und somit die Aufgabenerfüllung R annähernd der Aufgabenstellung T entspricht. Darüber hinaus ist, wie in Abschnitt 1.2 (siehe S. 4) beschrieben, die Anzahl der an den Montagemitarbeiter gestellten Aufgaben in der Variantenfließmontage innerhalb enger Grenzen starr.

$$P_{Mensch} = \frac{Q_{Arbeit}}{t} = \frac{R}{T \cdot t} \quad (2-1)$$

P_{Mensch}	Menschliches Leistungsangebot
Q_{Arbeit}	Arbeitsqualität
t	Zeitdauer
R	Aufgabenerfüllung
T	Aufgabenstellung

Somit stellt die für die Arbeitsaufgabe zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit den wesentlichen Stellhebel zur Beeinflussung der menschlichen Arbeitsleistung dar. Umgekehrt gilt die reale Bearbeitungszeit, die die zentrale Messgröße dieser Dissertation darstellt, als Indikator für das aktuelle menschliche Leistungsangebot.

2.2.2 Normleistung und Leistungsgrad

Nach JUNGBLUTH & MOMMSEN (1968) schließt der Mensch in seiner biologischen, physischen, psychischen und sozialen Vielseitigkeit eine Normung aus. Trotzdem stellt die Beurteilung der Leistung der menschlichen Arbeitskraft einen zentralen Aspekt in der Planung von Variantenfließmontagesystemen dar. Seit Einführung des Fließprinzips und der damit einhergehenden Standardisierung der Arbeitstätigkeiten wird versucht, die menschliche Leistung zu standardisieren (FLETCHER ET AL. 2008).

Zur Beurteilung von Leistung ist die Existenz einer Norm der Gesellschaft erforderlich. Denn als Leistung wird nur dann ein bestimmtes Verhalten(-sergebnis) anerkannt, wenn es gewissen soziokulturellen Erwartungen entspricht (HARTFIEL 1977). Eine solche „Bezugsleistung“ ist üblicherweise die sog. „Normalleistung“

(HETTINGER & WOBBE 1993). Im Allgemeinen wird sie als diejenige Leistung definiert, die ein hinreichend geeigneter und geübter Mensch auf die Dauer der täglichen Arbeitszeit und auf die Dauer des Berufslebens ohne gesundheitliche Beeinträchtigungen erbringen kann (SCHMIDTKE 1993). Die in der industriellen Produktion seit Jahrzehnten gängige REFA-Normalleistung wird in diesem Zusammenhang als eine Bewegungsausführung verstanden, die dem Beobachter hinsichtlich der Einzelbewegungen, der Bewegungsfolge und ihrer Koordination besonders harmonisch, natürlich und ausgeglichen erscheint. Sie kann erfahrungsgemäß von jedem in erforderlichem Maße geeigneten, geübten und voll eingearbeiteten Arbeiter auf die Dauer und im Mittel der Schichtzeit erbracht werden, sofern dieser die für persönliche Bedürfnisse und gegebenenfalls auch für Erholung vorgegebenen Zeiten einhält und die freie Entfaltung seiner Arbeitskraft nicht behindert wird (REFA 1971).

Daneben werden in der Praxis für Arbeitstätigkeiten über das System vorbestimmter Zeiten (SvZ) Vorgabezeiten definiert. Eine Vorgabezeit soll für jeden Menschen gelten, der an einem Arbeitsplatz eine genau beschriebene Arbeitsaufgabe durchzuführen hat, so dass eine Zeitvorgabe (= Normalzeit) abzuleiten ist, „die von der überwiegenden Zahl der Arbeitnehmer ohne Probleme auch erreicht werden kann“ (HETTINGER & WOBBE 1993). Mittels des SvZ werden manuelle, vom Menschen voll beeinflussbare Tätigkeiten durch eine Analyse des Bewegungsablaufes in Bewegungselemente gegliedert. Jedem dieser Elemente wird anschließend eine SOLL-Zeit zugeordnet. Durch Addition dieser elementaren Zeitwerte ergibt sich die SOLL-Zeit für den gesamten Bewegungsablauf und damit der Arbeitstätigkeit (BLOHM ET AL. 1997).

Die über die REFA-Normalleistung oder über das SvZ ermittelte SOLL-Zeit wird als Bezugsleistung definiert und entspricht einem Leistungsgrad von 100 % (REFA 1971, BLOHM ET AL. 1997). Die Bezugsleistung stellt ein Leistungsrichtungsmaß dar und hängt davon ab, welche SOLL-Stückzahl pro Zeiteinheit von der Arbeitsperson erwartet wird (REFA 1971). Der Leistungsgrad ist definiert als das prozentuale Verhältnis von beobachteter IST-Mengenleistung zur gewählten Bezugsleistung und entspricht somit dem individuellen menschlichen Leistungsangebot. Beispielsweise bezeichnet ein Leistungsgrad von 120 % eine beobachtete Leistung, die 20 % über der Normalleistung liegt (REFA 1971, HETTINGER & WOBBE 1993).

Ziel dieser Arbeit ist unter anderem, wie bereits erläutert, die im Rahmen einer Verhältnisprävention angestrebte Anpassung der für eine Arbeitsaufgabe zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit an das menschliche Leistungsangebot. Die Bezugsleistung soll dabei der SOLL-Bearbeitungszeit (t_{Plan}) entsprechen, die für einen zu definierenden Tätigkeitsumfang über die bereits ausgeführten Verfahren (REFA oder SvZ) ermittelt werden kann. Die beobachtete IST-Mengenleistung soll in der Folge als IST-Bearbeitungszeit (t_{Ist}) eingeführt werden. Somit berechnet sich der Leistungsgrad LG einer Arbeitsstation nach REFA (1971) nach folgender Formel aus dem Quotienten aus SOLL-Bearbeitungszeit und IST-Bearbeitungszeit (siehe Formel (2-2)).

$$LG = \frac{t_{Plan}}{t_{Ist}} \cdot 100 \% \quad (2-2)$$

LG	Leistungsgrad
t_{Plan}	Geplante Bearbeitungszeit / SOLL-Bearbeitungszeit
t_{Ist}	Reale erhobene Bearbeitungszeit / IST-Bearbeitungszeit

2.2.3 Menschliche Leistungsvoraussetzungen

Nach der Definition des menschlichen Leistungsangebots, der Normleistung, der SOLL- und der IST-Bearbeitungszeit und des Leistungsgrades besteht ein grundlegendes Verständnis über die wesentlichen Begrifflichkeiten zur menschlichen Leistung und deren Einordnung im Rahmen der Variantenfließmontage. Die reale Bearbeitungszeit t_{Ist} steht im Fokus der Untersuchungen, wobei das menschliche Leistungsangebot als Befähiger für eine bestimmte Arbeitsschwindigkeit gilt.

In diesem Zusammenhang existieren Voraussetzungen, damit ein Montagemitarbeiter die an ihn gestellten Leistungsanforderungen erfüllen kann. Abbildung 2-2 gibt eine schematische Übersicht über die wesentlichen Einflussfaktoren auf das menschliche Leistungsangebot nach SCHMIDTKE (1993). Demzufolge lassen sich sachliche und menschliche Leistungsvoraussetzungen voneinander unterscheiden. Erstere setzen sich aus technischen Vorbedingungen, wie Aufgabenschwierigkeit oder Maschinen- und Betriebsmittelgestaltung sowie organisatorischen Vorbedingungen wie Arbeitsziel, -vorbereitung, -sicherheit oder -strukturierung zusammen (SCHMIDTKE 1993).

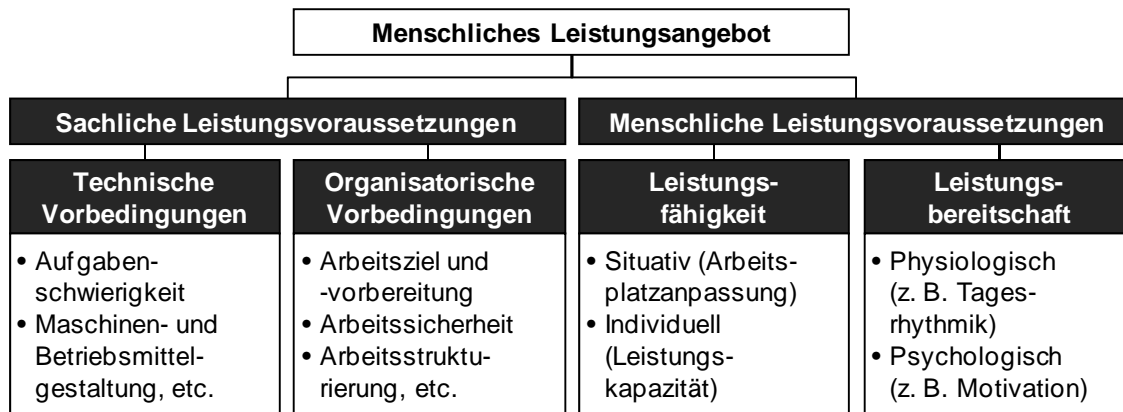


Abbildung 2-2: *Menschliches Leistungsangebot und wesentliche Einflussfaktoren (in Anlehnung an SCHMIDTKE (1993))*

Bei Zweiteren, also den menschlichen Leistungsvoraussetzungen, können die Leistungsfähigkeit und -bereitschaft voneinander unterschieden werden. Als Leistungsfähigkeit werden jene Merkmale bezeichnet, die physiologisch als Kapazität der Organsysteme und psychologisch als Potenz psychischer Funktionen das Leistungsgefüge einer Arbeitsperson bedingen (SCHLICK ET AL. 2009). Sie bezeichnet die Summe der individuellen Faktoren, die als angeborene Fähigkeiten oder als erworbene Fertigkeiten den Menschen zur Realisierung einer definierten Aufgabe qualifizieren (SCHMIDTKE 1993).

Fähigkeiten werden als die relativ stabilen personeninternen Voraussetzungen (z. B. Körperkräfte oder Fingergeschicklichkeit) zum Vollzug von Tätigkeiten definiert (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, RÖTHIG ET AL. 1992). Diese leistungsrelevanten angeborenen Persönlichkeitsmerkmale ergeben sich im Wesentlichen aus der physischen Konstitution (z. B. Skelettaufbau, Muskulatur) und den mentalen Anlagen (z. B. allgemeines Intelligenzniveau) (REFA 1984, SCHMIDTKE 1993).

Im Gegensatz dazu werden Fertigkeiten als weitgehend automatisiert ausgeführte Komponenten der bewussten menschlichen Handlungen definiert, die sich hauptsächlich durch Üben herausbilden (RÖTHIG ET AL. 1992). Sie betreffen Arbeitsfunktionen, die sowohl durch menschliche Grundfunktionen als auch den konkreten Gestaltungszustand der Arbeitsaufgabe und der Arbeitsumgebung bedingt sind (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). Wie weit diese bei der Arbeit aktiviert werden können, ist immer von den situativen Begebenheiten am Arbeitsplatz abhängig (SCHMIDTKE 1993).

Die aus individuellen und situativen Faktoren resultierende Leistungsfähigkeit kennzeichnet keine fixe Größe, sondern eine Potenz, wobei die tatsächliche Ausschöpfung dieser Potenz von Einflüssen abhängig ist, die nach Abbildung 2-2 unter dem Begriff der Leistungsbereitschaft zusammengefasst werden (SCHMIDTKE 1993). Die Leistungsfähigkeit bezeichnet somit das maximal zur Verfügung stehende Leistungspotential eines Menschen. Die Leistungsbereitschaft beschreibt, in welchem Maß der Mensch fähig und bereit ist, dieses Potential unter gegebenen Bedingungen zu aktivieren und für eine Arbeitsaufgabe nutzbar zu machen (BLOHM ET AL. 1997, FLETCHER ET AL. 2008). Komponenten der Leistungsbereitschaft (z. B. Leistungsmotive wie Bedürfnisse, Interessen, Absichten oder Überzeugungen) sind somit eine notwendige aber nicht hinreichende Bedingung, um vorhandene Potentiale der Leistungsfähigkeit ausschöpfen zu können (SCHLICK ET AL. 2009).

Die Leistungsbereitschaft umfasst zum einen eine physiologische Komponente. Neben konditionellen Einflüssen spielt insbesondere die aktuelle Disposition eine Rolle. Hierbei ergeben sich Schwankungen im Leistungsangebot vor allem aus Veränderungen der vegetativen Lage des Individuums relativ zur zirkadianen Rhythmik und aus Funktionsstörungen des Organismus im Sinne von Erkrankungen (SCHMIDTKE 1993). Zum anderen handelt es sich bei der psychologischen Komponente der Leistungsbereitschaft vor allem um die Arbeitsmotivation¹⁴. In produzierenden Unternehmen müssen vormalig Ziele erfüllt werden, die die Organisation vorgibt. Damit sich der Mensch dieser Ziele annimmt, müssen die an ihn gestellten Aufgaben auch persönliche Motive befriedigen (SCHLICK ET AL. 2009).

Das menschliche Leistungsangebot lässt sich in zwei wesentliche Blöcke unterteilen. Sachliche Leistungsvoraussetzungen dienen als Wegbereiter zur verbesserten Berücksichtigung menschlicher Leistungsvoraussetzungen. Im Rahmen dieser Arbeit von besonderer Relevanz zur Definition von Handlungsempfehlungen für Variantenfließmontagesysteme sind vor allem Bestandteile menschlicher Leistungsvoraussetzungen des Leistungsangebotes, die kurzfristig, also idealerweise auf Tages- oder sogar Schichtbasis, beeinflussbar sind. Diese werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

¹⁴ Zur weiteren Vertiefung des Themas Motivationstheorien sei auf in diesem Zusammenhang bekannte Autoren wie MASLOW (1943) oder HERZBERG ET AL. (1959) verwiesen.

2.2.4 Anpassungsmerkmale des menschlichen Leistungsangebots

Innerhalb eines exakt definierbaren menschlichen Leistungsbereichs (siehe Anhang, Abschnitt 10.2.1, S. 169) existieren individuelle Bestimmungsgrößen, die in Abhängigkeit des Zeithorizonts einer möglichen Veränderung eingeteilt werden können (siehe Abbildung 2-3). Nach SCHLICK ET AL. (2009) können in diesem Zusammenhang Konstitutionsmerkmale, Dispositionsmerkmale, Qualifikations- und Kompetenzmerkmale sowie Anpassungsmerkmale des menschlichen Leistungsangebotes unterschieden werden.

Zum Ersten umfassen Konstitutionsmerkmale u. a. Erbanlagen, Körperbau und Kulturkreis. Diese Gesamtheit innerer Eigenschaften eines Menschen gilt als im Lebenszyklus unveränderbar. Dispositionsmerkmale beschreiben zum Zweiten veränderliche, aber durch eine direkte Einflussnahme schwer zugängliche Bereiche wie beispielsweise das Alter des Montagemitarbeiters, den menschlichen Biorhythmus oder seine Intelligenz. Diese Merkmale bedürfen für eine Veränderung zusätzlich organisatorischer Aufwände mit längerem Zeithorizont. Zum Dritten sind Qualifikations- und Kompetenzmerkmale durch lang-, mittel- und kurzfristige Prozesse im Unternehmen veränderbar. Diese umfassen z. B. Fähigkeiten oder Fertigkeiten sowie Erfahrung und Wissen.

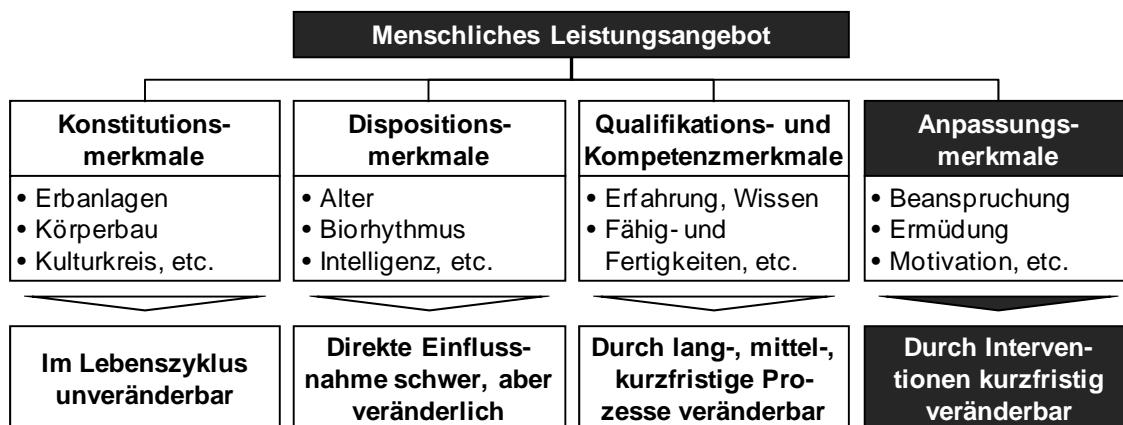


Abbildung 2-3: Individuelle Bestimmungsgrößen des menschlichen Leistungsangebotes in Abhängigkeit des Zeithorizonts einer möglichen Veränderung (in Anlehnung an LUCZAK (1998), SCHLICK ET AL. (2009))

Der für diese Arbeit relevante zeitliche Horizont einer möglichen Veränderung des menschlichen Leistungsangebots bezieht sich jedoch auf Tages- oder Schichtebene. Zum Vierten stellen Anpassungsmerkmale die durch Interventionen in dieser Kurzfristigkeit veränderliche Größe dar. Dazu zählen u. a. die aktuelle Beanspruchung durch die Arbeitsaufgabe, die Motivation sowie die erlebte Ermüdung. In diesem Zusammenhang erfordert die Ausführung einer Arbeitsaufgabe eine Inanspruchnahme der physischen und psychischen Ressourcen der Arbeitsperson. Soll mehr Leistung erbracht werden als an Nachbildung von Ressourcen möglich ist, werden zwangsläufig die vorhandenen bzw. vorrätigen Ressourcen in Anspruch genommen. Es tritt der reversible Vorgang der Ermüdung auf (DIN EN ISO 6385 (2004), SCHLICK ET AL. 2009).

Insgesamt bestimmen alle beschriebenen Merkmale, wie die Arbeit gestaltet werden muss, welche Personen eingesetzt werden können oder wie sie zu qualifizieren sind, um eine gewünschte Arbeitsleistung sicherzustellen (SCHLICK ET AL. 2009). Da in dieser Arbeit jedoch nur der sehr kurzfristige Zeithorizont relevant ist, werden in der Folge Anpassungsmerkmale fokussiert. Die zu definierenden Handlungsempfehlungen für die Planung von Variantenfließmontagesystemen sollen gezielt Belastungsmerkmale wie Ermüdung oder Motivation ansprechen können.

2.2.5 Fazit: Leistung

Über die Definition des Leistungsbegriffes wird deutlich, dass in dieser Dissertation die für die Arbeitsaufgabe zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit einen wesentlichen Stellhebel zur Beeinflussung der menschlichen Arbeitsleistung darstellt. Die beobachtete IST-Mengenleistung soll als t_{Ist} gemessen werden und gilt durch Berechnung des jeweiligen Leistungsgrades mittels Normung auf t_{Plan} als Indikator für das aktuelle menschliche Leistungsangebot. Unter Berücksichtigung vorgegebener technischer und organisatorischer Bedingungen stellt die gezielte Beeinflussung menschlicher Leistungsvoraussetzungen durch Handlungsempfehlungen für Variantenfließmontagesysteme das Ziel dieser Arbeit dar. Es existiert ein zeitlicher Aspekt in Bezug auf individuelle Bestimmungsgrößen menschlicher Leistung. Vor allem Anpassungsmerkmale wie Ermüdung oder Motivation können durch Intervention z. B. organisatorischer Vorbedingungen wie beispielsweise des Arbeitsziels in Form eines Eingriffes in die Produktionsplanung kurzfristig verändert werden.

2.3 Menschliche Leistungsschwankungen

Aufbauend auf den Grundlagen des menschlichen Leistungsangebotes (siehe Abschnitt 2.2) wird in diesem Abschnitt in Anlehnung an REINHART ET AL. (2011) erläutert, welche Einflussgrößen bei Leistungsschwankungen wirken. Es wird gezeigt, dass sich fast alle menschlichen Körperfunktionen periodisch verändern und Leistungsschwankungen hervorrufen. Dabei existieren Schwankungen einer Einzelperson genauso wie Unterschiede zwischen Personen.

2.3.1 Inter- und intraindividuelle Leistungsschwankungen

Das menschliche Leistungsangebot in Form der Eignung einer Arbeitsperson zur Arbeitsausführung ist keine Konstante. In Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen kann diese Variable große Schwankungen aufweisen (REFA 1984, SCHLICK ET AL. 2009) und grundsätzlich in zwei Abschnitte unterteilt werden (siehe Abbildung 2-4). Dabei differiert die Leistung sowohl interindividuell, also zwischen verschiedenen Personen, als auch bei einer Einzelperson (intraindividuell).

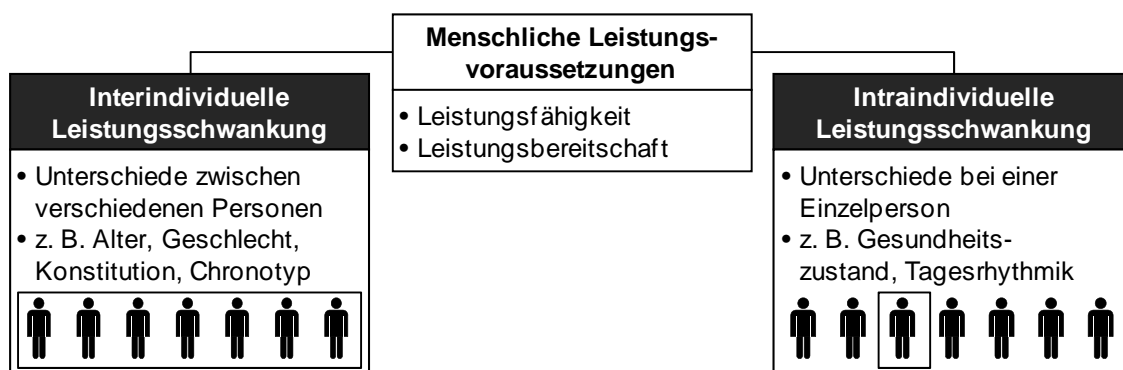


Abbildung 2-4: Unterscheidung interindividueller und intraindivideller Leistungsschwankungen (in Anlehnung an SCHMIDTKE 1993, SCHLICK ET AL. 2009, GLONEGGER & OTTMANN 2013)

Einerseits können interindividuelle Leistungsschwankungen bedingt sein durch Unterschiede im Geschlecht, im Alter, in der Konstitution, in den intellektuellen Anlagen, in der Leistungsmotivation oder beim jeweiligen Chronotyp. Daraus folgt, dass in produzierenden Unternehmen, wo Mitarbeiter zum Großteil in Gruppen organisiert sind, Unterschiede in der Leistungsvoraussetzung vorhanden sind. Das interindividuelle menschliche Leistungsangebot divergiert mit zuneh-

mendem Lebensalter (siehe Anhang 10.2.2, S. 170). Im Zuge des demographischen Wandels zeigt sich, dass die Leistungsheterogenität von Arbeitsgruppen in den nächsten Jahren zunehmen wird und es immer wichtiger wird, Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen berücksichtigen zu können.

Andererseits hängt eine intraindividuelle Leistungsschwankung beispielsweise vom Übungsgrad, vom aktuellen Gesundheitszustand oder von der zirkadianen Rhythmik ab (REFA 1984, SCHMIDTKE 1993, SCHLICK ET AL. 2009) und wird nachfolgend erläutert.

2.3.2 Periodische Einflüsse auf das menschliche Leistungsangebot

Grundsätzlich verändern sich fast alle menschlichen Körperfunktionen periodisch innerhalb eines gewissen Bezugszeitraums mehr oder weniger stark um einen Mittelwert. Diese Veränderungen sind biologisch bedingt oder werden durch äußere Umwelteinflüsse auf den Menschen ausgelöst (SCHLICK ET AL. 2009). Dies führt dazu, dass Menschen zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedliche Leistungen erbringen können bzw. zum Erreichen der gleichen Leistung die vorhandenen Leistungsreserven in unterschiedlichem Maße beanspruchen (JUNGBLUTH & MOMMSEN 1968). In Anlehnung dazu kann der sog. „Biorhythmus“ eine Periodendauer von wenigen (Milli-)Sekunden (ultradiane Rhythmen wie z. B. der Herzschlag) bis zu einem Jahr und darüber hinaus aufweisen. Die Jahresrhythmik („zirkaannuale Rhythmik“) folgt u. a. klimatischen Veränderungen und den damit verbundenen Verhaltensweisen (SCHLICK ET AL. 2009).

Die bekannteste Form des Biorhythmus ist die zirkadiane Rhythmik, bei der viele Körperfunktionen eine charakteristische 24-Stunden-Periodik aufweisen (SCHMIDTKE 1993). Sie basiert auf Untersuchungen von BJERNER ET AL. (1955) und GRAF (1960), die Fehler bei Vigilanztätigkeiten¹⁵ beurteilt und nach Tageszeit sortiert haben. Ihr Verlauf entspricht einer reziproken Fehlerverteilung und ist in Abbildung 2-5 (durchgezogene Linie) aufgetragen. Sie zeigt i. A. ein sehr günstiges menschliches Leistungsangebot in den Vormittagstunden, das am Nachmittag abnimmt und während der Nacht sein Tief erreicht (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). Im zirkadianen Verlauf kann eine ergotrope, also leistungs-

¹⁵ Eine Vigilanztätigkeit erfordert eine konstant bleibende Aufmerksamkeit (z. B. gegenüber Anzeigegeräten) bei geringen äußeren Reizen und geringer innerer Stimulierung (GABLER 2013B).

orientierte Phase („Arbeitsphase“) zwischen 3 und 15 Uhr von einer trophotropen Phase (15 bis 3 Uhr, „Ruhephase“) unterschieden werden. Bei letzterer dominieren Aufbau- und Regenerationsvorgänge, wobei sich der menschliche Organismus zwischen 3 und 4 Uhr morgens im absoluten Leistungstief befindet (REFA 1984, SCHMIDTKE 1993, BRAUN 2011). Zwischen 2 und 5 Uhr morgens tritt i. A. die größte Müdigkeit auf. Die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit ist erheblich beeinträchtigt und das allgemeine Unfallrisiko erhöht (CAJOCHEN 2005). Die zirkadiane Rhythmik wird vor allem durch endogene Zeitgeber bestimmt, die im Kerngebiet des Gehirns lokalisiert sind (ASCHOFF & WEVER 1962). Zu den wichtigsten exogenen Zeitgebern gehören neben dem Hell-Dunkel-Wechsel die sozialen Kontakte, die Aktivitätsphasen und der Zeitpunkt der Nahrungsaufnahme (SCHLICK ET AL. 2009, BRAUN 2011). Hinzu kommen noch Veränderungen, die aufgrund der Umwelteinwirkungen hervorgerufen werden. Diese Aktivitätsänderungen beeinflussen den Menschen sowie seine Reaktionen auf äußere Reize (SCHLICK ET AL. 2009).

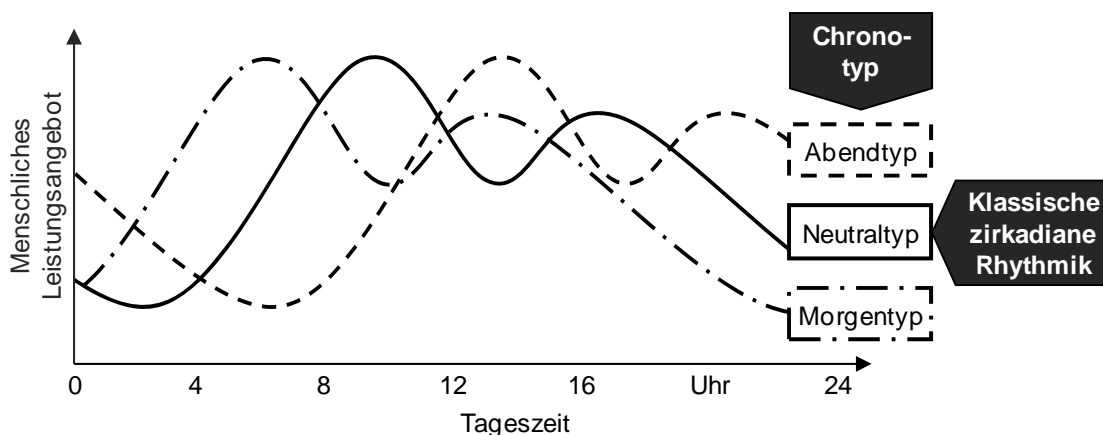


Abbildung 2-5: *Zirkadiane Rhythmuskurve am Beispiel von den drei phasenverschobenen Chronotypen Abend-, Neutral- und Morgentyp (in Anlehnung an BJERNER ET AL. (1955), GRAF (1960), GLONEGGER & OTTMANN 2013)*

Darüber hinaus ist der exakte Zeitpunkt von Leistungsmaxima und -minima allerdings auch vom zirkadianen Phasentyp, dem sog. „Chronotyp“ abhängig (CAJOCHEN 2005). Die bei jedem Menschen vorhandene 24-Stunden-Rhythmik ist sehr individuell und unterschiedlich stark ausgeprägt (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). Der Verlauf der Tagesperiodik wird dabei stark beeinflusst von z. B. dem persönlichen Schlafverhalten und kann phasenverschoben sein (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, FRIELING & SONNTAG 1999). Der klassische

zirkadiane Rhythmus kann dem sog. „Neutraltyp“ zugeordnet werden. Die sog. „Morgentypen“ erreichen die Minima und Maxima ihres Leistungsangebotes deutlich vor den „Abendtypen“ (CAJOCHEN 2005). Dazu wird in Abbildung 2-5 die zirkadiane Kurve eines Morgentypen mit dem Leistungshoch zwischen 4 und 8 Uhr morgens visualisiert (Strichpunkt-Linie). Die gestrichelte Linie zeichnet den Verlauf eines Abendtypen nach, der sein Maximum zwischen 12 und 16 Uhr erreicht. Es zeigt sich, dass jedes Individuum einer Gruppe von Montagemitarbeitern zu einem gegebenen Zeitpunkt aufgrund einer Vielzahl periodischer Einflüsse ein unterschiedlich großes Leistungsangebot bereitstellen kann.

2.3.3 Fazit: Leistungsschwankungen

In Abschnitt 2.2 (siehe S. 19) wurden Grundlagen der menschlichen Leistung beschrieben. Darauf aufbauend fokussiert dieser Abschnitt Leistungsschwankungen, um das menschliche Leistungsangebot in ihren für diese Arbeit relevanten Facetten zu erläutern. Dazu können menschliche Leistungsvoraussetzungen i. A. in inter- sowie intraindividuelle Schwankungen eingeteilt werden. Leistungsunterschiede zwischen Einzelpersonen nehmen durch ein steigendes Durchschnittsalter der erwerbstätigen Bevölkerung zu, wobei vor allem ab einem Lebensalter von 45 Jahren die Leistungsdivergenz rapide ansteigt (REFA 1984, BALTES & BALTES 1994, ILMARINEN & TEMPEL 2002). Darüber hinaus unterliegen Unterschiede innerhalb einer Einzelperson periodischen Einflüssen. Die bekannteste Form dieser Biorhythmen stellt die zirkadiane Rhythmik dar. Hierbei weisen viele bekannte Körperfunktionen, ausgelöst durch endogene und exogene Zeitgeber, eine charakteristische 24-Stunden-Periodik auf, die vom arbeitenden Menschen als besonders natürlich empfunden wird.

Insgesamt haben Biorhythmen einen großen Einfluss auf die Gestaltung von Arbeitssystemen. Die Tagesrhythmik repräsentiert die wichtigste Periodik in Bezug auf die Produktivität und Zuverlässigkeit der Arbeitsperson (LUCZAK 1998). Das Arbeiten danach wird als besonders natürlich empfunden, entspricht einem physiologischen Erfordernis und erfordert die Anpassung der Umgebung an die Natur des Menschen (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, SCHLICK ET AL. 2009). Die Verallgemeinerung von einer Vigilanztätigkeit auf z. B. komplexe und variantenreiche Montagearbeiten gilt jedoch als einer der Hauptkritikpunkte an der zirkadianen Rhythmuskurve (ULMER 2013). Sie kann somit nicht ohne weiteres als Grundlage für weitere Forschungstätigkeiten genutzt werden. Ihre

Akzeptanz in der Gesellschaft unterstreicht jedoch die grundsätzliche Relevanz von Leistungsschwankungen.

In Abbildung 2-5 wird die Leistungsheterogenität einer Arbeitsgruppe bestehend aus unterschiedlichen Individuen akzentuiert, wobei jeder Mitarbeiter intraindividuellen Leistungsschwankungen unterliegt und sich von seinen Kollegen interindividuell unterscheidet. Die dabei wirkenden Einflussfaktoren gelten vor allem im Praxisumfeld einer Variantenfließmontage als sehr schwer kontrollier- und messbar. Dies unterstreicht, dass nicht Einzelphänomene, wie z. B. ausschließlich die Tagesperiodik einer Einzelperson, untersucht werden sollen. Vielmehr erscheint es sinnvoll, den Betrachtungsgegenstand auf eine gesamte Gruppe von Mitarbeitern zu legen und die zu entwickelnden Handlungsempfehlungen gezielt auf die Verbesserung der Situation der Gesamtheit auszurichten. Durch die methodische Aufnahme der aktuellen Bearbeitungszeit t_{Ist} an einem Arbeitsplatz, unabhängig vom einzelnen Mitarbeiter, wird dessen Folge geleistet. Denn da das menschliche Leistungsangebot naturgemäß streut, wird für eine bestimmte Arbeit, in Abhängigkeit vom Leistungsniveau des beobachteten Menschen, ein unterschiedlicher Zeitverbrauch benötigt (REFA 1971, HETTINGER & WOBBE 1993). Dieser drückt sich in Variantenfließmontagesystemen durch unterschiedliche t_{Ist} , also der tatsächlich benötigten Bearbeitungszeit, aus und stellt, wie bereits erläutert, die wesentliche Beurteilungsgröße dieser Dissertation dar.

2.4 Systembedingte Stellhebel zur Beeinflussung menschlicher Leistungsschwankungen

In den Abschnitten 2.2 und 2.3 wurden die Grundlagen des menschlichen Leistungsangebotes erläutert. Während dieses z. B. in Form der zirkadianen Rhythmik schwanken kann, gilt die systembedingte Leistungsnachfrage als sehr starr (REINHART ET AL. 2012). Aufbauend auf der Spezifizierung des Betrachtungsgebietes (siehe S. 9) werden in diesem Abschnitt Grundlagen zur Planung der systembedingten Leistungsnachfrage moderner Variantenfließmontagesysteme beschrieben und relevante Stellhebel zur Beeinflussung menschlicher Leistungsschwankungen für diese Arbeit definiert.

2.4.1 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

Gegenstandsbereich der Produktionsplanung und -steuerung (kurz PPS)¹⁶ ist die mengenmäßige und raum-zeitliche Gestaltung von Produktionsprozessen in vorhandenen realen Produktionssystemen mit vorgegebenen Produktionskapazitäten zum Zweck der Produktion von Leistungen (ZELEWSKI ET AL. 2008). Grundsätzlich gestaltet die Produktionsplanung die Produktionsprozesse, bevor sie ausgeführt werden (ZELEWSKI ET AL. 2008), wobei der Produktionsablauf für eine bestimmte Zeit in die Zukunft geplant wird (WIENDAHL 1989). Grundlegende Ziele der PPS sind eine hohe Auslastung, Verfügbarkeit und Produktivität genauso wie geringe Bestände, Prozesskosten und Durchlaufzeiten des Produktionsbetriebes (WIENDAHL 1999, SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007).

Eine exakte Abgrenzung der Begriffe Produktionsplanung und Produktionssteuerung ist nur sehr schwer möglich, da beide Funktionsbereiche eng ineinander greifen. Die Bedeutung der einzelnen Teilfunktionen ist branchenbezogen recht unterschiedlich ausgeprägt (BLOHM ET AL. 1997). Nach ZELEWSKI ET AL. (2008) stellt die sog. „Auftragsfreigabe“ den Angelpunkt der Unterscheidung zwischen Produktionsplanung und Produktionssteuerung dar (siehe Abbildung 2-6).

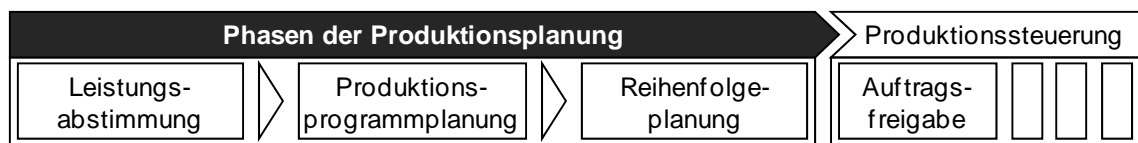


Abbildung 2-6: Phasen der PPS (in Anlehnung an BOYSEN (2005))

Durch die Auftragsfreigabe werden Produktionsaufträge, deren Ausführung im Rahmen der Produktionsplanung geplant wurde, zur Erfüllung durch Produktionsprozesse freigegeben (ZELEWSKI ET AL. 2008). Somit setzt die Produktionssteuerung während der Gestaltung von Produktionsprozessen ein (ZELEWSKI ET AL. 2008). Sie hat die Aufgabe, die Planung trotz der in jedem Betrieb unvermeidlichen Störungen, wie z. B. Personal- oder Maschinenausfall sowie Liefer-

¹⁶ Die Montageplanung stellt einen Teilbereich der Produktionsplanung dar. Sie wird als Prozess zur Erstellung eines Montageplans von der Analyse, über den Entwurf und die Gestaltung, bis zur Einführung von Montagesystemen definiert (CIRP 2012). Verfahren der Montageplanung wurden in den letzten Jahrzehnten zur Vorhersage der genauen Leistungskapazitäten der Montage sowie zur Erhöhung deren Effizienz entwickelt (COLLEDANI ET AL. 2010). EGBERS (2013) fasst relevante Phasen der Montageplanung aufbauend auf bekannten Vorgehensweisen (z. B. BULLINGER 1986) zusammen. Dabei existieren die für diese Arbeit relevanten Kernelemente der Montageplanung unter anderen Termini ebenfalls in der Produktionsplanung. Aufgrund der Bekanntheit der Nomenklatur von PPS-Systemen wird in dieser Arbeit die Produktionsplanung fokussiert.

verzögerungen, möglichst gut zu realisieren (WIENDAHL 1989). Die Produktionssteuerung betrifft infolgedessen alle Funktionen, die zur termin- und mengenmäßigen sowie qualitäts- und kostengerechten Abwicklung der Aufträge dienen (BLOHM ET AL. 1997).

Die Produktionsplanung umfasst die Gesamtheit von Aktivitäten, die zur Bestimmung eines Absatz- bzw. Produktionsprogrammes dienen, unterschieden in Primärbedarfsplanung, Materialwirtschaft und Zeitwirtschaft (CIRP 2012). Dabei müssen vor dem eigentlichen Leistungserstellungsprozess alle Verfahren, Methoden, Abläufe und Materialien festgelegt werden, die zur Durchführung der Produktion erforderlich sind (BLOHM ET AL. 1997). Sie untergliedert sich in die wesentlichen Phasen Leistungsabstimmung, Produktionsprogrammplanung und Reihenfolgeplanung (BOYSEN 2005).

Auf Schichtebene ordnet die Reihenfolgeplanung den einzelnen Varianten, die unterschiedliche zeitliche Belastungen an den Stationen bedingen, einen Fertigungstakt zu (BOYSEN 2005). Aufgabe der Reihenfolgeplanung ist es, Varianten, die hohe Arbeitsbelastungen an einzelnen Stationen hervorrufen, so auf die Montagefolge zu verteilen, dass einerseits eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Arbeitsstationen erreicht wird und andererseits die gewünschte Montagemenge realisiert werden kann (BLOHM ET AL. 1997, BOYSEN 2005). Bei der Maschinenbelegungsplanung, bei der die exakte Auftragsreihenfolge fixiert wird und endgültige Montageaufträge an den Produktionsvollzug gemeldet werden können, wird eine große Anzahl an Verfahren zur Lösung von Reihenfolgeproblemen eingesetzt (BLOHM ET AL. 1997, BOYSEN 2005). Diese umfassen Verfahren zur linearen Optimierung, zur dynamischen Optimierung, kombinatorische Verfahren (z. B. Branch-and-bound-Algorithmen), heuristische Verfahren oder Simulation (BLOHM ET AL. 1997). In der Praxis bekannte Verfahren wie das sog. „Mixed-model-sequencing“ werden seit WESTER & KILBRIDGE (1964) in der Literatur diskutiert (BOYSEN ET AL. 2009).

Im Rahmen der Produktionsprogrammplanung wird festgelegt, welche Erzeugnisse bestimmter Qualität, in welchen Mengen in definierten Zeiträumen gefertigt werden sollen (BLOHM ET AL. 1997, BOYSEN 2005). Ziel der Produktionsprogrammplanung ist es, gegebene Varianten gleichmäßig auf zu definierende Zeithorizonte (Monat, Woche, Tag, Schicht) zu verteilen. Dieses Vorgehen wird, je näher der Produktionszeitraum rückt, für immer kleinere Zeiträume wiederholt, bis das Schichtprogramm final bestimmt ist (BOYSEN 2005).

2.4.2 Leistungsabstimmung als relevante Phase der PPS

Bei der Leistungsabstimmung¹⁷ werden ganz grundlegend die Arbeitsgänge und Arbeitsabläufe für die Erstellung einzelner Werkstücke definiert. Neben einer Transportplanung findet eine Bedarfsplanung statt. Hierbei werden die Anforderungen an das Personal, die Betriebsmittel, deren Instandhaltung und das Material bestimmt. Es erfolgt die Durchlaufzeitenplanung, bei der das gesamte Zeitgerüst der Produktion festgelegt wird. Während der Kapazitätsterminierung wird der kundengesteuerte Leistungsbedarf mit dem produktionsbedingten Leistungsangebot abgeglichen (BLOHM ET AL. 1997). Jeder Station wird durch eine Kapazitätsteilung eine Menge an Arbeitsgängen zugeordnet, die innerhalb der Taktzeit an jedem Werkstück eines Taktes vollzogen werden (BULLINGER 1986, BOYSEN 2005). Die längste dieser Bearbeitungsdauern ergibt i. d. R die Taktzeit. Durch die Leistungsabstimmung ist die Taktzeit und mit ihr die Produktionsmenge innerhalb eines Zeitraumes fest vorgegeben (BOYSEN 2005). Ziele einer optimalen Leistungsabstimmung umfassen geringe Leerzeiten der Betriebsmittel und Montagemitarbeiter bei maximalem Gewinn und fokussieren damit in erster Linie Wirtschaftlichkeitskennzahlen (FANDEL ET AL. 2011).

In dieser Arbeit soll eine Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der *Planung* von Variantenfließmontagesystemen entwickelt werden. Innerhalb dieser Methode sollen die für diese Arbeit relevanten Stellhebel der Montage, die „Bearbeitungszeit“ und der „Tätigkeitsmix“, analysiert werden, um daraus Handlungsempfehlungen ableiten zu können (siehe Zielsetzung, Abschnitt 1.3, S. 7). Im Gegensatz dazu wird die onlinefähige, z. B. schichtgenaue Beeinflussung der Bearbeitungszeit oder des Tätigkeitsmix in der *Steuerung* im Ausblick näher ausgeführt. Die methodisch zu entwickelnden Handlungsempfehlungen nehmen ausschließlich auf die Planung von Montagesystemen Einfluss (siehe Abbildung 2-7).

¹⁷ Für eine weitergehende Diskussion zum Thema Leistungsabstimmung in Variantenfließmontagesystemen liefert KRATZSCH (2000) einen umfassenden Literaturüberblick.

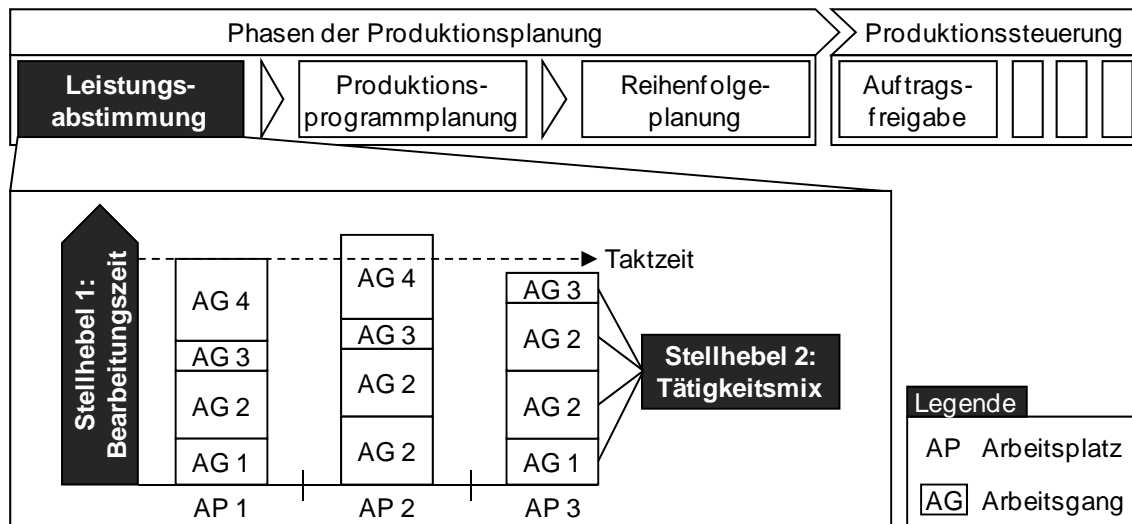


Abbildung 2-7: Einordnung der für diese Arbeit relevanten Stellhebel „Bearbeitungszeit“ und „Tätigkeitsmix“ in die Produktionsplanung

Dabei muss in der Betrachtungsebene der PPS die Phase der Leistungsabstimmung fokussiert werden. Denn in dieser Phase werden alle relevanten Einflussgrößen betrachtet, die Bezug zur Ermittlung der Bearbeitungszeit und des Tätigkeitsmix haben. Dadurch können andere Phasen wie die Produktionsprogrammplanung, die Reihenfolgeplanung oder die Produktionssteuerung aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

2.4.2.1 Stellhebel 1: Bearbeitungszeit

Grundlagen der Bearbeitungszeit

In der Variantenfließmontage werden Werkstücke mittels eines Transportsystems durch hintereinander angeordnete Produktiveinheiten bewegt, die jeweils die gleiche Zeitvorgabe zur Durchführung der jeweiligen Arbeitstätigkeiten haben (BOYSEN ET AL. 2006, CIRP 2012). Der Kundentakt, also der Bedarf, den ein Kunde in einem definierten Zeitraum an fertigen Endprodukten an den entsprechenden Montagebereich stellt, repräsentiert dabei die wesentliche Einflussgröße auf die Bestimmung einer Taktzeit (CARNAHAN & NORMAN 2001, ARNOLD ET AL. 2008). Sie entspricht dem zeitlichen Abstand, in dem fertige Teile die Fließlinie verlassen (TAKEDA 2008) und wird in der Leistungsabstimmung meist mittelfristig festgelegt (ARNOLD ET AL. 2008).

Aus Abbildung 2-7 ist an den Arbeitsplätzen 2 und 3 zu erkennen, dass sich die geplante Bearbeitungszeit t_{Plan} jedoch von der aus dem Kundentakt bestimmten Taktzeit unterscheiden kann (BOYSEN ET AL. 2009). Einzelne Arbeitsgänge entsprechen Elementartätigkeiten, die nicht mehr weiter sinnvoll unterteilbar sind. In der Leistungsabstimmung wird für jede Variante an jedem Arbeitsplatz eine Anzahl an Arbeitsgängen definiert. Die resultierende gesamte geplante Bearbeitungszeit t_{Plan} orientiert sich an der Taktzeit, muss dieser aber nicht exakt entsprechen. Bei t_{Plan} , oder den in der Industrie synonym verwendeten Begriffen „Vorgabezeit“ oder „Planzeit“, handelt es sich um den zur Ausführung von Arbeitsabläufen benötigten Zeitbedarf bei Normalleistung (BLOHM ET AL. 1997, CIRP 2012). Das Wissen über t_{Plan} dient als Grundlage der PPS, ermöglicht die Planung der Belegungszeit eines Betriebsmittels oder der Auftragszeit des Montagemitarbeiters und dient der Kapazitätsplanung des systembedingten Leistungsbedarfs (WIENDAHL 1989, BLOHM ET AL. 1997).

Die Auftragszeit eines Montagemitarbeiters unterteilt sich in eine Rüstzeit sowie eine Ausführungszeit (siehe Abbildung 2-8). Die reine Tätigkeitszeit, wie sie z. B. über das SvZen bestimmt wird, stellt in diesem Zusammenhang nur einen Teil der Grundzeit und diese wiederum nur einen Teil der Ausführungszeit dar. Die Verteilzeit dient beispielsweise der Abdeckung organisatorischer Unvollkommenheiten und ist für die Erfüllung menschlicher Bedürfnisse erforderlich (CIRP 2012).

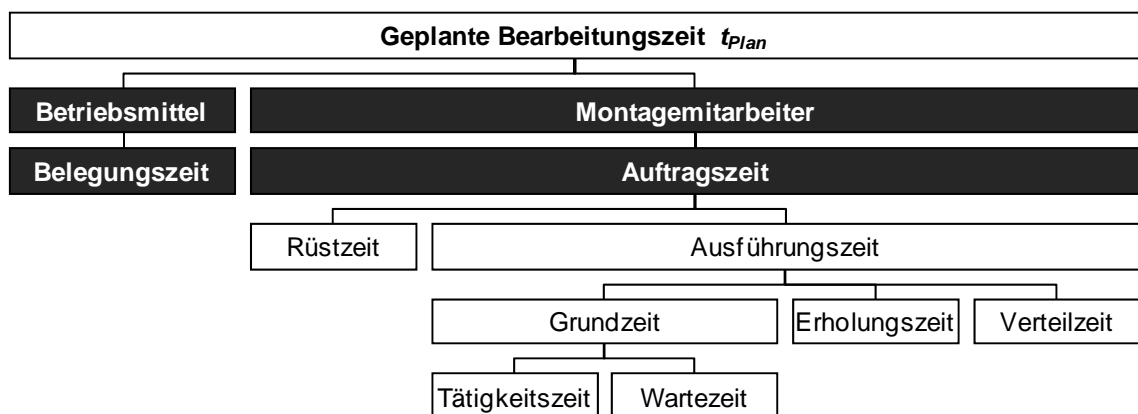


Abbildung 2-8: Zusammensetzung einer geplanten Bearbeitungszeit t_{Plan} (in Anlehnung an WIENDAHL (1989), REFA (1993))

Variabilität von Bearbeitungszeiten

Die geplante Bearbeitungszeit t_{Plan} wird in den meisten Fällen als deterministisch angenommen (BOYSEN 2005), d. h. als exakt vorhersehbare und planbare Größe. Bei einem vollautomatisierten oder bei sehr einfachen Arbeitsprozess/en kann diese Annahme eine ausreichende Approximation der Realität sein. Bei manueller Arbeit kann diese Annahme häufig jedoch nicht aufrechterhalten werden, da die tatsächliche Bearbeitungszeit t_{Ist} in Abhängigkeit vieler Einflussgrößen schwanken kann (JOHNSON 1983, BOYSEN 2005, TEMPELMEIER 2013). Selbst bei der Montage nur einer Variante unter Berücksichtigung einer perfekten Leistungsabstimmung, wenn also die Mittelwerte der geplanten Bearbeitungszeiten an allen Stationen identisch sind, kann t_{Ist} der einzelnen Werkstücke variieren (TEMPELMEIER 2013).

Nach HOPP & SPEARMAN (2008) existieren verschiedene Formen der Variabilität der Bearbeitungszeit, also ihrer zeitlichen Abweichung vom Soll-Zustand. Zum Ersten wird nicht kontrollierbare Variabilität durch zufällige Ereignisse verursacht, wobei weder deren Zeitpunkt noch Dauer plan- und vorhersehbar sind. Beispiele hierfür sind Maschinen- oder Stromausfälle oder Personenunfälle. Sie sind durch präventive Maßnahmen beeinfluss- und reduzierbar, jedoch nie vollständig zu verhindern. Zum Zweiten ist kontrollierbare Variabilität nicht zu unterbinden, ihr Eintrittszeitpunkt jedoch planbar. Als Beispiele sind Rüstvorgänge oder Wartungsarbeiten zu nennen. Die Kategorie der natürlichen Variabilität kann zum Dritten als Zusammenfassung aller übrigen Verursacher verstanden werden. Ein typisches Beispiel ist u. a. das Abrutschen des Schraubenziehers von der Schraube. Diese Form der Variabilität ist an manuellen Arbeitsplätzen wesentlich ausgeprägter als an automatisierten (HOPP & SPEARMAN 2008).

Abweichungen bei t_{Ist} aufgrund von (nicht) kontrollierbarer Variabilität werden aus der weiteren Betrachtung dieser Arbeit ausgeschlossen. Vielmehr wird angenommen, dass Diskrepanzen der realen Bearbeitungszeit aufgrund natürlicher Variabilität als Indikator für menschliche Leistungsschwankungen gelten. Sie werden in den weiteren Untersuchungen fokussiert.

2.4.2.2 Stellhebel 2: Tätigkeitsmix

Neben der Bearbeitungszeit stellt der Tätigkeitsmix den zweiten in dieser Arbeit zu betrachtenden Stellhebel zur systembedingten Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen dar. Eine Tätigkeit wird in ihrer kleinsten Einheit durch einen Arbeitsgang beschrieben. Arbeitsgänge des Montierens unterteilen sich in die Tätigkeiten Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und diverse Sonderoperationen (siehe Abbildung 1-5, S. 11). Die für die Montage sehr relevanten Fügetätigkeiten können weiter in Fügen durch Zusammensetzen (DIN 8593-1 (2003)), durch Füllen, durch An-/Einpressen (DIN 8593-3 (2003)), durch Urformen, durch Umformen, durch Schweißen, durch Löten und durch Kleben unterteilt werden (DIN 8593-0 (2003)). Bei der Leistungsabstimmung erfolgt eine Zuordnung der Arbeitsgänge an einzelne Arbeitsstationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Kapazitätsbedarfe zur Erfüllung eines bestimmten Zieloptimal (ZÄPFEL 2000, KRATZSCH 2000, BOYSEN 2005). Dadurch wird die Betriebsmittel- und Arbeitskräfteausstattung an der jeweiligen Station determiniert (BOYSEN 2005). Diese Zuordnung ergibt den arbeitsplatz- und variantenspezifischen Tätigkeitsmix.

2.4.3 Fazit: Stellhebel der Leistungsabstimmung

Aufbauend auf den Grundlagen der PPS wurden die beiden in dieser Arbeit zu betrachtenden Stellhebel zur Beeinflussung der systembedingten Leistungsnachfrage erläutert. Dabei unterliegt die tatsächliche Bearbeitungszeit einer Variabilität. In Kombination mit einem Tätigkeitsmix, der während der Leistungsabstimmung zu Engpassarbeitsplätzen (Erläuterungen hierzu siehe Anhang 10.2.3, S. 172) führen kann, entstehen in heutigen Variantenfließmontagesystemen Produktionsverluste für das Unternehmen und Überlastungen der Mitarbeiter. Auf dieser Basis werden im späteren Verlauf der Arbeit Methoden entwickelt, um die erläuterten Stellhebel in einem laufenden Variantenfließmontagesystem zu erheben und so aufzubereiten, um daraus Handlungsempfehlungen für die Planung ableiten zu können.

2.5 Fehlbeanspruchungen in der Variantenfließmontage

Um den Bedarf der Berücksichtigung von Mitarbeiter-Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage zu unterstreichen, soll dargestellt werden, welche Folgen durch die Diskrepanz aus Leistungsangebot und -nachfrage für den Mitarbeiter entstehen. Es wird die Annahme zu Grunde gelegt, dass mangelhaft geplante Bearbeitungszeiten oder Tätigkeitsmixe aufgrund der daraus resultierenden Engpässe und des folgenden Stressempfindens bei den Monteuren zu hohen Belastungen in Form von Termin- und Leistungsdruck führen. Darüber hinaus wird gezeigt, dass die zu entwickelnden Handlungsempfehlungen kein Patentrezept zur Belastungsreduzierung darstellen können, da jeder Mitarbeiter individuelle Leistungsvoraussetzungen aufweist.

2.5.1 Belastungs-Beanspruchungs-Konzept

Als Belastung wird die Gesamtheit aller Einwirkungen aus dem Arbeitsgegenstand, der Arbeitsumwelt und der Arbeitsmittel auf den physiologischen oder psychologischen Zustand einer Person im Arbeitsvollzug bezeichnet (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, SCHMIDTKE 1993, DIN EN ISO 6385 (2004)). Belastung ist eine Funktion aus Belastungshöhe und Belastungsdauer, also Intensität multipliziert mit der Zeit (SCHMIDTKE 1993) und führt zu Reaktionen beim Arbeitenden, die von seinen individuellen Merkmalen (z. B. Größe, Alter, Fähigkeiten, Fertigkeiten, usw.) abhängig sind und als Arbeitsbeanspruchung bezeichnet werden (HETTINGER & WOBBE 1993, SCHMIDTKE 1993, DIN EN ISO 6385 (2004)).

Arbeitsbeanspruchung entsteht bei einem Missverhältnis zwischen Arbeitsmenge, Arbeitsqualität und Arbeitszeit in Zusammenwirkung mit individuellen Leistungsvoraussetzungen, den Arbeitsbedingungen und der Unternehmenskultur (BAUA 2012). Im Gegensatz zur Arbeitsbelastung stellt die Arbeitsbeanspruchung einen personenbezogenen Begriff dar. Sie kennzeichnet die Auswirkungen einer Arbeitsbelastung auf einen bestimmten Menschen (REFA 1984). Die vom Individuum abhängige Beanspruchung ist subjektiv und gibt an, wie sich objektiv gleiche Belastungen individuell unterschiedlich auswirken (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983, DIN EN ISO 10075-2 (2000)). Zur Veranschaulichung des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts zeigt Abbildung 2-9 einen einseitig eingespannten Metallstab (in Anlehnung an SCHMIDTKE (1993)). Hierbei wirkt ein und dieselbe Belastung auf einen Stab, wobei dessen unterschiedliche Biegung syno-

nym steht für die beschriebene interindividuelle Ursache-Wirkung-Beziehung bei der Beanspruchung der einzelnen Mitarbeiter.

Die psychische Belastung beschreibt alle Einflüsse, die von außen auf den Menschen zukommen und auf ihn einwirken (DIN EN ISO 10075-1 (2000)). Die daraus folgende psychische Beanspruchung wird als die Inanspruchnahme von psychischen Voraussetzungen im Prozess des Arbeitsvollzuges verstanden. Sie ist ein Resultat der unbewussten Verarbeitung unterschiedlicher Arbeitsbedingungen und Belastungen durch den Menschen (HETTINGER & WOBBE 1993).

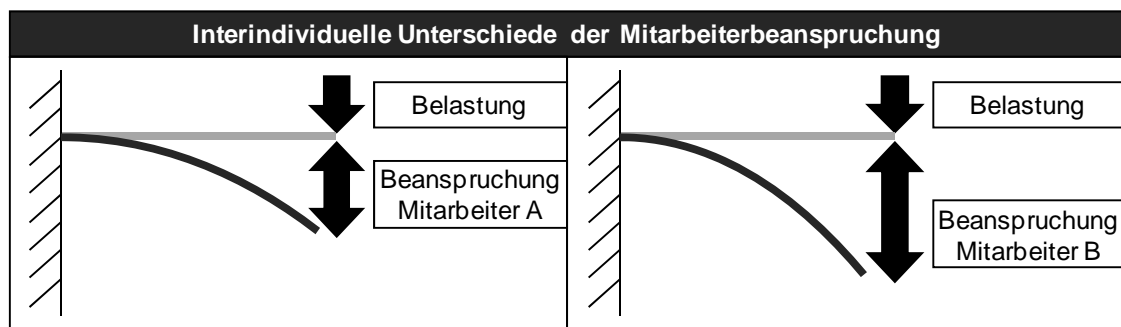


Abbildung 2-9: Einseitig eingespannter elastischer Metallstab zur Veranschaulichung des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts bei zwei interindividuell unterschiedlichen Mitarbeitern (in Anlehnung an SCHMIDTKE (1993))

2.5.2 Belastungssituation in der heutigen Variantenfließmontage

Die Belastungssituation in heutigen Variantenfließmontagesystemen gilt trotz großer Anstrengungen in den letzten Jahrzehnten nach wie vor als kritisch. Weil Freiheitsgrade des Erwerbstätigen hinsichtlich Arbeitsweise, Arbeitsgeschwindigkeit und Arbeitspausen immer noch sehr eingeschränkt sind, hat sich die Arbeit in der Montage in diesem Zeitraum nur zu einem geringen Grad erleichtert (LOTTER & SCHILLING 1994, SCHLICK ET AL. 2009). Denn je mehr über die Gestaltung der operationellen Abläufe und die organisatorische Reglementierung in die Dispositionsspielräume der Arbeitstätigkeiten eingegriffen wird, umso ausgeprägter fallen negative Auswirkungen auf die Beschäftigten aus (HETTINGER & WOBBE 1993).

Im Zuge des demografischen Wandels verstärkt sich diese Relevanz, da ein von Maschinen und Gruppenforderungen bestimmtes Arbeitstempo nur wenig Abwechslung hinsichtlich der körperlichen und geistigen Anforderungen bietet und

repetitive Arbeitstätigkeiten vor allem für ältere Erwerbspersonen als besonders belastend gelten (SCHLICK ET AL. 2009).

Dabei ist Fließbandarbeit unter Zeitdruck bei vorgegebenem Zwangstempo vor allem in der Einübungsphase besonders kritisch (HETTINGER & WOBBE 1993). Denn Zeitdruck führt i. A. nicht zu Leistungssteigerungen, sondern zumindest längerfristig eher zu Leistungsminderungen. Sobald eine zeitliche Bindung des Montageobjektes besteht (wie bei der Taktstraßenmontage, der kontinuierlichen Fließmontage oder der stationäre Fließmontage, siehe Abbildung 1-6, S. 13) entstehen vermehrt Unfälle, Ausschuss und Fehlzeiten der Mitarbeiter (JUNGBLUTH & MOMMSEN 1968, STANIC 2010). Werkstücke verlassen aufgrund mangelnder Planung der Bearbeitungszeit oder des Tätigkeitsmix oft zu früh den Arbeitsbereich und verursachen dadurch höchste Belastungen (BECKER & SCHOLL 2006).

Eine der zentralen Gestaltungsgrößen, mit der sehr unterschiedliche Auswirkungen der kurzzyklischen Taktarbeit verbunden sein können, liegt in dem arbeitsplatzbezogenen Entkopplungsgrad (vor- und nachgelagerte Pufferkapazität) (HETTINGER & WOBBE 1993). Hierunter ist der zeitliche Handlungsspielraum hinsichtlich der Disponierbarkeit des Arbeitstempos zu verstehen, der sich aus der Kapazität der dem Arbeitsplatz zugeordneten Pufferlager ergibt. Die ungünstigsten Bedingungen entstehen in taktbestimmten Fließbandarbeitssituationen in Verbindung mit einer zweiseitigen Verkettung der Arbeitstätigkeiten bei zusätzlichen zwangsbestimmten Anforderungen, wie sie in modernen Variantenfließmontagesystemen zu finden sind (HETTINGER & WOBBE 1993).

Eine weitere Grundlage der wirtschaftlichen Durchführung industrieller Produktion ist die Schichtarbeit. Hierbei gilt der Dreischichtbetrieb als, vor allem in der Automobilindustrie, sehr weit verbreitet. Typischerweise kann eine Frühschicht von 6 Uhr bis 14 Uhr, eine Spätschicht von 14 Uhr bis 22 Uhr und eine Nachtschicht von 22 Uhr bis 6 Uhr unterschieden werden. Grundsätzlich arbeitet die Nachtschicht zeitverschoben zur zirkadianen Rhythmik. Sie stellt eine wesentliche Belastung dar, da wichtige Körperfunktionen zeitverschoben zur sozialen Umwelt arbeiten müssen und der Schlaf-Wach-Rhythmus empfindlich gestört wird (HETTINGER & WOBBE 1993).

Die Variantenfließmontage belastet die darin arbeitenden Mitarbeiter hoch. Dabei lassen sich aus den bisherigen Erläuterungen folgende Merkmale als besonders kritisch fokussieren: Zeitdruck, Taktbindung, starre Verkettung sowie organisatorische Einengung. Jedes dieser Merkmale tritt in den für diese Arbeit definierten Umfängen der industriellen Produktion auf und soll durch die zu entwickelnden Handlungsempfehlungen verbessert werden.

2.5.3 Folgen erhöhter Beanspruchung für den Montagemitarbeiter

Psychische Erkrankungen am Arbeitsplatz machen 10,8 % des Gesamtkrankensstands aus und stehen damit an vierter Stelle der wichtigsten Krankheitsarten. Sie gehören zu den häufigsten und auch kostenintensivsten Erkrankungen (DAK 2010). Folgen der psychischen Beanspruchung von Montagemitarbeitern gelten als sehr vielschichtig, wobei diese je nach den individuellen und situativen Voraussetzungen hinsichtlich ihrer Erscheinungsform und Stärke unterschiedlich ausfallen (DIN EN ISO 10075-1 (2000)).

In diesem Zusammenhang ist Stress als bekannteste Form psychischer Beanspruchung eine unspezifische Reaktion des Körpers auf zu hohe Anforderungen, die an ihn gestellt sind. Einer Herstellung der allgemeinen Arbeitsbereitschaft, erkennbar u. a. an einer Steigerung der Herzfrequenz oder des Blutdrucks, stehen Gefahren durch eine zu hohe Anzahl und (Langzeit-) Intensität an Stressoren gegenüber. Mentale Stressoren umfassen z. B. zu hohe Anforderungen an die Auffassungsgabe, die Entscheidungsfähigkeit oder an die Fähigkeit zur Nutzung der im Langzeitgedächtnis gespeicherten Informationen (SCHMIDTKE 1993). Letzteres tritt in der Variantenfließmontage beispielsweise auf, wenn Taktzeiten insgesamt zu lange (Stellhebel Bearbeitungszeit) geplant werden und somit zu viele mitunter unterschiedliche (Stellhebel Tätigkeitsmix) Arbeitsgänge in einem Montagezyklus zu vollziehen sind.

Im Rahmen intraindividuelle Leistungsunterschiede (siehe Abschnitt 2.3.2, S. 29) steigt das menschliche Leistungsangebot nach Pausen oder zu Beginn der Arbeit aufgrund der Einarbeitungs- und Umstellungsphase an und verläuft dann gleichmäßig. Ab einer gewissen Arbeitszeit wird der Anstieg aufgrund von Ermüdungserscheinungen zunehmend flacher. Ab einem Maximum fällt die Effektivität bei weiterer Verlängerung der Arbeit ab. Für eine Mehrleistung muss unverhältnismäßig viel Zeit aufgewendet werden (SCHLICK ET AL. 2009). In diesem Zusammenhang stellen Ermüdung und Erholung periodische Vorgänge

bei jedem lebenden Organismus dar. Ermüdung ist eine Leistungs- und Funktionsminderung von Organsystemen, die durch ausreichende Erholung wieder ausgeglichen wird. Dies gilt sowohl für die biologische Ermüdung, die sich unabhängig davon einstellt, ob der Mensch arbeitet oder nicht, als auch für die Arbeitsermüdung als Folgeerscheinung einer vorausgegangenen Arbeitsbeanspruchung (REFA 1984).

Auch Monotonie stellt eine wesentliche Folge erhöhter Beanspruchung in der Variantenfließmontage dar. Sie wird beschrieben als ein langsam entstehender Zustand herabgesetzter Aktivierung, der bei langdauernden, einförmigen und sich wiederholenden Arbeitsaufgaben oder Tätigkeiten auftreten kann. Monotonie geht dabei einher mit einer Leistungsabnahme, Schläfrigkeit, Müdigkeit sowie mit Leistungsschwankungen (DIN EN ISO 10075-1 (2000)).

Nicht zuletzt hält heutzutage jeder dritte Beschäftigte den Anforderungen chronobiologisch unangemessener Arbeitsbedingungen nicht Stand. Bei dieser relevanten Folge erhöhter Beanspruchung sind die natürlichen biologischen Rhythmen des Menschen gestört (BRAUN 2011). Dabei ist der Montagemitarbeiter während der Nachtschicht gezwungen, seine Arbeit zu einer Tageszeit zu verrichten, in der sein Organismus bis in die Enzymstrukturen hinein nicht auf äußere Leistung, sondern auf Restitution der Kräfte geschaltet ist (SCHMIDTKE 1993). Es fehlt die Fähigkeit zur Regeneration und der Mensch gerät körperlich und psychisch aus dem Gleichgewicht (BRAUN 2011).

2.5.4 Fazit: Beanspruchungen

Aus mangelhaft geplanten Bearbeitungszeiten und Tätigkeitsmischen entsteht eine Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und -nachfrage in Variantenfließmontagesystemen. Neben Termin- und Leistungsdruck (siehe Handlungsbedarf, Abschnitt 1.2, S. 4) gelten Zeitdruck, Taktbindung, starre Verkettung sowie organisatorische Einengung in diesem Zusammenhang als wesentliche Belastungsmerkmale im beschriebenen Betrachtungsrahmen. In diesem Kontext stellen vor allem psychische Belastungen eine immer größer werdende Herausforderung für die Planung dar. Die Vermeidung von Stress, Ermüdung, Monotonie und in großem Maße chronobiologisch unangemessener Arbeitsanforderungen müssen bei der Entwicklung von Handlungsempfehlungen im Rahmen dieser Arbeit im zentralen Fokus stehen.

2.6 Fazit

Getrieben durch den Zwang einer kontinuierlichen Steigerung der Produktivität produzieren Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes in Variantenfließmontagesystemen. Dabei unterliegen die Leistung, die vom System abverlangt wird, sowie die Anforderungen an den Montagemitarbeiter einer Angebot-Nachfrage-Beziehung.

Einerseits folgt die systembedingte Leistungsnachfrage in erster Linie Wirtschaftlichkeitskennzahlen. Arbeitsgänge werden während der Leistungsabstimmung gleichmäßig über Tage und Schichten verteilt. In dieser Phase werden alle relevanten Größen geplant, die wesentlichen Einfluss auf die in dieser Arbeit betrachteten Stellhebel „Bearbeitungszeit“ und „Tätigkeitsmix“ nehmen. Insgesamt handelt es sich um ein Planungsproblem, wobei explizit Phasen wie die Produktionsprogrammplanung oder die Reihenfolgeplanung neben Steuerungsthemen in dieser Arbeit aus der weiteren Betrachtung ausgeklammert werden. Darüber hinaus wurde erläutert, welche wesentlichen Einflussgrößen auf die Planung der beiden Stellhebel wirken. Dabei unterliegt die tatsächliche Bearbeitungszeit einer Variabilität. In Kombination mit einem mangelhaften Tätigkeitsmix, der während der Leistungsabstimmung zu Engpassarbeitsplätzen führen kann, entstehen in heutigen Variantenfließmontagesystemen Produktivitätsverluste für das Unternehmen und Überlastungen der Mitarbeiter.

Der Leistungsgrad, der sich als Quotient aus der realen Bearbeitungszeit t_{Ist} und geplanten Bearbeitungszeit t_{Plan} berechnet, gilt andererseits als Indikator für das menschliche Leistungsangebot, wobei nicht alle Bestandteile direkt beeinflussbar sind. Sog. Anpassungsmerkmale wie Ermüdung oder Motivation sollen durch Intervention in Form eines Eingriffes in die Planung der Variantenfließmontage kurzfristig verändert werden können. Daneben gilt das menschliche Leistungsangebot als inter- und intraindividuell variabel. Zunehmende Leistungsunterschiede zwischen Einzelpersonen durch ein steigendes Durchschnittsalter der erwerbstätigen Bevölkerung und periodische Einflüsse auf das Leistungsangebot einer Person steigern die Leistungsheterogenität einer gesamten Arbeitsgruppe.

Aufgrund mangelhaft geplanter Bearbeitungszeiten und Tätigkeitsmixe entsteht eine Diskrepanz zwischen Leistungsangebot und -nachfrage in Variantenfließmontagesystemen. Es sollen Stressoren wie Ermüdung oder chronobiologisch unangemessene Arbeitsanforderungen durch Handlungsempfehlungen im Rah-

men einer Verhältnisprävention durch die zu entwickelnden Methoden adressiert werden können.

3 Stand der Erkenntnisse und Handlungsbedarf

3.1 Kapitelüberblick

Aufbauend auf den Grundlagen wird in diesem Kapitel der Stand der Erkenntnisse in Bezug zur übergeordneten Zielsetzung der Arbeit aufbereitet, um daraus den konkreten Handlungsbedarf spezifizieren zu können. In diesem Zusammenhang sollen für die für diese Arbeit relevanten Stellhebel der Leistungsabstimmung, die Bearbeitungszeit von Montagemitarbeiter und der Tätigkeitsmix, Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation generiert werden. Darauf aufbauend gliedert sich der Stand der Erkenntnisse in insgesamt vier Abschnitte (siehe Abbildung 3-1).

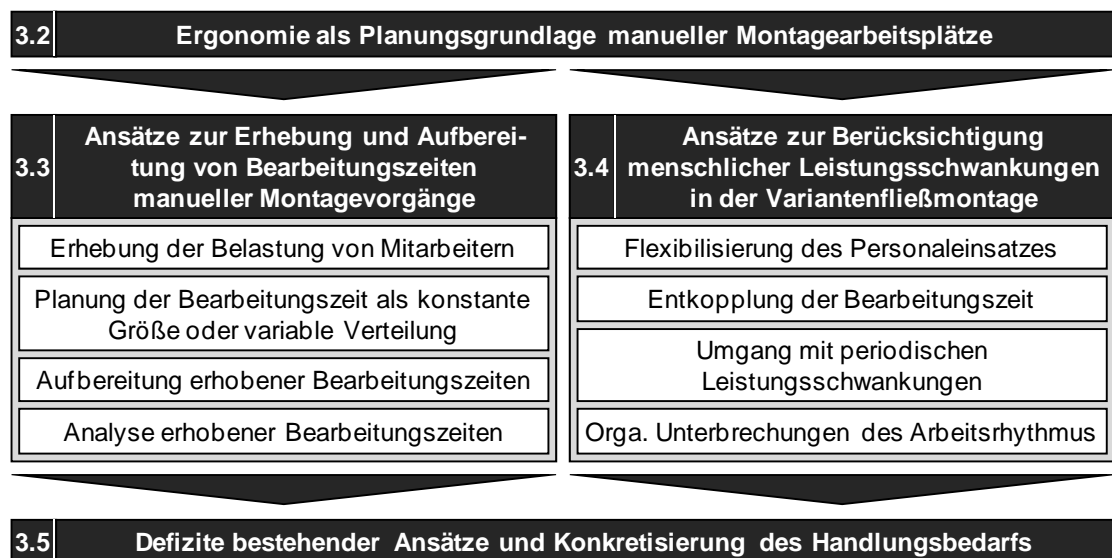


Abbildung 3-1: Überblick Kapitel 3

Zunächst wird die Ergonomie als Planungsgrundlage manueller Montagearbeitsplätze beschrieben (Abschnitt 3.2), wobei die Arbeitsplatzergonomie und deren Organisation eine exponierte Stellung einnehmen. Aufbauend auf diesem im Kontext der Arbeit übergeordneten Abschnitt wird der Stand der Technik zu zwei konkreten Themenkomplexen erläutert, aus deren bis dato defizitärer Betrachtung hinsichtlich der Zielsetzung der konkrete Handlungsbedarf (Abschnitt 3.5) dieser Arbeit abgeleitet wird.

Zum einen werden Ansätze zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge untersucht (Abschnitt 3.3). Relevante Unter-

suchungsgrößen sind dabei Methoden zur Erhebung der Belastung von Montagearbeitern, der Vergleich zwischen der Planung der Bearbeitungszeit als konstante Größe und als variable Verteilung sowie die Bewertung von Möglichkeiten zur Aufbereitung und Analyse von erhobenen Bearbeitungszeiten.

Darauf aufbauend werden zum anderen Ansätze zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage erörtert (Abschnitt 3.4). Es wird gezeigt, wie eine Flexibilisierung des Personaleinsatzes, die Entkopplung der Bearbeitungszeit, der Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen und die organisatorische Unterbrechung des Arbeitsrhythmus aktuell zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation beitragen.

3.2 Ergonomie als Planungsgrundlage manueller Montagearbeitsplätze

Bei der Gestaltung manueller Montagearbeitsplätze in der Variantenfließproduktion spielt, neben Wirtschaftlichkeitskennzahlen, die Berücksichtigung des Faktors Personal eine herausragende Rolle (WIENDAHL 1989, HECHL 1995, BLOHM ET AL. 1997). Die methodische Betrachtung des Arbeitsstudiums führt in diesem Zusammenhang seit Beginn des 20. Jahrhunderts zu einer nachhaltigen Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation an Fließbändern (REFA 1984). Daraus ist die Disziplin der Arbeitswissenschaft als Systematik zur Analyse, Ordnung und Gestaltung der technischen, organisatorischen und sozialen Bedingungen von Arbeitsprozessen mit dem allgemeinen Ziel der Schaffung von schädigungslosen, ausführbaren, erträglichen und beeinträchtigungsfreien Arbeitsbedingungen entstanden (REFA 1984, DIN EN ISO 6385 (2004)). Der Arbeitgeber ist grundlegend per Gesetz dazu verpflichtet, alle erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Gesundheit der Mitarbeiter bei der Arbeit zu treffen (ARBSCHG 1996).

Als Teilgebiet der Arbeitswissenschaft liefert die Ergonomie (griechisch: érgon = Arbeit, nomos = Lehre) unter Benutzung anatomischer, physiologischer, psychologischer, soziologischer und technischer Erkenntnisse Methoden, um die Grenzen der Ausführbarkeit und Erträglichkeit menschlicher Arbeit zu bestimmen. Sie schafft die Voraussetzung zur in dieser Arbeit angestrebten Verhältnisprävention, also der Anpassung der Arbeit an den Menschen (REFA 1984). Im Speziellen setzt sich die Arbeitsplatzergonomie zum Ziel, die psychischen, physischen

und sozioökonomischen Arbeitsbedingungen auf Grundlage der an die Physiologie des Menschen angepassten Arbeitsplatzgestaltung zu optimieren (DIN EN ISO 6385 (2004), CIRP 2012). Aufbauend auf den grundlegenden Definitionen adressiert die (Arbeitsplatz-)Ergonomie im Montageumfeld zwei wesentliche Stellhebel zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation: die physische Arbeitsplatzgestaltung und die Organisation der Arbeitsabläufe.

Zum Ersten beschreibt die physische Arbeitsplatzgestaltung die Planung von Arbeitsplätzen unter Berücksichtigung technischer, wirtschaftlicher und arbeitsphysiologischer Rahmenbedingungen (SCHMIDTKE 1993, CIRP 2012). Hauptziel ist das Schaffen aller notwendigen Voraussetzungen, damit die am Leistungserstellungsprozess beteiligten Produktionsfaktoren (siehe Abschnitt 1.4.1, S. 9) im Hinblick auf die Arbeitsaufgabe möglichst optimal zusammenwirken können (REFA 1990). Im Zentrum steht die Betrachtung des Menschen und der Interaktion mit seinem Arbeitsumfeld, das sich für Montageplaner nur sehr schwer genau vorhersagen lässt (SCHMIDTKE 1993, FLETCHER ET AL. 2008). Grundsätzliches Ziel ist die Reduzierung der Arbeitsbeanspruchung, die Vermeidung beeinträchtigender und die Förderung erleichternder Auswirkungen (DIN EN ISO 6385 (2004)), wobei der Nutzer des Systems von Beginn des Gestaltungsprozesses an berücksichtigt werden muss (DIN EN ISO 10075-2 (2000)).

Zum Zweiten wurde innerhalb eines in den 1970er Jahren von der Bundesrepublik Deutschland geförderten Aktionsprogrammes die Arbeitsorganisation als ein wesentlicher Stellhebel zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation vor allem in der Variantenfließmontage identifiziert (BLOHM ET AL. 1997). Ziel ist es, Regeln zur Aufgaben- und Kompetenzverteilung aufzustellen sowie sinnvolle wirtschaftliche, technische und menschengerechte Lösungen für Arbeitsabläufe zu entwickeln (GROCHLA 1980). Die Arbeitsorganisation liefert Methoden zur verbesserten Planung der systembedingten Leistungsnachfrage, um Einfluss auf das menschliche Leistungsangebot nehmen zu können (REFA 1985). Insgesamt sollen Über- und Unterforderungen von Montagemitarbeitern vermieden werden (REFA 1990). Neben der Schaffung von Handlungsspielräumen soll in der Planung ein gewisser Grad an Entscheidungsfreiheit für das selbst gewählte Arbeitstempo vorgehalten werden können (JUNGBLUTH & MOMMSEN 1968, REFA 1990, DIN EN ISO 6385 (2004)). Darüber hinaus fasst PRASCH (2010) in seiner Arbeit in Anlehnung an SCHMIDTKE (1993), GUSSONE ET AL. (1999), WILLNECKER (2000) sowie REIF & BUCK (2003) organisatorische Ziele einer ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung zusammen. Ein Fokus stellt hierbei die Entkopplung von

Arbeitsplätzen untereinander bzw. der Tätigkeiten am Arbeitsplatz dar, um eine flexiblere individuelle Zeiteinteilung und Leistungserbringung durch den Montagemitarbeiter ermöglichen zu können. Mit dem Vorteil der Reduzierung physischer und psychischer Belastung wurde dieses Ziel von PRASCH (2010) als Idee formuliert und liefert einen konkreten Handlungsbedarf aus Sicht der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung, der durch die in dieser Arbeit zu entwickelnden Methoden betrachtet werden soll.

3.3 Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge

Darauf aufbauend, dass manuelle Montagearbeitsplätze in modernen Variantenfließmontagesystemen i. d. R. nach ergonomischen Grundlagen geplant werden, werden in diesem Abschnitt Ansätze zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge untersucht. Dazu wird zunächst der Stand der Technik hinsichtlich Möglichkeiten zur Erhebung und Beeinflussung der Mitarbeiterbelastung im Produktionsumfeld aus arbeitswissenschaftlicher und produktionstechnischer Sichtweise recherchiert. Darüber hinaus wird die Planung der Bearbeitungszeit als konstante Größe sowie als variable Verteilung erörtert. Hierbei wird in Anlehnung an die Grundlagen analysiert, welche Folgen die Planung der Bearbeitungszeit als Konstante für die Mitarbeiter nach sich zieht, um daraus die Notwendigkeit einer variablen Betrachtung abzuleiten. Dazu werden relevante Größen der Statistik eingeführt. Abschließend werden Methoden zur Aufbereitung und Analyse von erhobenen Bearbeitungszeiten hinsichtlich der Zielsetzung dieser Arbeit untersucht.

3.3.1 Möglichkeiten zur Erhebung und Beeinflussung der Mitarbeiterbelastung im Produktionsumfeld

Grundsätzlich stellt die Ermittlung der Zusammensetzung der Belastung und vor allem der dabei wirkenden Beanspruchung auf den Mitarbeiter ein komplexes Problem dar, da bei dessen Messung nur sehr schwer kontrollierbare äußere Einflussgrößen eine tragende Rolle spielen (ZÄH & PRASCH 2007). Einwirkungen, die sich aus der sozialen Arbeitsumwelt (z. B. Zwang zur Kooperation in Gruppen), aus bestimmten Bereichen der Arbeitsorganisation (z. B. Zeitdruck) und aus dem sich ständig ausweitenden Bereich des mit Aufnahme, Verarbeitung

und Umsetzung von Informationen verknüpften Arbeitsgegenstandes ergeben, gelten im naturwissenschaftlich-technischen Sinne als nicht messbar (SCHMIDTKE 1993). Auch im Bereich psychischer Beanspruchung stoßen Messmethoden an ihre Grenzen, da die Beanspruchungsakkumulation bei konstanter Belastung für den Beobachter nicht kontinuierlich, sondern stufenweise abläuft (SCHMIDTKE 1993).

Trotz der Komplexität der Thematik wurden, u. a. aufgrund der Belastungssituation von Mitarbeitern im Produktionsumfeld (siehe Abschnitt 2.5, S. 40), einige Methoden zur Erhebung von Belastungsfaktoren in einem laufenden Systembetrieb entwickelt. Der Stand der Technik wird dabei aus der wissenschaftlichen Betrachtung der Mensch-Maschine-Interaktion abgeleitet. Denn hierbei treffen die Disziplinen der Arbeitswissenschaft sowie der Produktionstechnik aufeinander. In dieser Schnittstelle sind Methoden zur Messung von Belastungsfaktoren von Erwerbstätigen in Variantenfließmontagesystemen angesiedelt. Diese können in Methoden zur Messung der Psychophysiologie, zur Messung der Verhaltensweise, zur Messung durch Selbsteinschätzung sowie zur Messung der Arbeitsleistung eingeteilt werden (BURKE ET AL. 2004, KIDD & BREAZEAL 2005) (siehe Abbildung 3-2).

Arbeitswissenschaft			Produktionstechnik
Psychophysiologie	Verhaltensweise	Selbsteinschätzung	Arbeitsleistung
z. B. Herzfrequenz	z. B. Blickstreuung	z. B. Interviewskala	z. B. Bearbeitungszeit

Abbildung 3-2: Einteilung der Möglichkeiten zur Erhebung von Belastungsfaktoren von Montagemitarbeitern in arbeitswissenschaftliche und produktionstechnische Methoden (in Anlehnung an BURKE ET AL. (2004), KIDD & BREAZEAL (2005))

Einerseits fassen BETHEL ET AL. (2007) Möglichkeiten zur arbeitswissenschaftlichen und dabei im Speziellen der psychophysiologischen Beurteilung der Belastung von Mitarbeitern zusammen. Messungen der Herzfrequenz oder des Blutdrucks adressieren das Herzkreislaufsystem, Messungen der Schweißsekretion den Leitungswiderstand der Haut oder Messungen der Atemfrequenz oder des -volumens den Atmungsapparat im Allgemeinen. Darüber hinaus können über eine Messung der Muskel- oder Gehirnaktivität Belastungen ermittelt werden.

Eine bekannte Methode zur Beurteilung der Verhaltensweise von Montagemitarbeitern stellen sog. „Eye-Tracking“-Systeme dar. Dabei wird die menschliche Pupille sowie die Umgebung des Mitarbeiters über ein Kamerasystem gefilmt (BORTOT ET AL. 2013). Über standardisierte Analysemethoden werden z. B. die Streuung des Blickes oder die Häufigkeit der Veränderung des Blickwinkels ausgewertet (DIN EN ISO 15007-1 (2013)), um daraus z. B. über den Faktor Aufmerksamkeit Rückschluss auf das aktuelle Beanspruchungslevel des Mitarbeiters geben zu können.

Des Weiteren kann die Belastung in Form einer Selbsteinschätzung beispielsweise durch Fragebögen oder Interviews ermittelt werden (BETHEL ET AL. 2007).

Vorteile arbeitswissenschaftlicher Messmethoden wie der Messung der Psychophysiologie oder der Verhaltensweise bestehen in deren Echtzeitfähigkeit hinsichtlich der Datenaufnahme und -auswertung. Darüber hinaus kann eine bewusste Verfälschung der Ergebnisse durch eine Untersuchungsperson nahezu ausgeschlossen werden (KIDD & BREAZEAL 2005). Nachteile sind in einem hohen Aufwand zur Datenaufnahme aufgrund der Planung und Durchführung von Umfragen (z. B. bei Fragebögen) oder der oftmals komplexen Systemtechnik (z. B. beim Eye-Tracker) zu finden. Auch die technische Limitiertheit von beispielsweise rein Bild-basierten Sensoren bzgl. ausreichend räumlicher und zeitlicher Auflösung kann in diesem Zusammenhang kritisiert werden (ZÄH ET AL. 2007). Darüber hinaus besteht die Unsicherheit, ob das Messergebnis tatsächlich mit der aktuellen Belastungssituation der Untersuchungsperson übereinstimmt. Als Beispiel sei der Eye-Tracker erwähnt, wobei ein Fixieren des Auges auf einen bestimmten Punkt nicht zwingend bedeutet, dass darauf die Aufmerksamkeit gerichtet wird. Somit erscheint der Zusammenhang zur Belastung nicht immer zwingend gegeben.

Andererseits können aus produktionstechnischer Sicht durch das Messen der Arbeitsleistung (und dabei im Speziellen der variablen Bearbeitungszeit¹⁸) Rückschlüsse auf die Belastung von Montagemitarbeitern gemacht werden. Beispielsweise werden in Arbeiten von FLETCHER ET AL. (2008) oder POTTHAST (2013) reale Bearbeitungszeiten von Montagemitarbeitern erhoben, um daraus auf deren Belastungssituation zu schließen. Diese Autoren zeigen, dass eine reale Bearbeitungszeit grundsätzlich als Indikator für einzelne Belastungsfaktoren von Werkern brauchbar ist.

3.3.2 Planung der Bearbeitungszeit

Planung der Bearbeitungszeit als konstante Größe

In Anlehnung an die Grundlagen (siehe Abschnitt 2.4.2.1, S. 36) führen Leistungsschwankungen beim Bedienpersonal, Alternativen beim Maschineneinsatz sowie Abweichungen von der üblichen Materialqualität zu einer natürlichen Variabilität der Bearbeitungszeiten (HOPP & SPEARMAN 2008). Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten unterliegen damit zufälligen Schwankungen (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011).

Während in den Grundlagen allgemein beschrieben wurde, dass das menschliche Leistungsangebot Schwankungen unterliegt, wird nachfolgend erläutert, in welcher Höhe diese in heutigen Montagesystemen durch Bearbeitungszeiten messbar ist. In diesem Zusammenhang kann die minimale Bearbeitungszeit eines Werkstücks an einer Station nach TEMPELMEIER (2013) in der Praxis oft weniger als 50 % der durchschnittlichen Bearbeitungszeit betragen. Dabei nehmen einige Unternehmen einen Schwankungsbereich der Bearbeitungszeit an einem Handarbeitsplatz zwischen 80 % und 150 % um den Mittelwert an (TEMPELMEIER 2013). POTTHAST (2013) hat in einem Variantenfließmontagesystem auf Basis der Analyse von 50.816 Datensätzen bei insgesamt 24 unterschiedlichen Mitarbeitern eine Schwankung der Bearbeitungszeit zwischen 96 % und 106 % der durchschnittlich geplanten Bearbeitungszeit festgestellt.

Während in den Untersuchungen von BJERNER ET AL. (1955) und GRAF (1960) dabei das globale Leistungsmaximum der untersuchten Mitarbeiter bei ca. 07:30 Uhr lag, entwickelt POTTHAST (2013) eine im Verlauf ähnliche aber um

¹⁸ Die reale variable Bearbeitungszeit stellt in Anlehnung an die physikalische Grundgleichung einen wesentlichen Leistungsfaktor dar (siehe Abschnitt 2.2.1, S. 20).

acht Stunden phasenverschobene Kurve des Mitarbeiter-Leistungsangebotes mit einem globalen Maximum um 17:30 Uhr. Anhand der Untersuchungen von POTTHAST (2013) gelten zirkadiane Leistungsschwankungen in einem speziellen Anwendungsfall in einem modernen Variantenfließmontagesystem als nachgewiesen. Daneben konnten auch FLETCHER ET AL. (2008) im untersuchten Montagesystem signifikante Leistungsschwankungen der Mitarbeiter in einem produktionstechnischen Umfeld nachweisen.

Im Gegensatz dazu interpretiert ein Montageplaner im Unternehmen sein System vorwiegend aus technischen Gesichtspunkten. Ähnlich der Planung von beispielsweise Automatikstationen oder technischen Verkettungseinrichtungen wird auch der „Produktionsfaktor Mensch“ unter Nutzung einer Standardzeitvorgabe und stark vereinfachter Betrachtungsweise für seine Arbeitsaufgaben eingeplant (FLETCHER ET AL. 2008). Wie in den Grundlagen (siehe Abschnitt 2.4.1, S. 33) beschrieben, existieren hinsichtlich hoher Variantenvielfalt, Komplexität und Kundenindividualität der Produkte zahlreiche Verfahren der Produktionsplanung. Ein Ziel bei der Definition von Produktionssequenzen ist das gleichmäßige Auslasten der am Produktionsprozess beteiligten Mitarbeiter. Es sollen sog. „Hot-Spots“, also Takte mit Überlast, bzw. sog. „Cold-Spots“ (Takte mit Wartezeit für die Mitarbeiter) durch Planungslogiken minimiert werden. Die produktspezifische Bearbeitungszeit der Montagemitarbeiter wird dabei jedoch nur als fixe Eingangsgröße und nicht als Planungsobjekt berücksichtigt (AUER & SIHN 2012). Bereits entwickelte analytische und heuristische Verfahren zur Lösung des beschriebenen Abstimmungsproblems gehen von der Prämisse aus, dass fixe Bearbeitungszeiten vorgegeben sind (BLOHM ET AL. 1997).

Planung der Bearbeitungszeit als variable Verteilung

Die deterministische Planung von t_{Plan} als Konstante in Abhängigkeit des Arbeitsplatzes und der darauf zu bearbeitenden Variante stellt eine nur scheinbar genaue Lösung dar (KRATZSCH 2000). Es müssen Möglichkeiten erörtert werden, t_{Plan} als variable Verteilung in der Montageplanung abbilden zu können. Dabei repräsentiert deren Darstellung als stochastische Verteilung eine Möglichkeit, aufgrund der natürlichen Variabilität auftretende unvorhersehbare Schwankungen der Bearbeitungszeit berücksichtigen zu können (KRATZSCH 2000).

Dem Anhang (siehe Abschnitt 10.2.4, S. 173) sind hierzu die wesentlichen Grundlagen der deskriptiven Statistik zu entnehmen. Hierbei wird über die Grundbegriffe (Urliste, Merkmal, Ausprägung) die Möglichkeit der Beschrei-

bung einer Häufigkeitsverteilung mittels Lage- (z. B. Arithmetisches Mittel oder Modalwert) und Streumaße (z. B. Standardabweichung) erläutert. Darauf aufbauend können nachfolgend die zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen notwendigen Größen, der Erwartungswert und der Variationskoeffizient, in einem produktionstechnischen Rahmen abgeleitet werden.

Zur Beschreibung einer variablen Verteilung einer stationsbezogenen Bearbeitungszeit müssen in Anlehnung an MANITZ (2005) im Betrachtungsrahmen folgende Annahmen erfüllt sein. An der untersuchten Stationen müssen ganz oder teilweise manuelle Tätigkeiten ausgeführt werden, Störungen treten stochastisch auf und es wird immer ein ganzer Abschnitt einer Montagelinie mit mehreren Stationen betrachtet, auf die nicht explizit beschreibbare und nur schwer erfassbare äußere Einflussfaktoren wirken. Aufbauend auf den wesentlichen Termini der Beschreibung von Häufigkeiten werden zur Charakterisierung der Stochastik von Bearbeitungszeiten Maßzahlen verwendet, die Momente genannt werden. Hierzu existieren zur vollständigen Beschreibung insgesamt die vier Momente Erwartungswert, Varianz, Schiefe und Wölbung (VOGEL 1991). Darauf aufbauend soll für diese Arbeit die Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilung durch die ersten beiden Momente abgeleitet werden. In einem deduktiven Ansatz werden nachfolgend die Beschreibungsgrößen Erwartungswert und Variationskoeffizient definiert und deren Relevanz zur Darstellung dieses produktionstechnischen Umfelds erörtert.

Zum einen entspricht der Erwartungswert EW_u (1. Moment) einer Wahrscheinlichkeitsverteilung dem arithmetischen Mittelwert bei Häufigkeiten (siehe Formel (3-1)). Dieser wird als Wahrscheinlichkeit der Realisation definiert (BÜCKER 2003), gilt als unverzerrte, konsistente Schätzfunktion für die Bearbeitungszeit und ist aus einem hinreichend großen Stichprobenumfang n zu bestimmen (MANITZ 2005).

$$EW_u = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n u_h = \bar{u} \quad (3-1)$$

- EW_u Erwartungswert der Merkmalsausprägung
- h Laufvariable der Merkmalsausprägung $[1,2,\dots,n]$
- u Merkmalsausprägung
- \bar{u} Arithmetisches Mittel der Merkmalsausprägung

Zum anderen soll in dieser Arbeit der Variationskoeffizient VK_{EW} (in Anlehnung an die Varianz, 2. Moment) zur Charakterisierung der Wahrscheinlichkeitsverteilung verwendet werden. Der formelmäßige Zusammenhang ergibt sich aus dem Quotienten aus Standardabweichung s_{EW} und Erwartungswert EW_u der Merkmalsausprägung (siehe Formel (3-2)).

$$VK_{EW} = \frac{s_{EW}}{EW_u} \quad (3-2)$$

VK_{EW} Variationskoeffizient des Erwartungswertes

s_{EW} Standardabweichung des Erwartungswertes

EW_u Erwartungswert der Merkmalsausprägung

Unter der Annahme, dass alle Bearbeitungszeiten in einem zu untersuchenden Montagesystem zwar unabhängig voneinander aber identisch verteilt sind, postulierte MUTH (1973) erstmals die Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilung stochastischer Bearbeitungszeiten in einem produktionstechnischen Umfeld durch diese ersten beiden Momente. LAU & MARTIN (1987) und POWELL & PYKE (1994) zeigten in der Folge durch die Analyse einer Vielzahl unterschiedlicher Fließmontagesysteme und Wahrscheinlichkeitsverteilungen, dass auch die Momente Schiefe und Wölbung Einfluss auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung stochastischer Bearbeitungszeiten nehmen. Diese Wirkung ist aber unter realistischen Annahmen dieser Größen zu vernachlässigen. Unter Berücksichtigung der postulierten und mehrmals bestätigten Zwei-Momenten-These verzichtet MANITZ (2005) auf ein theoretisches Wahrscheinlichkeitsmodell zur Beschreibung stochastischer Bearbeitungszeiten. Auch im von BOYSEN (2005) beschriebenen Arbeitssystem folgt die Bearbeitungszeit der Arbeitsgänge einer stochastischen Verteilung und schwankt als Zufallsvariable mit einer Varianz um einen Erwartungswert.

Demzufolge werden auch in dieser Arbeit die beiden Momente Erwartungswert und Variationskoeffizient zur Beschreibung realer erhobener Bearbeitungszeiten verwendet. Zusammenfassend kann in Anlehnung an die in der Zielsetzung formulierte Kernidee dieser Dissertation (siehe Abbildung 1-3, S. 8) der Zusammenhang zwischen konstanten und variablen Bearbeitungszeiten für eine Arbeitsplatz-Varianten-Kombination visualisiert werden (siehe Abbildung 3-3).

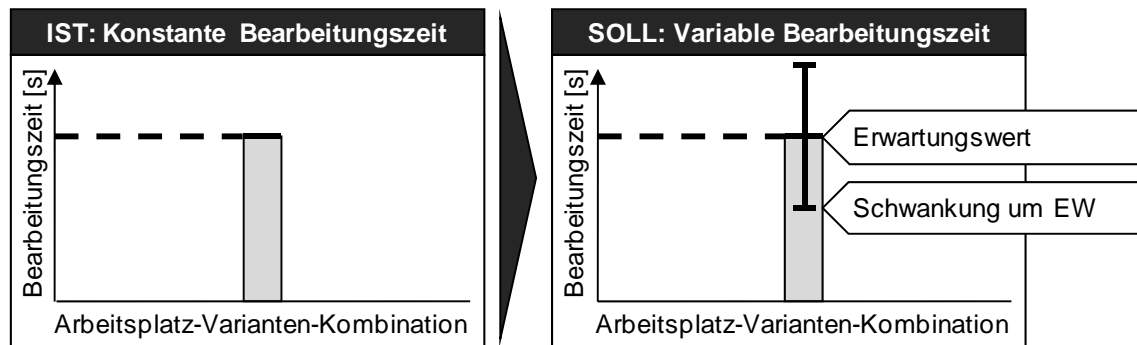


Abbildung 3-3: Vergleich der konstanten und variablen Bearbeitungszeit anhand einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination

3.3.3 Aufbereitung erhobener Bearbeitungszeiten

Bei fast jeder Datenaufnahme in großem Umfang werden z. B. aufgrund von Ungenauigkeiten der Messmethode Werte erhoben, aus denen kein Rückschluss auf die definierte Untersuchungsgröße gemacht werden kann. Hierzu müssen Messwerte einer Urliste aufbereitet werden, um diese in einem nachfolgenden Schritt analysieren zu können. Wie bereits erläutert, ist es z. B. zur Steigerung der Aussagekraft des arithmetischen Mittels zwingend erforderlich, Extremwerte aus der Urliste herauszufiltern. Hierzu existieren wenige Arbeiten, deren Aufbereitungsmethoden nachfolgend erläutert werden.

FLETCHER ET AL. (2008) haben nach Aufnahme von 200.000 Datensätzen pro Arbeitsplatz Extremwerte identifiziert, die aus rein logischen Gründen keiner realen Bearbeitungszeit entsprechen können. Als erster Schritt wurden wesentliche Abweichungen der Messwerte Systemstörungen zugeordnet und entsprechende Daten aus dem Datensatz „per Hand“ eliminiert. Darauf aufbauend wurde die Box-Plot-Methode¹⁹ verwendet, um Ausreißer zu identifizieren, die keinen Rückschluss auf eine menschliche Leistung geben konnten.

Auch POTTHAST (2013) hat reale Bearbeitungszeiten in einer Variantenfließmontage erhoben und diese aufbereitet. Hierzu wurde zunächst eine Plausibilitätsprüfung zur Feststellung der formalen Korrektheit der Daten durchgeführt. Ausreißer wurden anschließend mit der Drei-Sigma-Regel durch Definition eines Konfidenzintervalls eliminiert, wobei alle Werte im Bereich $\pm 3\sigma$ um den arithmetischen Mittelwert als valide angenommen wurden. Dabei entspricht das Kon-

¹⁹ Die Box-Plot-Methode dient der vergleichenden Beurteilung von Merkmalsausprägungen und der übersichtlichen Darstellung der wichtigsten statistischen Kenngrößen (DIETRICH & SCHULZE 2009).

fidenzintervall (oder auch „Vertrauensbereich“) grundsätzlich dem Prozentsatz an Daten, die als reliabel eingestuft und deshalb nicht entfernt werden (ECKSTEIN 2012). SIEBERTZ ET AL. (2010) zeigen, dass für hohe Stichprobenumfänge eine immer engere Wahl des Vertrauensbereichs zulässig ist. Gleichzeitig nennt ECKSTEIN (2012) 0,9 als gebräuchliches Intervall. Zur Prüfung der intern/externen Plausibilität der Daten hat POTTHAST (2013) die Qualitätskriterien Vollständigkeit, kontrollierte Missings, Vermeidung doppelter Daten, Einheitlichkeit, Ausreißer und Interpretierbarkeit nach SCHENDERA (2007) angewendet.

3.3.4 Analyse erhobener Bearbeitungszeiten

Nach Erhebung und Aufbereitung realer Bearbeitungszeiten müssen in der Analysephase aufgrund der Menge und Komplexität der Daten statistische Testverfahren angewendet werden, um einen vermuteten Zustand bestätigen oder widerlegen zu können. Da aufgrund der Diversität von Messergebnissen hierzu oft keine klare Entscheidung getroffen werden kann, ermöglichen statistische Testverfahren die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten zu definierender Entscheidungen (CASPARY & WICHMANN 2007). Dabei können Methoden der Statistik, obwohl diese ihre Wurzeln nicht in der Produktionstechnik haben, aufgrund der Ähnlichkeit der Entscheidungssituation auf den produktionstechnischen Betrachtungsrahmen übertragen werden (CASPARY & WICHMANN 2007).

Zur Analyse der Messdaten dieser Arbeit soll die Varianzanalyse, kurz ANOVA („Analysis of variance“) verwendet werden. Diese wurde im produktionstechnischen Umfeld zur Analyse von realen Bearbeitungszeiten bereits von FLETCHER ET AL. (2008) und POTTHAST (2013) erfolgreich eingesetzt²⁰ und gilt somit als statistische Referenzmethode für den Anwendungsfall. Basierend auf der Annahme, dass die Stichprobenwerte normalverteilt sind, liefert sie eine Aussage darüber, ob die Streuung zwischen Stichproben vom Zufall oder vom untersuchten Einflussfaktor abhängt (BÜCKER 2003, ECKSTEIN 2012). Dabei muss zunächst die Nullhypothese H_0 festgelegt werden, die jene Annahme zum Ausdruck bringt, dass die zu beurteilende Größe die vermutete oder vorausgesetzte Eigenschaft besitzt (CASPARY & WICHMANN 2007). Alle davon abweichenden Zustände werden mit der Alternativhypothese H_A zusammengefasst. Darüber hinaus gibt die Irrtumswahrscheinlichkeit in Anlehnung an die statistische Sicherheit das

²⁰ POTTHAST (2013) konnte bei Mitarbeitern eines europäischen Reifenherstellers beispielsweise mittels einer Varianzanalyse einen signifikanten Einfluss der Tageszeit auf das Leistungsangebot nachweisen.

Risiko an, auf Basis der Auswertungen eine falsche Entscheidung zu treffen. Dieser Wert wird im Regelfall mit 0,05 angenommen (CASPARY & WICHMANN 2007).

Die Varianzanalyse teilt die erhobenen und aufbereiteten Bearbeitungszeiten („Teststatistik“) in einen Annahmehereich für H_0 und, komplementär dazu, in einen Verwerfungsbereich. Fällt beispielsweise die Teststatistik in den Verwerfungsbereich, so wird H_0 zugunsten von H_A verworfen (CASPARY & WICHMANN 2007). Dazu wird für die Teststatistik die Streuung innerhalb der Messreihe („Binnenstreuung“) sowie die Streuung zwischen den Messreihen („Zwischenmittelstreuung“) berechnet. Der Quotient hieraus ergibt die Prüfgröße, auch „Schwellenwert“ genannt (BÜCKER 2003). Dieser Wert wird in Bezug zur Prüfverteilung gesetzt, die sich mittels der Definition der Anzahl an Messreihen sowie der Gesamtanzahl an Messwerten aus einem Tabellenwerk ablesen lassen (CASPARY & WICHMANN 2007). Ist die Prüfgröße größer als die Prüfverteilung, so ist die Nullhypothese zu verwerfen (BÜCKER 2003).

Eines z. B. im Hochschulumfeld oder in der Industrie häufig verwendetes Programm zur automatisierten und relativ einfachen Durchführung einer ANOVA ist die Statistik- und Analyse-Software SPSS[®] von IBM[®]. Es stellt fortgeschrittene Methoden der Datenanalyse und umfangreiche Möglichkeiten der Visualisierung zur Verfügung (BROSIOUS 2011).

3.4 Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

Nachfolgend soll erörtert werden, welche Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage mit speziellem Fokus auf die in dieser Arbeit zu betrachtenden Stellhebel Bearbeitungszeit und Tätigkeitsmix existieren. Dazu werden vier wesentliche Bausteine beleuchtet.

Zum Ersten wird die Frage beantwortet, was in heutigen Montagesystemen ein flexibler Personaleinsatz im eigentlichen Sinne bedeutet und welchen Einfluss dieser auf Bearbeitungszeiten-induzierte Leistungsschwankungen ausübt. Daneben werden zum Zweiten Ansätze zur Entkopplung der Bearbeitungszeit zum Ausgleich von Leistungsunterschieden analysiert, wobei eine Entkopplung durch Mengenpuffer fokussiert wird. Zum Dritten existieren Ansätze zum Umgang mit

periodischen Leistungsschwankungen einerseits durch eine Planung der Länge und Intensität einzelner Schichten eines Mehrschichtsystems sowie andererseits durch die flexible Anpassung der Geschwindigkeit der technischen Fließbandeinrichtung an das menschliche Leistungsangebot. Zum Vierten werden bei der Untersuchung von Ansätzen zu organisatorischen Unterbrechungen des Arbeitsrhythmus Länge und Häufigkeit von Pausen näher beleuchtet.

3.4.1 Flexibilisierung des Personaleinsatzes

In diesem Abschnitt wird über den allgemeinen Begriff der Flexibilität (siehe auch Fußnote 5, S. 4) das Verständnis der Flexibilisierung des Personaleinsatzes hergeleitet, um deren Anknüpfungspunkte zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage analysieren zu können. Hierzu finden sich in der Literatur unterschiedlichste Definitionen produktionstechnischer Flexibilität, die sich zu einer der begehrtesten Eigenschaften in Produktionssystemen entwickelt hat (SHEWCHUK & MOODIE 1998). Bei produktionstechnischer Flexibilität²¹ handelt es sich um vorgehaltene, problemspezifische Lösungen ohne eine Veränderung der initial geplanten Systemelemente (REFA 1990, REINHART & ZÄH 2003, VOBRUBA 2007, MÖLLER 2008, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011, REINHART & SCHELLMANN 2012, CIRP 2012). Dabei ist das Wechseln zwischen verschiedenen Zuständen, die innerhalb des ursprünglich geplanten Flexibilitätskorridors ohne finanziellen Aufwand möglich (MÖLLER 2008). Dies soll auch dem Ansatzpunkt dieser Arbeit entsprechen, aufbauend auf einer geplanten Umgebung, Handlungsempfehlungen für die Bearbeitungszeit und den Tätigkeitsmix zu generieren, die keinen wesentlichen Einschnitt in die Systemstruktur haben.

Im speziellen Fokus beschreibt die Personaleinsatzflexibilität die Möglichkeit eines schwankenden Personaleinsatzes und wird bestimmt durch die Anpassungsfähigkeit der Montagemitarbeiter an sich verändernde Montagetätigkeiten und Arbeitszustände (KRATZSCH 2000, CIRP 2012). Sie unterteilt sich in eine inhaltliche und eine zeitliche Komponente. Die beiden wesentlichen inhaltlichen Bestimmungsgrößen sind dabei einerseits das in einem Montagesystem anfallende Tätigkeitsspektrum und andererseits der von den einzelnen Mitarbeitern beherrschte Umfang an Tätigkeiten mit den daraus resultierenden Variationsmög-

²¹ In Abgrenzung dazu beschreibt Wandlungsfähigkeit die Fähigkeit eines (Montage-)Systems, sich schnell an Veränderungen des Umfeldes anzupassen, indem es seine Struktur ändert (MÖLLER 2008).

lichkeiten (KRATZSCH 2000). Für zeitliche Bestimmungsgrößen der Personaleinsatzflexibilität bestehen zahlreiche Ansätze. Diese umfassen in Anlehnung an HEYMAN & SEIWERT (1982), REFA (1984), BLOHM ET AL. (1997), DRUMM (2008) und PRASCH (2010) eine Dynamisierung von Arbeitszeiten in Form der Möglichkeit einer Altersteilzeit, einer saisonalen Verteilung von Arbeitszeit sowie flexiblen Arbeitszeitkonten. Daneben existieren Ansätze zur Variabilisierung der Arbeitszeit, um die individuelle Leistungserbringung von der Betriebsarbeitszeit zu entkoppeln. Diese bestehen aus der in den Unternehmen weit verbreiteten Gleitzeitregelung, bei der Arbeitsbeginn und -ende zur Flexibilisierung der Tagesarbeitszeit durch den Mitarbeiter individuell gestaltet werden können.

3.4.2 Entkopplung der Bearbeitungszeit

Eine spezielle Form der zeitlichen Personaleinsatzflexibilität stellen Ansätze zur Entkopplung der Bearbeitungszeit dar, die im Regelfall²² durch Puffer erreicht wird. Der Entkopplungsgrad einer Arbeitsstation wird als der zur Störungsvermeidung vorgehaltende zeitliche Handlungsspielraum hinsichtlich der Disponierbarkeit des individuellen Arbeitstempos verstanden (HETTINGER & WOBBE 1993, CIRP 2012). Die mitarbeiterbezogenen Ziele der Arbeitsorganisation lassen sich am ehesten realisieren, wenn die systembedingte Leistungsnachfrage und das menschliche Leistungsangebot zeitlich weitgehend entkoppelt werden (REFA 1990).

Im Gegensatz zu starr verketteten Systemen können bei loser oder elastischer Verkettung Puffer in das Fließmontagesystem integriert werden (WIENDAHL 1989). Die bekannteste Form der Entkopplung sind Mengepuffer, die als temporäre Werkstückspeicher dienen (CIRP 2012). Diese Zwischenlager im Fließsystem verhindern Störungen im Arbeitsablauf und gewährleisten einen über die Zeit relativ konstanten Produktionsausstoß (HETTINGER & WOBBE 1993, KRATZSCH 2000, ZÄPFEL 2000). Die wesentliche Herausforderung der Pufferdimensionierung liegt in der Bestimmung der Zahl, des Ortes und der Kapazität der Pufferlänge unter Berücksichtigung vorgegebener Kosten (BLOHM ET AL. 1997, CIRP

²² Daneben existieren noch Konzepte wie Springereinsatz oder Einplanung von Driftwegen. BLOHM ET AL. (1997) definieren Springer als personelle Reservekapazitäten durch universell einsetzbare Mitarbeiter zum kurzfristigen Ausgleich von Kapazitätsschwankungen, wobei keine Transparenz hinsichtlich des zeitlichen Auftretens von Belastungsspitzen herrscht (LEOPOLD 1997). Beim Driften kann der Mitarbeiter durch Öffnen der Stationsgrenzen bei Montageobjekten mit überdurchschnittlichen Kapazitätsanforderungen vor- bzw. nacharbeiten (ALTEMEIER 2009).

2012). Nach BLOHM ET AL. (1997) kann dieses Optimierungsproblem aufgrund der zahlreichen Einflussgrößen wie z. B. menschliche Leistungsschwankungen sowie Wechselwirkungen mit Hilfe der Simulation gelöst werden. GÜNTHER & TEMPELMEIER (2011) beschreiben dazu Ansätze zur Optimierung der Puffer zur Integration stochastischer Bearbeitungszeiten bei Automatikstationen.

Wesentliche Nachteile von Puffer sind ein erhöhter Investition- und Planungsaufwand, Platzbedarf und Bestand durch den benötigten Entkopplungsgrad (REFA 1990). Dies steht in Kontrast zur Lean-Philosophie, die sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts in erfolgreichen Produktionsstätten etabliert hat (WOMACK ET AL. 1990). Vorteile bestehen in der Möglichkeit des Ausgleichs von Leistungsschwankungen und -unterschieden (REFA 1990, KRATZSCH 2000). Puffer bieten eine Option der zeitlichen Individualisierung der Arbeitsaufgabe und somit einer realistischen Selbstbestimmung durch die Werker (LEOPOLD 1997, Arnold et al. 2008). PRASCH (2010) unterstellt entkoppelten Arbeitsplätzen nach Analyse einer Vielzahl von Studien zum Thema Gruppenarbeit eine motivationssteigernde Wirkung durch eine erhöhte gefühlte persönliche Freiheit des Einzelnen. Vor allem seine Annahme der automatischen Anpassung der Arbeit an den individuellen zirkadianen Rhythmus durch Entkopplung ist für diese Arbeit von besonderer Relevanz. WILLNECKER (2000) schreibt in diesem Zusammenhang von einem erhöhten psychischen Leistungsangebot durch Aufhebung ablauftechnischer Bindungen.

3.4.3 Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen

Periodische Leistungsschwankungen von Menschen setzen sich aus intraindividuellen Aspekten wie der zirkadianen Rhythmik sowie interindividuellen Gesichtspunkten wie unterschiedlichen Chronotypen zusammen (siehe Abschnitt 2.3, S. 28). Die Notwendigkeit eines besseren Matchings aus variablem menschlichen Leistungsangebot und starrer systembedingter Leistungsnachfrage wird dabei von einer Vielzahl an Autoren mit dem Ziel diskutiert, die zeitlichen Leistungstiefs innerhalb der zirkadianen Rhythmik zu respektieren, um Hochphasen für verbesserte Arbeitsleistungen nutzen zu können (siehe u. a. JUNGBLUTH & MOMMSEN (1968), ROHMERT & RUTENFRANZ (1983), DIN EN ISO 10075-2 (2000), STANIC (2010), BRAUN (2011), BORGHARDT (2012)).

Ansätze zum Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage umfassen zum Ersten die Planung der Länge und Intensität einzelner Schichten eines Mehrschichtsystems. In diesem Zusammenhang fasst SCHMIDTKE (1993) Untersuchungen zu Produktivitätsunterschieden zwischen Schichten zusammen. Demzufolge wurde in einem 3-Schicht-Betrieb, entgegen der zirkadianen Rhythmik, in der Spätschicht die höchste und in der Frühschicht die geringste Leistung erhoben. Hingegen existieren kaum Unterschiede zwischen einzelnen Produktionstagen (COLQUHOUN 1971). Daneben empfehlen HETTINGER & WOBBE (1993) und SCHMIDTKE (1993) eine Anpassung der Schichtlänge an die zirkadiane Rhythmik, da Arbeitszeit nicht losgelöst von der Tageszeit betrachtet werden kann. Nach SCHLICK ET AL. (2009) soll das Wissen um die zirkadiane Rhythmik vor allem zur besseren Planung der Nachtschicht verwendet werden, um der auftretenden Ermüdung entgegenwirken zu können. JUNGBLUTH & MOMMSEN (1968) empfehlen dazu generische organisatorische Ansätze hinsichtlich der Schichtzeiten und des Arbeitstempos. Jedoch werden erhöhte Beanspruchungen durch die Nachtschicht im Regelfall nicht durch z. B. eine verringerte systembedingte Leistungsnachfrage kompensiert, sondern durch einen Lohnzuschlag ausgeglichen (SCHMIDTKE 1993).

Zum Zweiten behandeln relevante Ansätze die flexible Anpassung der Geschwindigkeit der technischen Fließbandeinrichtung an das menschliche Leistungsangebot (siehe u. a. JUNGBLUTH & MOMMSEN (1968), ROHMERT & RUTENFRANZ (1983), LUCZAK (1998)). Denn würden Arbeitspersonen keiner Vorgabe der Arbeitsgeschwindigkeit unterliegen, würden sie ihre Arbeitsleistung ihrem persönlichen Leistungsangebot anpassen (LUCZAK 1998). Darüber hinaus berichten FLETCHER ET AL. (2008) bei Systemen mit konstanter Bandgeschwindigkeit von Mitarbeitern, die ihr Arbeitstempo in Grenzen selbstständig individuell variieren, um eine sog. „Wiederhol-Langeweile“ durch die Arbeitsaufgabe zu reduzieren. KLEEMANN ET AL. (2002) und FABAUER (2008) fassen das Bewältigen des formalisierten Arbeitsprozesses durch den Menschen unter kompensatorischer Flexibilität zusammen, also der einseitigen Anpassung der Person an arbeitsorganisationale Vorgaben. STANIC (2010) empfiehlt dazu im Speziellen eine generelle Verlangsamung des Fließbandes vor allem jeweils zu Schichtbeginn, um die Gewöhnungsphase der Mitarbeiter berücksichtigen zu können.

3.4.4 Planung von organisatorischen Unterbrechungen des Arbeitsrhythmus

Eine organisatorische Unterbrechung des Arbeitsrhythmus drückt sich in der modernen Variantenfließmontage durch einen Schichtwechsel bzw. eine Pause aus. Dabei sollen eine durch die Arbeitsaufgabe verursachte Ermüdung und die deswegen auftretenden Symptome reversibler Funktionsveränderungen grundsätzlich vermieden werden (JUNGBLUTH & MOMMSEN 1968, SCHMIDTKE 1993). Nach JUNGBLUTH & MOMMSEN (1968) sollen als Ergebnis arbeitspsychologischer Untersuchungen mehrere Kurzpausen zur Verringerung von Ermüdungserscheinungen in ein Montagesystem integriert werden. Die ideale Pausenlänge ist dann gefunden, wenn der Leistungsverlust durch die Pause geringer ausfällt als die Leistungssteigerung durch Erholung (SCHLICK ET AL. 2009). Denn wegen des nichtlinearen Charakters der Ermüdungs- und Erholungsphasen ist es nicht zweckmäßig, bis zum Eintreten der Ermüdung zu arbeiten, da dann unverhältnismäßig lange Erholungsphasen notwendig sind. Vielmehr erweist es sich als physiologisch und ökonomisch günstiger, kurzzyklische Arbeits- und Erholungsphasen für den Montagemitarbeiter vorzusehen (SCHLICK ET AL. 2009).

Neben der Intensität der psychischen Belastung ist deren zeitliche Verteilung von Bedeutung für die resultierende Ermüdung. Im Allgemeinen existiert eine exponentielle Beziehung zwischen Arbeitsdauer und der resultierenden Ermüdung. Von Bedeutung sind dabei die reine Dauer der Arbeitszeit, Ruhezeiten zwischen aufeinanderfolgenden Arbeitstagen und Schichten, ob es sich um Schichtarbeit handelt, das Vorhandensein von Arbeitsunterbrechungen und Ruhepausen sowie regelmäßige Aufgabenwechsel (DIN EN ISO 10075-1 (2000)).

Neben der Vermeidung von Ermüdung muss auch der Effekt des Einarbeitens betrachtet werden. Hierbei kann kein Mitarbeiter seine Tätigkeit mit voller Arbeitsintensität beginnen. Erst nach ca. 10-30 Min. kann bei industrieller Arbeit die vollständige Leistung angeboten werden (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). In einem von STANIC (2010) untersuchten Variantenfließmontagesystem wurden in einem Zeitraum von sechs Wochen Fehler erfasst. Hierbei wurden vor allem zu Beginn der Schichtarbeitszeit vermehrt Fehler der Mitarbeiter festgestellt, die durch eine Gewöhnungsphase erklärt wird, die vor allem bei kurzgetakteten Tätigkeiten auftritt. ROHMERT & RUTENFRANZ (1983) erläutern dieses Phänomen aus physiologischer Sicht dadurch, dass in der ersten Minute nach Beginn einer Arbeit deutliche inter- und intraindividuell unterschiedliche Umstellungsreaktio-

nen von Muskelstoffwechsel, Muskeldurchblutung, Herz- und Atmungstätigkeit sowie Blutzusammensetzung stattfinden. Bei den meisten dieser Reaktionen tritt bei konstanter Arbeitsintensität erst nach mehreren Minuten ein Gleichgewichtszustand (steady state) ein (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983).

3.5 Defizite bestehender Ansätze und Handlungsbedarf

Nachdem der Stand der Technik zur Ergonomie als Planungsgrundlage manueller Montagearbeitsplätze im Allgemeinen und im Speziellen hinsichtlich der Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge sowie der Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage analysiert wurde, werden in diesem Abschnitt dessen Defizite beschrieben. Daraus wird in Bezug zur Zielsetzung der Handlungsbedarf dieser Arbeit konkretisiert.

3.5.1 Defizite bestehender Ansätze

Ergonomie als Planungsgrundlage manueller Montagearbeitsplätze

Über die Jahrzehnte industrieller Produktion hat sich aus dem Arbeitsstudium und der Arbeitswissenschaft die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung entwickelt. Die dabei ausgearbeiteten Methoden und Normen gelten als Grundlage jeder modernen Montagesystemgestaltung und somit als Voraussetzung des in dieser Arbeit betrachteten Rahmens. Dazu zählt im Speziellen auch die physische Arbeitsplatzgestaltung. Es wird vorausgesetzt, dass die Mensch-Maschine-Schnittstelle der sich innerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit befindenden Variantenfließmontagesysteme nach aktuellstem Wissen geplant wurde und betrieben wird. Hinsichtlich der Organisation der Arbeitsabläufe liefert die Disziplin der Ergonomie Ideen zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation. Einen Ansatzpunkt stellt hierbei eine Flexibilisierung der Leistungserbringung des Erwerbstätigen dar. Die Ergonomie bleibt aber konkrete und im allgemeinen Unternehmenskontext umsetzbare Handlungsempfehlungen in einem produktionstechnischen Umfeld schuldig, wodurch u. a. die in den Grundlagen beschriebene defizitäre Belastungssituation von Montagemitarbeitern entsteht.

Möglichkeiten zur Erhebung und Beeinflussung der Mitarbeiterbelastung im Produktionsumfeld

FLETCHER ET AL. (2008) und POTTHAST (2013) zeigen, dass in der Praxis bei einem Produktionsunternehmen grundsätzlich reale Bearbeitungszeiten erhoben werden können, um daraus auf eine Belastungssituation zu schließen. Hierzu baut POTTHAST (2013) einen Standarddatensatz in folgender Datenstruktur auf: Arbeitsgangnummer, Maschinenummer, Variantenbezeichnung, Tätigkeitsbeschreibung, Startzeit und Endzeit in Zehntel, Maschinenzeit, Datum und Uhrzeit. Dabei fehlt aber gänzlich die Beschreibung systembedingter Anforderungen an die Aufnahme einzelner Datensätze. Dem großen Vorteil der hohen Datenqualität aufgrund der Aufnahme realer Daten bei einem Anwender steht die für Feldstudien typische Verfälschung der Daten durch externe Einflussgrößen gegenüber. Dabei nehmen beide Arbeiten Daten für einen spezifischen Anwendungsfall auf und beschreiben die externen Einflussgrößen rudimentär. Es fehlt ein übergreifender methodischer Ansatz zur Aufnahme realer Bearbeitungszeiten.

Planung der Bearbeitungszeit als konstante Größe oder variable Verteilung

Insgesamt gilt das Thema Leistungsschwankungen in der manuellen Montage als sehr relevant, wird aber im heutigen Planungsprozess ignoriert (FLETCHER ET AL. 2008, TEMPELMEIER 2013). Das menschliche Leistungsangebot wird als Konstante geplant, woraus Fehlbeanspruchungen der Mitarbeiter entstehen (siehe Abschnitt 2.5, S. 40). Demzufolge ist sowohl die Beachtung von interindividuellen als auch von intraindividuellen Streuungen bei der Planung des Leistungsangebotes manueller Montagearbeitsplätze notwendig (REFA 1984). Dies führt zur Annahme einer variablen Verteilung der Bearbeitungszeiten. Diese ist vor allem dann gerechtfertigt, wenn die Arbeiten an Handarbeitsplätzen ausgeführt werden (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011). Zusammenfassend gelten die beiden Maßzahlen der Wahrscheinlichkeitsverteilung, Erwartungswert und Variationskoeffizient, als hinreichend genau zur Beschreibung der Bearbeitungszeit als variable Verteilung. Dabei muss die Mischung der Varianten, der sog. Variantenmix, über einen längeren Zeitraum bekannt und konstant sein (MANITZ 2005).

Aufbereitung erhobener Bearbeitungszeiten

Zur Aufbereitung realer erhobener Bearbeitungszeiten eines Variantenfließmontagesystems existieren insgesamt wenige Methoden. Dabei werden diese entweder nur rudimentär beschrieben oder weisen Mängel in der Vollständigkeit und praktischen Durchführbarkeit auf. So wird beispielsweise bei POTTHAST (2013) das Konfidenzintervall zur Bearbeitungszeiten-basierten Datensatz-Eliminierung verwendet. Jedoch fehlen Methoden, Datensätze z. B. hinsichtlich ihrer Uhrzeit zu eliminieren. Denn vor allem zu Beginn und Ende von Pausen oder bei Schichtwechseln herrscht Unklarheit über jene validen Zeitbereiche, deren erhobene Bearbeitungszeiten in die Datenanalysen integriert werden dürfen.

Analyse erhobener Bearbeitungszeiten

Die Analyse von Messdaten und die Beschreibung der dazu notwendigen Methoden (wie z. B. der Varianzanalyse) gilt in der Statistik als durchdrungen (z. B. BÜCKER (2003), CASPARY & WICHMANN (2007), SIEBERTZ ET AL. (2010), BROSIUS (2011), ECKSTEIN (2012)). Anwendungen der statistischen Methoden finden sich im produktionstechnischen Umfeld und im Speziellen in der Analyse von erhobenen Bearbeitungszeiten (z. B. FLETCHER ET AL. (2008) oder POTTHAST (2013)). Demzufolge liefert eine weitere Erforschung statistischer Methoden in diesem Zusammenhang keinen weiteren Erkenntnisgewinn. Für eine Analyse der erhobenen realen Bearbeitungszeiten sind statistische Methoden als Mittel zum Zweck jedoch zwingend erforderlich, um Handlungsempfehlungen statistisch absichern zu können.

Flexibilisierung des Personaleinsatzes

Bezugnehmend auf Ansätze zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage umfasst die Personaleinsatzflexibilität als spezielle Form der Flexibilität in ihrer zeitlichen Komponente Ansätze zur Dynamisierung und Variabilisierung der Arbeitszeit. Der Stellhebel der Bearbeitungszeit (z. B. durch eine geplante Flexibilisierung der Arbeitsgeschwindigkeit) bleibt dabei aber bis dato unberücksichtigt. Der Stellhebel Tätigkeitsmix wird bei der inhaltlichen Betrachtung der Personaleinsatzflexibilität von wenigen Autoren skizziert. Fokus hierbei ist jedoch die Planung qualifikatorischer Anforderungen an den Mitarbeiter zur Bearbeitung von Arbeitsgängen. Die Planung des Tätigkeitsmixes in Abhängigkeit menschlicher Leistungsschwankungen spielt in heutigen Variantenfließmontagesystemen keine Rolle.

Entkopplung der Bearbeitungszeit

Ansätze zur Entkopplung der Bearbeitungszeit, allen voran eine Implementierung von Puffern, stellen eine gute Möglichkeit dar, menschliche Leistungsschwankungen in Form variabler Bearbeitungszeiten in der Variantenfließmontage berücksichtigen zu können. Hierzu existieren Optimierungsalgorithmen für Automatikstationen. Eine Entkopplung gilt aber als unwirtschaftlich und widerspricht der Lean-Philosophie (WOMACK ET AL. 1990). In Systemen mit variablen Bearbeitungszeiten bei manuellen Arbeitsstationen werden Puffer immer notwendig sein. Diese zu optimieren bedeutet aber, Folgen mangelhafter Planung zu beheben anstatt den Ursachen für Über- und Unterlast der Mitarbeiter auf den Grund zu gehen. In diesem Feld bedarf es somit weiterer Überlegungen.

Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen

Allen untersuchten Ansätzen zum Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen ist gemein, dass Handlungsempfehlungen hinsichtlich Bearbeitungszeit oder Tätigkeitsmix im Konjunktiv formuliert werden. Das Bewusstsein, dass Fließproduktion hochbelastend auf Mitarbeiter wirkt und dass vor allem periodische Leistungsschwankungen Berücksichtigung finden müssen, besteht vor allem im Bereich der Arbeitswissenschaft seit über einem halben Jahrhundert. Wie dies konkret bewerkstelligt werden soll, gilt bis dato als ungeklärt.

Organisatorische Unterbrechungen des Arbeitsrhythmus

Nicht zuletzt wird seit mehreren Jahrzehnten an der idealen Verteilung organisatorischer Arbeitsunterbrechungen geforscht. Die Planung von Schichtbeginn und -ende sowie der Verteilung und Länge der Pausen zählen zum Stand der Technik. Daneben gelten die Effekte Einarbeitung und Ermüdung arbeitsphysiologisch als erforscht.

3.5.2 Konkretisierung des Handlungsbedarfs

In Abbildung 3-4 werden Defizite und Handlungsbedarf für die im Stand der Erkenntnisse beschriebenen Ansätze einerseits zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagevorgänge visualisiert. Handlungsbedarf besteht bei der Definition von Anforderungen an die Aufnahme realer Bearbeitungszeiten und bei der Beschreibung variabler Bearbeitungszeiten mittels Erwartungswert und Variationskoeffizient. Zusätzlich existiert ein Defizit hinsichtlich einer vollständigen und praktikablen Daten-Aufbereitung, während deren Analyse bereits bei realen erhobenen Bearbeitungszeiten validiert wurde und in dieser Arbeit somit nicht weiter vertieft wird.

Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten	Erhebung der Belastung von Mitarbeitern	Anforderungen zur Aufnahme von Eingangsdaten nicht vorhanden	Defizite und Handlungsbedarf
	t_{Soll} als konstante Größe oder variable Verteilung	Beschreibung variabler Bearbeitungszeiten mittels <i>EW</i> und <i>VK</i> nicht vorhanden	
	Aufbereitung erhobener Bearbeitungszeiten	Vollständige und praktikable Daten-Aufbereitung nicht vorhanden	
	Analyse erhobener Bearbeitungszeiten	Analysemethoden bei realen erhobenen Bearbeitungszeiten validiert	Kein Defizit
Berücksich. menschlicher Leistungsschwankungen i. d. Variantenfließmontage	Flexibilisierung des Personaleinsatzes	Weder Bearbeitungszeit noch Tätigkeitsmix hinsichtlich Leistungsschwankung berücksichtigt	Defizite und Handlungsbedarf
	Entkopplung der Bearbeitungszeit	Entkopplung der Bearbeitungszeit gilt als unwirtschaftlich	
	Umgang mit periodischen Leistungsschwankungen	Keine konkreten Lösungen für eine Variantenfließmontage	
	Orga. Unterbrechungen des Arbeitsrhythmus	Wissen über Verteilung und Länge von Pausen in der Montage validiert	Kein Defizit

Abbildung 3-4: Zusammenfassung der Defizite und des Handlungsbedarfs in Anlehnung an die untersuchten Ansätze

Andererseits werden Defizite und Handlungsbedarf in Bezug auf eine Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage visualisiert. In diesem Zusammenhang existiert kein Ansatz, mit dem im Sinne einer Verhältnisprävention Handlungsempfehlungen für die Stellhebel Bearbeitungszeit und Tätigkeitsmix generiert werden können. Entweder werden diese ignoriert (Personaleinsatzflexibilität), gelten als unwirtschaftlich (Entkopplung)

oder werden im Konjunktiv formuliert (periodische Leistungsschwankungen). Das Wissen über die Verteilung und Länge von Pausen gilt in der Montage als validiert. Ansätze zur organisatorischen Unterbrechung des Arbeitsrhythmus werden demzufolge in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

4 Anforderungen an die Methode und Lösungsansatz

4.1 Grundlegende Anforderungen an die Methode

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist die Analyse realer Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen. Aufbauend auf der Abgrenzung des Betrachtungsrahmens, den Grundlagen und dem Stand der Technik werden grundlegende Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden zusammengefasst. Darauf aufbauend wird der Lösungsansatz konkretisiert, der als Rahmenwerk für die beiden folgenden Methodenkapitel gilt. In Anlehnung an KREBS (2011) können folgende grundlegende Anforderungen für die praktische Anwendung der zu entwickelnden Methoden definiert werden.

- **Robustheit produktionslogistischer Prozesse:** Da durch die zu entwickelnden Methoden u. a. geplante Bearbeitungszeiten innerhalb einer Verhältnisprävention an das menschliche Leistungsangebot angepasst werden sollen, muss die Robustheit produktionslogistischer Prozesse geprüft werden. Denn vor- und nachgelagerte Prozesse, die in der Regel nach starren Takten arbeiten, werden von den zu entwickelnden Handlungsanweisungen ausgeschlossen.
- **Praxistauglichkeit:** Die zu entwickelnde Planungslogik muss für den Anwender aus der industriellen Praxis verständlich sein und einen Mehrwert darstellen. Hierzu bedarf es einer übersichtlichen Struktur und deren Implementierung in einem Software-Werkzeug.
- **Übertragbarkeit:** Jede Variantenfließmontagelinie weist für sich individuelle Einflussgrößen und Rahmenbedingungen auf. Es muss darauf geachtet werden, dass die zu entwickelnden Methoden innerhalb des in der Einleitung spezifizierten Betrachtungsrahmens auf weitere Einsatzfälle übertragen werden können.
- **Transparenz:** Die Anforderung der Übertragbarkeit bedingt die Transparenz der Logik der Methoden. Nur wenn der Aufbau und die Zusammenhänge der Methoden für den Anwender ersichtlich sind, kann dieser das Planungsvorgehen auf neue Einsatzfälle übertragen. Hierzu sind Prozessabläufe zu definieren.

- **Skalierbarkeit:** Die Planungslogik muss bzgl. des zu betrachtenden Anwendungsfalls erweitert bzw. angepasst werden können. Somit müssen die im unterstützenden Software-Werkzeug abgebildeten Zusammenhänge veränderbar sein.

4.2 Lösungsansatz

Der Lösungsansatz zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen wird in zwei aufeinander aufbauende Methodenteile strukturiert, die in sich geschlossene und logische Einheiten mit einem klar zu definierenden Methodeninput und -output darstellen (siehe Abbildung 4-1).

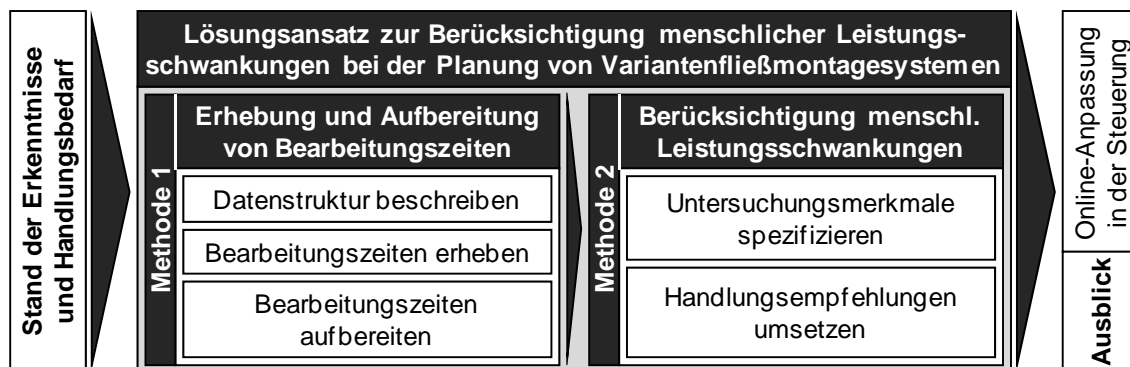


Abbildung 4-1: Übergeordneter Lösungsansatz

4.2.1 Methode 1: Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten

Zuerst wird eine Methode zur Erhebung und Aufbereitung von realen Bearbeitungszeiten entwickelt. Bestehende Arbeiten behandeln stets eine spezifische Problemstellung und weisen bestimmte Zusammenhänge in einem Variantenfließmontagesystem nach, ohne grundlegende Anforderungen an die Erhebung der Daten zu spezifizieren. Darüber hinaus wirken auf jede Montagelinie individuelle Einflussfaktoren, weswegen aus der Analyse eines Systems keine Handlungsempfehlungen für andere Montagelinien z. B. anderer Unternehmen abgeleitet werden können.

Demzufolge wird als vorbereitende Erläuterung zunächst die grundlegende Datenstruktur beschrieben, um damit die Rohdaten für alle weiteren Methodenschritte zu fundieren. In einem deduktiven Ansatz sollen Anforderungen definiert werden, die als zwingende Voraussetzungen an die Verfügbarkeit und Qualität der zu untersuchenden Rohdaten gelten. Ziel der Entwicklung ist eine Checkliste zur Erhebung realer Bearbeitungszeiten in einem Variantenfließmontagesystem, die den Anwender in diesem Methodenschritt durchgängig begleitet. Um die Qualität der Ausgangsdaten des ersten Methodenteils zu erhöhen, müssen jene Datensätze aus den Rohdaten eliminiert werden, die keinen Rückschluss über menschliche Leistungsschwankungen erlauben. Dazu wird in Anlehnung an den Handlungsbedarf eine für diesen Betrachtungsrahmen vollständige und praktikable Vorgehensweise entwickelt.

4.2.2 Methode 2: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen

Aufbauend auf Methodenteil 1 wird eine Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen entwickelt. Als Eingangsdaten dienen die erhobenen und aufbereiteten realen Bearbeitungszeiten. Zunächst werden Untersuchungsmerkmale spezifiziert. Diese untergliedern sich in Leistungs-, Tätigkeits- und Zeitmerkmale und erweitern die im ersten Methodenschritt ausgearbeitete grundlegende Struktur an Rohdaten. Durch Kombination der spezifizierten Untersuchungsmerkmale können methodisch Handlungsempfehlungen für ein Variantenfließmontagesystem umgesetzt werden. So führt einerseits eine Verknüpfung von Leistungs- und Zeitmerkmalen zur Möglichkeit der Auswertung der Eingangsdaten nach dem Erwartungswert und einer konkreten Handlungsempfehlung für den Stellhebel Bearbeitungszeit. Andererseits kann durch die Kombination von Tätigkeits- und Leistungsmerkmalen der Variationskoeffizient als Rahmenbedingung bei der Planung des Stellhebels Tätigkeitsmix hergeleitet werden.

4.3 Fazit

Durch die beiden Methoden sollen die im Stand der Technik identifizierten Defizite behoben werden. Der Handlungsbedarf im Bereich der Erhebung und Aufbereitung realer Bearbeitungszeiten wird aufgegriffen und direkt in den beiden

Methoden behandelt. Defizitäre Ansätze zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in die Variantenfließmontage werden jedoch nicht direkt in die Methodenentwicklung einbezogen. Diese dienen als Grundlage zur Entwicklung und Umsetzung der Handlungsempfehlungen in Methode 2.

Darüber hinaus wird die Thematik grundsätzlich aus Sicht der Planung angenähert. Auf Basis der Aufnahme, Aufbereitung, Analyse und Auswertung historischer Daten sollen Handlungsempfehlung für Neu- oder Umplanungen der untersuchten Montagelinie definiert werden. Die darauf aufbauende Herausforderung einer online-fähigen Anpassung des Montagesystems an menschliche Leistungsschwankungen im Bereich der Produktionssteuerung wird in dieser Arbeit ausgeklammert und im Ausblick näher spezifiziert.

5 Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

5.1 Überblick über die Methode

Die Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in der Variantenfließmontage setzt sich aus drei wesentlichen Schritten zusammen (siehe Abbildung 5-1).

Dazu wird als erstes die grundlegende Datenstruktur erläutert (Abschnitt 5.2). In einem deduktiven Ansatz werden zunächst die zu erhebenden Attribute eines Datensatzes definiert, wobei ein vollständig erhobener und aufbereiteter Datensatz das Ziel dieses Kapitels darstellt und in der Folge erarbeitet wird. Der Anwender muss in diesem Methodenschritt nicht aktiv werden.

Dieser dient als vorbereitende Erläuterung zur Methode und somit dem Verständnis über die grundlegende Datenstruktur, um darauf aufbauend als zweites alle relevanten Anforderungen an die zu erhebenden Rohdaten herzuleiten und in einer Checkliste für den Anwender der Methode zusammenzufassen (Abschnitt 5.3).

Nach diesem Schritt liegen Rohdatensätze vor, die fehlerbehaftet sein können und somit keine Aussage über das Werker-Leistungsangebot erlauben. Diese werden im letzten Schritt der Aufbereitung von Bearbeitungszeiten eliminiert (Abschnitt 5.4).



Abbildung 5-1: Überblick über die Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

5.2 Vorbereitende Erläuterung: Beschreibung der grundlegenden Datenstruktur

In diesem Abschnitt wird das wesentliche Ergebnis der Erhebung von Bearbeitungszeiten dargestellt. Dem Anwender der Methode wird in diesem Abschnitt somit das Methodenziel vermittelt und in der Folge der konkrete Weg dahin aufgezeigt. Kernaspekt für eine spätere Interpretation von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten stellt deren Rohdatensatz dar. Abbildung 5-2 zeigt dazu die grundlegende Datenstruktur zur Erhebung von Bearbeitungszeiten. Die dabei verwendeten Begrifflichkeiten orientieren sich an den Theorien zum standardisierten relationalen Datenbankmodell nach CODD (1990), die von POTTHAST (2013) in einem Variantenfließmontagesystem in ähnlicher Form bereits erfolgreich verwendet wurden.

		Anforderungen an							
		Grundlagen	Arbeitsstation		Bauteilvariante	Zeitmessung			
Attribute		Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{plan} [Sek.]	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	t_{ist} [Sek.]
Daten	Datensatz	1	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:33:35	23
	Datensatz	2	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:33:58	44
	Datensatz	3	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:34:42	26
	Datensatz	4	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:35:08	24
	Datensatz	5	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:35:32	41
	Datensatz	6	AP 2	1	VarB	24	24.10.12	14:36:13	--

Abbildung 5-2: Grundlegende Datenstruktur zur Aufnahme von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

Die Gesamtheit aller erhobenen „Daten“ setzt sich aus „Datensätzen“ zusammen, deren einzelne Spalten als „Attribute“ bezeichneten Informationsarten entsprechen. Ein Datensatz beinhaltet dabei zur eindeutigen Identifizierung und Verknüpfung jedes Datensatzes bei durchzuführenden Rechenoperationen eine fortlaufende Nummer. Des Weiteren werden die Attribute Arbeitsplatz und Mitarbeiteranzahl pro Arbeitsplatz erhoben. Das Attribut Bauteilvariante beschreibt die nach Arbeitsplan unterscheidbaren Tätigkeiten, die am jeweiligen Arbeitsplatz von der jeweiligen Mitarbeiteranzahl durchgeführt werden müssen, wobei das Attribut t_{plan} einer für eine Arbeitsplatz-Varianten-Kombination geplanten Bearbeitungszeit entspricht. Die Attribute Datum und Uhrzeit stellen die wesentlichen

Messgrößen zur Berechnung der Bearbeitungszeit dar und vervollständigen jede Variante pro Arbeitsplatz mit einem Messwert.

Die zur Verfügung stehenden Daten werden im laufenden Systembetrieb erhoben. Da dabei ein bestehender IST-Stand abgebildet wird, erfolgt die spätere Analyse ex post²³. Um Datensätze mit den erläuterten Attributen hinterlegen zu können, müssen verschiedene Anforderungen an die Datenerhebung erfüllt werden. Dabei lassen sich die beschriebenen Attribute zu den in der Folge zu ermittelnden Anforderungen zuordnen.

5.3 Anforderungsermittlung an die Erhebung von Bearbeitungszeiten

Die Aufnahme von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten ist an mehrere Anforderungen geknüpft. Diese gelten als zwingende Voraussetzungen an die Verfügbarkeit und Qualität der zu untersuchenden Rohdaten. Wird eine der Anforderungen nicht erfüllt, gilt die Methode für das zu untersuchende Montagesystem als nicht anwendbar. In Anlehnung an die Datenstruktur (siehe Abbildung 5-2) lassen sich grundlegende Anforderungen, Anforderungen an die Arbeitsstation, Anforderungen an die Bauteilvariante und Anforderungen an die Zeitmessung unterscheiden (in Anlehnung an GLONEGGER ET AL. (2013)). Diese werden nachfolgend erläutert und abschließend in einer Checkliste für den Anwender der Methode zur Generierung von Rohdatensätzen zusammengefasst.

5.3.1 Grundlegende Anforderungen

In eigenen Untersuchungen wurden, je nach Anwendungsfall, zwischen ca. 15.000 und ca. 650.000 Datensätze erhoben, aufbereitet und ausgewertet. Aufgrund dieser Datenmenge müssen die erhobenen Datensätze grundlegend durch den Einsatz einer geeigneten Systemtechnik automatisiert gespeichert und weiterverarbeitet werden können. Ein bekanntes und handhabbares Programm stellt z. B. Microsoft[®] Office Excel[®] dar, das als Standardsoftware im Regelfall im Unternehmen vorhanden ist.

²³ Ex-post-Analysen finden vor allem in der Volkswirtschaftslehre sowie der Marktforschung eine weite Verbreitung. Sie zielen auf eine rückschauende Beschreibung gegebener Zusammenhänge ab (GABLER 2013A).

Als weitere grundsätzliche Annahme müssen erhobene Bearbeitungszeiten (t_{Ist}) in logische Blöcke eingeteilt werden können. In diesem Zusammenhang unterstützt die Blockbildung die Reduktion von systematischen Fehlern, die durch Faktoren bedingt werden, die zwar bekannt, aber nicht kontrollierbar sind (SIEBERTZ ET AL. 2010). Logische Blöcke beschreiben Gruppierungen in Bereiche mit relativ homogenen Randbedingungen (SIEBERTZ ET AL. 2010). Somit müssen t_{Ist} zum einen arbeitsplatzspezifisch erhoben werden. Dies resultiert aus der Tatsache, dass jede Station voneinander wesentlich unterschiedliche Charakteristika in Sachen Logistikanbindung, Betriebsmittel, etc. hat. Da jede Station dadurch keine vergleichbaren t_{Ist} aufweist, wird jeder zu untersuchende Arbeitsplatz als in sich geschlossener Versuchsaufbau betrachtet.

Zum anderen wird t_{Ist} variantenspezifisch betrachtet. Wenn sich Arbeitsinhalte bei verschiedenen Baugruppen unterscheiden, ist auch die jeweilige deterministisch geplante Bearbeitungszeit (t_{plan}) ungleich (siehe Grundlagen, Abschnitt 2.4.2.1, S. 36). Dadurch entstehen zwangsläufig verschiedene variantenspezifische t_{Ist} , die differenziert betrachtet werden müssen, um daraus später eine Aussage zu mitarbeiterbedingten Leistungsschwankungen treffen zu können.

5.3.2 Anforderungen an die Arbeitsstation

Eine eindeutige Arbeitsplatzbezeichnung ermöglicht die Identifizierung der betreffenden Stationen und Zuordnung aller relevanten Datensätze zu dieser.

Darüber hinaus bietet eine typische Variantenfließmontage in mittleren bis großen Unternehmen eine Vielzahl an manuellen oder teilautomatisierten Arbeitsplätzen, die in Montagelinien angeordnet sind. Nach einer Vorauswahl einer Montagelinie, die untersucht werden soll, müssen in dieser diejenigen Arbeitsstationen identifiziert werden, die eine Aussage über Leistungsschwankungen durch t_{Ist} zulassen. Wichtigster Faktor der Stationsauswahl ist die Charakteristik von t_{plan} im Vergleich zusammenhängender Arbeitsplätze. Eine valide Arbeitsstation muss als Engpassarbeitsplatz in der jeweiligen Montagelinie identifizierbar sein (siehe Abbildung 5-3, Arbeitsplatz 2). Dies erfolgt anhand der Beurteilung der über die jeweilige Variantenhäufigkeit gemittelten t_{plan} für eine Station, die sich jeweils aus dem gesamten Montageumfang und den dafür hinterlegten Zeiten aus der Zeitwirtschaft ergeben. Dabei muss für jede Arbeitstätigkeit ein exakter Zeitbedarf definiert werden können, der bereits als t_{plan} für diese Arbeit eingeführt wurde. Es müssen t_{plan} von jeweils drei hintereinandergeschalteten Arbeitsstatio-

nen miteinander verglichen werden (die Station, die beurteilt wird (AP 2), sowie deren vor- (AP 1) und nachgelagerte (AP 3)). Gesucht werden Konstellationen, bei denen die vor- und nachgelagerte Station über alle Varianten kürzere gemittelte t_{Plan} haben. In diesem Fall wird die zu untersuchende Station zuverlässig mit neuen Bauteilen versorgt (Vermeidung von „starving“) und kann fertige Bauteile in der Regel ohne Verzögerung (Vermeidung von „blocking“) weitergeben, da der nachfolgende Mengepuffer leer ist. Somit fließen in t_{Ist} keine Produktionsreihenfolge-bedingten Wartezeiten ein. Dagegen kann es bei Stationen mit besonders kurzer t_{Plan} dazu kommen, dass der Montagemitarbeiter nach Fertigstellung eines Bauteils auf das nächste warten muss. Somit stellt der Arbeitsplatz mit der größten t_{Plan} die Engpass-Station dar und kann für die Datenerhebung verwendet werden.

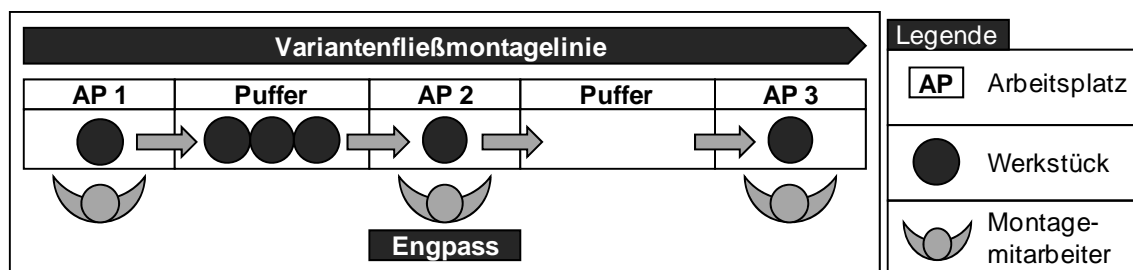


Abbildung 5-3: Anforderungen an die Arbeitsstation: Identifikation eines Engpassarbeitsplatzes

Außerdem ist es unumgänglich, externe Faktoren der Arbeitsumgebung durch einen Produktionsrundgang für die möglichen Arbeitsstationen auszuschließen. Diese lassen sich zum einen ausschließen, wenn allgemeine Grundlagen der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung (siehe Stand der Technik, Abschnitt 3.2, S. 48) berücksichtigt werden. Hierbei können z. B. Anforderungen an Lärm oder Hitze genannt werden. Werden diese nicht eingehalten, können erhobene Leistungsdaten an den betroffenen Arbeitsplätzen das Ergebnis hinsichtlich der Untersuchung nach menschlichen Leistungsschwankungen verfälschen. Zum anderen sind besondere Begebenheiten einzelner Arbeitsplätze zu identifizieren. Diese können diffizil zu handhabende Bauteile oder verzögert ansprechende Bedienelemente umfassen. Auch die Möglichkeit, Bauteile unplanmäßig außerhalb der eigenen Arbeitsstation montieren zu können, muss ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus muss an den im zu untersuchenden Variantenfließmontagesystem ausgewählten Arbeitsstationen eine technische Zeitmessung vorhanden sein, die t_{Ist} automatisiert aufnehmen kann. Dabei ist in jedem Falle zu beachten, dass erhobene Daten dieser Art mitbestimmungspflichtig sind. In diesem Zusammenhang gilt eine manuelle Zeitnahme (z. B. durch eine Stoppuhr) aufgrund des extrem hohen Aufwands für die Datenerhebung als nicht praktikabel und wird für die weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Bekannte Arten der technischen Zeitnahme sind:

- eine Lichtschranke an der Arbeitsstation, die Ein- und Ausgang des z. B. Werkstückträgers und somit der aktuell zu bearbeitenden Baugruppe exakt identifiziert.
- Darüber hinaus existiert die Möglichkeit eines Barcode- oder Datamatrixcode-Scanners, mit dem der Montagemitarbeiter ein gerade verbautes Teil aufnimmt und somit einen Zeitwert für den entsprechenden Datensatz erzeugt.
- Zudem können über einen manuellen Freigabetaster Bauteile nach deren Fertigstellung vom jeweiligen Mitarbeiter über eine Förderstrecke zur nächsten Station geschickt werden. Der Zeitpunkt des Drückens kann vom System aufgenommen und einem Datensatz zugeordnet werden.
- Weiterhin kann der Abschluss eines Arbeitsschrittes durch das drehmomentgesteuerte Verschrauben eines Bauteils aufgenommen werden. Hierbei prüft die Steuerungstechnik der Arbeitsstation programmierte Drehmomentvorgaben aus dem Arbeitsplan und definiert nach korrektem Tätigkeitsabschluss einen Zeitwert für den Datensatz.
- Ferner kann ein Pick-by-Light-System durch Lichtschranken (Einzelsensoren oder Lichtvorhänge) z. B. an Bauteil-Entnahmeregalen einen Wert von t_{Ist} für den jeweiligen Datensatz aufnehmen.

Darüber hinaus müssen an der ausgewählten Arbeitsstation für das Produktspektrum allgemeingültige Bauteilvarianten mit repräsentativen Bearbeitungszeiten montiert werden. Werden ausschließlich sog. „Sonderläufer“ montiert, wird die entsprechende Arbeitsstation aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

5.3.3 Anforderungen an die Bauteilvariante

Neben den Ansprüchen an die Arbeitsstation müssen Anforderungen an die Bauteilvariante erfüllt werden. Einzigartige, für jedes Produkt angelegte Sachnum-

mern (Beispiel: eingravierte Motornummer auf dem Motorblock), stehen für eindeutige Baugruppenbezeichnungen. Dadurch können Bauteile in der gesamten Produktionsumgebung nachverfolgt werden. Dabei hat jede Variante eine eigene t_{Plan} , die sich mitunter in großem Umfang voneinander unterscheiden kann und somit wesentlich differente t_{Ist} ergibt.

Grundsätzlich muss ein Arbeitsplan existieren, der variantenabhängig und stationsspezifisch in sich abgeschlossene Tätigkeiten (=Arbeitsgänge) beschreibt. Dies ist von besonderer Relevanz für eine nachfolgende Generierung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich des Stellhebels Tätigkeitsmix.

Für Arbeitsgänge müssen für eine automatisierte Datenverarbeitung Identifikationsnummern definiert sein, die in der Folge als eindeutige Montage-IDs bezeichnet werden. Somit setzt sich eine bestimmte Variante am betrachteten Arbeitsplatz aus verschiedenen Montage-IDs zusammen. Abbildung 5-4 visualisiert diesen Sachverhalt anhand von zwei Beispielen. Dabei korrespondiert Montage-ID4 mit dem vorher beschriebenen manuellen Freigabetaster während Montage-ID6 dem Signal einer Lichtschranke entspricht²⁴. Die in der Abbildung verzeichnete VarA wird dabei ausschließlich durch Montage-ID4 identifiziert, weil bei dieser Arbeitsstation-Varianten-Kombination nur ein Freigabetaster im Tätigkeitsumfang zur technischen Zeitmessung beschrieben wird. Bei VarB ist zusätzlich zum Freigabetaster noch eine Lichtschranke, die vom System registriert wird in den Tätigkeitsumfang integriert.

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Bauteilvariante		
			Variante	Freigabetaster	Lichtschranke
1	AP 2	1	VarA	= Montage-ID4	
2	AP 2	1	VarB	= Montage-ID4 +	Montage-ID6
3	AP 2	1	VarA	= Montage-ID4	
4	AP 2	1	VarA	= Montage-ID4	
5	AP 2	1	VarB	= Montage-ID4 +	Montage-ID6
6	AP 2	1	VarB	= Montage-ID4 +	Montage-ID6

Abbildung 5-4: Anforderungen an die Bauteilvariante: Definition von Montage-IDs

²⁴ Hierbei sind nur Montage-IDs beschrieben, die mit einem System der technischen Zeitmessung verknüpft sind. Grundsätzlich existiert darüber hinaus für jede weitere Einzeltätigkeit (z. B. „Bauteil holen“ oder „Seitenblech mit drei Schrauben fügen“) eine Montage-ID, deren Umfang von Arbeitsstation zu Arbeitsstation variieren kann. Diese sind aber für die Erhebung von Datensätzen, die eine Aussage über Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten erlauben, nicht weiter relevant.

5 Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

Des Weiteren muss bei jeder Arbeitsstation-Varianten-Kombination mindestens eine Montage-ID mitgeloggt werden. Sollten über eine technische Zeitmessung Montage-IDs einzelner Varianten an einer Station nicht aufgenommen werden können, so würden sich t_{Ist} über mehrere sukzessive montierte Varianten aufsummieren, da die gesamte t_{Ist} einer Variante der folgenden zugerechnet werden würde. Bei mehreren vom System mitgeloggten Montage-IDs pro Arbeitsstation und Variante muss die Montage-ID für die weiteren Untersuchungen ausgewählt werden, die bei jeder am Arbeitsplatz montierten Variante über die technische Zeitmessung identifiziert werden kann. Im Beispiel aus Abbildung 5-4 entspricht dies Montage-ID4 (Freigabetaster), die bei jeder Variante auftaucht.

5.3.4 Anforderungen an die Zeitmessung

Neben grundlegenden Anforderungen sowie Ansprüchen an die Arbeitsstation und an die Bauteilvariante müssen Anforderungen an die Zeitmessung erfüllt werden, um Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in einem laufenden Variantenfließmontagesystem erheben zu können.

Grundsätzlich muss für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination in Abhängigkeit der Mitarbeiteranzahl am Arbeitsplatz eine geplante Bearbeitungszeit t_{Plan} vorhanden sein. Darüber hinaus muss ein Rohdatensatz den exakten Messzeitpunkt einer für die technische Zeitmessung relevanten Montage-ID beinhalten. Dieser wird im Regelfall als Tageszeit bestehend aus dem Datum [dd.mm.yy] und der entsprechenden Uhrzeit [hh:mm:ss] festgehalten (siehe Abbildung 5-5).

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{Plan} [Sek.]	Zeitmessung			t_{Ist} [Sek.]
					Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	Freigabetaster	
1	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:33:35	VarA = 23 Sek.	23
2	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:33:58	VarB = 44 Sek.	44
3	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:34:42	VarA = 26 Sek.	26
4	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:35:08	VarA = 24 Sek.	24
5	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:35:32	VarB = 41 Sek.	41
6	AP 2	1	VarB	24	24.10.12	14:36:13		--

Abbildung 5-5: Anforderungen an die Zeitmessung: Exakte Messzeitpunkte für jede Montage-ID

Im veranschaulichenden Beispiel entspricht der Freigabetaster der relevanten Montage-ID. Die Bearbeitungszeit t_{Ist} ergibt sich dabei durch Subtraktion der Uhrzeit des betrachteten von der Uhrzeit des nachfolgenden Datensatzes. Dadurch ergeben sich im Beispiel drei t_{Ist} für VarA und zwei für VarB. Demzufolge kann dem Datensatz über die Tageszeit und somit über eine eindeutige Montage-ID eine Bearbeitungszeit zugeordnet werden.

Zur Herleitung der nächsten Anforderung muss die Bearbeitungszeit einer Arbeitsstation-Varianten-Kombination weiter detailliert werden. So setzt sich t_{Plan} aus mehreren Montage-IDs zusammen (exemplarisches Beispiel in Anlehnung an den skizzierten Datensatz 1, siehe Abbildung 5-6). ID1 beschreibt hierbei das Einfahren des Werkstückträgers in die Arbeitsstation mit einer Dauer von 4 Sek., ID2 das Holen des Bauteils (5 Sek.), ID3 das Fügen des Bauteils mit drei Schrauben (7 Sek.), ID4 das Drücken des Freigabetasters (3 Sek.) sowie ID5 das Ausfahren des Werkstückträges mit einer Dauer von 5 Sek. Hierbei korrespondiert das graue Rautensymbol mit dem Messsignal, das über eine technische Zeitmessung dem Datensatz zugeordnet wird.

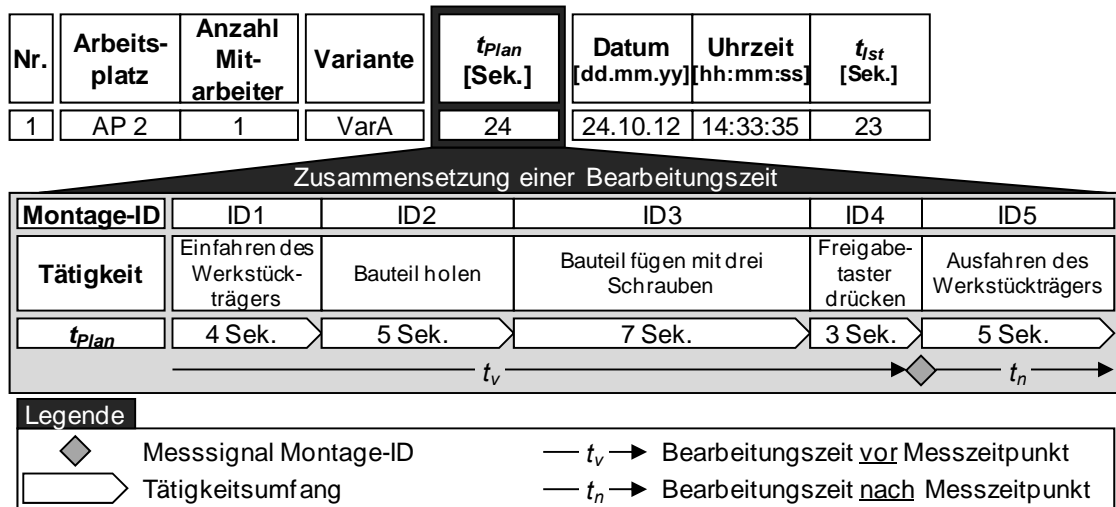


Abbildung 5-6: Zusammensetzung einer Bearbeitungszeit durch Beschreibung der Montage-IDs

5 Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

Die konstanten Zeitblöcke an Montage-IDs müssen Rückschluss über mindestens eine der folgenden möglichen Zeiten geben. Der Zeitblock von Variantenbeginn bis Zeitpunkt des Messsignals wird als t_v bezeichnet und umfasst alle in diesem Zeitraum aus dem Arbeitsplan stattfindenden Montage-IDs. Der Zeitpunkt vom Messsignal bis zum geplanten Variantenende ergibt den Zeitblock t_n . Dieser beinhaltet die in dem hier betreffenden Zeitabschnitt aus dem Arbeitsplan definierten Montage-IDs. Demzufolge berechnet sich t_{Ist} im Allgemeinen mittels Formel (5-1).

$$t_{Ist} = t_v + t_n \quad (5-1)$$

t_{Ist}	Erhobene Bearbeitungszeit
t_v	Zeitlicher Anteil der Bearbeitungszeit vor dem Messzeitpunkt
t_n	Zeitlicher Anteil der Bearbeitungszeit nach dem Messzeitpunkt

Generell spiegelt die erhobene Bearbeitungszeit t_{Ist} dabei im Regelfall nicht exakt die geplante Bearbeitungszeit t_{Plan} wider. Abbildung 5-7 dient darüber hinaus der Erläuterung der Logik hinter dem Unterschied zwischen t_{Ist} und t_{Plan} . Es wird veranschaulicht, dass von Methoden der technischen Zeitmessung fiktive Bearbeitungszeiten erhoben werden, die sich unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen einem Rohdatensatz zuordnen lassen.

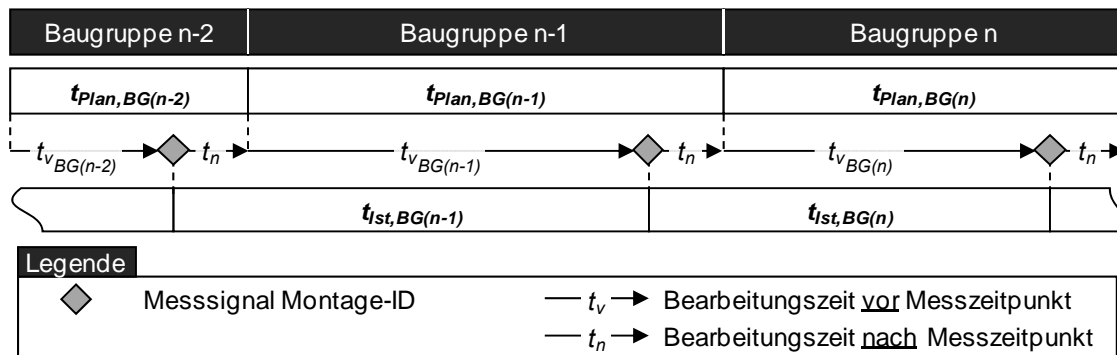


Abbildung 5-7: Unterschied zwischen t_{Plan} und t_{Ist} und Beschreibung von Fall 1 ($t_n = const.$)

Auf Basis dessen müssen für alle Varianten, die an einer Arbeitsstation bearbeitet werden, im Arbeitsplan der Zeitwirtschaft hinsichtlich der absoluten Bearbeitungszeit vergleichbar konstante²⁵ Zeitblöcke an Montage-IDs existieren. Denn wenn Messzeitpunkte im variantenspezifischen Montageablauf eine ungleiche Länge zu Variantenbeginn oder -ende aufweisen, genügt die vom System erfasste t_{Ist} nicht der ursprünglich geplanten t_{Plan} . Somit muss jede Variante, die an der betrachteten Arbeitsstation montiert wird, eine der folgenden Voraussetzungen erfüllen:

- Fall 1: Die absolute Bearbeitungszeit von mitgeloggtter Montage-ID bis zum geplanten Ende der Bearbeitung t_n ist für alle Baugruppen identisch (siehe Abbildung 5-7).
- Fall 2: Die absolute Bearbeitungszeit von Start der geplanten Bearbeitung bis zur mitgeloggtten Montage-ID t_v ist für alle Baugruppen identisch (Visualisierung siehe Anhang, Abschnitt 10.2.5, S. 176).

t_{Ist} berechnet sich in beiden Fällen ähnlich. Bei Fall 1 ist t_n konstant. Im durchgängigen Beispiel entspricht dies Montage-ID5 (Ausfahren des Werkstückträgers, siehe Abbildung 5-6). Hierbei ist die Verfahrensgeschwindigkeit der technischen Fließbainrichtung für jede Variante gleich. Der Zeitbedarf von Messung bis zum automatisierten Ausfahren der fertigen Baugruppe ist dabei für jede Variante gleich. In diesem Zusammenhang ist der vorhergehende Zeitanteil $t_{v,var}$ variabel und t_n zählt zu der gerade betrachteten Baugruppe. t_{Ist} berechnet sich durch Summation der beiden Zeitanteile (siehe Formel (5-2)).

$$t_{Ist} = t_{v,var} + t_n \quad (5-2)$$

t_{Ist}	Erhobene Bearbeitungszeit
$t_{v,var}$	Zeitlicher Anteil der variablen Bearbeitungszeit <u>vor</u> dem Messzeitpunkt
t_n	Zeitlicher Anteil der konstanten Bearbeitungszeit <u>nach</u> dem Messzeitpunkt

In Fall 2 ist t_v konstant. Ein Beispiel hierfür kann die Entnahme eines Bauteils aus einem Regal, das mit einem Pick-by-Light-System ausgestattet ist, sein, bei der immer gleiche vorbereitende Tätigkeiten durchzuführen sind. Bei Entnahme wird der Messzeitpunkt ausgelöst, dessen Abstand zum geplanten Start der Bearbeitung für jede Variante an der betreffenden Arbeitsstation konstant ist. Der

²⁵ „Konstant“ bedeutet in diesem Zusammenhang eine in Abhängigkeit der technischen Fließbainrichtung gleichförmige Verfahrensgeschwindigkeit der zu montierenden Baugruppe.

nachfolgende Zeitanteil $t_{n,var}$ ist bauteilspezifisch und variiert. Dabei liegt der Messzeitpunkt nicht im ursprünglich geplanten Arbeitsschritt. Dadurch wird durch den mitgeloggtten Wert t_{Ist} der vorhergehenden Baugruppe definiert. t_{Ist} berechnet sich somit durch Summation von t_v und $t_{n,var}$. (siehe Formel (5-3)).

$$t_{Ist} = t_v + t_{n,var} \quad (5-3)$$

t_{Ist} Erhobene Bearbeitungszeit

t_v Zeitlicher Anteil der konstanten Bearbeitungszeit vor dem Messzeitpunkt

$t_{n,var}$ Zeitlicher Anteil der variablen Bearbeitungszeit nach dem Messzeitpunkt

Durch Beachtung der erläuterten Anforderungen können in gegebenen Montagesystemen valide Arbeitsstationen-Varianten-Kombinationen definiert werden, die Rückschluss über Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten geben und für die Datenerhebung verwendet werden können.

5.3.5 Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit manueller Montagetätigkeiten

In Abschnitt 5.3 wurden Anforderungen zur Erhebung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in einer Variantenfließmontage ermittelt. Mit dem Ziel der Generierung von Rohdatensätzen von Bearbeitungszeiten wurden grundlegende Anforderungen, Anforderungen an die Arbeitsstation und Bauteilvariante sowie an die Zeitmessung eruiert. Abbildung 5-8 fasst die Anforderungen als Fragen zusammen und bietet dem Anwender der Methode eine Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit. Nur wenn jede Frage positiv beantwortet werden kann, sind alle Anforderungen erfüllt und es können in der Folge Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in einem Variantenfließmontagesystem erhoben werden.

Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit				
Grundlegende Anforderungen	1	Werden Daten der Zeitmessung automatisiert gespeichert?	JA	NEIN
	2	Können Daten arbeitsplatzspezifisch erhoben werden?	JA	NEIN
	3	Können Daten variantenspezifisch erhoben werden?	JA	NEIN
Anforderungen an die Arbeitsstation	4	Existiert eine eindeutige Arbeitsplatzbezeichnung?	JA	NEIN
	5	Ist die betrachtete Arbeitsstation eine Engpass-Station?	JA	NEIN
	6	Sind externe Faktoren der Arbeitsumgebung in Ordnung?	JA	NEIN
	7	Existiert eine technische Zeitmessung?	JA	NEIN
	8	Laufen allg.gültige Bauteilvarianten über den Arbeitsplatz?	JA	NEIN
Anforderungen an die Bauteilvariante	9	Existiert eine eindeutige Variantenbezeichnung?	JA	NEIN
	10	Existiert ein Arbeitsplan?	JA	NEIN
	11	Existieren eindeutige Montage-IDs für Einzeltätigkeiten?	JA	NEIN
	12	Existiert mindestens eine gemessene Montage-ID?	JA	NEIN
Anforderungen an die Zeitmessung	13	Existiert eine geplante Bearbeitungszeit pro AP-Var-Kombi?	JA	NEIN
	14	Existiert ein exakter Messzeitpunkt pro Montage-ID?	JA	NEIN
	15	Existieren absolut konstante Zeitblöcke an Montage-IDs?	JA	NEIN

Abbildung 5-8: *Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit manueller Montagetätigkeiten*

5.4 Statistische Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

Das grundlegende Ziel einer statistischen Datenaufbereitung ist es, den betrachteten Rohdatensatz hinsichtlich der gewählten Untersuchungsgröße (im Betrachtungsfall: Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern) interpretierbar zu machen. Dazu müssen einzelne Datensätze der vorhandenen Datenmenge miteinander vergleichbar sein und Regelmäßigkeiten in den jeweiligen Attributwerten identifiziert werden können. Die erhobenen Bearbeitungszeiten müssen aufbereitet werden, da bei Messungen in der Praxis immer mit fehlenden Werten oder Messfehlern zu rechnen ist (SCHWAB 1991). Die „Aufbereitung von Datensätzen“ bedeutet in diesem Zusammenhang deren Eliminierung aus den gesamten erhobenen Daten, was nach SCHWAB (1991) eine Strategie zum Umgang mit auf Messfehlern basierenden Datensätzen darstellt. Dem Anhang ist eine beispielhafte Visualisierung erhobener aber fehlerbehafteter Rohdatensätze der Bearbeitungszeit zu entnehmen, was die Notwendigkeit einer statistischen Datenaufbereitung unterstreicht (siehe Abschnitt 10.2.6, S. 177).

5 Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten

In der Folge werden die wesentlichen Methodenschritte der statistischen Datenaufbereitung zur Definition von vergleichbaren Regelmäßigkeiten in den Rohdaten erläutert. Diese setzen sich aus einer

- Variantenhäufigkeits-basierten,
- Zeitpunkt-basierten und
- Bearbeitungszeiten-basierten

Datensatz-Eliminierung zusammen. In Abbildung 5-9 wird dieser Zusammenhang auf Basis der grundlegenden Datenstruktur visualisiert. Die Reihenfolge der Bereinigungs-schritte ergibt sich dabei aus der sinkenden Wahrscheinlichkeit, mit der tatsächliche Messfehler im jeweiligen Bereinigungs-schritt erfasst werden können. So werden die Messfehler in den ersten beiden Schritten durch die Wahl von Validitätsgrenzen definiert. Im dritten Schritt werden Fehler basierend auf Annahmen identifiziert.

Aus der praktischen Erfahrung zeigt sich, dass durch die automatisierte Datenaufnahme und -verarbeitung unvollständige Datensätze entstehen können. Somit werden in der Folge nur vollständige Datensätze betrachtet, bei denen jedem Attribut ein Wert ungleich Null zugewiesen werden kann.

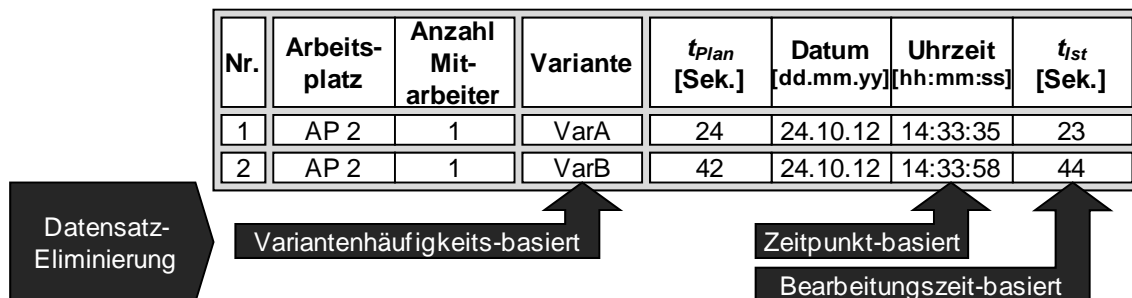


Abbildung 5-9: Eliminierung von Datensätzen der Attribute Variante, Uhrzeit und t_{Ist} zur statistischen Datenaufbereitung

5.4.1 Variantenhäufigkeits-basierte Datensatz-Eliminierung

In einem Variantenfließmontagesystem werden unterschiedliche Varianten in unterschiedlicher Häufigkeit an einer Arbeitsstation montiert. Neben sog. „High-Runnern“ existieren auch sog. „Sonderläufer“, die nur sehr selten produziert werden. Abbildung 5-10 zeigt hierzu exemplarisch insgesamt 20 Varianten (x-Achse: VarA-VarT) und deren absolute Anzahl an Rohdatensätzen (y-Achse: graue Balken). Diese Anzahl wird in der Folge als Datenstärke bezeichnet. Dabei sind die Datenstärken nach deren Häufigkeit sortiert, wobei oft montierte Varianten in der Abbildung links eingeordnet werden.

Ziel der Variantenhäufigkeits-basierten Datensatz-Eliminierung ist es, Varianten mit deutlich niedrigeren Stückzahlen in Relation zum Gesamtumfang aus den Daten zu extrahieren. Dafür sprechen folgende Gründe: Erstens wird die Komplexität der Daten für weitere Analyseoperationen reduziert. Varianten mit geringeren Stückzahlen (also einer kleinen Anzahl an erhobenen Bearbeitungszeiten und somit wenigen entsprechenden Datensätzen) erfordern den gleichen Analyseaufwand wie Varianten mit hoher Stückzahl. Dem Effizienzgedanken folgend sollen somit Varianten mit einem unvorteilhaften Aufwand-Nutzen-Verhältnis eliminiert werden, um dem Anwender der Methode ein möglichst einfaches aber trotzdem wirksames Werkzeug an die Hand geben zu können.

Zweitens können Varianten mit geringen Stückzahlen das Analyseergebnis verfälschen. Während High-Runner durch ihre hohe Wiederholhäufigkeit Routineoperationen des Montagemitarbeiters auslösen, erfordern Sonderläufer ein erhöhtes Maß an z. B. Aufmerksamkeit oder Konzentration. Seltene Varianten bringen „Unruhe“ in das Montagesystem und führen zu Unregelmäßigkeiten in der erhobenen Bearbeitungszeit des jeweils montierten Ablegers.

Als Methode zur variantenhäufigkeitsbasierten Datensatz-Eliminierung wird die ABC-Analyse²⁶ gewählt. Sie liefert mit vertretbarem Aufwand eine Analyse komplexer Probleme bei einer übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse (NEBL 2007). Häufig verwendete Grenzen zur Trennung der Bereiche sind 0-80 % Anteil an der Gesamtstückzahl für A-Teile, weitere 15 % für B-Teile und 5 % für C-

²⁶ Die ABC-Analyse gilt in der Materialbeschaffung als eine der wichtigsten Methoden der Materialanalyse (NEBL 2007). Hierbei werden Lagerartikel je nach anfallen Jahresverbrauchswerten (Menge mal Bezugswert) gruppiert. Zum Zweck der Einteilung von Datensätzen nach deren Menge und Wertigkeit findet sie Anwendung in verschiedenen Bereichen der Forschung und Industrie. Für weitere Informationen zur ABC-Analyse sei auf NEBL (2007) verwiesen.

Teile. In Abbildung 5-10 werden diese kumulierten Anteile der Datenstärke an der Gesamtstückzahl durch die schwarze Kurve dargestellt. In diesem kann der Rohdatensatz auf 60 % der Bauteilvarianten (VarA-VarL) reduziert werden, wobei 95 % (also Eliminierung der „C-Varianten“) der gesamten Rohdatensätze vorhanden bleibt. Es können insgesamt acht zu selten montierte Varianten (VarM-VarT) auf Basis dieser Methode aus den Rohdaten eliminiert werden.

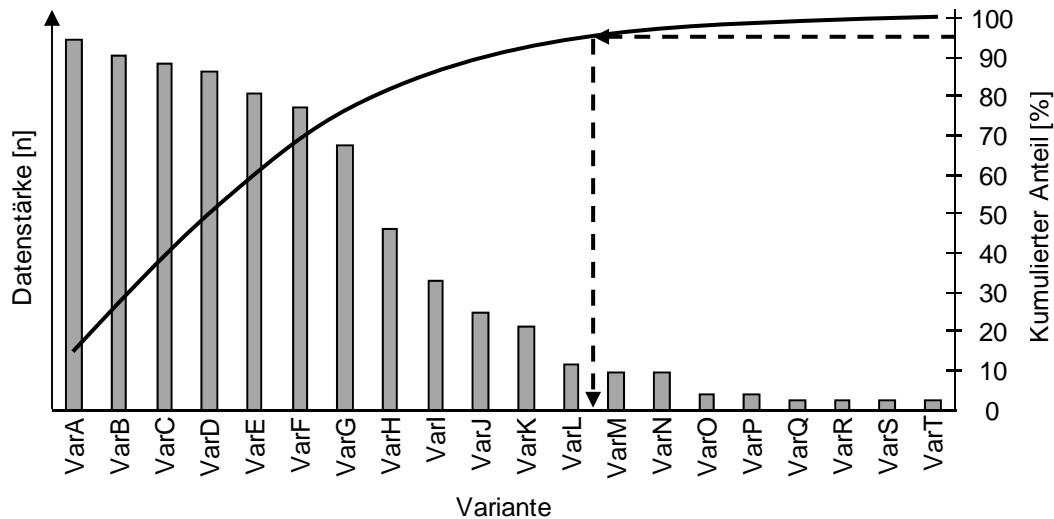


Abbildung 5-10: Anzahl an Rohdatensätzen an Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten pro Variante als absoluter (Balken) sowie kumulierter (Linie) Wert mit Markierung der 95 % Grenze

5.4.2 Zeitpunkt-basierte Datensatz-Eliminierung

Neben der variablen Datenstärke von Bauteilvarianten können Datensätze auch in ihrer Häufigkeit pro Zeitpunkt variieren. Dazu visualisiert Abbildung 5-11 exemplarisch die Datenstärke über einen 24-Stunden-Tag. Ein grauer Balken (hell oder dunkel) symbolisiert dabei plakativ die Anzahl an fertiggestellten Produkten in einer abgeschlossenen Zeiteinheit. In einem Mehrschichtsystem können Produktionsphasen (hellgrau) und Unterbrechungsphasen (dunkelgrau) unterschieden werden. Produktionsphasen zeigen im Regelfall relativ konstante Datenstärken während vor allem zu Pausenzeiten und zu Schichtwechseln Intervalle entstehen können, die in der Anzahl an Rohdatensätzen deutlich unterrepräsentiert sind.

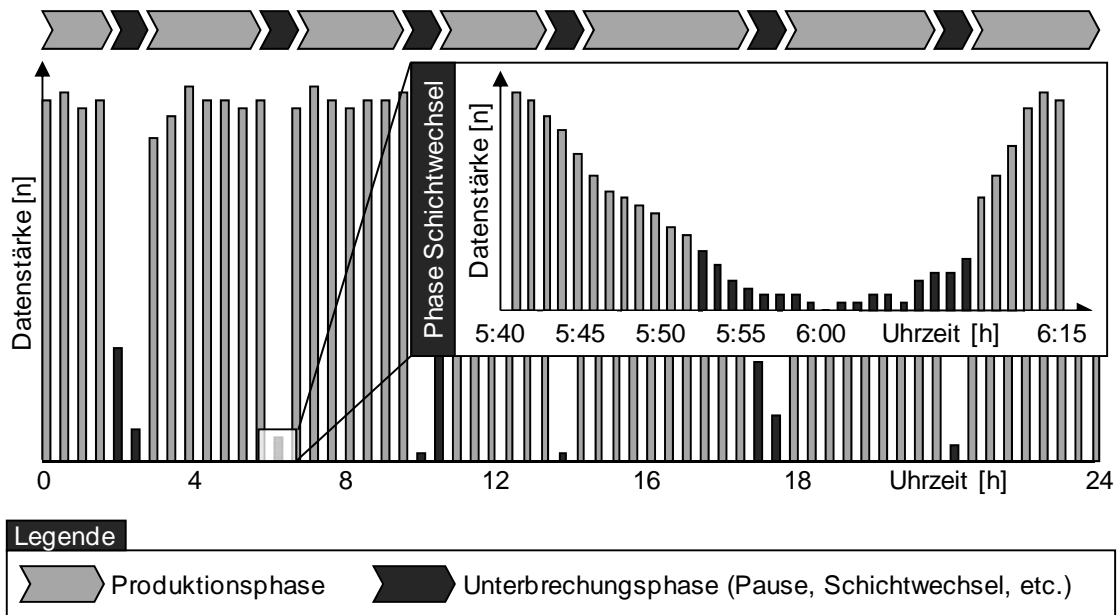


Abbildung 5-11: Qualitative Datenstärke je Zeitpunkt mit Fokus auf eine Unterbrechungsphase (Schichtwechsel)

Die wenigen, zu diesen Zeitpunkten erhobenen Datensätze, sind in der späteren Datenanalyse aus folgenden Gründen zu ignorieren. Zum Ersten wird in Produktionsphasen heutiger Variantenfließmontagesysteme möglichst gleichmäßig montiert. In Unterbrechungsphasen können keine identischen und konstanten Arbeitsbedingungen angenommen werden²⁷. Darüber hinaus neigen vergleichsweise geringe Datenstärken erhobener Bearbeitungszeiten zum Zweiten dazu, das Analyseergebnis stark zu verfälschen. In eigenen Untersuchungen wurden hierbei Unterschiede in den Datenstärken zu verschiedenen Zeitpunkten von bis zu 94,87 % festgestellt, wobei geringe Datenstärken wesentlich andere Analyseergebnisse für die definierten Untersuchungsmerkmale²⁸ aufwiesen als hohe Datenstärken.

Aus diesen Gründen werden Zeitpunkte mit zu geringen Datenstärken als „nicht-valide Zeitpunkte“ definiert. Diese entsprechen einer Unterbrechungsphase und müssen eliminiert werden. Die Herausforderung besteht dabei in der Abgrenzung von Produktions- zu Unterbrechungsphasen, da dieser Übergang häufig²⁹ nicht

²⁷ Beispielhaft ist der Schichtwechsel hervorzuheben, bei dem Arbeitsstationen teilweise kurzfristig doppelt besetzt sind und Mitarbeiter in ihrem regulären Arbeitsumfeld abgelenkt werden.

²⁸ Zur Spezifizierung der dieser Arbeit zu Grunde liegenden Untersuchungsmerkmale siehe Abschnitt 6.2, S. 98.

²⁹ Diese Einschränkung trifft vor allem auf die stationäre Fließmontage mit der Möglichkeit einer im Rahmen eines Mengenpuffers durch den Montagemitarbeiter getätigten Bauteil-Freigabe zu.

eindeutig ist. Dazu wird in Abbildung 5-11 innerhalb des betrachteten Tages die Phase eines Schichtwechsels fokussiert, der offiziell um 6:00 Uhr stattfinden soll. Es ist zu erkennen, dass es vor und nach diesem Zeitpunkt zu abfallenden bzw. ansteigenden Datenstärken kommt, wobei die Abgrenzung zwischen Produktions- und Unterbrechungsphasen bisher nur vermutet werden kann. Diese Einordnung wird durch diesen Methodenschritt der Zeitpunkt-basierten Datensatz-Eliminierung definiert, wobei folgende zwei Annahmen für die Durchführbarkeit des Methodenschrittes erfüllt sein müssen. Die geplanten Unterbrechungsphasen müssen zum Ersten über den betrachteten Zeitraum konstant sein. Verschiebt sich eine Pause oder ein Schichtwechsel in der Uhrzeit, vermischen sich Produktions- und Unterbrechungsphasen über unterschiedliche Datenerhebungstage und verfälschen das Analyseergebnis. Zum Zweiten sind Bearbeitungszeiten unterschiedlicher Varianten an unterschiedlichen Arbeitsplätzen in ihrer Länge vergleichbar. Trifft dies nicht zu, können sich Datenstärken trotz einer identischen Produktionsgeschwindigkeit stark voneinander unterscheiden³⁰. Die Analyseergebnisse würden wiederum verfälscht werden.

Hierzu wird eine Vorgehensweise zur Zeitpunkt-basierten Datensatz-Eliminierung definiert. Diese wird in Abbildung 5-12 visualisiert, wobei für ein besseres Verständnis eine 2x2-Matrix dargestellt wird. In den Zeilen wird lediglich die Skalierung der Datenstärke unterschieden. Während die obere Zeile einer hohen Skalierung entspricht, zeigt die untere Zeile deren Gesamtüberblick. In der linken Spalte ist jeweils die Datenstärke des Zeitpunktes dargestellt, während die rechte Spalte jeweils ein Histogramm der Datenstärke visualisiert. Zunächst muss, basierend auf der grundlegenden Datenstruktur, die Datenstärke in Relation zum Zeitpunkt generiert werden (Abbildung 5-12, Teil 1). Die Granularität der Zeitpunkte wird aus Gründen der Vereinfachung auf Minutengenauigkeit reduziert. Dies ergibt insgesamt 1440 Balken, wobei jeder für eine Minute des Tages steht und die entsprechende Datenstärke (wie bereits erläutert: die Datenstärke entspricht der jeweiligen Anzahl an Rohdatensätzen) darstellt. Die in Teil 1 insgesamt vorhandene Datenmenge entspricht somit der gesamten Anzahl der noch vorhandenen Rohdatensätze.

³⁰ Beispiel: Eine Bauteilvariante mit 30 Sek. Bearbeitungszeit weist bei gleicher Produktionsgeschwindigkeit die doppelte Datenstärke pro Zeiteinheit auf als eine Bauteilvariante mit 60 Sek.

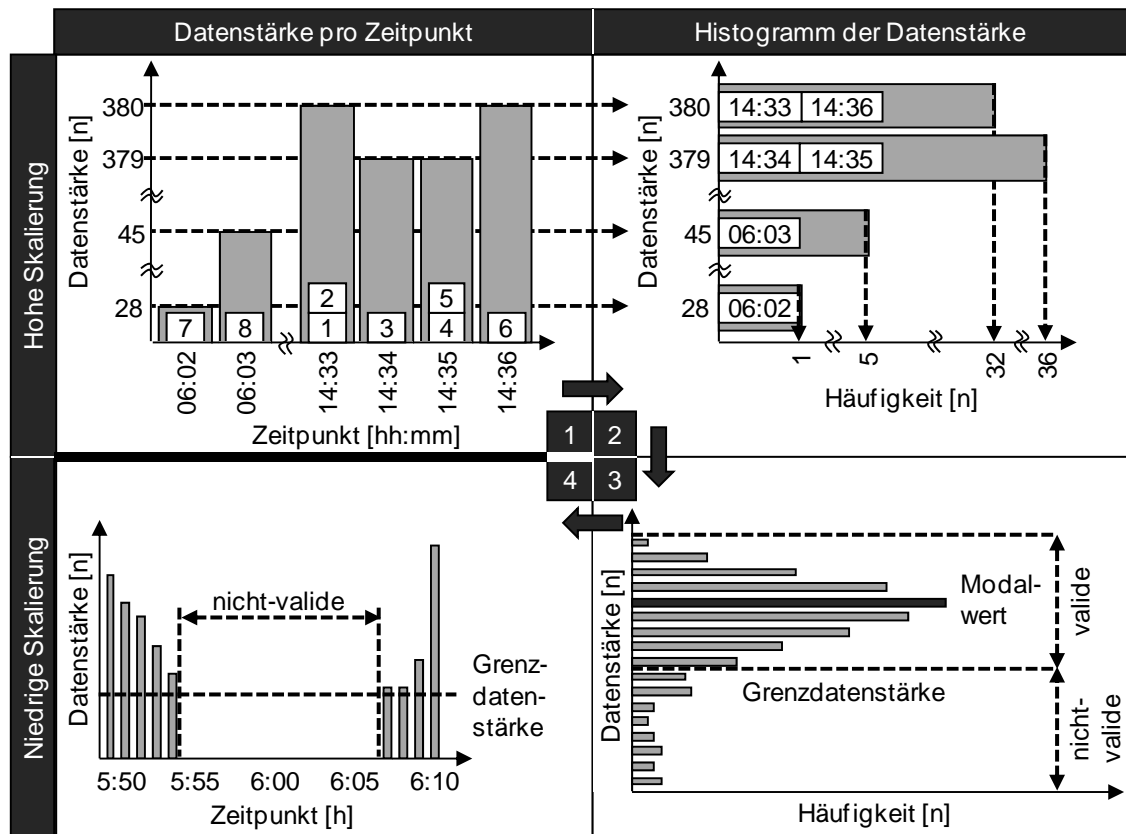


Abbildung 5-12: Methodische Vorgehensweise zur Zeitpunkt-basierten Datensatz-Eliminierung

Als nächstes wird die Verteilung der Datenstärke ermittelt. Hierzu werden gleiche Datenstärken aus Teil 1 zusammengezählt und in einem Histogramm der Datenstärken dargestellt (siehe Abbildung 5-12, Teil 2). Exemplarisch werden die Datensätze Nr. 1 und Nr. 2 dem Zeitpunkt 14:33 Uhr zugeordnet, die insgesamt eine Datenstärke von 380 aufweist. Ebenso werden zum Zeitpunkt 14:36 Uhr insgesamt 380 Rohdatensätze erhoben (u. a. Datensatz Nr. 6 aus Teil 1). Diese beiden Zeitpunkte werden in Teil 2 mit weiteren summiert und ergeben eine Häufigkeit von 32. Somit wurde die Datenmenge in Teil 2 auf 1440 Einzelwerte der minutengenauen Zeitpunkte reduziert.

Die in Teil 2 der Abbildung 5-12 sehr detailliert dargestellte Verteilung der Datenstärke wird in Teil 3 niedriger skaliert. Es ergibt sich ein Überblick über die die Häufigkeit der Datenstärken. Daraus lässt sich der Modalwert identifizieren, der die Datenstärke definiert, die zu den meisten Zeitpunkten erzielt wurde. In diesem Zusammenhang wird zu Zeitpunkten gleicher oder ähnlicher Datenstärken eine ebensolche Anzahl an Produkten montiert. Je niedriger die Datenstärke

ist, desto weniger Baugruppen wurden zum jeweiligen Zeitpunkt fertiggestellt. Zur Abgrenzung von validen zu nicht-validen Datenstärken muss ein Grenzwert eingeführt werden, wobei alle nicht-validen Datenstärken unterhalb des Grenzwertes liegen. Dieser muss der Anforderung genügen, Datenstärken, die aus Produktionsprozess-bedingten Schwankungen vom Modalwert abweichen, von Datenstärken der Unterbrechungsphasen unterscheiden zu können. Hierzu findet der Variationskoeffizient der erhobenen Bearbeitungszeiten Anwendung. Dieser beschreibt den prozentualen Anteil, den t_{Ist} durchschnittlich um ihren Erwartungswert schwanken. Da die Datenstärke ein Maß für die Anzahl hergestellter Produkte ist und diese direkt mit der erhobenen Bearbeitungszeit im Verhältnis steht, dürfen beide Größen durchschnittlich nur um den gleichen Wert schwanken. Da es sich zusätzlich um eine relative Größe handelt, ist sie direkt auf die Datenstärke übertragbar. Somit ist aus allen in diesem Schritt noch vorhandenen Rohdatensätzen für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination der jeweilige Variationskoeffizient von t_{Ist} zu ermitteln. Aus dem jeweiligen Anteil wird der mittlere Variationskoeffizient für den gesamten Datenumfang berechnet. Der Modalwert abzüglich des prozentualen Anteils des Variationskoeffizienten ergibt die zu definierende Grenzstärke³¹.

Als letzter Schritt (Abbildung 5-12, Teil 4) werden aus validen/nicht-validen Datenstärken über die berechnete Grenzdatenstärke nicht-valide Zeitpunkte definiert. Diese als Unterbrechungsphasen bestimmten Zeiten müssen aus den Daten eliminiert werden. Somit sind nach diesem Methodenschritt nur noch Datensätze von Zeitpunkten vorhanden, die Produktionsphasen zuzuordnen sind.

5.4.3 Bearbeitungszeiten-basierte Datensatz-Eliminierung

Nach der Datensatz-Eliminierung durch die Analyse von Bauteilvarianten sowie von validen Zeitpunkten müssen die erhobenen Rohdaten nach den Bearbeitungszeiten aufbereitet werden. Grundsätzlich sollen hierbei Ausreißer-Daten von t_{Ist} in der Grundgesamtheit eliminiert werden (siehe exemplarische Darstellung im Zwischenfazit, Abschnitt 10.2.6, S. 177). Dies folgt der Annahme, dass Extremwerte mit höherer Wahrscheinlichkeit auf Messfehler oder sonstigen externen Einflussgrößen zurückzuführen sind, als Werte, die im durchschnittli-

³¹ Beispielrechnung: Betragen der Modalwert der Datenstärkenhäufigkeit 370 und der aus den Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen errechnete mittlere Variationskoeffizient von t_{Ist} 24 %, ergibt sich eine Grenzdatenstärke von 281.

chen Wertebereich liegen (ECKSTEIN 2012) und somit nicht einer regulären Leistungsschwankung von Montagemitarbeitern entsprechen.

In einem Variantenfließmontagesystem kann für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination eine geplante Bearbeitungszeit berechnet werden (siehe Grundlagen, Abschnitt 2.4.2.1, S. 36). In der Realität weichen erhobene Bearbeitungszeiten jedoch davon ab (exemplarische Häufigkeitsverteilung für eine Arbeitsplatz-Varianten-Kombination siehe Abbildung 5-13). Während in dieser Weibull-Verteilung eine deutliche Häufung bei der durchschnittlich erhobenen Bearbeitungszeit zu verzeichnen ist, fällt die Anzahl an Datensätzen zu den Rändern hin ab.

Um aus realen Bearbeitungszeiten, die über eine technische Zeitmessung erhoben wurden, fehlerbehaftete Daten zu eliminieren, wird das Konfidenzintervall angewendet. Auf Basis der Erläuterungen im Stand der Technik (siehe Abschnitt 3.3.3, S. 57) und angesichts der angenommenen Vielzahl an erhobenen Rohdatensätzen werden die obersten und untersten 5 % an den Rändern der erhobenen t_{Ist} entfernt. Somit werden jene Daten eliminiert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit fehlerbehaftet sind. Abbildung 5-13 veranschaulicht die Abgrenzung des Konfidenzintervalls (hellgraue Balken) im Gegensatz zu den auszusortierenden IST-Bearbeitungszeiten (dunkelgraue Balken). Jeder Wert entspricht dabei einem Datensatz, der mit diesem Methodenschritt aus den Rohdaten entfernt wird.

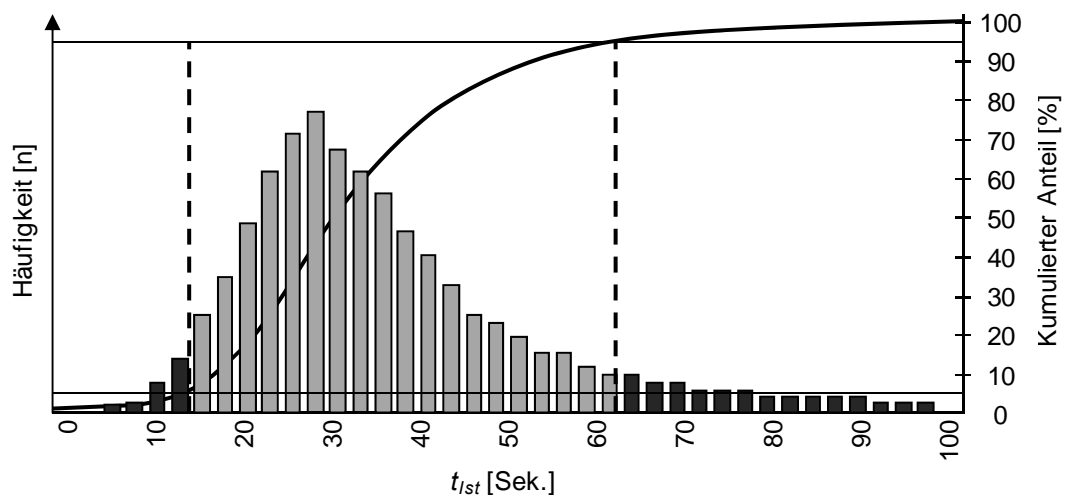


Abbildung 5-13: Exemplarisches Histogramm einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination aus dem Rohdatensatz unter Anwendung des Konfidenzintervalls von 5 %

5.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde eine Methode zur Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in einem Variantenfließmontagesystem beschrieben. Sie besteht aus zwei wesentlichen Schritten, die sequentiell zu durchlaufen sind.

Im ersten Schritt der Erhebung der Bearbeitungszeiten wurde zunächst die grundlegende Datenstruktur eingeführt. In einem deduktiven Ansatz wurde erläutert, welche Anforderungen zu erfüllen sind, damit diese Basis gelegt werden kann. Dabei wurden grundlegende Ansprüche sowie Anforderungen an die Arbeitsstation, die Bauteilvariante und die Zeitmessung definiert. Darauf aufbauend wurde eine Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen der Bearbeitungszeit beschrieben, mit der alle Anforderungen vom Anwender der Methode Schritt für Schritt auf deren Erfüllungsgrad geprüft werden können.

Da die erhobenen Rohdaten jedoch noch fehlerbehaftete Datensätze beinhalten, die keinen Rückschluss auf das reale Leistungsangebot von Montagemitarbeitern in einem Montagesystem zulassen, wurden diese in einem zweiten Methodenschritt aufbereitet. Ziel war es, vergleichbare Regelmäßigkeiten in den erhobenen Rohdatensätzen zu identifizieren. Es konnte, wiederum in Anlehnung an den Rohdatensatz, eine Variantenhäufigkeits-basierte, eine Zeitpunkt-basierte sowie eine Bearbeitungszeiten-basierte Datensatz-Eliminierung entwickelt werden.

In der Folge können die erhobenen und aufbereiteten Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten analysiert und daraus Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in Variantenfließmontagesystemen abgeleitet werden.

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

6.1 Überblick über die Methode

Aufbauend auf der Erhebung und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten wird in diesem Kapitel eine Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage entwickelt. Dies stellt den Entkopplungspunkt von aufbereiteten Rohdaten standardisierter Form zur Analyse und Auswertung des zu untersuchenden Variantenfließmontagesystems dar. Ab diesem Punkt werden somit keine Daten mehr eliminiert sondern ausschließlich weiterverarbeitet. Die Methode unterteilt sich in zwei wesentliche Schritte (siehe Abbildung 6-1).

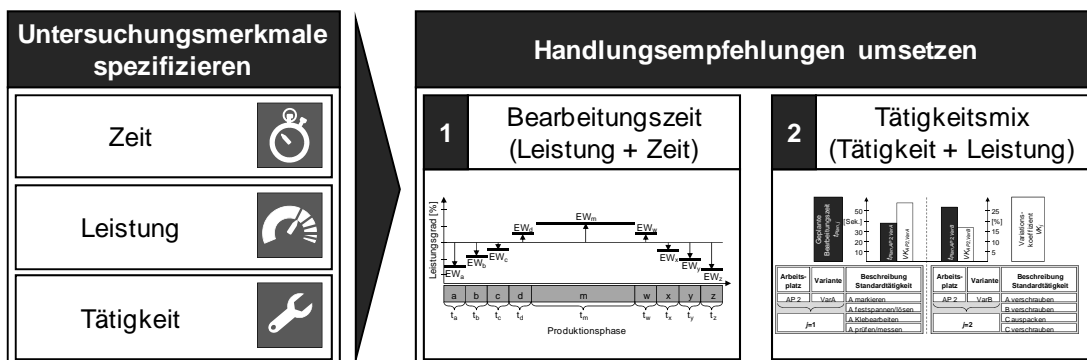


Abbildung 6-1: Überblick über die Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

Zunächst müssen Untersuchungsmerkmale spezifiziert werden, die es erlauben, den Rohdatensatz zielgerichtet analysieren zu können (Abschnitt 6.2). Dabei werden die Merkmale Zeit, Leistung und Tätigkeit unterschieden. Im Rahmen deren Spezifizierung wird die grundlegende Datenstruktur durch relevante Attribute, die sich aus der Grundstruktur ableiten lassen, erweitert.

Darauf aufbauend sollen durch eine logische Verknüpfung der Untersuchungsmerkmale Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in einer Variantenfließmontage generiert werden (Abschnitt 6.3). Dabei können die wesentlichen Abschnitte Bearbeitungszeit (Kombination der Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit) und Tätigkeitsmix (Kombination der Untersuchungsmerkmale Tätigkeit und Leistung) voneinander unterschieden und jeweils betrachtet werden.

6.2 Spezifizierung der Untersuchungsmerkmale

Im Rohdatensatz ist verzeichnet, welche Attribute pro Datensatz in einem laufenden Systembetrieb einer Variantenfließmontage erhoben und mittels gängiger Programme (wie z. B. Microsoft[®] Office Excel[®]) gespeichert werden können. Nach deren statistischer Aufbereitung müssen die für die Analyse der Daten notwendigen Untersuchungsmerkmale spezifiziert werden. Diese werden in der Statistik als eine an den Elementen einer Gesamtheit interessierte Eigenschaft, die in individuell unterschiedlichen Ausprägungen auftreten kann, bezeichnet (GABLER 2013C) (siehe Stand der Technik, Abschnitt 3.3.2, S. 53). Dabei untergliedern sich die in dieser Arbeit relevanten Untersuchungsmerkmale zur Analyse von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten in Anlehnung an den Rohdatensatz (siehe Abschnitt 5.2, S. 76) in Leistungsmerkmale, Tätigkeitsmerkmale sowie Zeitmerkmale. Diese sind jeweils abhängig vom zu untersuchenden Montagesystem und werden im Folgenden näher erläutert.

6.2.1 Zeitmerkmale



Das grundlegende Anliegen der Spezifizierung von Zeitmerkmalen ist das Zusammenfassen von logischen Zeitblöcken des Datensatzes, die eine im jeweiligen Betrachtungszeitraum kontinuierliche Produktionsrate erwarten lassen und somit eine Aussage zu Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern zulassen. Grundsätzlich geben die erhobenen und aufbereiteten Rohdaten Bearbeitungszeiten aus, die sekundengenau einer Tageszeit zugeordnet werden können. Da der exakte Messzeitpunkt von t_{Ist} von Tag zu Tag schwankt, verbietet sich auf dieser Basis ein Vergleich z. B. einzelner Tage. Abhilfe schafft das Mittel der Blockbildung (ECKSTEIN 2012). Zeitmerkmale der Rohdaten erweitern die

einem Datensatz zugeordneten Attribute Datum sowie Uhrzeit. Darauf aufbauend werden zur exakten Beschreibung eines Datensatzes die Attribute in Abhängigkeit ihrer absteigenden Aggregationsebene in Analysetag, Produktionsphase und Phasenabschnitt unterteilt (siehe Abbildung 6-2).

Zum Ersten verteilen sich Datensätze auf mehrere Analysetage (1-n). Dieses Attribut stellt gleichzeitig die höchste Aggregationsstufe der Zeitmerkmale dar. Der Analysetag ist in diesem Zusammenhang nicht zwingend gleichbedeutend mit der klassischen Maßeinheit eines Tages von 00:00 Uhr bis 23:59 Uhr. Denn wie in Abschnitt 2.5.2 (siehe S. 41) beschrieben, gilt der Dreischichtbetrieb in der industriellen Produktion als sehr weit verbreitet. Dieser startet, in Abhängigkeit des konkreten Schichtsystems des Unternehmens, um ca. 22 Uhr. Über Mitternacht erfolgt deshalb eine kontinuierliche Produktion. Unter der Annahme, dass Datensätze um 23:59 Uhr in Vergleich zu Datensätzen um 00:00 Uhr relativ geringe Unterschiede in den erhobenen t_{Ist} aufweisen werden, startet der Analysetag immer mit Start der Nachtschicht. In Ein- bzw. Zweischichtbetrieben startet der Analysetag jeweils mit dem ersten Arbeitsgang des dem Rohdatensatz korrelierenden Tages.

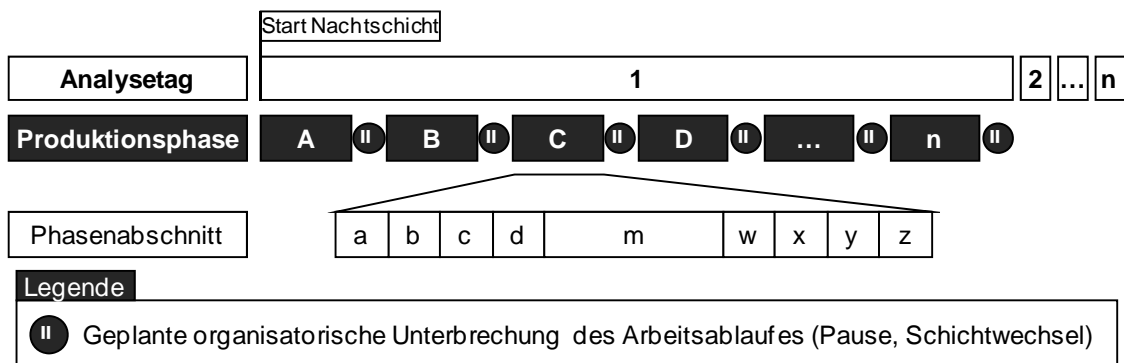


Abbildung 6-2: Spezifizierung der Zeitmerkmale „Analysetag“, „Produktionsphase“ und „Phasenabschnitt“

Produktionsphasen (A-n) stellen zum Zweiten die nächste Aggregationsstufe nach den Analysetagen dar und spezifizieren einen Analysetag. Unter einer Produktionsphase wird ein zusammenhängender Zeitblock verstanden, der nicht durch eine geplante organisatorische Unterbrechung des Arbeitsablaufes in Form eines Schichtwechsels oder einer Pause gestört wird³². Es wird die Annahme

³² Als Beispiel für Produktionsphase A in einem Dreischichtbetrieb sei die BMW AG beschrieben. Diese startet mit dem Beginn der Nachtschicht im Regelfall um 23:11 Uhr und dauert bis zur ersten Pause um 02:30 Uhr. Die Gesamtdauer dieser Phase beträgt somit 199 Min.

getroffen, dass organisatorische Unterbrechungen im Arbeitsablauf verbunden mit einem kurzzeitigen Verlassen des Arbeitsplatzes einen wesentlichen Einfluss auf das menschliche Leistungsangebot haben. Diese aus der starken organisatorischen Einengung einer Variantenfließmontage resultierenden Leistungsschwankungen können unter dem Oberbegriff Produktionsrhythmus zusammengefasst werden (GLONEGGER ET AL. 2013).

Zum Dritten stehen Phasenabschnitte (a-z) für die niedrigste Aggregationsstufe und spezifizieren eine Produktionsphase. Hierbei sollen vor allem Phänomene der Einarbeitung und Umstellung auf Arbeit zu Beginn der Phase, Monotonie in der mittleren sog. Routinephase sowie Ermüdung gegen Ende einer Produktionsphase abgebildet werden können. Denn wie in Abschnitt 2.5.3 (siehe S. 43) beschrieben, steigt das menschliche Leistungsangebot nach Pausen oder zu Beginn der Arbeit aufgrund der Einarbeitungs- und Umstellungsphase an und verläuft dann gleichmäßig. Deswegen werden der Produktionsphasenbeginn (a-d) sowie das Produktionsphasenende (w-z) in vier kurzyklische Phasen unterteilt. Die Länge der Einzelabschnitte ist in Abhängigkeit des analysierten Montagesystems individuell zu bestimmen, wobei in der Erstanwendung der Methode jeweils 5-Min-Phasen verwendet werden sollen. Denn COLQUHOUN (1971) beschreibt zur Einteilung in kurzyklische Leistungsphasen des Menschen eine Methode, bei der der Tag in 15-Min-Intervalle unterteilt wird. Alle Messergebnisse, die in ein bestimmtes Intervall fallen, werden diesem zugeordnet. Durch dieses Untersuchungsmerkmal können zu Produktionsphasenbeginn und -ende somit 20-Min-Phasen im Detail analysiert werden. Diese Größe liefert einen ersten Richtwert zur zeitlichen Einteilung der Phasenabschnitte, muss aber aus Gründen der Repräsentativität und Praktikabilität im Einzelfall geprüft werden.

Auf Basis der definierten Zeitmerkmale können die Attribute der erhobenen und aufbereiteten Daten spezifiziert werden. Den ursprünglichen Attributen Datum und Uhrzeit können die Zeitmerkmale Analysetag, Produktionsphase und Phasenabschnitt zugeordnet werden (siehe Abbildung 6-3). Zusammenfassend lassen diese mittels Blockbildung definierten Zeiträume eine im jeweiligen Betrachtungszeitraum kontinuierliche Produktionsrate erwarten und dienen als Grundlage zur Analyse der Leistungs- und Tätigkeitsmerkmale.

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{Plan} [Sek.]	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	t_{Ist} [Sek.]
1	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:33:35	23

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{Plan} [Sek.]	Analyse-tag	Produktionsphase	Phasenabschnitt	t_{Ist} [Sek.]
1	AP 2	1	VarA	24	10	D	z	23

Abbildung 6-3: Umwandlung der Attribute „Datum“ und „Uhrzeit“ der aufbereiteten Rohdaten in die spezifizierten Zeitmerkmale

Zur praktischen Umsetzung der Spezifizierung von Zeitmerkmalen müssen vom Anwender der Methode folgende Fragen beantwortet werden können.

- In wie vielen Schichten wird pro Tag gearbeitet?
- Wann startet die jeweilige Schicht?
- Von wann bis wann sind jeweils feste organisatorische Pausen eingeplant?
- Wie gestaltet sich das Einarbeitungs- und Auslaufverhalten innerhalb einer Produktionsphase?

Können diese Fragen beantwortet werden, kann der Anwender mit der Methode zur Berücksichtigung von menschlichen Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage weiterarbeiten.

6.2.2 Leistungsmerkmale



Der grundsätzliche Mehrwert der Methode ist es, durch die Ergebnisse der Datenaufnahme, -aufbereitung und -analyse einen Rückschluss über das menschliche Leistungsangebot in Bezug zu einem zu definierenden Betrachtungsbereich (z. B. zeitlich) machen zu können, um daraus Handlungsempfehlungen für die Neu- oder Umplanung von Montagesystemen ableiten zu können. Um Leistung vergleichbar zu machen, bedarf es einer Normalleistung, die einem Leistungsgrad von 100 % entspricht (siehe Abschnitt 2.2.2, S. 21) und aus dem Attribut „Bearbeitungszeit“ der grundlegenden Datenstruktur abgeleitet wird. Diese Umformung ist deshalb notwendig, weil in Variantenfließmontagesystemen Arbeitsgänge in Abhängigkeit vom Arbeitsplatz und der darauf zu montierenden Variante zusammengefasst werden.

Wie in Abschnitt 2.4.2.1 (siehe S. 36) erläutert, entspricht die resultierende geplante Bearbeitungszeit t_{plan} nicht immer der Taktzeit des Montagesystems. Hinter völlig verschiedenen Absolutwerten einer gemessenen Bearbeitungszeit t_{Ist} kann ein identisches menschliches Leistungsangebot stehen. Darüber hinaus soll die Bezugsleistung nicht die initial für das Montagesystem geplante t_{plan} sein, sondern die durchschnittliche arbeitsplatz- und variantenspezifische Bearbeitungszeit. Denn die heutige Qualität der Planung von Bearbeitungszeiten ist nicht ausreichend, um diese als Nulllinie des systembedingten Leistungsangebots gelten zu lassen. So liegt die REFA-Normalzeit etwa um einen Faktor von 1,1 bis 1,3 über den Tabellenzeiten der SvZ (BLOHM ET AL. 1997). Zusätzlich ist die Arbeitsausführung in den meisten modernen Variantenfließmontagelinien schneller als die aus den bekannten Verfahren zur Zeitenermittlung für die Arbeitsaufgabe minimal geplante Zeit (FLETCHER ET AL. 2008). Somit wird als erster Schritt die durchschnittliche arbeitsplatz- und variantenspezifische Bearbeitungszeit $t_{\emptyset,j}$ aus den erhobenen Bearbeitungszeiten der entsprechenden Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j mit Hilfe des arithmetischen Mittels ermittelt (vgl. Formel (6-1)).

$$t_{\emptyset,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{Ist,j,i} \quad (6-1)$$

i	Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]
j	Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]
$t_{\emptyset,j}$	Durchschnittliche Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination
$t_{Ist,i}$	Erhobene Bearbeitungszeit einer Datensatz-Nr. einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination

Damit berechnet sich das arbeitsplatz- und variantenspezifische IST-Leistungsniveau $LN_{Ist,j}$ in Anlehnung an Formel (2-2) (siehe S. 23) aus dem Quotienten aus durchschnittlicher und erhobener Bearbeitungszeit (vgl. Formel (6-2)). Da sich diese Größe auf die durchschnittliche Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination $t_{\emptyset,j}$ bezieht und nicht auf eine ursprünglich geplante SOLL-Bearbeitungszeit t_{plan} , wird nicht der „Leistungsgrad“ verwendet sondern an dieser Stelle der Begriff „Leistungsniveau“ eingeführt.

$$LN_{Ist,j} = \frac{t_{\emptyset,j}}{t_{Ist,j}} \times 100 \% \quad (6-2)$$

- i* Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]
- j* Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]
- $LN_{Ist,j}$ Arbeitsplatz-Varianten-spezifisches IST-Leistungsniveau
- $t_{\emptyset,j}$ Durchschnittliche Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination
- $t_{Ist,j}$ Erhobene Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination

Dieses stellt eine relative Bezugsgröße dar, die die Messgröße jedes Datensatzes untereinander vergleichbar macht. Abbildung 6-4 visualisiert hierzu das erläuterte Vorgehen anhand der grundlegenden Datenstruktur. Die Datensätze Nr. 1, 3 und 4 weisen die gleiche Arbeitsplatz-Varianten-Kombination auf. Aus diesen kann exemplarisch $t_{\emptyset,AP2,VarA}$ errechnet und daraus LN_{Ist} für die Datensätze 1, 3 und 4 abgeleitet werden. Alle weiteren Leistungsniveaus errechnen sich synonym.

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{Plan} [Sek.]	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	t_{Ist} [Sek.]	$t_{\emptyset,AP2,VarA} = 24,33 \text{ s}$	LN_{Ist} [%]
1	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:33:35	23	→	105,78
2	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:33:58	44	→	--
3	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:34:42	26	→	93,58
4	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:35:08	24	→	101,38
5	AP 2	1	VarB	42	24.10.12	14:35:32	41	→	--

Abbildung 6-4: Berechnung von LN_{Ist} auf Basis der Berechnung der durchschnittlichen Bearbeitungszeit pro Arbeitsplatz und Variante und Umwandlung des Attributs „ t_{Ist} “ in „ LN_{Ist} “

6.2.3 Tätigkeitsmerkmale



Die Spezifizierung von Tätigkeitsmerkmalen erlaubt eine differenziertere Betrachtung einzelner Arbeitsvorgänge. Wie in Abschnitt 2.4.2.2 (siehe S. 39) erläutert, wird eine Tätigkeit in ihrer kleinsten Einheit durch einen Arbeitsgang beschrieben. So können Arbeitsgänge der Montage auf Basis relevanter DIN-Normen in die Blöcke Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen unterteilt werden. Auf dieser Basis wurde ein Universelles Analysiersystem (kurz UAS) entwickelt, das typische Tätigkeiten der Serienfer-

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

tigung, insbesondere der Serienmontage, in Form einzelner Prozessbausteine abbildet (LOTTER & WIENDAHL 2006). Hierbei können insgesamt die neun UAS-Standardvorgänge „Auspacken“, „Behandeln“, „Festspannen und Lösen“, „Klebearbeiten“, „Elektrik / Leitungen verlegen“, „Markieren“, „Normteile montieren“, „Prüfen oder Messen“ und „Schraubarbeiten“ unterschieden werden. Dadurch können die meisten für die industrielle Montage typischen Tätigkeiten hinreichend genau spezifiziert werden (LOTTER & WIENDAHL 2006).

Über die entwickelte Checkliste aus dem vorherigen Methodenschritt (siehe Abschnitt 5.3.5, S. 86) ist sichergestellt, dass für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j ein Arbeitsplan existiert. Darauf aufbauend kann die entsprechende Gesamttätigkeit in ihre Standardtätigkeiten k_j aufgesplittet und der jeweilige Anteil an t_{Plan} ermittelt werden (siehe Abbildung 6-5).

Arbeitsplatz	Variante	Beschreibung Standardtätigkeit	Index k_j	Anteil an $t_{Plan,j}$ [%]
AP 2	VarA	Auspacken	α	$\alpha_j \times t_{Plan,j}$
		Behandeln	β	$\beta_j \times t_{Plan,j}$
		Festspannen und Lösen	γ	$\gamma_j \times t_{Plan,j}$
		Klebearbeiten	δ	$\delta_j \times t_{Plan,j}$
		Elektrik / Leitungen verlegen	ε	$\varepsilon_j \times t_{Plan,j}$
		Markieren	ζ	$\zeta_j \times t_{Plan,j}$
		Normteile montieren	η	$\eta_j \times t_{Plan,j}$
		Prüfen oder Messen	θ	$\theta_j \times t_{Plan,j}$
		Schraubarbeiten	ι	$\iota_j \times t_{Plan,j}$

Abbildung 6-5: Definition des Anteils der Standardtätigkeit k_j an $t_{Plan,j}$ in Relation zum jeweiligen Standardvorgang durch Aufsplitten der Gesamttätigkeit einer AP-Var-Kombination

Der Anteil der Standardtätigkeit k_j einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j liegt dabei in der Regel nicht direkt vor. Dieser berechnet sich nach folgender Formel (6-3) aus dem Quotienten aus der Zeitdauer der Standardtätigkeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, $t_{Plan,k,j}$, und der gesamten Tätigkeitsdauer von j , $t_{Plan,j}$ multipliziert mit 100 %.

$$k_j = \frac{t_{Plan,k,j}}{t_{Plan,j}} \times 100\% \quad (6-3)$$

- k_j Anteil Standardtätigkeit an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [$\alpha, \beta, \dots, \iota$]
- j Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA, AP1+VarB, \dots, n]
- $t_{Plan,k,j}$ Geplante Bearbeitungszeit einer Standardtätigkeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination
- $t_{Plan,j}$ Geplante Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination

Über den im Arbeitsplan verzeichneten Anteil der jeweiligen Standardtätigkeit k_j kann, in Weiterentwicklung der grundlegenden Datenstruktur, für jede Standardtätigkeit ein IST-Leistungsniveau $LN_{Ist,k}$ spezifiziert werden. Hierbei muss der kumulierte Anteil an t_{Plan} immer 100 % ergeben, wobei nicht bei jeder Arbeitsplatz-Varianten-Kombination jeder Standardvorgang vorkommen muss. So beträgt beispielsweise der Anteil der Standardtätigkeit „Klebearbeiten“, δ , an t_{Plan} bei einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, bei der keine Klebearbeiten geplant wurden, 0 %.

6.2.4 Zwischenfazit: Untersuchungsmerkmale

Um den erhobenen und statistisch aufbereiteten Rohdatensatz analysieren und daraus Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung einer Variantenfließmontage ableiten zu können, wurden in diesem Abschnitt die dafür relevanten Untersuchungsmerkmale spezifiziert. Diese unterteilen sich in Leistungs-, Tätigkeits- und Zeitmerkmale. Sie stellen die an der Gesamtheit interessanten und variablen Eigenschaften dar und erweitern die Attribute der grundlegenden Datenstruktur um die Attribute Produktionsphase, Phasenabschnitt, geplante Bearbeitungszeit einer Standardtätigkeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination $t_{Plan,k,j}$ und LN_{Ist} . Abbildung 6-6 visualisiert die angepasste grundlegende Datenstruktur.

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	t_{Plan} [Sek.]	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	t_{Ist} [Sek.]
1	AP 2	1	VarA	24	24.10.12	14:33:35	23

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	$t_{Plan,j}$ [Sek.]	$t_{Plan,j,k}$ [%]	Produktionsphase	Phasenabschnitt	LN_{Ist} [%]
1	AP 2	1	VarA	24	--	D	z	105,78
1	α	1	VarA	--	$\alpha \times 24$	D	z	105,78
1	γ	1	VarA	--	$\gamma \times 24$	D	z	105,78

Abbildung 6-6: *Angepasste grundlegende Datenstruktur nach Spezifizierung der Untersuchungsmerkmale*

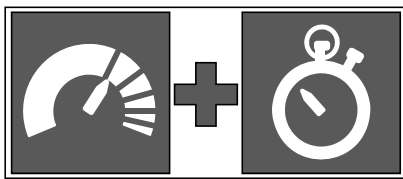
6.3 Umsetzung von Handlungsempfehlungen durch logische Verknüpfung von Untersuchungsmerkmalen

Aus den Grundlagen und dem Stand der Technik wird ersichtlich, dass aufgrund mangelhaft geplanter Bearbeitungszeiten und Tätigkeitsmixe eine Diskrepanz zwischen menschlichem Leistungsangebot und systembedingter Leistungsnachfrage in Variantenfließmontagesystemen entsteht. Dabei gelten Zeitdruck, Taktbindung, starre Verkettung, organisatorische Einengung sowie fehlende Einarbeitung als wesentliche Belastungsmerkmale im beschriebenen Betrachtungsrahmen. Bis dato existiert keine methodische Vorgehensweise zur Definition von Handlungsempfehlungen für die verbesserte Planung von Bearbeitungszeiten und Tätigkeitsmixe, um menschliche Leistungsschwankungen durch Verhältnisprävention in der Variantenfließmontage berücksichtigen zu können.

Auf Basis der angepassten grundlegenden Datenstruktur können Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation in der Variantenfließmontage umgesetzt werden. Im Zentrum der Betrachtung steht die logische Verknüpfung der spezifizierten Untersuchungsmerkmale. Hierbei werden in dieser Arbeit zwei Zusammenhänge näher erläutert. Zum Ersten ergibt die logische Verknüpfung der Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit eine Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit. Grundsätzlich soll dabei der Erwartungswert des erhobenen Leistungsniveaus für einen zu definierenden Zeitabschnitt berechnet und ausgewertet werden. Die logische Verknüpfung aus Tätigkeits- und Leistungsmerkmalen ergibt zum Zweiten eine Handlungsempfehlung

für den Tätigkeitsmix. Über die Auswertung des Variationskoeffizienten von Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen sollen Aussagen zu Leistungsschwankungen von Standardtätigkeiten gegeben werden können. Beide Fälle basieren auf erhobenen historischen Daten, aus denen Handlungsempfehlung für zukünftige Neu- oder Umplanungen untersuchter Variantenfließmontagesysteme getroffen werden sollen.

6.3.1 Handlungsempfehlung zur Bearbeitungszeit aus logischer Verknüpfung von Leistungs- und Zeitmerkmalen



Als erstes sollen die Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit logisch miteinander verknüpft werden. In einem ersten Schritt (notwendige Verfahrensschritte der Handlungsempfehlung Bearbeitungszeit siehe Abbildung 6-7) wird zunächst die Handlungsempfehlung zur

Anpassung der Bearbeitungszeit formuliert. Anschließend wird in einem deduktiven Ansatz der Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur erläutert. Darauf aufbauend werden die Grundzüge der methodischen Analyse der Daten nach dem Erwartungswert skizziert. Die notwendige Datenanalyse gilt in der induktiven Statistik als Stand der Technik. Dies dient dem Verständnis, wie aufbereitete Datensätze analysiert werden müssen, um sie anschließend nach definierten Untersuchungsgrößen auswerten zu können und wird deshalb für eine durchgängige Betrachtung mit aufgeführt.

Abschließend erfolgt die Auswertung der Daten nach dem Erwartungswert. Insgesamt liefert dies das methodische Handwerkszeug, um Leistungsmerkmale nach spezifizierten Zeitmerkmalen planen zu können.

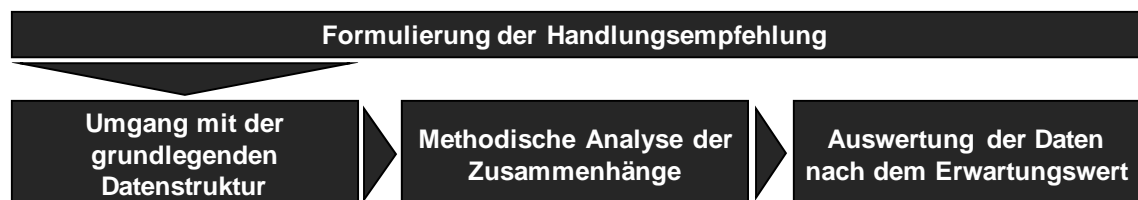


Abbildung 6-7: Notwendige Verfahrensschritte der Handlungsempfehlung Bearbeitungszeit

6.3.1.1 Formulierung der Handlungsempfehlung

Die „offensichtlichste“ Handlungsempfehlung leitet sich aus der Verknüpfung zwischen Leistungs- und Zeitmerkmalen ab. Sie entspricht der klassischen Denkweise, z. B. die Bandgeschwindigkeit eines Variantenfließmontagesystems (=Leistung) an die zirkadiane Rhythmik (=Zeit) anzupassen. Hierzu muss für einen zu definierenden Zeitabschnitt p (Produktionsphase oder Phasenabschnitt) der Erwartungswert EW_p berechnet werden und daran die Bearbeitungszeit für diese Arbeitsstation $t_{Plan,p}$ in einer nachfolgenden Planung angepasst werden. Es kann somit folgende Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit formuliert werden.

Handlungsempfehlung	Die Bearbeitungszeit für eine Arbeitsstation $t_{Plan,p}$ muss in einem bestimmten Zeitabschnitt p (Phasenabschnitt, Produktionsphase) an den jeweils zu definierenden Erwartungswert EW_p des menschlichen Leistungsangebotes angepasst werden.
Bearbeitungszeit	

6.3.1.2 Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur

Über die Spezifizierung der Leistungsmerkmale wird jedem Datensatz ein Leistungsniveau LN_{Ist} zugeordnet, wobei über die beschriebene Spezifizierungsmethode Varianten eliminiert werden können. Jede Variante wurde bei der Spezifizierung der Leistungsmerkmale über den jeweiligen spezifischen Mittelwert als Bezugsgröße in ein Leistungsniveau umgewandelt. Hierdurch wird jeder Datensatz in Bezug auf das Leistungsniveau für den gesamten Arbeitsplatz vergleichbar. Betreffend der Definition einer Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit muss somit nur noch zwischen einzelnen Arbeitsplätzen als eigenständigen Versuchsaufbau unterschieden werden³³. An dieser Stelle muss aus der grundlegenden Datenstruktur für das zu untersuchende Zeitmerkmal, z. B. einer Produktionsphase r , der Erwartungswert EW_r ermittelt werden. Hierzu wird das arithmetische Mittel von $LN_{Ist,r,i}$ aller Datensätze berechnet, die dem zu untersuchenden Zeitmerkmal zugeordnet werden können (siehe Formel (6-4)).

³³ Anders als bei POTTHAST (2013) spielen Variantenunterschiede in diesem Zusammenhang keine Rolle. Dieser wertet Daten variantenspezifisch aus und ermittelt daraus mitarbeiterindividuelle Leistungskurven.

6.3 Umsetzung von Handlungsempfehlungen durch logische Verknüpfung von Untersuchungsmerkmalen

$$EW_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LN_{Ist,r,i} \quad (6-4)$$

- i Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]
 r Laufvariable für das Zeitmerkmal Produktionsphase [A,B,...,n]
 EW_r Erwartungswert einer Produktionsphase
 $LN_{Ist,r,i}$ IST- Leistungsniveau einer Produktionsphase einer Datensatz-Nr.

Abbildung 6-8 visualisiert exemplarisch den Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur. Hierzu wird, in Anlehnung an die bereits verwendeten Datensätze Nr. 1 bis 5, exemplarisch jeder Datensatz der Produktionsphase D zusammengefasst. Der Erwartungswert für die betrachteten fünf Datensätze, EW_D , ergibt sich nach dem erläuterten formelmäßigen Zusammenhang zu 104,39 %. Dieser ist somit um 4,39 % größer als das in der Planung ursprünglich berechnete Leistungsniveau von 100 % für diese Arbeitsstation. In gleicher Weise werden die Erwartungswerte aller Produktionsphasen oder Phasenabschnitte berechnet werden.

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Produktionsphase	LN_{Ist} [%]	
1	AP 2	1	D	105,78	<div style="background-color: #333; color: white; padding: 5px; font-weight: bold; margin-bottom: 10px;">Erwartungswert Produktionsphase D</div> $EW_D = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 LN_{Ist,D,i} = 104,39\%$
2	AP 2	1	D	108,59	
3	AP 2	1	D	93,58	
4	AP 2	1	D	101,38	
5	AP 2	1	D	112,66	

Abbildung 6-8: Exemplarische Ableitung eines Erwartungswertes aus einer Produktionsphase am Beispiel der grundlegenden Datenstruktur

6.3.1.3 Analyse der Daten nach dem Erwartungswert

Aufgrund der Menge und Komplexität der nach dem Erwartungswert aufbereiteten Daten sollen diese mittels einer ANOVA (siehe Stand der Technik, Abschnitt 3.3.4, S. 58) analysiert werden. Hierzu existiert mit der Statistik- und Analyse-Software SPSS® ein anwenderfreundliches und zeiteffizientes Programm, das logisch in die zu entwickelnde Methode und deren Umsetzung eingebettet werden soll.

Die wesentlichen Schritte sind die Festlegung der Null- und Alternativhypothese sowie der Irrtumswahrscheinlichkeit, die im Regelfall mit 0,05 angenommen werden soll. Über Binnen- und Zwischenmittelstreuung der Teststatistik wird die Prüfgröße ermittelt. Durch einen Vergleich der Prüfgröße mit der Prüfverteilung (zu generieren aus einem Tabellenwerk in Abhängigkeit zur Anzahl an Messreihen sowie Gesamtanzahl an Messwerten) kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Streuung zwischen Stichproben vom Zufall oder signifikant vom untersuchten Einflussfaktor abhängt. Dieser Einflussfaktor ist im betrachteten Fall der Erwartungswert. Konkrete Beispiele dieser Einflussbeziehung werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.3.1.4 Auswertung der Daten nach dem Erwartungswert

Erwartungswert einer Produktionsphase r

Die Auswertung der Daten nach dem Erwartungswert zur Spezifizierung der Bearbeitungszeit soll anhand der beiden möglichen zeitlichen Ausprägungen Produktionsphase sowie Phasenabschnitt erläutert werden. Zum Ersten wird der schwankende Erwartungswert in Abhängigkeit der Produktionsphase charakterisiert (siehe Abbildung 6-9).

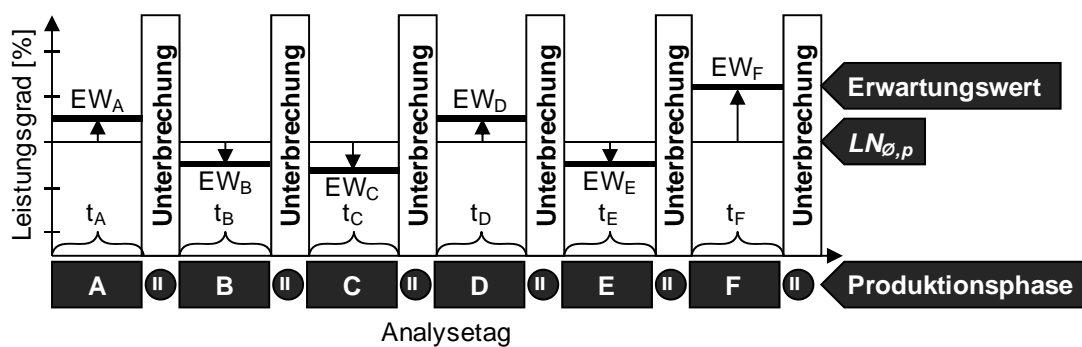


Abbildung 6-9: Visualisierung des schwankenden Erwartungswertes in Abhängigkeit der Produktionsphase

Diese entspricht am nächsten der Betrachtungsweise einer Leistungsschwankung nach der zirkadianen Rhythmik. Dabei wurde die Bearbeitungszeit mit einem durchschnittlichen Leistungsniveau geplant. Wie im Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur beschrieben, kann für jede Produktionsphase ein Erwartungswert des Leistungsniveaus definiert werden. Wie in der Abbildung zu er-

kennen ist, nimmt der Erwartungswert somit für die jeweilige Produktionsphase ein Plateau ein, das die gesamte Zeitdauer der Produktionsphase gehalten wird.

In Berücksichtigung der Rahmenbedingung eines konstanten Teile-Outputs am Ende des Produktionstages muss der Erwartungswert EW_r multipliziert mit der jeweiligen Zeitdauer t_r für einen Analysetag immer gleich dem durchschnittlichen Leistungsniveau des jeweils betrachteten Zeitabschnittes, $LN_{\emptyset,p}$, entsprechen (siehe Formel (6-5)). Im Beispiel entspricht n gleich der letzten Produktionsphase F.

$$\sum_{r=A}^n EW_r \times t_r = LN_{\emptyset,p} \quad (6-5)$$

- r Laufvariable für das Zeitmerkmal Produktionsphase [A,B,...,n]
- EW_r Erwartungswert einer Produktionsphase
- t_r Bearbeitungszeit einer Produktionsphase
- $LN_{\emptyset,p}$ Leistungsniveau des betrachteten Zeitabschnittes

Erwartungswert eines Phasenabschnittes s

Synonym zur Produktionsphase kann zum Zweiten das Zeitmerkmal Phasenabschnitt, s , als niedrigste Aggregationsstufe ausgewertet werden (siehe Abbildung 6-10). Nach Abschnitt 6.2.1 (siehe S. 98) wird eine Produktionsphase zu Beginn (a-d) und zu Ende (w-z) aufgrund Einarbeitung und Ermüdung in jeweils vier kurzzyklische Phasen unterteilt. Mit dem Ziel, möglichst homogene Leistungsblöcke zu erhalten, sollen für diese Phasen als ersten Anhaltspunkt nach COLQUHOUN (1971) 15-Min-Intervalle gewählt werden. Diese Größe liefert einen ersten Richtwert, muss aber im Einzelfall iterativ angepasst werden. In eigenen Untersuchungen wurden auf dieser Basis beispielsweise 5-Min-Intervalle gewählt, da hier deutliche Unterschiede in den kurz-Plateaus zu identifizieren waren. Die Zeitdauer für den Mittelblock, $t_{s=m}$, ergibt sich durch Subtraktion der Zeitdauern der acht kurzzyklischen Phasenabschnitte von der gesamten Zeitdauer der Produktionsphase.

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

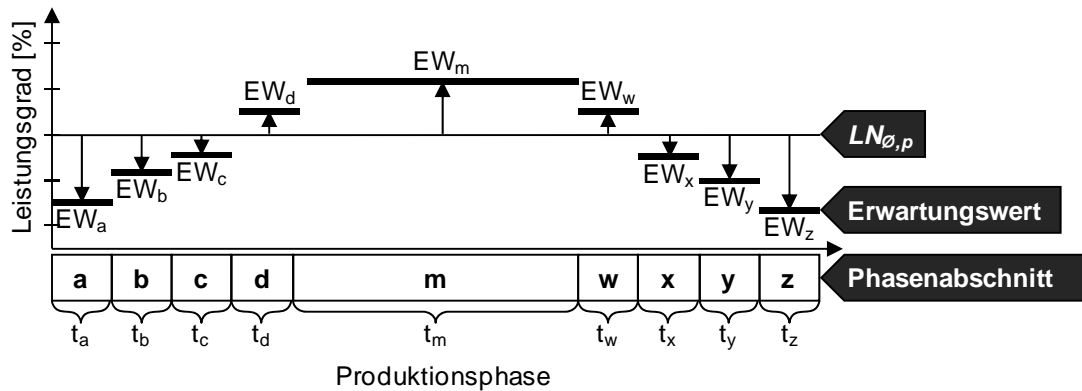


Abbildung 6-10: Visualisierung des schwankenden Erwartungswertes in Abhängigkeit des Phasenabschnittes

Analog zur Produktionsphase ergibt sich der Erwartungswert eines Phasenabschnittes durch Zusammenfassen aller Werte eines Arbeitsplatzes (siehe Abbildung 6-8, S. 109). Ebenfalls gilt die Randbedingung, dass nach Anpassung der Bearbeitungszeit an den Erwartungswert der gleiche Teile-Output wie bei einem durchschnittlichen Leistungsniveau erreicht werden muss. Somit müssen die einzelnen Erwartungswerte der Phasenabschnitt EW_s multipliziert mit der entsprechenden Zeitdauer t_s dem Leistungsniveau des betrachteten Zeitabschnittes, $LN_{\emptyset,p}$, entsprechen (siehe Formel (6-6)).

$$\sum_{s=a}^z EW_s \times t_s = LN_{\emptyset,p} \quad (6-6)$$

s Laufvariable für das Zeitmerkmal Phasenabschnitt [a,b,c,d,m,w,x,y,z]

EW_s Erwartungswert eines Phasenabschnittes

t_s Bearbeitungszeit eines Phasenabschnittes

$LN_{\emptyset,p}$ Leistungsniveau des betrachteten Zeitabschnittes

In der Praxis sind für den Anwender aufgrund Einarbeitung und Ermüdung der Mitarbeiter vor allem die Erwartungswerte der relevanten Phasenabschnitte zu Beginn (a-d) und gegen Ende (w-z) von Interesse. Der Erwartungswert des mittleren Phasenabschnittes $EW_{s=m}$ stellt keine relevante Untersuchungsgröße dar. Um Ressourcen bei Anwendung der Methode zu schonen, soll dieser nicht aus der Datenstruktur extrahiert, sondern durch folgenden formelmäßigen Zusammenhang bestimmt werden (siehe Formel (6-7)).

6.3 Umsetzung von Handlungsempfehlungen durch logische Verknüpfung von Untersuchungsmerkmalen

$$EW_m = \frac{\sum_{s=a}^d EW_s \times t_s + \sum_{s=w}^z EW_s \times t_s}{t_m} \quad (6-7)$$

- EW_m Erwartungswert des Phasenabschnittes m
 s Laufvariable für das Zeitmerkmal Phasenabschnitt [a,b,c,d,m,w,x,y,z]
 EW_s Erwartungswert eines Phasenabschnittes
 t_s Bearbeitungszeit eines Phasenabschnittes

Kumulierter Erwartungswert durch Zusammenfassung von r und s

Darüber hinaus sind Überlagerungen der Erwartungswerte der Produktionsphase sowie der Phasenabschnitte möglich. Abbildung 6-11 visualisiert schematisch diesen Zusammenhang für einen Analysetag. Dabei wird angenommen, dass sich das Anlauf- und Abklingverhalten innerhalb einer Produktionsphase an einem Arbeitsplatz unabhängig von der Tageszeit gleich verhält. Diese Annahme ist aufgrund der kurzzyklischen Betrachtungsweise der Phasenabschnitte zulässig. Auf dieser Basis können für einen Analysetag bei minutengenauer Betrachtung insgesamt 1440 Erwartungswerte EW_s abzüglich der in einem vorherigen Schritt vorgenommenen Zeitpunkt-basierten Datensatz-Eliminierung (z. B. auf Basis von Pausen oder Schichtwechseln) definiert werden. Hierzu müssen die einem Betrachtungszeitraum entsprechenden Datensätze aus den Daten identifiziert werden.

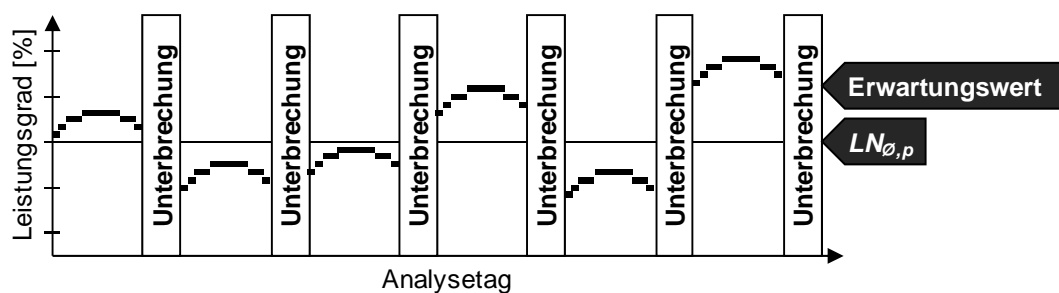


Abbildung 6-11: Exemplarische Visualisierung einer Überlagerung aus Schwankungen des Erwartungswertes aus Produktionsphase und Phasenabschnitt

Soll beispielsweise der Erwartungswert des Phasenabschnittes c der Produktionsphase D definiert werden, müssen alle korrelierenden Datensätze i_c des Phasenabschnittes c sowie i_D der Produktionsphase D ermittelt werden. Über das arithmetische Mittel der einbezogenen Datensätze ergibt sich der jeweilige Erwartungswert für die betrachtete Tageszeit (siehe Formel (6-8)).

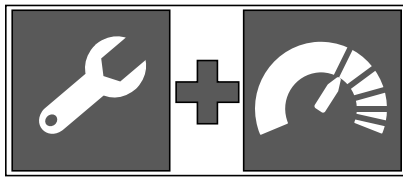
$$EW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LN_{Ist,r,i} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LN_{Ist,s,i} \quad (6-8)$$

EW	Erwartungswert
i	Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]
r	Laufvariable für das Zeitmerkmal Produktionsphase [A,B,...,n]
s	Laufvariable für das Zeitmerkmal Phasenabschnitt [a,b,c,d,m,w,x,y,z]
$LN_{Ist,r,i}$	IST- Leistungsniveau einer Produktionsphase einer Datensatz-Nr.
$LN_{Ist,s,i}$	IST- Leistungsniveau eines Phasenabschnittes einer Datensatz-Nr.

6.3.1.5 Zwischenfazit: Handlungsempfehlung Bearbeitungszeit

Die erste Handlungsempfehlung leitet sich aus der Verknüpfung der Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit ab. Ganz grundlegend wurde formuliert, dass die Bearbeitungszeit der Montagemitarbeiter an den zu analysierenden Erwartungswert eines bestimmten Zeitabschnittes angepasst werden soll. In einem deduktiven Ansatz wurde der Umgang mit der grundlegenden und mittels der Untersuchungsmerkmale aufbereiteten Datenstruktur vermittelt. Hierbei wird der zu untersuchende Zeitabschnitt (r oder s) definiert, um aus dem arithmetischen Mittel der IST-Leistungsniveaus der korrelierenden Datensätze den Erwartungswert EW dieses Zeitabschnittes definieren zu können. Darauf aufbauend wurden die Grundlagen der methodischen Analyse der Daten nach dem Erwartungswert erläutert. Bei der abschließenden Auswertung der Daten nach dem Erwartungswert konnte nach den Zeitmerkmalen Produktionsphase EW_r und Phasenabschnitt EW_s unterschieden werden. Dabei wurde die Plateaubildung des jeweiligen Erwartungswertes anschaulich erläutert und die Möglichkeit der Verknüpfung der beiden Größen gezeigt. Dies liefert insgesamt das methodische Handwerkszeug, um Leistungsmerkmale nach spezifizierten Zeitmerkmalen planen zu können, um auf Leistungsschwankungen von Mitarbeitern reagieren zu können.

6.3.2 Handlungsempfehlung zum Tätigkeitsmix aus logischer Verknüpfung von Tätigkeits- und Leistungsmerkmalen



Zum einen wurde aus der Kombination aus Leistungs- und Zeitmerkmalen eine Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit durch Spezifizierung des Erwartungswertes hergeleitet. Zum anderen soll in diesem Abschnitt durch eine logische Verknüpfung zwischen Tätigkeits- und Leistungsmerkmalen und Analyse des Variationskoeffizienten eine Handlungsempfehlung für den Tätigkeitsmix deduziert werden (visualisierter Zusammenhang und Einführung relevanter Indizes siehe Abbildung 6-12). Dazu wird zuerst die grundlegende Idee als Handlungsempfehlung formuliert. Im Anschluss daran soll analog zur differenzierten Betrachtung der Bearbeitungszeit auch im Zusammenhang mit dem Tätigkeitsmix zunächst der Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur erläutert werden. Darauf aufbauend wird die Auswertung der definierten Standardtätigkeiten nach dem Variationskoeffizienten geschildert und dieser als Rahmenbedingung bei der Planung des Tätigkeitsmix eingeführt. Als wesentliches Ergebnis dieses deduktiven Ansatzes soll die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination ermittelt werden können. Dies stellt die Grundlage der zu formulierenden Handlungsempfehlung und das wesentliche Ergebnis dieses Abschnittes dar.

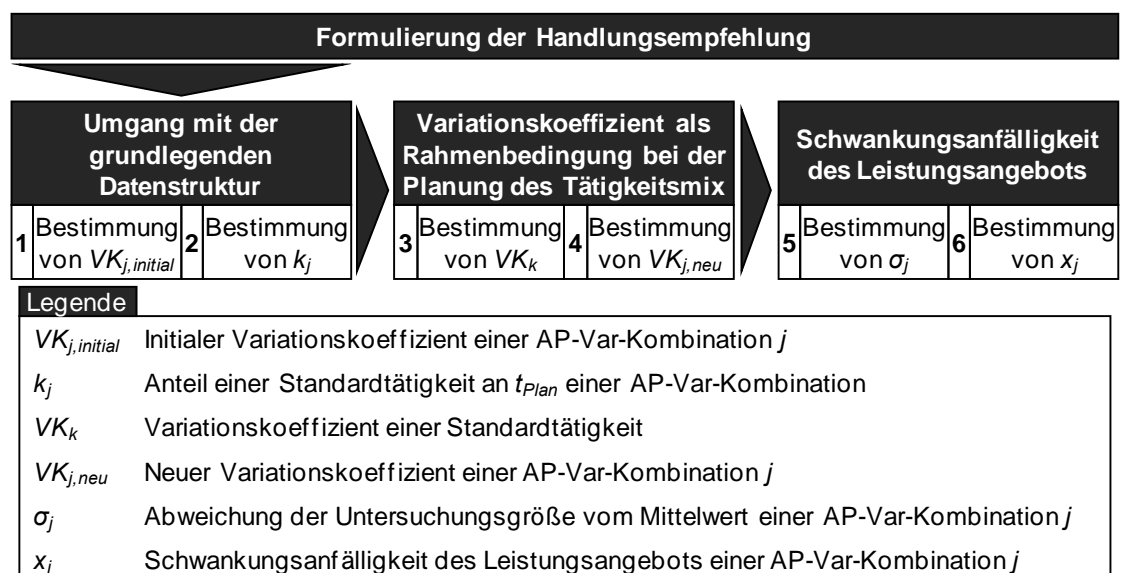


Abbildung 6-12: Notwendige Verfahrensschritte zur Ermittlung der Handlungsempfehlung Tätigkeitsmix

6.3.2.1 Formulierung der Handlungsempfehlung

Wie bereits beschrieben, werden alle relevanten Arbeitsgänge in der Fließbandabstimmung einzelnen Arbeitsplätzen zugeordnet. Das Ergebnis sind verschiedene Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j , die sich aus Standardtätigkeiten k_j zusammensetzen. Jeder j wird in diesem Zusammenhang eine geplante Bearbeitungszeit $t_{Plan,j}$ zugeordnet. Diese kann sich in Abhängigkeit von j enorm unterscheiden. In Abbildung 6-13 wird dieser Sachverhalt in Anlehnung an die gewählte Datenstruktur visualisiert. Während die Kombination aus Arbeitsplatz 2 und Variante A eine niedrige $t_{Plan,AP2,VarA}$ ergibt, stellt $t_{Plan,AP2,VarB}$ bei Arbeitsplatz 2 in Kombination mit Variante B einen wesentlich höheren Wert dar. Dem kann der jeweilige Variationskoeffizient VK_j gegenüber gestellt werden. Der grundsätzlichen Annahme folgend sollte eine lange Bearbeitungszeit eine in Relation tendenziell hohe Leistungsschwankung und somit einen erhöhten Variationskoeffizienten aufweisen. Auffällig war in eigenen Untersuchungen jedoch eine oftmals auftretende inverse Korrelation zwischen der Länge der Bearbeitungszeit $t_{Plan,j}$ und dem Variationskoeffizienten VK_j beim direkten Vergleich verschiedener Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen³⁴.

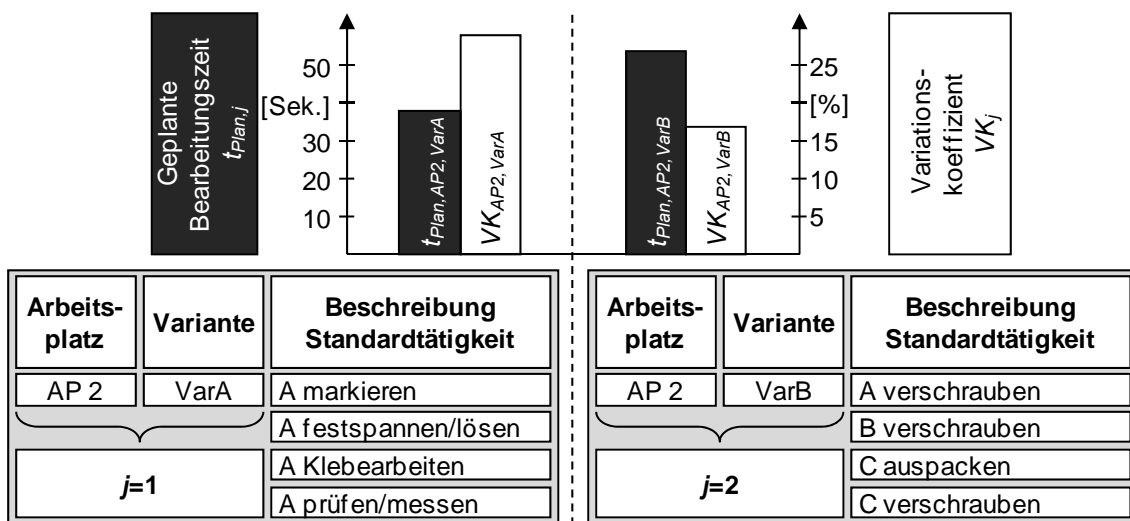


Abbildung 6-13: Visualisierung einer möglichen inversen Korrelation zwischen Länge der Bearbeitungszeit $t_{Plan,j}$ und dem Variationskoeffizienten VK_j von zwei verschiedenen AP-Var-Kombinationen j

³⁴ Die durchschnittliche Bearbeitungszeit einer Variante war an einem Arbeitsplatz im betrachteten System um 64,71 % kürzer als an einem anderen Arbeitsplatz. Der entsprechende Variationskoeffizient war an diesem Arbeitsplatz jedoch um 30 % höher.

Die Vermutung liegt daher nahe, dass der Tätigkeitsmix, der bei jeder Arbeitsplatz-Varianten-Kombination unterschiedlich sein kann, einen großen Einfluss auf die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebotes einer j aufweist. Während sich $j=1$ z. B. aus den Standardtätigkeiten „Teil A Markieren“, „Teil A Festspannen/Lösen“, „Teil A Klebearbeiten“ und „Teil A Prüfen/Messen“ zusammensetzt, besteht $j=2$ aus den sich davon differenzierenden Standardtätigkeiten „Teil A verschrauben“, „Teil B verschrauben“, „Teil C auspacken“ und „Teil C verschrauben“. Aufgrund der beschriebenen möglichen inversen Korrelation wird angenommen, dass jede der neun eingeführten Standardtätigkeiten k einen eigenen Variationskoeffizienten VK_k aufweist. Im qualitativen Beispiel aus Abbildung 6-13 ergeben die Standardtätigkeiten von $j=1$ einen wesentlich höheren Variationskoeffizienten VK_1 als jene von $j=2$, VK_2 . Dies steht im Widerspruch der grundlegenden Zielsetzung der Fließbandabstimmung, zeitlich möglichst nivellierte Tätigkeitsmixe zu etablieren. Denn schwankt eine Tätigkeit im Vergleich zu anderen stark, tritt in Leistungstiefs eine unverhältnismäßig hohe Überlast auf. Die Folge sind z. B. Störungen im Montageablauf und Fehler am Montageobjekt.

Heutzutage spielt die Leistungsschwankung einzelner Standardtätigkeiten VK_k bei der Planung des Tätigkeitsmix keine Rolle. VK_k soll bei der Zusammenfassung von Arbeitsgängen zu Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen als feste Rahmenbedingung bei der Fließbandabstimmung etabliert werden. Dabei soll die maximale Abweichung σ des Variationskoeffizienten für einen für eine Arbeitsstation geplanten Tätigkeitsmix einen zu definierenden Prozentsatz nicht überschreiten dürfen. Im Rahmen dieser Arbeit soll hierzu die Schwankungsanfälligkeit x des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination hergeleitet werden. Zusammenfassend kann aus den Ausführungen für den Tätigkeitsmix folgende Handlungsempfehlung abgeleitet werden.

Handlungsempfehlung	Arbeitsgänge müssen als Standardtätigkeiten k für einen zusammenhängenden Bandabschnitt, neben anderen Rahmenbedingungen, zusätzlich in Abhängigkeit ihres Variationskoeffizienten VK_k zu Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen j zusammengefasst werden. Dabei soll die maximale Abweichung σ des Variationskoeffizienten für einen für eine Arbeitsstation geplanten Tätigkeitsmix einen zu definierenden Prozentsatz nicht überschreiten.
Tätigkeitsmix	

6.3.2.2 Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur

Das Vorgehen zur Definition der Schwankungsanfälligkeit x des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination unterteilt sich in mehrere Schritte. Zunächst soll der Umgang mit den relevanten Attributen der angepassten grundlegenden Datenstruktur nach Spezifizierung der Untersuchungsmerkmale erläutert werden. In diesem Zusammenhang muss im ersten Schritt für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination der jeweilige Variationskoeffizient $VK_{j,initial}$ ermittelt werden (siehe Formel (6-9), in Anlehnung an Formel (3-2), S. 56). Notwendige Attribute der Datenstruktur umfassen, neben dem Arbeitsplatz und der Variante, das erhobene IST-Leistungsniveau LN_{Ist} sowie die korrelierende Datensatz-Nr. i . Insgesamt handelt es sich hierbei um einen Variationskoeffizienten, der sich aus erhobenen Daten einer Initialplanung des Variantenfließmontagesystems ergeben hat. In einem späteren Schritt soll ein neuer Variationskoeffizient für eine Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, $VK_{j,neu}$, entwickelt werden, der sich von $VK_{j,initial}$ unterscheidet.

$$VK_{j,initial} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[LN_{Ist,i,j} - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LN_{Ist,i,j} \right) \right]^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n LN_{Ist,i,j}} \times 100\% \quad (6-9)$$

$VK_{j,initial}$ Initialer Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j

i Laufvariable einer Datensatz-Nr. [1,2,...,n]

j Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]

$LN_{Ist,i,j}$ IST-Leistungsniveau einer Datensatz-Nr. einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j

In Schritt 2 muss in Anlehnung an die grundlegende Datenstruktur sowie an Formel (6-3) (siehe S. 105) der Anteil einer Standardtätigkeit an der gesamten geplanten Bearbeitungszeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, k_j , berechnet werden. Dieser wird aus dem Quotienten aus dem Zeitbedarf einer Standardtätigkeit $t_{Plan,k,j}$ und dem gesamten Zeitbedarf der entsprechenden Arbeitsplatz-Varianten-Kombination $t_{Plan,j}$ ermittelt.

In diesem Zusammenhang werden aus der grundlegenden Datenstruktur in Abbildung 6-14 exemplarisch die Anteile der Standardtätigkeiten von zwei Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen abgeleitet. Jeder im Arbeitsvorgang bezeichnete Arbeitsgang wird vom Anwender der Methode mittels einer Standardtätigkeit beschrieben und mit einem Index k hinterlegt. Dabei werden gleiche Standardtätigkeiten zu einem Zeitbedarf und somit prozentualen Anteil kumuliert. Im unteren Beispiel ergeben die einzelnen Arbeitsgänge „Teil A verschrauben“, „Teil B verschrauben“ und „Teil C verschrauben“ einen kumulierten Anteil ι am gesamten Tätigkeitsumfang. Die jeweilige Zusammensetzung an Standardtätigkeiten unterscheidet sich dabei zwischen den Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen.

Arbeitsplatz	Variante	Beschreibung Standardtätigkeit	$t_{Plan,j,k}$ [Sek.]	Index k_j	Anteil an $t_{Plan,j}$ [%]	k_j [%]
AP 2	VarA	A Markieren	3	ζ	$\zeta_j \times t_{Plan,j}$	12,50
		A Festspannen und Lösen	5	γ	$\gamma_j \times t_{Plan,j}$	20,83
		A Klebearbeiten	8	δ	$\delta_j \times t_{Plan,j}$	33,33
		A Prüfen oder Messen	8	θ	$\theta_j \times t_{Plan,j}$	33,33
		$t_{Plan,j} = 24$				
Arbeitsplatz	Variante	Beschreibung Standardtätigkeit	$t_{Plan,j,k}$ [Sek.]	Index k_j	Anteil an $t_{Plan,j}$ [%]	k_j [%]
AP 2	VarB	A verschrauben	11	ι	$\alpha_j \times t_{Plan,j}$	21,43
		B verschrauben	11	ι	$\iota_j \times t_{Plan,j}$	78,57
		C auspacken	9	α		
		C verschrauben	11	ι		
		$t_{Plan,j} = 42$				

Abbildung 6-14: Exemplarische Ableitung der Anteile einer Standardtätigkeit an zwei Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen der grundlegenden Datenstruktur

6.3.2.3 Variationskoeffizient als Rahmenbedingung bei der Planung des Tätigkeitsmix

Dem grundlegenden Ziel bei der Berücksichtigung des Variationskoeffizienten bei der Planung des Tätigkeitsmix folgend muss jeder einzelne Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination VK_j in einem zusammenhängenden Bandabschnitt möglichst konstant sein. Dazu muss in einem nächsten Schritt (Schritt 3) der Variationskoeffizient einer Standardtätigkeit VK_k für das untersuchte System bestimmt werden. Dieser berechnet sich nach Formel (6-10) aus dem Quotienten aus der Summe der initialen Variationskoeffizienten einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination $VK_{j,initial}$ mal dem prozentualen Anteil der

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

Standardtätigkeit k_j sowie der Summe aus den einzelnen Anteilen k_j multipliziert mit 100 %. Es werden somit die prozentualen Anteile jeder Standardtätigkeit in Abhängigkeit des jeweiligen Anteils an den Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen von Arbeitsplätzen eines zusammenhängenden Bandabschnittes aufsummiert und normiert.

$$VK_k = \frac{\sum_{j=1}^n (VK_{j,initial} \times k_j)}{\sum_{j=1}^n k_j} \times 100\% \quad (6-10)$$

VK_k Variationskoeffizient einer Standardtätigkeit k

j Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]

k_j Anteil Standardtätigkeit an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [$\alpha, \beta, \dots, \iota$]

Auf dieser Basis kann in Schritt 4 der Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j für eine Umplanung der Tätigkeiten eines zusammenhängenden Bandabschnittes, $VK_{j,Neu}$, ermittelt werden. Dieser ergibt sich aus der Summe 1-n der einzelnen Variationskoeffizienten VK_k der Standardtätigkeit k multipliziert mit dem jeweiligen Anteil der Standardtätigkeit am gesamten Arbeitsumfang $k_{j,Neu}$ der jeweiligen Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j (siehe Formel (6-11)). Dieser neue Anteil von $k_{j,Neu}$ stellt den in dieser Arbeit identifizierten wesentlichen Stellhebel bei der Planung des neuen Tätigkeitsmix dar.

$$VK_{j,Neu} = \sum_{k=\alpha}^{\iota} VK_k \times k_{j,Neu} \quad (6-11)$$

$VK_{j,Neu}$ Neuer Variationkoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j

j Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA,AP1+VarB,...,n]

VK_k Variationskoeffizient einer Standardtätigkeit k

$k_{j,Neu}$ Neuer Anteil der Standardtätigkeit k an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [$\alpha, \beta, \dots, \iota$]

6.3.2.4 Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination

Mit dem iterativ anzupassenden Anteil von Standardtätigkeiten an der Gesamtheit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, $k_{j,Neu}$, kann für jedes j ein neuer Variationskoeffizient ermittelt werden. Um die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination herleiten zu können, muss in einem fünften Schritt zunächst die Abweichung des untersuchten Variationskoeffizienten der Arbeitsplatz-Varianten-Kombination σ_j berechnet werden. Dieser setzt sich nach folgender Formel (6-12) aus dem Betrag des Variationskoeffizienten einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination VK_j minus des Mittelwertes der Variationskoeffizienten der Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen eines zusammenhängenden Bandabschnittes \overline{VK}_j zusammen.

$$\sigma_j = \left| VK_{j,Neu} - \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n VK_{j,Neu} \right) \right| = |VK_{j,Neu} - \overline{VK}_{j,Neu}| \quad (6-12)$$

σ_j	Abweichung der Untersuchungsgröße vom Mittelwert einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombi j
j	Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA, AP1+VarB, ..., n]
$VK_{j,Neu}$	Neuer Variationkoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
$\overline{VK}_{j,Neu}$	Arithmetisches Mittel des neuen Variationkoeffizienten einer AP-Var-Kombi j

Nach Normierung der ermittelten Abweichung σ_j mit dem entsprechenden Mittelwert $\overline{VK}_{j,neu}$ ergibt sich ein Wert $x_{j,neu}$, der Auskunft über die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebotes einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination gibt (siehe Formel (6-13)). Dieser Wert $x_{j,neu}$ ist über alle Kombinationen j möglichst gering zu halten. Dies wird realisiert, indem der wesentliche Stellhebel $k_{j,Neu}$, also der Anteil einer Standardtätigkeit an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, iterativ angepasst wird. Ist diese Anforderung erfüllt, ist jeder $VK_{j,neu}$ ein in einem zusammenhängenden Bandabschnitt möglichst konstant und das ursprünglich formulierte Ziel der Handlungsempfehlung zur Planung des Tätigkeitsmix nach dem Variationskoeffizienten erfüllt.

$$x_{j,neu} = \frac{\left| \sum_{k=\alpha}^t VK_k \times k_{j,Neu} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=\alpha}^t VK_k \times k_{j,Neu} \right) \right|}{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=\alpha}^t VK_k \times k_{j,Neu} \right)} \times 100 \% \quad (6-13)$$

$$= \frac{\left| VK_{j,Neu} - \overline{VK_{j,Neu}} \right|}{\overline{VK_{j,Neu}}} \times 100 \%$$

- $x_{j,neu}$ Neue Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j
 j Laufvariable einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination [AP1+VarA, AP1+VarB, ..., n]
 $k_{j,Neu}$ Neuer Anteil der Standardtätigkeit k an einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j [α, β, \dots, t]
 VK_k Variationskoeffizient einer Standardtätigkeit k

6.3.2.5 Zwischenfazit: Handlungsempfehlung Tätigkeitsmix

In diesem Abschnitt wurde durch eine logische Verknüpfung von Tätigkeits- und Untersuchungsmerkmalen und Analyse des Variationskoeffizienten eine Handlungsempfehlung für den Tätigkeitsmix hergeleitet. In einem deduktiven Ansatz wurde zunächst die elementare Idee als Handlungsempfehlung formuliert und diese anschließend in mehreren sukzessiven Schritten entwickelt. In diesem Zusammenhang wurde im Umgang mit der grundlegenden Datenstruktur erläutert, welche Attribute zur Datenverarbeitung verwendet werden müssen. So kann über den initialen Variationskoeffizient einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, $VK_{j,initial}$, der Anteil einer Standardtätigkeit an t_{Plan} , k_j , ermittelt werden. Darauf aufbauend wurde die Auswertung der definierten Standardtätigkeiten nach dem Variationskoeffizienten, VK_k , geschildert um daraus einen neuen Anteil der Standardtätigkeiten an den Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen $k_{j,Neu}$ generieren zu können. Durch Iterationsschleifen zur Anpassung von $k_{j,Neu}$ kann für jedes j ein neuer Variationskoeffizient $VK_{j,Neu}$ ermittelt werden. Abschließend wurde für jeden $VK_{j,Neu}$ die Abweichung vom Mittelwert aller $VK_{j,Neu}$ berechnet, um durch dessen Normierung ein Maß für die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination, x_j , zu erhalten.

6.4 Fazit

In diesem zweiten Methodenkapitel wurde beschrieben, wie menschliche Leistungsschwankungen in einem Variantenfließmontagesystem berücksichtigt werden können. Aufbauend auf der Grundlage von in einem Montagesystem erhobener und aufbereiteter Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten wurden deren Spezifizierung, Analyse und Auswertung erläutert.

Es wurden zunächst die für die Ableitung von Handlungsempfehlungen relevanten Untersuchungsmerkmale spezifiziert. Diese unterteilen sich in Leistungs-, Tätigkeits- und Zeitmerkmale und erweitern die im vorherigen Methodenschritt entwickelten Attribute der grundlegenden Datenstruktur um die Attribute Produktionsphase, Phasenabschnitt, geplante Bearbeitungszeit einer Standardtätigkeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination $t_{Plan,k,j}$ und LN_{Ist} .

Darauf aufbauend wurden zwei Zusammenhänge spezifizierter Untersuchungsmerkmale erläutert. Zum einen resultiert aus der logischen Verknüpfung der Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit eine Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit. Dabei wurde der Erwartungswert des Leistungsniveaus in Abhängigkeit des zu untersuchenden Zeitmerkmals Produktionsphase oder Phasenabschnitt als Reaktionsmöglichkeit auf Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern definiert. Es wurde gezeigt, wie diese Planungsgröße aus der Datenstruktur extrahiert werden kann und wie die Datenanalyse und -auswertung durchgeführt werden muss. Die zweite Handlungsempfehlung resultiert zum anderen aus der logischen Verknüpfung von Tätigkeits- mit Leistungsmerkmalen. Durch die Definition eines Variationskoeffizienten für Standardtätigkeiten und Ableitung des Variationskoeffizienten für Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen, kann ein Maß für die Schwankungsanfälligkeit des Leistungsangebots einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination definiert werden.

Insgesamt wurden zwei Wege aufgezeigt, wie aus einem Rohdatensatz an erhobenen und aufbereiteten Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Die beiden beschriebenen Methoden stellen zusammenfassend das theoretische Handwerkszeug dar, relevante Daten eines Montagesystems zu erheben um darauf aufbauend menschliche Leistungsschwankungen in der Neu- oder Umplanung von Variantenfließmontagesystemen berücksichtigen zu können. Im folgenden Kapitel soll auf dieser Basis

6 Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage

die praktische Umsetzung, Anwendung und Bewertung der theoretischen Methoden skizziert werden.

7 Umsetzung, Anwendung und Bewertung der Methoden

7.1 Kapitelüberblick

In diesem Kapitel soll die Anwendbarkeit der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden im produktionstechnischen Umfeld gezeigt werden. Diese werden zunächst in einem Software-Tool für den Anwender umgesetzt. Durch eine logische Verknüpfung der Methodenschritte und Hinterlegung von Systematiken für deren systemtechnische Abarbeitung kann dabei der Aufwand in der Praxis reduziert werden. Daran anschließend wird als zentrales Element dieses Kapitels die Anwendung der Methoden in einer Feldstudie bei einem Motorenhersteller gezeigt. Abschließend werden die entwickelten Methoden hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen sowie der an diese gestellten Anforderungen bewertet.

7.2 Umsetzung in einem Software-Tool für den Anwender

Für die Anwendung der Methoden kommt ein Software-Tool zum Einsatz, in dem die komplette entwickelte Logik implementiert wurde. So gliedert sich das beschriebene Vorgehen in insgesamt zehn Schritte. Abbildung 7-1 zeigt dazu jeweils Prozessschritte der Anwenderebene, hierzu hinterlegte Systematiken der Systemebene sowie das jeweilige Ergebnis. So muss beispielsweise im Methodenschritt 5, der Bearbeitungszeiten-basierten Datensatz-Eliminierung, durch den Anwender aktiv ein Vertrauensbereich definiert werden. Hierzu ist auf Systemebene die Logik des Konfidenzintervalls hinterlegt. Als Ergebnis liegen valide Datensätze der in einem vorherigen Schritt definierten SQL-Datenbank aus den Rohdaten vor.

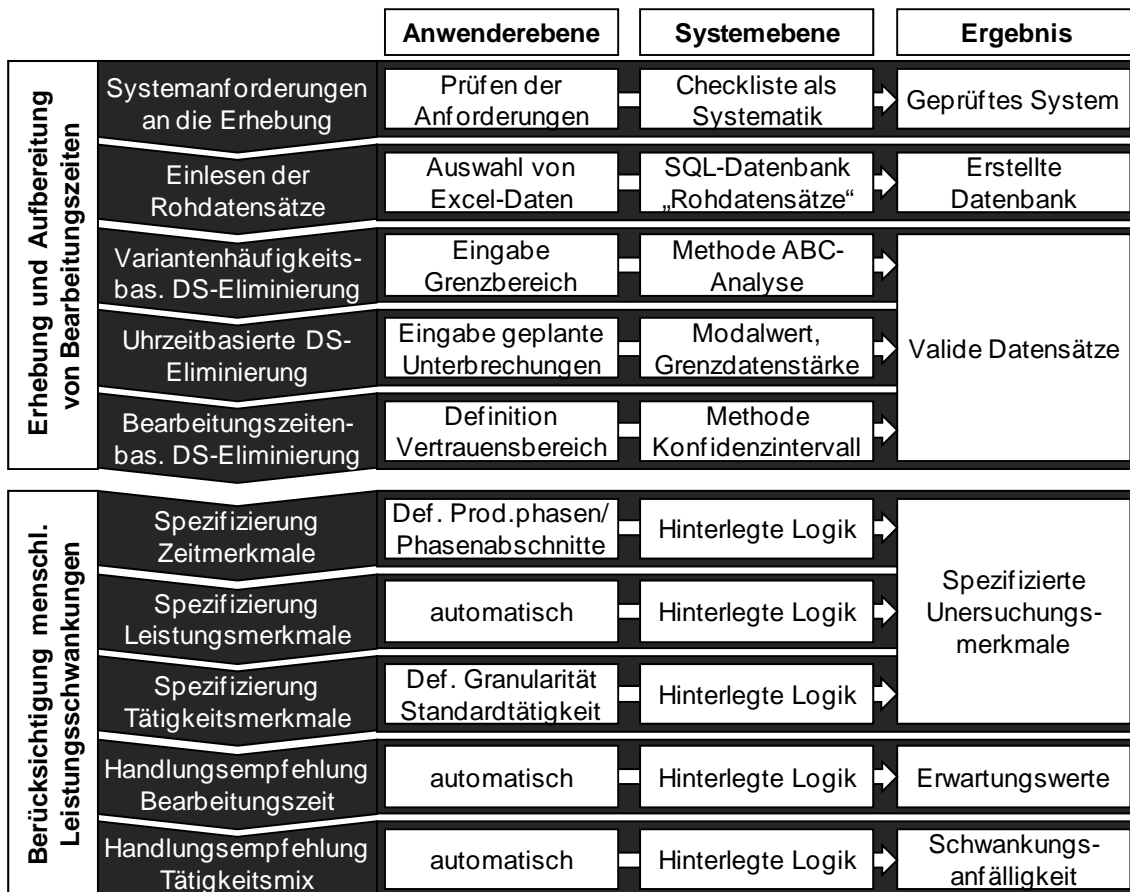


Abbildung 7-1: Grundlegender Prozessablauf der entwickelten Methoden

Zusätzlich findet sich im Anhang (siehe Abschnitt 10.2.7, S. 179) das GUI (Graphical User Interface) des implementierten Software-Tools, um einen Eindruck dessen Visualisierung zu bekommen.

7.3 Anwendung der entwickelten Methoden in einer Feldstudie bei einem Motorenhersteller

In dem im Folgenden beschriebenen Anwendungsbeispiel werden die beiden entwickelten Methoden im Praxiseinsatz evaluiert. Hierzu werden der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung beschrieben. Darauf aufbauend werden innerhalb einer Feldstudie in einer Fertigmotormontage eines Kfz-Herstellers beide Methodenteile durchgängig am realen Anwendungsfall evaluiert. Neben der Erhebung und Aufbereitung von t_{Ist} liegt der Fokus in der Spezifizierung von Untersuchungsmerkmalen und der Umsetzung von Handlungsempfehlungen für diesen Anwendungsfall. Die Feldstudie wird abschließend kritisch betrachtet.

7.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Feldstudie wird in einem Fertigmotormontagebereich eines Kfz-Herstellers durchgeführt. Hierbei werden kraftstoff-, varianten- und fahrzeugspezifische Bauteile montiert, um den jeweiligen Motor zu einem funktionsfähigen Aggregat zu komplettieren. Im untersuchten System werden insgesamt 46 Varianten von vier und sechs Zylinder-Motoren von 1,6 l bis 3,0 l Hubraum produziert, wobei die Varianten nach einer Austaktung der Arbeitsplätze in der geeignetsten Perlenkette in die Montagelinie eingesteuert werden. Die geplanten Bearbeitungszeiten pro Arbeitsplatz und Variante wurden mittels dem SvZ von MTM generiert. Die durchschnittliche Bearbeitungszeit eines Motors beträgt im Gesamt-Überblick 26,4 Sek.

Der untersuchte Bandabschnitt enthält, neben fünf Automatikstationen, insgesamt 38 manuelle Arbeitsplätze, die in fünf Arbeitsgruppen mit sechs bis neun Arbeitsplätzen unterteilt sind. Mitarbeiter wechseln regelmäßig die Arbeitsstationen. Es handelt sich um eine stationäre Fließmontage (Einordnung siehe Abbildung 1-6, S. 13), in der Mitarbeiter an einem ortsfesten Arbeitsplatz an ihnen vorbeifahrende Baugruppen bearbeiten und in einen Mengenpuffer weitergeben. Die Förderstrecke zwischen einzelnen Stationen entspricht dabei der Pufferkapazität, die im Maximum bis zu fünf Baugruppen entspricht. Die einzelnen Stationen sind mittels einer Rollenbahn miteinander verknüpft.

Die Datenaufnahme erfolgte über insgesamt neun Wochen, wobei in einer Schicht ca. 1.000 Baugruppen den Montagebereich als Fertigteil verlassen haben. Es wird in einem 15-Schicht-Betrieb montiert, also jeweils drei Schichten von Montag bis Freitag. Start einer Woche ist sonntags um 23:11 Uhr und Ende freitags um 23:11 Uhr.

7.3.2 Methodenschritt 1: Datenstruktur, Erhebung von t_{Ist} und Aufbereitung von t_{Ist}

Datenstruktur

Die Datenstruktur liegt in der nach Abbildung 7-2 visualisierten Form vor. Zusätzlich zu den nach der entwickelten Methode geforderten Attributen ist für jeden Datensatz und somit für jedes produzierte Fertigteil eine eindeutige Variantenbezeichnung vorhanden. Zusätzlich wird jedem Datensatz eine eindeutige

Variantenbezeichnung in Form einer Motornummer zugeordnet, die im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch eine untergeordnete Rolle spielen. Überdies wird als Mittel der Bauteilweitergabe ein Freigabetaster verwendet. Das jeweilige Datum sowie die Uhrzeit, die jedem Datensatz zugeordnet werden, entsprechen der Montage-ID des Freigabetasters.

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	Var-bezeichnung	Montage-ID	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]
1	AP 12	1	VarA	123456	Freigabe	03.10.11	13:25:46
2	AP 12	1	VarB	123457	Freigabe	03.10.11	13:26:16
3	AP 12	1	VarC	123458	Freigabe	03.10.11	13:26:43

Abbildung 7-2: *Vorliegende Struktur der erhobenen Datensätze in der Feldstudie*

Grundlegende Anforderungen

Im Methodenschritt Erhebung von Bearbeitungszeiten wird mittels der Checkliste (siehe Abbildung 5-8, S. 87) das Montagesystem analysiert. Dabei werden alle grundlegenden Anforderungen erfüllt. So werden die Daten der Zeitmessung in der oben beschriebenen Form automatisiert in Microsoft® Office Excel® abgelegt (Frage 1). Wie bereits in der Beschreibung der Datenstruktur vorweg genommen, können Daten arbeitsplatz- und variantenspezifisch betrachtet werden (Fragen 2 und 3). Beide Attribute werden für jeden Datensatz identifiziert.

Anforderungen an die Arbeitsstation

Bei den Anforderungen an die Arbeitsstation existiert eine eindeutige Arbeitsplatzbezeichnung. Jeder Arbeitsplatz kann von anderen in den Datensätzen unterschieden werden (Frage 4). Wie beschrieben befinden sich im untersuchten Montagesystem insgesamt 38 manuelle Arbeitsplätze, die in fünf Arbeitsgruppen unterteilt sind. Die Arbeitsgruppen sind durch z. B. Automatikstationen voneinander getrennt und somit in größerem Maße entkoppelt. Innerhalb dieser fünf Arbeitsgruppen besteht eine direkte Verknüpfung zwischen den Mitarbeitern und ein daraus resultierender geringer Grad an Entkopplung. Für jede Arbeitsgruppe kann auf Basis der durchschnittlich geplanten Bearbeitungszeit der langsamste Arbeitsplatz ausgewählt werden (siehe Abbildung 7-3). Diese gelten in der Folge als Engpass-Arbeitsplätze und werden weiter untersucht (Frage 5). Hinsichtlich der externen Faktoren der Arbeitsumgebung wird im Unternehmen durchgängig

ein Tool zur Bewertung der ergonomischen Güte der Arbeitsplätze angewendet. Für alle betrachteten Arbeitsplätze wurden nach standardisierten Kriterien ergonomische Belastungsfaktoren ermittelt, die dem Stand der Technik in der Arbeitsplatzergonomie entsprechen. Diese gilt als grundlegende Voraussetzung für die Freigabe eines Arbeitssystems (Frage 6). Daneben geben Mitarbeiter ihre Baugruppen nach Fertigstellung mittels eines Freigabetasters in Form eines Druckknopfes oder eines Fußpedals, die in Abhängigkeit der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung platziert wurden, weiter. Der Zeitpunkt des Drückens kann vom System aufgenommen und einem Datensatz zugeordnet werden (Frage 7). Außerdem laufen allgemeingültige Bauteilvarianten und nicht ausschließlich Sonderläufer über den Arbeitsplatz (Frage 8).

Untersuchter Montageabschnitt				
Arbeitsgruppe 1	Arbeitsgruppe 2	Arbeitsgruppe 3	Arbeitsgruppe 4	Arbeitsgruppe 5
AP 11	AP 21	AP 31	AP 41	AP 51
AP 12	AP 22	AP 32	AP 42	AP 52
AP 13	AP 23	AP 33	AP 43	AP 53
AP 14	AP 24	AP 34	AP 44	AP 54
AP 15	AP 25	AP 35	AP 45	AP 55
AP 16	AP 26	AP 36	AP 46	AP 56
AP 17	AP 27		AP 47	AP 57
AP 18	AP 28			AP 58
AP 19				

Abbildung 7-3: Arbeitsplätze des untersuchten Montageabschnittes und die fünf ausgewählten Engpassstationen (dunkel markiert)

Anforderungen an die Bauteilvariante

Auch die Anforderungen an die Bauteilvariante werden im untersuchten Montagesystem erfüllt. Wie in der vorliegenden Struktur gezeigt, existiert für jeden produzierten Motor eine eindeutige Variantenbezeichnung in Form einer eingravierten Nummer auf dem Motorblock, die vom System erfasst wird (Frage 9). Darüber hinaus liegt für jede Arbeitsplatz-Varianten-Kombination ein Arbeitsplan vor, der alle geplanten Arbeitsvorgänge mit der jeweils geplanten Bearbeitungszeit umfasst (Frage 10). Überdies existieren eindeutige Montage-IDs für Einzeltätigkeiten, da jedem Datensatz durch den manuellen Freigabetaster ein Messsignal zugeordnet werden kann (Frage 11). Dies ist auch die einzige Montage-ID jedes Datensatzes und entspricht somit dem jeweils definierten Zeitwert, wodurch auch Frage 12 der Checkliste nach mindestens einer gemessenen Montage-ID mit „Ja“ beantwortet werden kann.

Anforderungen an die Zeitmessung

Abschließend existiert innerhalb der Anforderungen an die Zeitmessung eine geplante Bearbeitungszeit pro Arbeitsplatz-Varianten-Kombination. Diese berechnet sich grundsätzlich aus Arbeitsplatz, darauf montierter Variante und der dafür zur Verfügung stehenden Anzahl an Mitarbeitern und kann aus dem Arbeitsplan abgelesen und dem jeweiligen Datensatz zugeordnet werden (siehe Abbildung 7-4) (Frage 13). Daneben existiert ein exakter Messzeitpunkt pro Montage-ID, da der Montage-ID Freigabetaster ein im Arbeitsablauf eindeutiger Messzeitpunkt zugeordnet werden kann. Diese Montage-ID ist im Arbeitsplan hinterlegt und im Arbeitsablauf jeder Arbeitsplatz-Varianten-Kombination logisch eingeordnet (Frage 14). Überdies stellt das Drücken des Freigabetasters die letzte geplante aktive Tätigkeit im Arbeitsablauf der Montagemitarbeiter dar. Im Anschluss fährt die Baugruppe über die fest installierte Rollenbahn in den der Station angeschlossenen Mengenpuffer. Somit ist die Bearbeitungszeit nach Messzeitpunkt, t_n , für alle am jeweiligen Arbeitsplatz montierten Varianten absolut konstant, es existiert ein absolut konstanter Zeitblock an Montage-ID (Frage 15).

Nr.	Arbeitsplatz	Anzahl Mitarbeiter	Variante	Var-bezeichnung	Montage-ID	Datum [dd.mm.yy]	Uhrzeit [hh:mm:ss]	t_{Plan} [Sek.]
1	AP 12	1	VarA	123456	Freigabe	03.10.11	13:25:46	25,14
2	AP 12	1	VarB	123457	Freigabe	03.10.11	13:26:16	26,46
3	AP 12	1	VarC	123458	Freigabe	03.10.11	13:26:43	29,46

Abbildung 7-4: Definition einer geplanten Bearbeitungszeit als Funktion aus Arbeitsplatz, Variante und Mitarbeiteranzahl

Somit können alle Fragen der Checkliste mit „Ja“ beantwortet werden. Es kann mit den definierten validen Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen weitergearbeitet werden. Nach Erhebung liegen insgesamt 633.463 Datensätze in der oben beschriebenen Form vor. Dabei existieren für jede valide Arbeitsplatz-Varianten-Kombination Datensätze, deren Messgröße „reale Bearbeitungszeit t_{Ist} “ keinen Rückschluss auf menschliche Leistungsschwankungen erlaubt (schematische Visualisierung siehe Anhang, Abbildung 10-6, S. 178). Somit müssen die erhobenen Rohdaten aufbereitet werden, um diese im Anschluss daran weiterverarbeiten zu können. Vorab können 63.645 unvollständige Datensätze, bei denen systembedingt nicht alle Attribute mit einem Wert hinterlegt sind, aus der Betrachtung ausgeschlossen werden.

Datenaufbereitung

Auf dieser Basis wird die im ersten Methodenteil erläuterte Vorgehensweise zur Aufbereitung der Datensätze angewendet. Zum Ersten werden auf Basis der Variantenhäufigkeit Datensätze eliminiert. Wie bereits erwähnt, werden im untersuchten Montageabschnitt insgesamt 46 Varianten montiert. Mittels einer ABC-Analyse können daraus 25 Varianten identifiziert werden, deren Anzahl an montierten Baugruppen summiert weniger als 5 % der Gesamtanzahl entspricht. Die restlichen 21 Varianten machen 95 % der Produktionsmenge aus und werden in der Folge weiter betrachtet. Somit können 31.348 Datensätze durch Sonderläufer-Varianten eliminiert werden. In der Zeitpunkt-basierten Datensatz-Eliminierung werden zum Zweiten Produktionsphasen von Unterbrechungsphasen getrennt. Der Modalwert der minutengenauen Datenstärke beträgt 430. Mittels eines aus den Daten zu ermittelnden Variationskoeffizienten von 25 % wird die Grenzdatenstärke mit 320 beziffert. Somit wird jede Minute, in der im Erhebungszeitraum weniger als 320 Einheiten montiert wurden, als Unterbrechungsphase identifiziert. Durch Anwenden der beschriebenen Methode werden demzufolge 8.059 Datensätze aus den erhobenen Rohdaten gestrichen. Zum Dritten werden 53.044 Datensätze auf Basis der Bearbeitungszeiten eliminiert. Mittels des Konfidenzintervalls wird pro Arbeitsplatz-Varianten-Kombination ein Vertrauensbereich von 90 % der Bearbeitungszeiten definiert, wobei jeweils 5 % an den Rändern des Datenbereichs eliminiert werden. Diese entsprechen mit hoher Wahrscheinlichkeit Bearbeitungszeiten, die keinen Rückschluss auf menschliche Leistungsschwankungen erlauben.

Als Ergebnis der Datenbereinigung liegen 477.367 valide Datensätze vor. Somit müssen in der Datenaufbereitung ca. 25 % der ursprünglich erhobenen Rohdaten eliminiert werden. Alle weiteren Analyseschritte basieren ausschließlich auf den bereinigten Rohdaten.

7.3.3 Methodenschritt 2: Berücksichtigung von menschlichen Leistungsschwankungen

Spezifizierung der Untersuchungsmerkmale

In einem ersten Schritt werden die Untersuchungsmerkmale auf Basis der entwickelten Methode spezifiziert. Im Rahmen der Zeitmerkmale umfassen die aufbereiteten Daten bei einer Betrachtung von neun Wochen insgesamt 45 Analyseta-

ge. Auf Basis des Dreischicht-Systems des Anwenders können sieben Produktionsphasen A-G unterschieden werden, die durch organisatorische Arbeitsunterbrechungen unterteilt werden (siehe Abbildung 7-5). Die Produktionsphasen dauern von minimal 135 Min. als mittlere Phase der Frühschicht bis maximal 266 Min. als letzte Phase der Spätschicht.

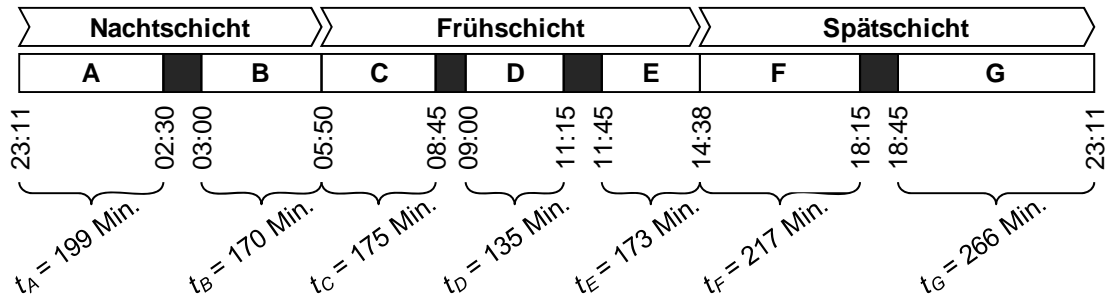


Abbildung 7-5: Schichtsystem mit Beginn und Ende von Unterbrechungsphasen sowie absoluter Dauer t_A bis t_G der jeweiligen Produktionsphasen A bis G

Produktionsphasen können weiter in Phasenabschnitte unterteilt werden, wobei der Beginn und das Ende einer Produktionsphase aufgrund von Einarbeitung und Ermüdung von besonderem Interesse sind. Demzufolge werden, unabhängig von der Dauer der jeweiligen Produktionsphase, die ersten und die letzten 20 Min. in 4x5 Min.-Blöcke unterteilt, um Variabilität in den Erwartungswerten zu identifizieren. Diese Einteilung hat sich nach ersten Vorversuchen für das untersuchte Montagesystem bewährt. Auf dieser Basis werden Leistungsmerkmale spezifiziert. Zunächst wird für jede valide Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j die durchschnittliche Bearbeitungszeit $t_{0,j}$ berechnet (vgl. Formel (6-1), S. 102). Darauf aufbauend kann das arbeitsplatz- und variantenspezifische IST-Leistungsniveau $LN_{Ist,j}$ aus dem Quotienten aus durchschnittlicher und erhobener Bearbeitungszeit berechnet werden (vgl. Formel (6-2), S. 103). Nachfolgend werden jedem betrachteten Zeitabschnitt p die korrespondierenden Datensätze zugeordnet, um daraus den Erwartungswert EW_p pro Zeitabschnitt aus dem Durchschnitt der entsprechenden Leistungsniveaus $LN_{Ist,p}$ zu generieren. Nicht zuletzt werden für jede valide Arbeitsplatz-Varianten-Kombination j Tätigkeitsmerkmale auf Basis von MTM UAS spezifiziert. Hierbei wird jede im Arbeitsplan verzeichnete Tätigkeit einem der neun Standards zugeordnet.

Handlungsempfehlung zur Bearbeitungszeit

In einem zweiten Schritt können aus den erhobenen und aufbereiteten Bearbeitungszeiten sowie den spezifizierten Untersuchungsmerkmalen für das Montagesystem der Feldstudie Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Zum Ersten wird durch eine Kombination von Leistungs- und Zeitmerkmalen im Rahmen einer Berechnung des Erwartungswertes EW_p für einen Zeitabschnitt p eine Handlungsempfehlung für die Bearbeitungszeit definiert. Diese berücksichtigt menschliche Leistungsschwankungen, die sich aus intra- sowie interindividuell unterschiedlichen Leistungsvoraussetzungen zusammensetzen. Bei der Auswertung nach der Produktionsphase r ergibt sich für das untersuchte Montagesystem die in Abbildung 7-6 visualisierte Verteilung des Erwartungswertes EW_r .

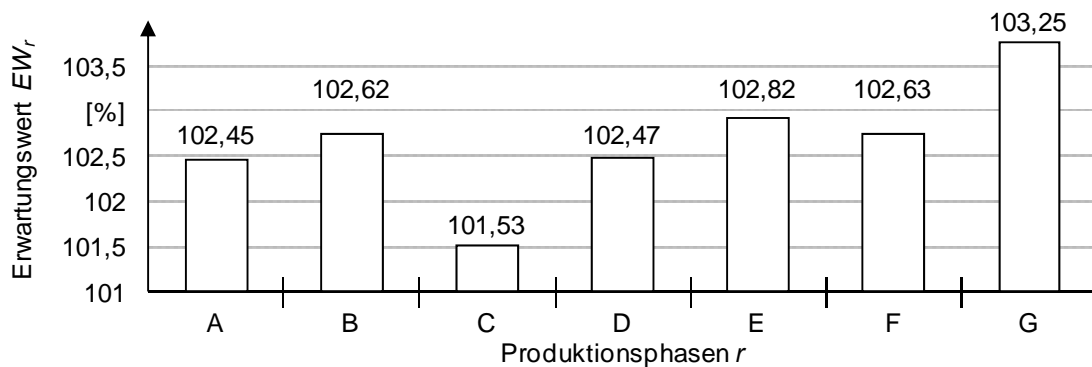


Abbildung 7-6: Auswertung der erhobenen Leistungsdaten der Feldstudie nach Produktionsphasen

Während die Produktionsphasen A, B, D, E und F einen relativ konstanten Erwartungswert rund um 102,50 % aufweisen, ist der Erwartungswert in Produktionsphase C mit 101,53 % im Vergleich deutlich niedriger und der Erwartungswert in Produktionsphase G mit 103,25 % vergleichbar höher. Somit wird im betrachteten Montagesystem in der ersten Produktionsphase der Frühschicht zwischen 05:50 Uhr und 08:45 Uhr am langsamsten produziert, während die zweite Phase der Spätschicht zwischen 18:45 Uhr und 23:11 Uhr die Leistungstärkste darstellt. Dabei beläuft sich die Anzahl an Datensätzen pro untersuchte Produktionsphase in Abhängigkeit deren jeweiliger Dauer auf 49.521 (Produktionsphase D) bis 84.877 (Produktionsphase G).

Die Auswertung nach dem Phasenabschnitt s ergibt sich im Großteil der untersuchten Zeitabschnitte ein relativ konstanter Erwartungswert rund um 102,60 % (c, d, m, w, x, y, z) (siehe Abbildung 7-7). Demgegenüber zeigt sich ein deutlich

niedrigerer Erwartungswert in Phasenabschnitt a, also den ersten 5 Min. einer Produktionsphase, mit 101,20 %. Phasenabschnitt b weist einen Anstieg des Erwartungswertes auf 102,30 % auf. Während der mittlere Phasenabschnitt aus 355.632 Datensätzen generiert wird, setzen sich die betrachteten 5-Min-Phasen aus ca. 13.000 Datensätzen zusammen.

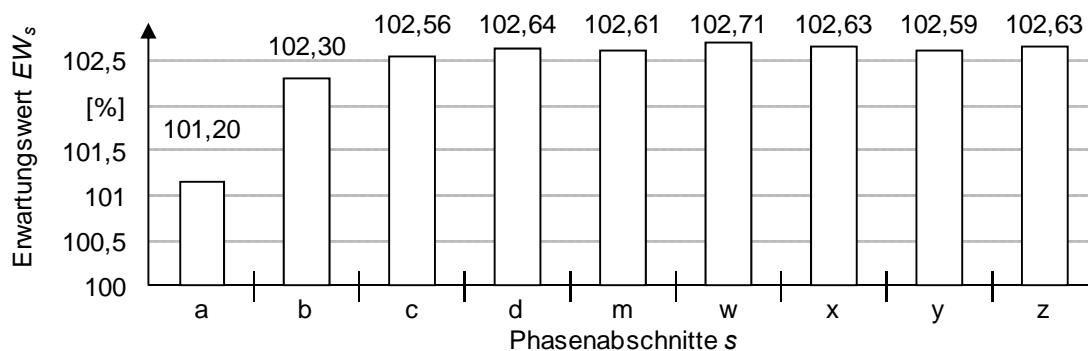


Abbildung 7-7: Auswertung der erhobenen Leistungsdaten der Feldstudie nach Phasenabschnitten

Somit zeigt das System ein deutliches Anlaufverhalten innerhalb der ersten zehn Minuten nach organisatorischen Unterbrechungen. Demzufolge können auf Basis einer minutengenauen Betrachtung 1.440 Erwartungswerte durch Kombination aus Produktionsphase und Phasenabschnitt definiert werden (Berechnung siehe Formel (6-8), S. 114). In Abbildung 7-8 wird dieser Zusammenhang am untersuchten Schichtsystem der Feldstudie visualisiert.

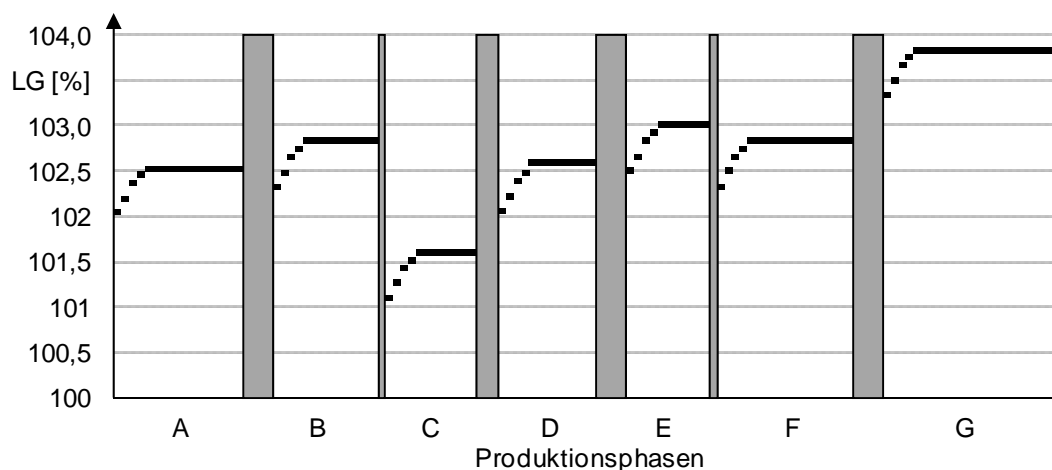


Abbildung 7-8: Überlagerung der Schwankungen des Erwartungswertes aus Produktionsphase und Phasenabschnitt am untersuchten Schichtsystem

Handlungsempfehlung zum Tätigkeitsmix

Zum Zweiten können durch eine Kombination von Leistungs- und Tätigkeitsmerkmalen Datensätze nach dem Variationskoeffizienten VK ausgewertet und Handlungsempfehlungen für den Tätigkeitsmix ausgesprochen werden. Im untersuchten Montagesystem werden nach der Aufbereitung der Datensätze 21 Varianten intensiv betrachtet, die sich in Abhängigkeit des Arbeitsplans nochmals in insgesamt 15 unterscheidbare Varianten zusammenfassen lassen (siehe Abbildung 7-9, VarA-VarO). Daraus ergeben sich insgesamt 30 Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen j , von denen sich jeweils der initiale Variationskoeffizient $VK_{j,initial}$ mittels Formel (6-9) (siehe S. 118) berechnen lässt.

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AP	AP12					AP25						AP32			
Var	VarA	VarB	VarC	VarD	VarE	VarA	VarB	VarC	VarF	VarD	VarE	VarG	VarA	VarH	VarC
$VK_{j,initial}$	15,37	13,12	15,05	16,37	15,70	17,81	19,42	17,93	17,38	15,95	18,86	20,87	18,92	15,57	15,63
$x_{j,initial}$	4,83	18,76	6,81	1,36	2,79	10,28	20,25	11,02	7,62	1,24	16,78	29,23	17,15	3,59	3,22

j	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
AP	AP32	AP45									AP51					
Var	VarD	VarA	VarB	VarI	VarJ	VarK	VarD	VarL	VarM	VarN	VarA	VarB	VarO	VarJ	VarD	
$VK_{j,initial}$	16,16	16,00	18,02	15,91	15,61	16,10	15,51	16,27	16,44	17,13	16,11	13,63	12,37	13,14	12,10	
$x_{j,initial}$	0,06	0,93	11,58	1,49	3,34	0,31	3,96	0,74	1,80	6,07	0,25	15,60	23,41	18,64	25,08	

Abbildung 7-9: Bestimmung von $VK_{j,initial}$ sowie $x_{j,initial}$ aller untersuchten AP-Var-Kombinationen j und jeweils Kennzeichnung des minimalen und maximalen Wertes

Die für den zusammenhängenden Bandabschnitt ermittelten $VK_{j,initial}$ schwanken zwischen 12,10 % und 20,87 %. Hieraus können große Unterschiede in der Schwankung des Leistungsbedarfs einzelner AP-Var-Kombinationen j abgeleitet werden. Der Mittelwert des Variationskoeffizienten ergibt sich zu 16,15 %. Daraus lässt sich über die Abweichung σ_j in Anlehnung an Formel (6-13) (siehe S. 122) die aktuelle Schwankungsanfälligkeit $x_{j,initial}$ des untersuchten Montagesystems berechnen. Während viele Werte vor allem an AP45 im Gesamtvergleich eine relativ geringe Schwankungsanfälligkeit aufweisen (Minimum an AP32 mit $x_{16,initial} = 0,06$ %), zeigt sich an AP25 eine große Schwankungsanfälligkeit (Maximum mit $x_{12,initial} = 29,23$ %). Diese Diskrepanzen in den Ergebnissen unterstreichen den Handlungsbedarf im untersuchten Montagesystem.

Aus den ermittelten Werten kann der Variationskoeffizient jeder Standardtätigkeit VK_k berechnet werden. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Abbildung 7-10 visualisiert. Sie schwanken zwischen $VK_\beta = 13,12\%$ für die Tätigkeit „Behandeln“ bis $VK_t = 16,82\%$ für „Schraubarbeiten“. Die Tätigkeiten „Klebearbeiten“ und „Markieren“ kommen an den untersuchten AP-Var-Kombinationen nicht vor und werden deshalb von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Beschreibung Standardtätigkeit	k	VK_k [%]	Beschreibung Standardtätigkeit	k	VK_k [%]
Auspacken	α	15,28	Markieren	ζ	---
Behandeln	β	13,12	Normteile montieren	η	16,00
Festspannen und Lösen	γ	15,94	Prüfen oder Messen	θ	16,33
Klebearbeiten	δ	---	Schraubarbeiten	t	16,82
Elektrik / Leitungen verlegen	ε	16,35			

Abbildung 7-10: Ableitung des Variationskoeffizienten einer Standardtätigkeit k für den untersuchten Montagebandabschnitt

Unter Berücksichtigung von Restriktionen der Fließbandabstimmung (z. B. nach BOYSEN (2005)) wie beispielsweise des Montagevorranggraphen oder Layoutbeschränkungen können die Standardtätigkeiten neu auf die gegebenen Arbeitsplätze verteilt werden. Bei einem durchschnittlichen Variationskoeffizienten für AP-Var-Kombinationen VK_j im untersuchten Montagesystem von 16,15 % stellt dieser Wert das Optimierungsziel dar. Dies folgt der in Abschnitt 6.3.2.3 (siehe S. 120) beschriebenen Forderung nach einem möglichst konstanten VK_j zusammenhängender Arbeitsplätze. Im Idealfall ist es möglich, niedrigere VK_k ($\beta=13,12\%$, $\alpha=15,28\%$, $\gamma=15,94\%$ und $\eta=16,00\%$) mit höheren ($t=16,82\%$, $\varepsilon=16,35\%$ und $\theta=16,33\%$) zu kombinieren.

In Anlehnung an die Formeln (6-11), (6-12) und (6-13) (siehe S. 120-122) kann, wie beschrieben, iterativ für jedes j ein $VK_{j,Neu}$ ermittelt werden, der der Anforderung möglichst geringer x_j genügt. Die in der Praxis anwendbare Planungserweiterung wird in Abbildung 7-11 visualisiert. Für die entsprechende Arbeitsplatz-Varianten-Kombination liegt nach dem Stand der Technik eine Beschreibung aller Tätigkeiten nach Arbeitsplan vor, wobei für jeden Vorgang eine Zeit hinterlegt ist. Die Planung nach dem Tätigkeitsmix erlaubt darüber hinaus über eine Standardisierung der Tätigkeitsbeschreibung und korrelierenden Variationskoeffizienten VK_k die Ermittlung der Schwankungsanfälligkeit der AP-Var-Kombination x_j als Planungsgröße.

Stand der Technik		Planung nach dem Tätigkeitsmix	
Tätigkeit nach Arbeitsplan	t_{Plan} [s]	Standardtätigkeit	VK_k [%]
Palette um 180° drehen	6,12	Festspannen und Lösen	15,94
Werkstückträger freigeben	1,20	Festspannen und Lösen	15,94
Wasseranschluss mit 2 Schrauben heften	13,68	Schraubarbeiten	16,82
Halteblech festziehen	5,58	Festspannen und Lösen	15,94
2 Auspuffkrümmerdichtungen aufstecken	5,34	Normteile montieren	16,00
		x_j [%]	10,28

Abbildung 7-11: Erweiterung des bisherigen Planungsblattes für die Zuordnung von Arbeitstätigkeiten zu Arbeitsplätzen

7.3.4 Kritische Betrachtung der Feldstudie

Insgesamt erweisen sich die im Rahmen der Handlungsanweisung zur Bearbeitungszeit entwickelten Erwartungswerte als relativ konstant und gering schwankend (untersuchte Produktionsphasen schwanken zwischen 101,53 % und 103,25 %). 1,72 % absoluter Unterschied im ermittelten Leistungsniveau erscheinen auf den ersten Blick sehr gering. Folgende Ursachen können konstante Leistungsniveaus hervorrufen. Ein Variantenfließmontagesystem wird heutzutage unter großem Ressourceneinsatz auf möglichst konstante Prozesse ausgelegt. Unterschiede in der Leistung werden nach Möglichkeit durch eine umfassende Planung eliminiert.

Darüber hinaus werden Arbeitsplatz-Varianten-Kombinationen j ohne Berücksichtigung einzelner Mitarbeiter untersucht. Unter Annahme sehr heterogener Mitarbeiter-Leistungsprofile, deren Vermischung an den Versuchsaufbauten j sowie einem hinreichend großen Zeitfaktor nivellieren sich Unregelmäßigkeiten der Leistung. Nach COLQUHOUN (1971) und SCHMIDTKE (1993) sind in der Regel z. B. periodische Leistungsschwankungen bei menschlicher Berufsarbeit aufgrund nicht kontrollierbarer externer Einflussgrößen nicht so deutlich zu erkennen wie in z. B. in Laborstudien. Trotzdem treten im untersuchten System durch die Anwendung der Methoden messbare Leistungsschwankungen auf, die 1,72 % Unterschied als wertige Größe zur Verbesserung der Mitarbeiterereinsatzsituation erscheinen lassen.

Im vorliegenden Fall wird MTM UAS zur Einteilung der Standardtätigkeiten eines zusammenhängenden Bandabschnittes verwendet. Grundsätzlich ist die Granularität der Tätigkeit jedoch immer zu prüfen und das Zuordnungsschema bei Bedarf anzupassen. Beispielsweise kann die Standardtätigkeit i , Schraubar-

beiten, basierend auf den äußeren Rahmenbedingungen höchst unterschiedlich ausfallen. Denn dies umfasst Tätigkeiten wie beispielsweise das Anziehen einer Schraube mit einem Standard-Schraubenschlüssel an einem leicht zugänglichen Bauteil ebenso wie ein (umständliches) Festziehen einer (übergroßen) Schraube über Kopf, ohne die Fügestelle direkt einsehen zu können. In diesem Falle sind Unterschiede im jeweiligen Variationskoeffizienten zu erwarten. Die jeweilige Standardtätigkeit muss weiter unterteilt werden.

7.4 Bewertung der entwickelten Methoden

Im Anschluss an die Umsetzung der Methoden in einem Software-Tool sowie der Vorstellung eines Anwendungsbeispiels werden die Methoden anhand der in Abschnitt 4.1 (siehe S. 71) erläuterten Anforderungen bewertet. Zudem werden Aufwand und Nutzen der Methoden gegenübergestellt.

7.4.1 Bewertung in Bezug auf die Anforderungen an die Methode

Zunächst soll das Kriterium *Robustheit produktionslogistischer Prozesse* beleuchtet werden. Dies wurde in einem Unternehmen untersucht, das am betreffenden Standort in Deutschland mehr als zwei Millionen Geschirrspüler im Jahr produziert. Durch eine Vielzahl an Varianten und einer hohen Personalintensität (ca. 2.000 Mitarbeiter) in der Montagefabrik ergeben sich erhebliche Anforderungen an die Personaleinsatzplanung.

Ziel eines gemeinsamen Projektes war die Identifikation von Optimierungspotentialen bei der Personaleinsatzplanung, in der die zur Verfügung stehenden Mitarbeiter auf die verschiedenen Arbeitsplätze unter Berücksichtigung quantitativer, zeitlicher und örtlicher Erfordernisse sowie Fähig- und Fertigkeiten der Mitarbeiter verteilt werden. Dabei stellte die Möglichkeit der Variation der Taktzeiten in der Montage anhand der menschlichen Leistungskurve eine wesentliche Erkenntnis des durchgeführten Projektes dar. Dazu wurden Szenarien entwickelt, in denen der Umfang der Taktzeitanpassung definiert wurde. Diese wurden dann durch eine Ablaufsimulation mittels Siemens[®] Tecnomatix Plant Simulation[®] validiert. Bei einer durchschnittlich geplanten Bearbeitungszeit von 35,2 Sek. wurde diese innerhalb eines Zweischicht-Systems zu Beginn der Frühschicht und gegen Ende der Spätschicht um 3 % (36,3 Sek.) bzw. 10 % (38,3 Sek.) verlangsamt. Demgegenüber stand eine Beschleunigung der Taktzeit in der Mitte der

jeweiligen Schicht um jeweils 3 % (34,2 Sek.) bzw. 10 % (31,7 Sek.) (10%-Abweichung siehe Abbildung 7-12, gestrichelte Linie). Die Dauer der zeitlichen Abweichung betrug dabei jeweils knapp 2 h. Bei einer Anpassung der Taktzeit liegt die Vermutung nahe, dass vor- und nachgelagerte Prozesse durch diese Varianz negativ beeinflusst werden können. Im untersuchten Beispiel wurde dazu das vorgelagerte Behälterlager fokussiert, das als Mengenpuffer für die Montagefabrik dient.

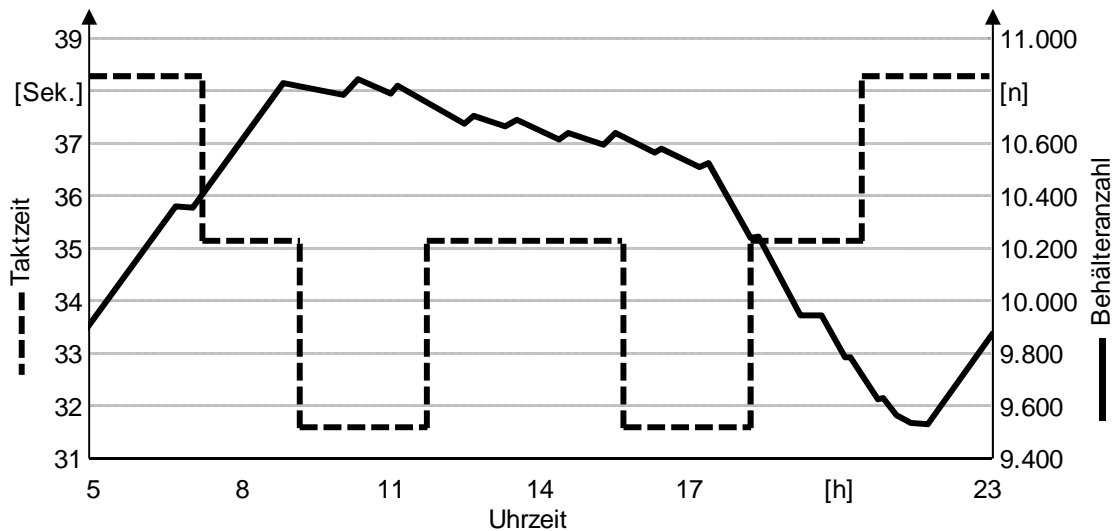


Abbildung 7-12: 10%-Taktzeitanpassung und korrelierende Behälteranzahl an einem Untersuchungstag

Anhand der Kennzahl „Abweichung zum regulären Füllstand des untersuchten Behälterlagers“ konnten in Relation zur Taktzeitvariation keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden (siehe Abbildung 7-12, durchgezogene Linie). Die Schwankung der Kurve lag vor allem durch eine vermehrte Teileentnahme in der Frühschicht begründet, während deren simulierte Abweichung zum „Normalverlauf“ ohne Taktzeitveränderung bei maximal 50 Behältern lag. Bei einer Reduzierung der Taktzeit entstanden keine wesentlichen Veränderungen im Füllstand des Behälterlagers (siehe Abbildung 7-12, Taktzeitniveau von 31,7 Sek.). Dadurch kann die grundsätzliche Robustheit produktionslogistischer Prozesse hinsichtlich der Variation von geplanten Bearbeitungszeiten von bis zu 10 % an einem Praxisbeispiel bei einem Unternehmen der „Weißen Ware“ gezeigt werden.

Zur Sicherstellung der praktischen Anwendbarkeit der in dieser Arbeit entwickelten und in einem Software-Tool umgesetzten Methoden, wurde das Kriterium

Praxistauglichkeit definiert. Dabei tragen der schrittweise Aufbau der Methoden sowie der deduktive Ansatz in Methode 1, der die grundlegende Datenstruktur als Ziel der Datenaufnahme und -aufbereitung frühzeitig einführt, zur Reduktion der Komplexität für den Anwender bei. Darüber hinaus fasst die Checkliste alle Anforderungen an das zu untersuchende System aus Sicht des Anwenders zusammen. Das Software-Tool reduziert die Komplexität für den Anwender im Vergleich zum Mehrwert der Methoden.

Die *Übertragbarkeit* der Methoden auf andere Anwendungsfälle ist durch die exakte Eingrenzung des Betrachtungsrahmens und der allgemeingültigen Vorgehensweise sichergestellt. Auf den großen Einfluss individueller Rahmenbedingungen eines Montagesystems wurde an den betreffenden Stellen der Methode hingewiesen. Strategien zum Umgang damit wurden jeweils beschrieben.

Um zur *Transparenz* beizutragen, wurde in Abbildung 7-1 (siehe S. 126) die logische Vorgehensweise der beiden Methoden in einen sequentiellen Ablauf mit insgesamt sieben Schritten definiert. Dazu korrelierend wurden auf Anwender-ebene Anweisungen definiert, die in der Praxis durchzuführen sind. Daneben wurde auf Systemebene jeweils die Logik hinter einem Prozessschritt zusammengefasst und das Ergebnis dargestellt.

Die Planungslogik muss bzgl. des zu betrachtenden Anwendungsfalls erweitert bzw. angepasst werden können und somit das Merkmal *Skalierbarkeit* aufweisen. So wurden Prozessschritte an den jeweiligen Anwendungsfall adaptierbar gestaltet. Hierbei lassen sich beispielsweise weitere Untersuchungsmerkmale wie z. B. Belastungsmerkmale hinzufügen und logisch in den Prozessablauf integrieren. Auch können bereits spezifizierte Untersuchungsmerkmale wie die Standardtätigkeit an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden.

7.4.2 Bewertung des Verhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen

Konkrete Auswirkungen bei der Bewertung ergonomischer Maßnahmen sind heutzutage in der Regel kaum abschätzbar (HELMENSTEIN ET AL. 2004). Eine monetäre Gegenüberstellung von Aufwand und Nutzen der entwickelten Methoden ist in großem Maße von individuellen externen Einflussfaktoren auf heutige Montagesysteme abhängig (EGBERS 2013). Somit kann keine allgemeingültige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der entwickelten Methoden durchgeführt werden.

Die folgenden Ausführungen zeigen aber die große Relevanz der Thematik und den Stellhebel, den eine Anwendung der Methoden anspricht.

Der Aufwand für das Unternehmen entsteht vor allem in der Erhebung der Rohdaten realer Bearbeitungszeiten. Unter Nutzung von im betrieblichen Umfeld als Standardsoftware geltenden Programmen wie Microsoft® Office Excel® muss ein dafür notwendiger Experte (z. B. aus der Produktion) Rechercheaufwand betreiben. Denn in der Regel werden Daten zu realen Bearbeitungszeiten in der Produktionssteuerung erhoben und automatisiert gespeichert. Vor allem das Wissen über Zusammenhänge des zu untersuchenden Montagesystems ist zwingende Voraussetzung zur Arbeit mit der entwickelten Checkliste und erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aus Produktionsplanung und Produktionssteuerung. Jedoch kann der zeitliche Aufwand für den Anwender durch Beschreibung der Prozessschritte sowie deren logischer Verknüpfung und vor allem durch eine Verwendung des Software-Tools reduziert werden. Denn alle Schritte nach Erhebung und Aufbereitung der Rohdaten werden vom System automatisiert abgearbeitet.

Der monetäre Nutzen ist in diesem kurzen Betrachtungszeitraum noch nicht direkt messbar. Wie jedoch eingangs beschrieben, stellt das Verarbeitende Gewerbe mit 6,9 Mio. Erwerbstätigen eine sehr große Anzahl an Mitarbeitern, wobei Werker in der Variantenfließmontage davon einen substantiellen Anteil ausmachen. So gilt der Zusammenhang aus Belastungsmerkmalen wie Zeitdruck, starrer Verkettung, Taktbindung, organisatorischer Einengung und fehlender Einarbeitung (siehe Abschnitt 2.5.2, S. 41) und möglichen Folgen wie steigendem Stress und einem Anstieg der Arbeitsunfähigkeitstage (DAK 2010) als offensichtlich. Daneben verursachen Fehler sowie mangelnde Qualität in der Montage im schlimmsten Falle einen Imageschaden des Unternehmens und einen Verlust der Käuferschaft eines Produktes. Umsatzeinbußen und erhöhte Anforderungen an die Qualitätssicherung steigern Kosten. Eine mangelhafte Abstimmung zwischen systembedingter Leistungsnachfrage und menschlichem Leistungsangebot kann diesen Faktoren nicht ursächlich zugeordnet werden, lässt aber eine klare Tendenz vermuten.

7.5 Fazit

Die Zuordnung von Arbeitstätigkeiten zu Arbeitsplätzen erfolgt heutzutage auf Basis einer Spezifizierung der Zeitbedarfe von Arbeitsgängen sowie deren Zusammenfassung während der Kapazitätsteilung unter Berücksichtigung einer Taktzeit (BULLINGER 1996, BLOHM ET AL. 1997, BOYSEN 2005). Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern spielen dabei eine untergeordnete Rolle (siehe Abschnitt 3.5, S. 65ff). Durch die Erhebung und Aufbereitung von realen Bearbeitungszeiten sowie der Ableitung von Handlungsempfehlungen kann einerseits ein variables Leistungsangebot von Mitarbeitern bei manuellen Montagevorgängen bei Neu- und Umplanungen von Variantenfließsystemen berücksichtigt werden. Andererseits kann durch die Berechnung des Variationskoeffizienten von Standardtätigkeiten VK_k die Schwankungsanfälligkeit einer Arbeitsplatz-Varianten-Kombination x_j ermittelt und das bisherige Planungsblatt für die Zuordnung von Arbeitstätigkeiten zu Arbeitsplätzen um diese Größe erweitert werden. Dies senkt die Wahrscheinlichkeit einer fehlerhaften Leistungsabstimmung, da Tätigkeiten mit hoher sowie niedriger Leistungsschwankung nivelliert werden.

Zusammenfassend können die entwickelten Methoden die Diskrepanz zwischen Leistungsnachfrage und -angebot senken und somit zur Gesundheit der Mitarbeiter durch eine Reduzierung der Belastungsfaktoren Termin- und Leistungsdruck in produzierenden Unternehmen beitragen. Der dem gegenüberstehende Aufwand für die Erhebung von Rohdatensätzen ist durch die Umsetzung der beiden Methoden in einem Software-Tool als vergleichsweise gering einzuschätzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Trotz großer Anstrengungen in produktionstechnischer und arbeitswissenschaftlicher Forschung hat sich die Belastungssituation der Mitarbeiter in der Variantenfließmontage in den letzten Jahrzehnten nicht ausreichend verbessert. Nach wie vor gelten Zeitdruck, starre Verkettung, Taktbindung, organisatorische Einengung und fehlende Einarbeitung als zentrale Belastungsmerkmale heutiger Produktionssysteme. Daneben steht die klassische zirkadiane Rhythmik stellvertretend für das schwankende menschliche Leistungsangebot. Dabei treten neben dieser interindividuellen Leistungsschwankung auch intraindividuelle Leistungsschwankungen in Form phasenverschobener Chronotypen auf. Aus der daraus entstehenden Diskrepanz zur starren systembedingten Leistungsnachfrage resultieren Belastungsfaktoren wie Termin- und Leistungsdruck der Mitarbeiter, während sich Unternehmen mit Kosten durch Fehler und Qualitätsmängel konfrontiert sehen.

Mit dem Ziel, diese Diskrepanz reduzieren zu können, bedarf es demzufolge einer Möglichkeit, menschliche Leistungsschwankungen in der Planung von Variantenfließmontagesystemen berücksichtigen zu können.

Hierzu wurde eine Methode entwickelt, um reale Bearbeitungszeiten, die als Indikator für das menschliche Leistungsangebot gelten, als wesentliche Messgröße in einem laufenden Systembetrieb erheben zu können. Dabei wurde eine Checkliste ausgearbeitet, die alle relevanten Anforderungen an die Datenerhebung (grundlegende Anforderungen, Anforderungen an die Arbeitsstation, an die Variante sowie an die Zeitmessung) zusammenfasst und den Anwender der Methode durch alle relevanten Schritte dieser Phase führt. Um fehlerhafte Datensätze, die keinen Rückschluss über menschliche Leistungsschwankungen erlauben, eliminieren zu können, wurde unter Verwendung bestehender Methoden eine vollständige und praktikable Vorgehensweise entwickelt. Diese umfasst eine Variantenhäufigkeits-basierte (ABC-Analyse), Zeitpunkt-basierte (Modalwert, Grenzdatenstärke) und eine Bearbeitungszeiten-basierte (Konfidenzintervall) Datensatz-Eliminierung.

Diese erhobenen und aufbereiteten Daten dienen als Grundlage für die Methode zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage. Zur zielgerichteten Datenanalyse wurden relevante Untersuchungsmerkmale spezifiziert. Diese lassen sich in Zeitmerkmale (Produktionsphase, Phasenabschnitt), Leistungsmerkmale (Leistungs niveau) und Tätigkeitsmerkmale (Standardtätigkeiten) einteilen. Darauf aufbauend wurde zum einen durch eine logische Verknüpfung der Untersuchungsmerkmale Leistung und Zeit über die Definition von Erwartungswerten für verschiedene Zeitabschnitte eine Handlungsempfehlung für den Stellhebel Bearbeitungszeit umgesetzt. Zum anderen wurde durch eine Kombination von Leistungs- und Tätigkeitsmerkmalen durch eine Planungsintegration des Variationskoeffizienten eine Handlungsempfehlung für den Stellhebel Tätigkeitsmix entwickelt.

Als zentraler Aspekt der vorliegenden Arbeit werden somit erstmalig Anforderungen an ein Montagesystem zur Erhebung realer Bearbeitungszeiten im Systembetrieb definiert und in einer Checkliste für ein Unternehmen anwendbar gemacht. Über eine umfangreiche Vorgehensweise zur Datensatz-Aufbereitung und die Spezifizierung von Untersuchungsmerkmalen können Handlungsanweisungen zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage fundiert hergeleitet und, in sich im Betrachtungsrahmen befindenden individuell unterschiedlichen Systemumgebungen, umgesetzt werden.

8.2 Ausblick

Durch die entwickelten Methoden können mittels der Aufnahme, Aufbereitung, Analyse und Auswertung historischer Daten Handlungsempfehlungen für Neu- oder Umplanungen einer untersuchten Montagelinie definiert werden. Auf Basis der Annäherung an die Thematik menschlicher Leistungsschwankungen aus Sicht der Produktionsplanung kann der nächste Entwicklungsschritt durch eine Integration der Methoden in die Produktionssteuerung folgen. Mit dem Ziel der zeitnahen Anpassung des systembedingten Leistungsbedarfs an das menschliche Leistungsangebot soll in einem online-fähigen Umfeld auf hochaktuelle Ereignisse reagiert werden können. Dazu müssen technische und organisatorische Rahmenbedingungen im Unternehmen geschaffen werden, die es ermöglichen, z. B. auf Basis des aktuellen Auslastungsgrades eines Mitarbeiters an einer Arbeitsstation oder aufgrund individuell gehäufte Fehlerarten die Leistungsnachfrage anpassen zu können.

Dazu bedarf es der Erforschung adaptiver und werkerindividueller Montageassistenzsysteme. Diese umfassen eine Maßnahmenentwicklung wie z. B. die Zuordnung von Handlungsempfehlungen (wie der Neueinteilung variabler Arbeitsinhalte) zu Handlungsauslösern (wie beispielsweise dem Überschreiten von Stationsgrenzen durch Mitarbeiter in der kontinuierlichen Fließmontage). Darüber hinaus müssen technische Maßnahmen für die Übermittlung der Systeminformationen an den Mitarbeiter (u. a. Haptik, Akustik, Visualisierung) entwickelt werden.

Abschließend bietet die (philosophische) Frage weiteren Forschungsbedarf, ob eine Variantenfließmontage grundsätzlich die richtige Organisations- und somit Arbeitsform für einen Menschen darstellt. Denn dieser trägt, in Anlehnung an das einleitende Zitat, eine produktive Einzigkeit als Kern seines Wesens in sich. Um weltweiter Konjunkturmotor im produktionstechnischen Bereich zu bleiben und dabei Mitarbeiter bis in das Renteneintrittsalter arbeitsfähig zu halten, bedarf es weitergehender interdisziplinärer Überlegungen hinsichtlich dieser Fragestellung.

9 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion. München: Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ALTEMEIER 2009

Altemeier, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie. Diss. Universität Paderborn (2009). Paderborn: HNI 2009. ISBN: 978-3-939-35081-1.

ARBSCHG 1996

Bundesministerium der Justiz (Hrsg.): Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG). Arbeitsschutzgesetz vom 07.08.1996, zuletzt geändert durch Art. 15 Abs. 89 G vom 05.02.2009.

ARNOLD ET AL. 2008

Arnold, D.; Kuhn, A.; Furmans, K.; Isermann, H.; Tempelmeier, H. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-72928-0.

ASCHOFF 1978

Aschoff, C.: Betriebliches Humanvermögen - Grundlagen einer Humanvermögensrechnung. Wiesbaden: Gabler 1978.

ASCHOFF & WEVER 1962

Aschoff, J.; Wever, R.: Spontanperiodik des Menschen bei Ausschluss aller Zeitgeber. Die Arbeitswissenschaften, 15(1), S. 337-342. Stuttgart: Ergonomia 1962.

AUER & SIHN 2010

Auer, S.; Sihn, W.: Optimale Nutzung der Personalressourcen in der variantenreichen Serienfertigung. WINGbusiness 43 (2010) 4, S. 6-11. ISSN: 0256-7830.

BAINES & KAY 2002

Baines, T.-S.; Kay, J.-M.: Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design: A pilot study. *International Journal of Production Research* Vol. 40, No. 10, S. 2321-2334. London: Taylor & Francis 2002.

BALTES & BALTES 1994

Baltes, P. B.; Baltes, M. M.: Gerontologie: Begriff, Herausforderung und Brennpunkte. In: Baltes, P. B.; Mittelstraß, J.; Staudinger, U. M. (Hrsg.): *Alter und Altern: Ein interdisziplinärer Studientext zur Gerontologie*. Berlin: de Gruyter 1994, S. 1-34. ISBN: 3-11-014408-5.

BAUA 2012

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): *Stressreport Deutschland 2012 – Psychische Anforderungen, Ressourcen und Befinden*. Dortmund/Berlin/Dresden: 2012.

BEACH ET AL. 2000

Beach, R.; Muhlemann, A.-P.; Price, D.-H.-R.; Paterson, A.; Sharp, J.-A.: A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research* 122 (2000), S. 41-57. Oxford: Elsevier 2000.

BECKER & SCHOLL 2006

Becker, C.; Scholl, A.: A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 (2006), S. 694-715. Oxford: Elsevier 2006.

BETHEL ET AL. 2007

Bethel, C.-L.; Salomon, K.; Murphy, R.-R.; Burke, J.-L.: Survey of Psychophysiology Measurements Applied to Human-Robot Interaction. 16th IEEE International Symposium on Robot and Human interactive Communication (2007), S. 732–737. ISBN: 978-1-4244-1634-9.

BIPM 2006

Bureau international des poids et mesures (Hrsg.): *Le Système international d'unités (SI)*, 8. Auflage. Paris: STEDI Media 2006. ISBN: 92-822-2213-6.

BJERNER ET AL. 1955

Bjerner, B.; Holm, A.; Swennson, A.: Diurnal variation in mental performance – a study of three-shift workers. *Brit. J. industry. Med.*, 12, 103, 1955, S. 103-110.

BLOHM ET AL. 1997

Blohm, H.; Beer, T.; Seidenberg, U.; Silber, H.: *Produktionswirtschaft*. 3., völlig neubearbeitete Auflage. Berlin: Herne 1997. ISBN: 3-482-63023-2.

BMI 2011

Bundesministerium des Inneren: Demografiebericht – Bericht der Bundesregierung zur demografischen Lage und künftigen Entwicklung des Landes. Berlin: Publikationsversand der Bundesregierung 2011.

BORGHARDT 2012

Borghardt, L.: Wieder lernen, Pausen zu machen. *Wirtschaftswoche*, Düsseldorf. Online-Artikel vom 05.03.2012.
<<http://www.wiwo.de>> - 02.05.2012.

BORTOT ET AL. 2013

Bortot, D.; Hawe, B.; Schmidt, S.; Bengler, K.: Industrial Robots – The new friend of an ageing workforce? In: Trzcielinski, S.; Karwowski, W. (Hrsg.): *Advances in ergonomics and manufacturing*, S. 253-262. Boca Raton, FL. Taylor & Francis 2013.

BOYSEN 2005

Boysen, N.: *Variantenfließfertigung*. Diss. Universität Hamburg (2005). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2005.
ISBN: 3-8350-0058-6.

BOYSEN ET AL. 2006

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: *Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Hierarchische Planung*. Arbeits- und Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena. 22/2006. ISSN: 1611-1311.

BOYSEN ET AL. 2007

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* 183 (2007), S. 674-693. Oxford: Elsevier 2007.

BOYSEN ET AL. 2009

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* 192 (2009), S. 349-373. Oxford: Elsevier 2009.

BRAUN 2011

Braun, M.: *Chronobiologische Arbeitsgestaltung*. Stuttgart: Fraunhofer IAO 2011.

<http://wiki.iao.fraunhofer.de/index.php/Chronobiologische_Arbeitsgestaltung> - 29.06.2011.

BROSIUS 2011

Brosius, F.: *SPSS 19*. 1. Auflage. Heidelberg: mitp 2011. ISBN: 978-3-8266-9038-9.

BÜCKER 2003

Bücker, R.: *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler*. 5. Auflage. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 3-486-27423-6.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J. (Hrsg.): *Systematische Montageplanung – Handbuch für die Praxis*. München: Hanser 1986. ISBN: 3-446-14606-7.

BULLINGER ET AL. 2009

Bullinger, H.-J.; Spath, D.; Warnecke, H.-J.; Westkämper, E.: *Handbuch Unternehmensorganisation. Strategien, Planung*, 3. Auflage. Umsetzung. Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-5407-2136-9.

BURKE ET AL. 2004

Burke, J.-L.; Murphy, R.-R.; Riddle, D.-R.; Fincannon, T.: *Task Performance Metrics in Human-Robot Interaction: Taking a Systems Approach*. In: *Proceedings of the 2004 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, 24.-26.08.2004, Gaithersburg, MD, 2004.

CAJOCHEN 2005

Cajochen, C.: Schlafstörungen bei Schichtarbeit und Jetlag und die Rolle der inneren Uhr. Praxis, 94, S. 1479-1483. Bern: Hans Huber 2005.

CARNAHAN ET AL. 2001

Carnahan, B.-J.; Norman, B.-A.; Redfern, M.-S.: Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. IIE Transactions (2001) 33, S. 875-887. London: Taylor & Francis 2001.

CASPARY & WICHMANN 2007

Caspary, W.; Wichmann, K.: Auswertung von Messdaten – Statistische Methoden für Geo- und Ingenieurwissenschaften. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-486-58351-9.

CIRP 2012

CIRP Internationale Akademie für Produktionstechnik (Hrsg.): Wörterbuch der Fertigungstechnik Bd. 4 Montage. 1. Auflage. Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-12006-0.

CODD 1990

Codd, E.-F.: The relational model for database management – Version 2. Boston: Addison-Wesley Longman 1990. ISBN: 0-201-14192-2.

COLLEDANI ET AL. 2010

Colledani, M.; Matta, A.; Tolio, T.: Analysis of the production variability in multi-stage manufacturing systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 59 (2010), S. 449-452. Oxford: Elsevier 2010.

COLQUHOUN 1971

Colquhoun, W.-P.: Biological Rhythms and Human Performance. London: Academic Press Inc. 1971. ISBN: 0-12-182050-5.

DAK 2010

DAK Forschung. DAK Gesundheitsreport 2010. Hamburg: 2010.

DENKENA ET AL. 2012

Denkena, B.; Lorenzen, L.-E.; Schmidt, J.: Adaptive process planning. Production Engineering Research and Development (2012) 6, S. 55-67. Berlin: Springer 2012.

DENNIS 2007

Dennis, P.: Lean production simplified: A Plain-Language Guide to the World's Most Powerful Production System. 2. Auflage. New York: Productivity Press 2007. ISBN: 978-1-5632-7356-8.

DESTATIS 2012

Statistisches Bundesamt: Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes 2010. Wiesbaden: 2012.

<<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/IndustrieVerarbeitendesGewerbe.html;jsessionid=C29F2E3B1C40BA5004D2E968DFC1E160.cae2>> - 14.09.2012.

DIETRICH & SCHULZE 2009

Dietrich, E.; Schulze, A.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 6., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-41525-6.

DIN 199 (2002)

DIN 199: CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten. Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 2002.

DIN 8580 (2003)

DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8593-0 (2003)

DIN 8593-0: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8593-1 (2003)

DIN 8593-1: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 1: Fügen durch Zusammensetzen. Berlin: Beuth 2003.

DIN 8593-3 (2003)

DIN 8593-3: Fertigungsverfahren Fügen, Teil 3: Fügen durch Anpressen/Einpressen. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN ISO 10075-1 (2000)

DIN EN ISO 10075-1, Teil 1: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Belastungen: Allgemeines und Begriffe. Berlin: Beuth 2000.

DIN EN ISO 10075-2 (2000)

DIN EN ISO 10075-2, Teil 2: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Belastungen: Gestaltungsgrundsätze. Berlin: Beuth 2000.

DIN EN ISO 15007-1 (2013)

DIN EN ISO 15007-1: Straßenfahrzeuge – Messung zum visuellen Verhalten des Fahrers in Bezug zu Transportinformationen und Regelsystemen – Teil 1: Definitionen und Parameter. Berlin: Beuth 2013.

DIN EN ISO 6385 (2004)

DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth 2004.

DREITZEL 1974

Dreizel, H.-P.: Soziologische Reflexionen über das Elend des Leistungsprinzips. In: Gehlen, A. (Hrsg.): Sinn und Unsinn des Leistungsprinzips – Ein Symposium, 4. Auflage, S. 31-53. München: Deutscher Taschenbuch-Verlag 1974. ISBN: 978-3-4230-0990-4.

DRUMM 2008

Drumm, H.-J.: Personalwirtschaft. 6. Auflage. Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-77696-3.

DUDEN 2013

Duden: Bedeutung Methode.

<<http://www.duden.de/rechtschreibung/Methode>> - 05.04.2013.

ECKSTEIN 2012

Eckstein, P.-P.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler – Eine realdatenbasierte Einführung mit SPSS. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler 2012. ISBN: 978-3-8349-3568-7.

EGBERS 2013

Egbers, J.-F.: Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses. Diss. Technische Universität München (2013). München: Utz 2013. ISBN: 978-3-. (Forschungsberichte IWB Band 28).

ELMARAGHY & URBANIC 2003

ElMaraghy, W.-H.; Urbanic, R.J.: Modelling of manufacturing systems complexity. CIRP Annals – Manufacturing Technology 52 (2003) 1, S. 363-366. Oxford: Elsevier 2003.

FANDEL ET AL. 2011

Fandel, G.; Fistek, A.; Stütz, S.: Produktionsmanagement. 2. Auflage. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-14591-9.

FABAUER 2008

Faßauer, G.: Arbeitsleistung, Identität und Markt – Eine Analyse marktförmiger Leistungssteuerung in Arbeitsorganisation. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH 2008. ISBN: 978-3-531-15950-8.

FELDMANN ET AL. 1999

Feldmann, K.; Müller, B.; Haselmann, T.: Automated assembly of lightweight automotive components. CIRP Annals – Manufacturing Technology 48 (2010) 1, S. 9-12. Oxford: Elsevier 1999.

FIGGEN & SEILER 2009

Figgen, M.; Seiler, K.: Arbeitsbedingte Belastungen und ihre körperlichen, psychischen und sozialen Auswirkungen aus Sicht der Beschäftigten – Ergebnisse von Repräsentativbefragungen in NRW. Bericht zum 55. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 4.-6. März 2009, S.485-488. Dortmund: GfA-Press 2009.

FLETCHER ET AL. 2008

Fletcher, S.-R.; Baines, T.-S.; Harrison, D.-K.: An investigation of production workers' performance variations and the potential impact of attitudes. International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2008) 35, S. 1113-1123. London: Springer 2008.

FRIELING & SONNTAG 1999

Frieling, E.; Sonntag, K.: Lehrbuch Arbeitspsychologie. 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Bern: Hans Huber 1999. ISBN: 3-456-82932-9.

GABLER 2013A

Gabler Wirtschaftslexikon: Ex-post-Analyse. Springer Gabler: Wiesbaden.
<<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/73588/ex-post-analyse-v6.html>>
- 31.01.2013.

GABLER 2013B

Gabler Wirtschaftslexikon: Vigilanztätigkeit. Springer Gabler: Wiesbaden.
<<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/vigilanztaetigkeit.html>>
- 10.09.2013.

GABLER 2013C

Gabler Wirtschaftslexikon: Untersuchungsmerkmal. Springer Gabler: Wiesbaden.
<<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/merkmal.html?referenceKeywordName=Untersuchungsmerkmal>> - 19.09.2013.

GLONEGGER & OTTMANN 2013

Glonegger, M.; Ottmann, W.: Menschliche Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage. Vortrag auf der Fachtagung Ergonomie. Straubing, 03.07.2013.

GLONEGGER ET AL. 2013

Glonegger, M.; Ottmann, W.; Schadl, M.; Distel, D.: Identification of production rhythms in synchronized assembly lines by recording and evaluating current processing times. Advanced Materials Research Vol. 769 (2013) pp. 350-358.

GÖPFERT ET AL. 2013

Göpfert, I.; Braun, D.; Schulz, M. (Hrsg.): Automobillogistik – Stand und Zukunftstrends. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-658-01582-4.

GRAF 1960

Graf, O.: Arbeitsphysiologie. In: Gutenberg, E. (Hrsg.): Die Wirtschaftswissenschaften. Wiesbaden: Gabler 1960.

GROCHLA 1980

Grochla, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Poeschel: Stuttgart 1980. ISBN: 978-3-7910-8016-1

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2011

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 9. Auflage. Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-25165-8.

GUSSONE ET AL. 1999

Gussone, M.; Huber, A.; Morschhäuser, M.; Petrenz, J.: Ältere Arbeitnehmer – Altern und Erwerbsarbeit in rechtlicher, arbeits- und sozialwissenschaftlicher Sicht. Frankfurt/Main: Bund 1999. ISBN: 3-7663-2802-6.

GUTENBERG 1983

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1 Die Produktion. 24., unveränderte Auflage. Berlin: Springer 1983. ISBN: 3-540-05694-7.

HARTFIEL 1977

Hartfiel, G. (Hrsg.): Das Leistungsprinzip – Merkmale, Bedingungen, Probleme. 1. Auflage. Opladen: Leske und Budrich 1977. ISBN: 978-3-8100-0160-3.

HATTESOHL 2013

Hattesoehl, S.: Gestaltung alternsgerechter Arbeitssysteme in der Pkw-Montage – Ein integrativer Ansatz im Produktentstehungsprozess. Diss. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (2013). Garbsen: PZH 2013. ISBN: 978-3-943104-88-2. (Berichte aus dem IFA, Band 2/2013).

HECHL 1995

Hechl, C.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte. Diss. Technische Universität München (1995). Berlin: Springer 1995. ISBN: 978-3-5406-0325-2. (Forschungsberichte IWB Band 92).

HELMENSTEIN ET AL. 2004

Helmenstein, C.; Hofmarcher, M.; Kleissner, A.; Riedel, M.; Röhrling, G.; Schnabl, A.: Ökonomischer Nutzen betrieblicher Gesundheitsförderung. Studie im Auftrag des Bundeskanzleramts, Sektion Sport, Endbericht. Institut für Höhere Studien (IHS), Wien. Eisenstadt: ESCE Wirtschafts- und Sozialwissenschaftliche Forschung 2004.

HERZBERG ET AL. 1959

Herzberg, F.; Mausner, B.; Snyderman, B.-B.: The Motivation to Work. 2. Auflage. New York: Wiley 1959.

HETTINGER & WOBBE 1993

Hettinger, T.; Wobbe, G. (Hrsg.): Kompendium der Arbeitswissenschaft – Optimierungsmöglichkeiten zur Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation. Ludwigshafen: Friedrich Kiehl 1993. ISBN: 3-470-45401-9.

HEYMANN & SEIWER 1982

Heymann, H.-H.; Seiwert, L.-J.: Job Sharing – Flexible Arbeitszeit durch Arbeitsplatzeinteilung. Grafenau: Expert 1982. ISBN: 978-3-799-20261-9.

HOPP & SPEARMAN 2008

Hopp, W.-J.; Spearman, M.-L.: Factory Physics. 3. Auflage. Columbus: McGraw-Hill 2008. ISBN: 978-0-071-23246-3.

HU ET AL. 2008

Hu, S.-J.; Zhu, X.; Wang, H.; Koren, Y.: Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008), S. 45-48. Oxford: Elsevier 2008.

ILMARINEN & TEMPEL 2002

Ilmarinen, J.; Tempel, J.: Arbeitsfähigkeit 2010. Was können wir tun, damit Sie gesund bleiben? Hamburg: VSA-Verlag 2002. ISBN: 3-87975-840-9.

JOHNSON 1983

Johnson, R.-V.: A Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Formulation Irregularities. Management Science Vol. 29 (1989) 11, S. 1309-1324.

JUNGBLUTH & MOMMSEN 1968

Jungbluth, A.; Mommsen, E. (Hrsg.): Angewandte Arbeitswissenschaft: Ein Lehrbuch für Ingenieure. München: Verlag Mensch und Arbeit 1968.

KALLIO ET AL. 2012

Kallio, K.; Johnsson, M.; Nevalainen, O.-S.: Estimating the operation time of flexible surface mount placement machines. Production Engineering Research and Development (2012) 6, S. 319-328. Berlin: Springer 2012.

KIDD & BREAZEAL 2005

Kidd, C.-D.; Breazeal, C.: Human-Robot Interaction Experiments – Lessons Learned. In: Proceedings of the Symposium on Robot Companions: Hard Problems and Open Challenges in Robot-Human Interaction. 12-15 April 2005, University of Hertfordshire, Hatfield, UK (2005), S. 141-142.

KLEEMANN ET AL. 2002

Kleemann, F.; Matuschek, I.; Voß, G.: Subjektivierung von Arbeit – Ein Überblick zum Stand der Diskussion. In: Moldaschl, M.; Voß, G. (Hrsg.): Subjektivierung von Arbeit, 2. Auflage, S. 53-100. München: Rainer Hampp 2002. ISBN: 3-87988-651-2.

KNAUTH ET AL. 2009

Knauth, P.; Elmerich, K.; Karl, D. (Hrsg.): Risikofaktor demografischer Wandel: Generationenvielfalt als Unternehmensstrategie. Düsseldorf: Symposium Publishing GmbH 2009. ISBN: 978-3-939707-12-7.

KRATZSCH 2000

Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig (2000). Essen: Vulkan 2000. ISBN: 3-8027-8654-8. (Schriftenreihe des IWF).

KREBS 2011

Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Diss. Technische Universität München (2011). München: Utz 2011. ISBN: 978-3-8316-4156-7. (Forschungsberichte IWB Band 255).

LAU & MARTIN 1987

Lau, H.-S.; Martin, G.-E.: The effects of skewness and kurtosis of processing times in unpaced lines. International Journal of Production Research Vol. 25, No. 10, S. 1483-1492. London: Taylor & Francis 1987.

LEOPOLD 1997

Leopold, N.: Ein Planungsverfahren zur Kapazitätsabstimmung für Model-Mix-Montagelinien am Beispiel einer Automobil-Endmontage. Diss. Universität Stuttgart (1997). Heidelberg: Springer 1997. ISBN: 3-540-63520-3. (Schriftenreihe des IPA/IAO, Band 254).

LOTTER & SCHILLING 1994

Lotter, B.; Schilling, W.: Manuelle Montage: Planung – Rationalisierung – Wirtschaftlichkeit. Düsseldorf: VDI 1994. ISBN: 3-18-401244-1.

LOTTER & WIENDAHL 2006

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis. Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-21413-7.

LUCZAK 1998

Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 2., vollständig neubearbeitete Auflage. Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 3-540-59138-9.

MANITZ 2005

Manitz, M.: Leistungsanalyse von Montagesystemen mit stochastischen Bearbeitungszeiten. Köln: Kölner Wissenschaftsverlag 2005. ISBN: 978-3-937-40411-0.

MASLOW 1943

Maslow, A.: A Theory of Human Motivation. Psychological Review 50 (1943), S. 370-396. Washington: American Psychological Society 1943.

MAZZOLA ET AL. 2008

Mazzola, E.; Perrone, G.; Noto la Diega, S.: Shaping inter-firm collaboration in new product development in the automobile industry: A trade-off between a transaction and relational-based approach. CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008), S. 485-488. Oxford: Elsevier 2008.

MEDO 2010

Medo, M.: Kontinuierliche Planung der Fließfertigung von Varianten. Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 978-3-8322-9546-2. (Schriftenreihe des IFU Band 015).

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte IWB Band 212).

MUTH 1973

Muth, E.-J.: The production rate of a series of work stations with variable service times. International Journal of Production Research Vol. 11, No. 2, S. 155-169. London: Taylor & Francis 1973.

NEBL 2007

Nebl, T.: Produktionswirtschaft. 6. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH 2007. ISBN: 978-3-486-58493-6.

PFOHL 1981

Pfohl, H.-C.: Planung und Kontrolle. 1. Auflage. Stuttgart: Kohlhammer 1981. ISBN: 978-3-1700-4852-2.

PIEPER 2010

Pieper, M.: Das Programm „Heute für morgen“ bei der BMW Group – Den demografischen Realitäten aktiv begegnen. Vortrag. München: 26.10.2010.

POTTHAST 2013

Potthast, J.-M.: Nachweis zirkadianer Leistungsschwankungen bei manuellen Montagetätigkeiten. Diss. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover (2013). Garbsen: PZH 2013. ISBN: 978-3-943104-92-9. (Berichte aus dem IPH, Band 1/2013).

POWELL & PIKE 1994

Powell, S.-G.; Pyke, D.-F.: An empirical investigation of the two-moment approximation for production lines. International Journal of Production Research Vol. 32, No. 5, S. 1137-1157. London: Taylor & Francis 1994.

PRASCH 2010

Prasch, M.: Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage. Diss. Technische Universität München (2010). München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-4033-1. (Forschungsberichte IWB Band 243).

REFA 1971

REFA Verband für Arbeitsstudien e. V. (Hrsg.): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 2: Datenermittlung. 1. Auflage. München: Hanser 1971. ISBN: 3-446-11445-9.

REFA 1984

REFA Verband für Arbeitsstudien e. V. (Hrsg.): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 1: Grundlagen. 7. Auflage. München: Hanser 1984. ISBN: 3-446-14234-7.

REFA 1985

REFA Verband für Arbeitsstudien e. V. (Hrsg.): Methodenlehre des Arbeitsstudiums – Teil 3: Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung. München: Hanser 1985. ISBN: 3-446-14236-3.

REFA 1990

REFA Verband für Arbeitsstudien e. V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. 2. Auflage. München: Hanser 1990. ISBN: 3-446-15967-3.

REFA 1993

REFA Verband für Arbeitsstudien e. V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation – Lexikon der Betriebsorganisation. München: Hanser 1993. ISBN: 3-446-17523-7.

REIF & BUCK 2003

Reif, A.; Buck, H. (Hrsg.): Innovationsfähigkeit in der Montage bei sich verändernden betrieblichen Altersstrukturen. Stuttgart: Fraunhofer IRB. ISBN: 978-3-8167-5612-5.

REINHART & SCHELLMANN 2012

Reinhart, G.; Schellmann, H.: A method to determine customer-specific volume flexibility in a supply network. *Production Engineering Research and Development* (2012) 6, S. 69-78. Berlin: Springer 2012.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M.-F.: Marktchance Individualisierung. Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 3-540-00594-3.

REINHART ET AL. 2011

Reinhart, G., Glonegger, M.; Egbers, J.; Schilp, J., Göritz, A.; Weikamp, J.: Taktzeitadaption unter Berücksichtigung der zirkadianen Rhythmik – Analyse unterschiedlicher Taktzeit-Szenarien zur Belastungsreduktion von Montagearbeitern. *wt Werkstattstechnik online*, 101 (2011), H.9, S. 595-599. Springer-VDI: Düsseldorf 2011.

REINHART ET AL. 2012

Reinhart, G.; Glonegger, M.; Festner, M.; Egbers, J.; Schilp, J.: Adaption of processing times to individual work capacities in synchronized assembly lines. In: Hu, S.-J. (Hrsg.): *Technologies and Systems for Assembly Quality, Productivity and Customization. Proceedings of the 4th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, S. 161-164. Ann Arbor, Michigan, USA: 20.-22.05.2012. ISBN: 978-0-615-64022-8.

ROHMERT & RUTENFRANZ 1983

Rohmert, W.; Rutenfranz, J. (Hrsg.): *Praktische Arbeitsphysiologie*. 3., neubearbeitete Auflage. Stuttgart: Georg Thieme 1983. ISBN: 3-13-370103-7.

RÖTHIG ET AL. 1992

Röthig, P.; Becker, H.; Carl, K.; Kayser, D.; Prohl, R. (Hrsg.): *Sportwissenschaftliches Lexikon*. 6., völlig neu bearbeitete Auflage. Schorndorf: Hofmann 1992. ISBN: 3-77-804496-6.

RVAGANPG 2012

Rentenversicherungs-Altersgrenzenanpassungsgesetz: Gesetz zur Anpassung der Altersgrenze an die demografische Entwicklung und zur Stärkung der Finanzierungsgrundlagen der gesetzlichen Rentenversicherung. Berlin: 01.01.2008.

SCHAIE 1983

Schaie, K. W.: The Seattle Longitudinal Study: A twenty-one year exploration of psychometric intelligence in adulthood. In: Schaie, K. W. (Hrsg.): *Longitudinal studies of adult psychological development*. New York: Guilford Press 1993, S. 64-135. ISBN: 0-89862-131-3.

SCHENDERA 2007

Schendera, C.: *Datenqualität mit SPSS*. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-486-58214-7.

SCHLICK ET AL. 2009

Schlick, C.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-78332-9.

SCHMIDTKE 1993

Schmidtke, H. (Hrsg.): Ergonomie, 3. Auflage. München: Hanser 1993. ISBN: 3-446-16440-5.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous processes in assembly systems. CIRP Annals – Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 712-729. Oxford: Elsevier 2007.

SCHWAB 1991

Schwab, G.: Fehlende Werte in der angewandten Statistik. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1991. ISBN: 978-3-8244-0079-9.

SELIGER & BARTUNEK 1976

Seliger, V.; Bartunek, Z.: Mean Values of Various Indices of Physical Fitness in the Investigation of Czechoslovak Population Aged 12-55 Years. Praha: Czechoslovak Association of Physical Culture 1976.

SHEWCHUK & MOODIE 1998

Shewchuk, J.-P.; Moodie, C.-L.: Definition and Classification of Manufacturing Flexibility Types and Measures. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 10 (1998) 4, S. 325-349.

SIEBERTZ ET AL. 2010

Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE). Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05492-1.

SPUR & STÖFERLE 1986

Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik – Band 5: Fügen, Handhaben, Montieren. München: Hanser 1986. ISBN: 3-446-12536-1.

STANIC 2010

Stanic, S.: Fahrzeugendmontage – Herausforderung für den demografischen Wandel. Diss. Universität Kassel (2010). Kassel: kassel university press 2010. ISBN: 978-3-89958-914-6. (Schriftenreihe Personal- und Organisationsentwicklung IfA Band 8).

STATISTISCHES BUNDESAMT 2009

Statistisches Bundesamt: Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 12. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 18. November 2009 in Berlin. Wiesbaden: 2009.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2012

Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch – Deutschland und Internationales. Wiesbaden: 2012. ISBN: 978-3-8246-0989-5.

TAKEDA 2008

Takeda, H.: Das System der Mixed Production – Personal-Order-Prinzip für kundenorientierte Produktion. 2. Auflage. München: mi-Fachverlag 2008. ISBN: 978-3-636-03117-4.

TEMPELMEIER 2013

Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik: Einflussgrößen der Leistung von Fließproduktionssystemen unter stochastischen Bedingungen.
<<http://www.produktion-und-logistik.de/produktionundlogistik-477.html>>
- 03.04.2013.

ULMER 2013

Ulmer, H.-V.: Das Graf'sche Konzept von „Tagesperiodischen Schwankungen der Leistungsfähigkeit“ – ein paradigmatischer Irrtum infolge fälschlicher Verallgemeinerung. Johannes-Gutenberg-Universität Mainz.
<http://www.uni-mainz.de/FB/Sport/physio/pdf/371LEIPZIG_poster03.pdf> - 25.09.2013.

VDI 2012

VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Produktion und Logistik in Deutschland 2025 – Trends, Tendenzen, Schlussfolgerungen. Düsseldorf: VDI e.V. März 2012.

VDI 2860 (1990)

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.

VOBRUBA 2006

Vobruba, G.: Grundlagen der Soziologie der Arbeitsflexibilität. Berliner Journal für Soziologie Vol 16 Issue 1, S. 25-35. Berlin: Springer 2006.

VOGEL 1991

Vogel, F.: Beschreibende und schließende Statistik – Formeln, Definitionen, Erläuterungen, Stichwörter und Tabellen. 6., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Oldenbourg 1991. ISBN: 3-486-21850-6.

VÖLKER ET AL. 2010

Völker, M.; Junker, F.; Schmidt, T.; Carl, S.; Schneider, H.: Organisation der Montage variantenreicher Maschinen und Anlagen – Ein innovatives Konzept. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Jahrgang 105 (2010) 1-2, S. 84-90.

WESTER & KILBRIDGE 1964

Wester, L.; Kilbridge, M.: The Assembly Line Model-Mix Sequencing Problem. In: Kreweras, G.; Morat, G. (Hrsg.): Proceedings of the Third International Conference on Operations Research. Oslo 1963, S. 247-260. Paris: Dunod 1964.

WESTKÄMPER ET AL. 2001

Westkämper, E.; Bullinger, H.-J.; Horváth, P.; Zahn, E. (Hrsg.): Montageplanung – effizient und marktgerecht. Heidelberg: Springer 2001. ISBN: 3-540-66647-8.

WIENDAHL 1989

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser 1989. ISBN: 3-446-15604-6.

WIENDAHL ET AL. 2004

Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis in der flexiblen Produktionsendstufe. Heidelberg: Springer 2004. ISBN: 978-3-540-14042-9.

WIENERT 2009

Wienert, H.: Wachstumsmotor Industrie? Zur Bedeutung des Verarbeitenden Gewerbes für die Entwicklung des Bruttoinlandprodukts. In: Häfner, A.; Jost, N.; Rau, K.-H.; Scherr, R.; Wehner, C.; Beck, H. (Hrsg.): Beiträge der Hochschule Pforzheim, Nr. 130. Pforzheim: 2009.

WILLNECKER 2000

Willnecker, U.: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000. ISBN: 3-89675-891-8. (Forschungsberichte IWB Band 146).

WOMACK ET AL. 1990

Womack, J.-P.; Jones, D.-T.; Roos, D.: The machine that changed the world. Based on the Massachusetts Institute of Technology 5-million-dollar 5-year study on the future of the automobile. New York: Rawson Associates 1990. ISBN: 978-3-89256-350-0.

ZÄH & PRASCH 2007

Zäh, M.-F.; Prash, M.: Systematic workplace and assembly redesign for ageing workforces. Production Engineering Research and Development (2007) 1, S. 57-64. Berlin: Springer 2007.

ZÄH ET AL. 2007

Zäh, M.-F.; Wiesbeck, M.; Engstler, F.; Friesdorf, F.; Schubö, A.; Stork, S.; Bannat, A.; Wallhoff, F.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage – Adaptive Montageführung mittels zustandsbasierter, umgebungsabhängiger Anweisungsgenerierung. wt Werkstattstechnik online, 97 (2007), H.9, S. 644-650. Springer-VDI: Düsseldorf 2007.

ZÄPFEL 2000

Zäpfel, G.: Strategisches Produktionsmanagement. 2. Auflage. München: Oldenbourg 2000. ISBN: 978-3-486-25450-2.

ZELEWSKI ET AL. 2008

Zelewski, S.; Hohmann, S.; Hügens, T.: Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme: Konzepte und exemplarische Implementierungen mithilfe von SAP[®] R/3[®]. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 978-3-486-58722-7.

10 Anhang

10.1 Anhang A: Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren 2011 bis 2014 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen rund um die Analyse und Aufbereitung von Bearbeitungszeiten zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen untersucht. Entstandene Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden herzlich für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

DISTEL 2012

Distel, D.: Statistische Analyse von Leistungsdaten einer Kfz-Endmontage zur Definition arbeitsplatzspezifischer Flexibilitätsfenster. Diplomarbeit (2012/021-D). Technische Universität München: 2012.

ERNST 2012

Ernst, M.: Entwicklung der humanen Leistungskurve von Montagemitarbeitern auf Basis der Leistungs- und Fehlerdatenanalyse einer Motorenendmontage bei einem Fahrzeughersteller. Diplomarbeit (2011/036-D). Technische Universität München: 2012.

FESTNER 2011

Festner, M.: Identifikation und Bewertung von Restriktionen zur Bestimmung der Taktzeit in der variantenreichen Serienmontage. Bachelor's Thesis (2011/014-B). Technische Universität München: 2011.

FETSCHER 2014

Fetscher, M.: Software-technische Umsetzung einer Methode zur Berücksichtigung von Mitarbeiter-Leistungsschwankungen in der Variantenfließmontage. Bachelor's Thesis (2013/-056BT). Technische Universität München: 2014.

LUTZ 2013

Lutz, J.: Anpassung der Leistungsnachfrage einer Variantenfließmontage an das menschliche Leistungsangebot auf Basis einer statistischen Analyse realer Bearbeitungszeiten. Diplomarbeit (2013/016-DA). Technische Universität München: 2013.

MARSCHALL 2012

Marschall, M.: Entwicklung und Umsetzung von Beispielszenarien zur Anpassung der Arbeitsvorgabe an individuelle Leistungsschwankungen. Semesterarbeit (2011/072-S). Technische Universität München: 2012.

ROMANOW 2012

Romanow, A.: Identifikation von Mitarbeiteranforderungen in der Produktionssteuerung. Bachelor's Thesis (2012/018-B). Technische Universität München: 2012.

SCHADL 2012

Schadl, M.: Ermittlung und Validierung von operativen Einflussfaktoren auf die Arbeitsgeschwindigkeit von Montagemitarbeitern. Diplomarbeit (2012/042-D). Technische Universität München: 2012.

STADTELMEYER 2013

Stadtelmeyer, Y.: Planung und Durchführung einer Studie zur Aufnahme von Arbeitsbelastungen von Montagemitarbeitern. Master Semesterarbeit (2013/001-MSA). Technische Universität München: 2013.

WINTER 2012

Winter, J.: Analyse unterschiedlicher Ausprägungen von Produktionssystemen und deren Anwendung in der variantenreichen Serienmontage. Semesterarbeit (2011/104-S). Technische Universität München: 2012.

10.2 Anhang B: Inhaltliche Ausführungen

10.2.1 Schema der menschlichen Leistungsbereiche

Zum grundsätzlichen Verständnis menschlicher Leistung kann diese, in Abhängigkeit ihres Anteils an der Maximalleistung, nach HETTINGER & WOBBE (1993) in verschiedene Stufen eingeteilt werden. Hierzu visualisiert Abbildung 10-1 ein Schema der menschlichen Leistungsbereiche in Abhängigkeit ihrer grundsätzlichen zeitlichen Anpassbarkeit. Auf der Abszisse ist ein steigendes menschliches Leistungsangebot aufgetragen, wobei 100 % der absoluten Maximalleistung entsprechen.

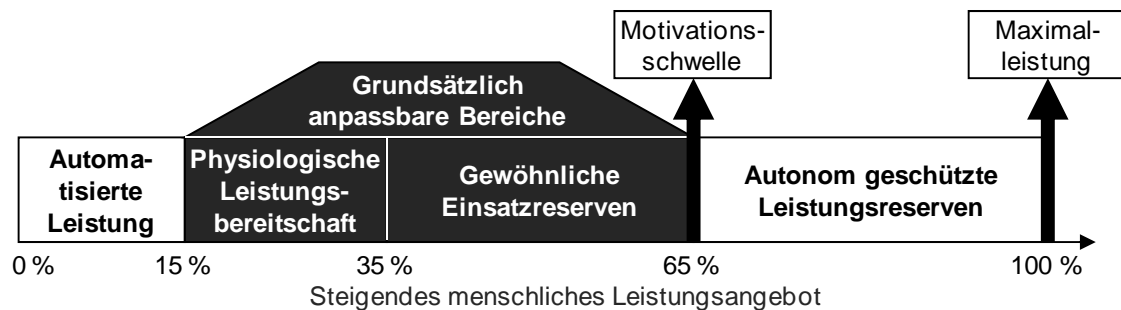


Abbildung 10-1: Schema der menschlichen Leistungsbereiche (in Anlehnung an HETTINGER & WOBBE (1993))

Von 0 bis 15 % der Maximalleistung ruft der Mensch automatisierte Leistungen ab (HETTINGER & WOBBE 1993). Dies umfasst Leistungen des menschlichen Organismus ohne bewusste Steuerung wie beispielsweise lebenserhaltende Vorgänge der Kreislauf- und Atmungstätigkeit, der Stoff- und Energieumsatz und zahlreiche andere physiologische Prozesse. Aber auch viele motorische Prozesse wie das Gehen oder Gestikulieren laufen weit unterhalb der Schwelle bewusster Sachzuwendung ab (SCHMIDTKE 1993).

Im Bereich von 15 bis 65 % der Maximalleistung befinden sich mit der physiologischen Leistungsbereitschaft und den gewöhnlichen Einsatzreserven direkt beeinflussbare Bereiche des menschlichen Leistungsangebotes. Sie entsprechen in der betrieblichen Praxis mittelschwerer bis schwerer Arbeit (HETTINGER & WOBBE 1993). Dies sind die Bereiche, die durch Handlungsempfehlungen für die Produktionsplanung bewusst beeinflusst werden können und in dieser Arbeit fokussiert werden.

Über der Motivationsschwelle existiert noch ein Bereich autonom geschützter Leistungsreserven zwischen 65 bis 100 % der Maximalleistung (SCHMIDTKE 1993, HETTINGER & WOBBE 1993). Im Normalfall kann der Mensch nicht willkürlich voll über sein angelegtes und durch Übung entwickeltes maximales Leistungsangebot verfügen (SCHLICK ET AL. 2009). Somit sind insgesamt nur in etwa 50 % des menschlichen Leistungsangebots aktiv durch Maßnahmen beeinflussbar.

10.2.2 Altersbedingte Zunahme mitarbeiterabhängiger Leistungsunterschiede

Neben dem Geschlecht, der Konstitution und dem Chronotyp stellt Lebensalter eine Form der interindividuellen Leistungsschwankung dar. Dieses soll aufgrund der aktuellen Relevanz des demografischen Wandels näher erläutert werden, da sich damit einhergehend Leistungsunterschiede in Arbeitsgruppen zukünftig vergrößern werden. Neben Verschiebungen der Alters- und Geschlechterstruktur zählt zum demografischen Wandel auch eine regionale Umverteilung der Bevölkerung (BMI 2011). Die abnehmende Zahl der Geburten und das Altern der gegenwärtig stark besetzten mittleren Jahrgänge führen zu gravierenden Veränderungen in der Altersstruktur weg von der klassischen Bevölkerungspyramide (STATISTISCHES BUNDESAMT 2009). Deutschland ist neben Japan das erste Land, das den demografischen Wandel in diesem Ausmaß erleben wird. Dieser Wandel bietet aber auch gleichzeitig die Chance, Innovationsführer zu werden. Denn eine Fabrik der Zukunft muss Arbeitsplätze anbieten, die der demografischen Veränderung unserer Gesellschaft gerecht werden (ABELE & REINHART 2011).

Der demografische Wandel stellt produzierende Unternehmen vor große Herausforderungen. Vor allem in großen Unternehmen kann die Altersstruktur in der Regel nicht wesentlich beeinflusst werden (PIEPER 2010). Die generelle Abnahme der Zahl der 20- bis 65-Jährigen insgesamt geht mit einer Verschiebung hin zu den älteren Erwerbstätigen einher (STATISTISCHES BUNDESAMT 2009). Während sich das Durchschnittsalter der Belegschaft eines produzierenden Unternehmens bis zum Jahre 2020 auf 46 Jahre erhöhen wird, steigt der Anteil der über 50-jährigen bis zu diesem Zeitpunkt auf 45 % an der Gesamtbelegschaft an. Verstärkt wird diese Problematik durch eine im Jahre 2007 beschlossene Erhöhung des Renteneintrittsalters nach Vollendung des 67. Lebensjahres (RVAGANPG 2008).

Insgesamt gilt der Erhalt der Arbeitsfähigkeit der Mitarbeiter als der zentrale Schlüsselfaktor für den erfolgreichen Umgang mit dem demografischen Wandel (KNAUTH ET AL. 2009). Denn die Veränderung physiologischer Parameter wie z. B. Muskelkraft ist wesentlich vom Lebensalter des Erwerbstätigen abhängig (REFA 1984, SCHMIDTKE 1993). SELIGER & BARTUNEK (1976) haben Studien zur maximalen Sauerstoffaufnahme (als ein Indikator für Leistungsfähigkeit) in Abhängigkeit vom Lebensalter durchgeführt. Während das Maximum bei ca. 20 Jahren liegt kommt es bei Männern und Frauen³⁵ gleichermaßen zu einem kontinuierlichen Abfall ihres Leistungsangebotes (ROHMERT & RUTENFRANZ 1983). Altern findet individuell statt und erfolgt in Abhängigkeit u. a. der Erwerbsbiographie (HATTESOHL 2013). In diesem Zusammenhang gilt als einer der wichtigsten Befunde der Gerontologie³⁶, dass ältere Menschen sehr verschieden voneinander sind und sehr unterschiedlich altern. Die interindividuelle Variabilität zwischen älteren Menschen ist größer als derer in früheren Lebensperioden (BALTES & BALTES 1994), da die interindividuellen Streubereiche von Fähigkeiten im Durchschnitt ab einem Lebensalter von 45 Jahren erheblich zunehmen (REFA 1984, ILMARINEN & TEMPEL 2002). Hierzu illustriert Abbildung 10-2 das Phänomen des differentiellen Alterns am Beispiel der Intelligenz³⁷.

Während diese im Idealverlauf einer stetigen Progression folgt, können Menschen im Worst-Case-Verlauf auch einer deutlichen Abnahme ihrer Intelligenz im Altersverlauf unterlegen sein (BALTES & BALTES 1994). Zusätzlich zeigen die Ergebnisse einer Studie zum Altern der Intelligenz, dass es im höheren Alter eine große Vielfalt an Entwicklungsverläufen gibt. Mit 78 Jahren zeigen noch 8 % der Untersuchten ein Leistungswachstum in Intelligenztests, 52 % sind in ihren Leistungen im Vergleich zum letzten Erhebungszeitpunkt stabil und 40 % zeigen einen Abbau (SCHAIE 1983).

35 Neben dem Lebensalter sind viele weitere interindividuelle Leistungsunterschiede von besonderer Relevanz. Beispielsweise haben Unterschiede in der Muskelmasse sowie im Herz-, Kreislauf- und Atemsystem zwischen männlichen und weiblichen Arbeitspersonen insbesondere bei industriellen und handwerklichen Tätigkeiten ihre Bedeutung (REFA 1984).

36 „Die Gerontologie beschäftigt sich mit der Beschreibung, Erklärung und Modifikation von körperlichen, psychischen, sozialen, historischen und kulturellen Aspekten des Alterns und des Alters.“ (BALTES & BALTES 1994)

37 Intelligenz wurde in Abbildung 2-3 (siehe S. 26) als Dispositionsmerkmal des menschlichen Leistungsangebotes eingeführt. Sie steht an dieser Stelle als plakatives Beispiel stellvertretend für das menschliche Leistungsangebot.

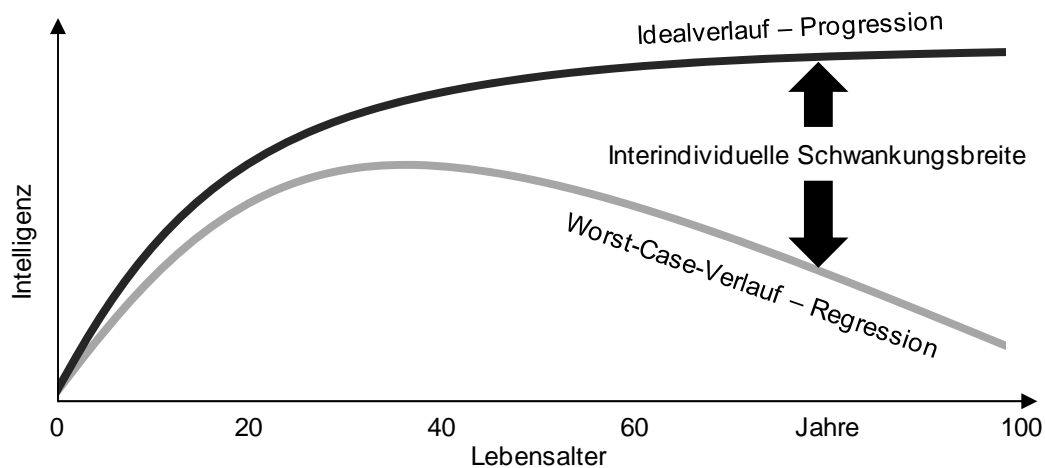


Abbildung 10-2: *Interindividuelle Schwankungsbreite der Intelligenz in Abhängigkeit des Lebensalters (in Anlehnung an BALTES & BALTES 1994)*

Vor dem Hintergrund einer so großen interindividuellen Variabilität des Altersverlaufs muss ein Kontext gefunden werden, der der Individualität des älteren Menschen einen hinreichenden Entfaltungsraum anbietet (BALTES & BALTES 1994, KNAUTH ET AL. 2009). Insgesamt existiert kein arbeitsgestalterisches Patentrezept für den älteren Mitarbeiter. Vielmehr muss die Passung zwischen Arbeitsanforderungen und der individuellen Arbeitsfähigkeit immer wieder neu angestrebt werden (KNAUTH ET AL. 2009).

10.2.3 Engpassarbeitsplatz

In der modernen Variantenfließmontage scheint es auf Basis der erläuterten Variabilität unmöglich, perfekt aufeinander abgestimmte Arbeitsstationen zu planen. Folgen zwei Varianten mit sehr hohem systembedingtem Leistungsbedarf und somit einer hohen t_{plan} , können die Arbeiten unter Umständen nicht innerhalb der gegebenen Taktzeit abgearbeitet werden (BOYSEN 2005). Darüber hinaus muss sich die Taktzeit für das gesamte Montagesystem konsequent am Engpassarbeitsplatz ausrichten, da dieses Nadelöhr die Leistung einer Montagelinie determiniert (BLOHM ET AL. 1997). Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 10-3 visualisiert. Die Arbeitsgänge der Arbeitsplätze 1 und 3 sind zeitlich weniger belastend als die von Arbeitsplatz 2. Nr. 2 stellt die langsamste Arbeitsstation in einem zusammenhängenden Fließbandbereich dar und gilt als Engpass. Station 3 muss zeitweise auf Nachschub von der Vorgängerstation warten („starving“) während Station 1 ein weiter zu bearbeitendes Werkstück aufgrund von Platz-

mangel nicht sofort an die Nachfolgerstation weitergegeben kann („blocking“). Wird jedoch auf Basis von Arbeitsplatz 1 die Taktzeit bestimmt und existiert eine Zeitspreizung, d. h. ein großer Unterschied zwischen den Montagezeiten für die Maximal- und Minimalvariante des Werkstücks, kommt es insgesamt zu Produktionsverlust und Überlastungen der Mitarbeiter (KRATZSCH 2000, TEMPELMEIER 2013).

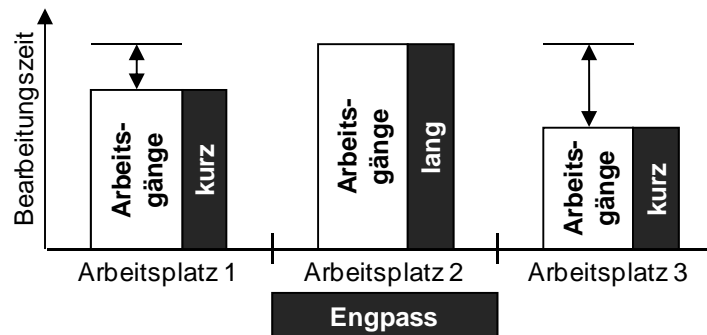


Abbildung 10-3: Definition eines sog. „Engpass“-Arbeitsplatzes (in Anlehnung an BLOHM ET AL. 1997)

10.2.4 Grundlagen der deskriptiven Statistik

Die Statistik ist eine wissenschaftliche Disziplin zur Entwicklung und Anwendung formaler Methoden zur Gewinnung, Beschreibung, Analyse und Beurteilung quantitativer Beobachtungen (VOGEL 1991). Erhobene Daten, die in dieser Arbeit gemessenen realen Bearbeitungszeiten entsprechen, dienen der numerischen Beschreibung der Umwelt zum Zwecke der Entscheidungsfindung (BÜCKER 2003, ECKSTEIN 2012). Grundbegriffe der deskriptiven Statistik sind „Urliste“, „Merkmal“ und „Ausprägung“ (ECKSTEIN 2012). Das Merkmal beschreibt den interessierenden Gegenstand einer statistischen Untersuchung und entspricht im Umfang dieser Arbeit der erhobenen realen Bearbeitungszeit t_{Ist} . Die merkmalsbezogene Aussage bzw. der für das Merkmal erhobene Wert wird als Ausprägung bezeichnet (ECKSTEIN 2012) und korrespondiert mit den erhobenen Einzelwerten des Untersuchungsmerkmals. Die ungeordnete Gesamtheit aller erhobenen Merkmalsausprägungen wird als Urliste bezeichnet (ECKSTEIN 2012). In Abbildung 10-4 werden diese Begriffszusammenhänge anhand eines Beispiels mit 18 Einzelwerten und acht Ausprägungen des Merkmals t_{Ist} visualisiert.

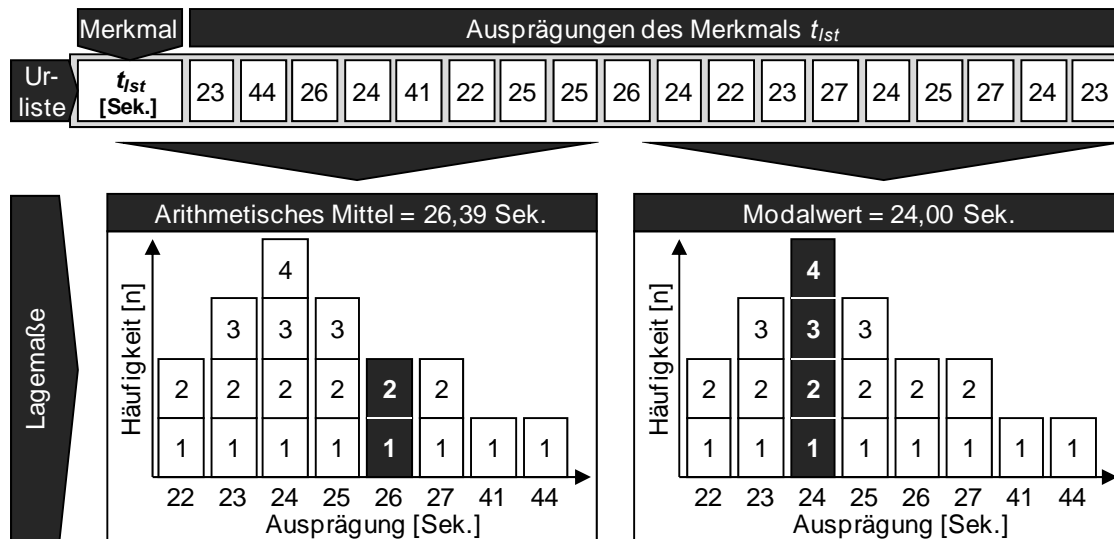


Abbildung 10-4: Grundbegriffe der deskriptiven Statistik und Einführung der wesentlichen Maßzahlen von Häufigkeitsverteilungen (in Anlehnung an VOGEL (1991), ECKSTEIN (2012))

Aus einer Urliste lässt sich eine Häufigkeitsverteilung generieren, die der Auflistung der verschiedenen Merkmalsausprägungen und der Zuordnung von absoluten und relativen Häufigkeiten zu diesen entspricht (VOGEL 1991). Aufgrund der bei steigender Datenanzahl unübersichtlichen Darstellung von Häufigkeitsverteilungen mittels klassischer Säulendiagramme, werden Maßzahlen zu deren Beschreibung verwendet. Diese dienen der Charakterisierung bestimmter Eigenschaften von Häufigkeitsverteilungen und können in Lagemaße und Streuungsmaße eingeteilt werden (Vogel 1991).

Hierbei stellen zum Ersten Lagemaße die zentrale Tendenz einer Beobachtungsreihe dar (BÜCKER 2003), wobei in dieser Arbeit vor allem das arithmetische Mittel und der Modalwert von Bedeutung sind. Der Modalwert (oder „Modus“) repräsentiert einen lagetypischen Mittelwert und entspricht der Merkmalsausprägung, die in einer statistischen Gesamtheit am häufigsten beobachtet wurde (BÜCKER 2003, ECKSTEIN 2012). Hierzu werden in Abbildung 10-4 die Häufigkeiten der Messwerte über deren Ausprägung aufgetragen, wobei der Modus der Merkmalsausprägung 24,00 Sek. entspricht. Der Modus ist umso aussagekräftiger, je stärker die entsprechende Merkmalsausprägung dominiert (BÜCKER 2003). Daneben stellt das arithmetische Mittel \bar{u} den bekanntesten rechnerischen Mittelwert einer Messreihe dar (BÜCKER 2003). Es berechnet sich aus der Summation aller Merkmalsausprägungen u_h dividiert durch deren Anzahl (siehe Formel (10-1)).

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n u_h \quad (10-1)$$

- \bar{u} Arithmetisches Mittel
 h Laufvariable der Merkmalsausprägung [1,2,...,n]
 u Merkmalsausprägung

Für die Messreihe in Abbildung 10-4 ergibt sich, abweichend vom Modus, ein arithmetisches Mittel von 26,39 Sek. Dies veranschaulicht die wesentliche Eigenschaft des arithmetischen Mittels: eine erhebliche Beeinflussung durch Extremwerte (im Beispiel die Messwerte 41 Sek. und 44 Sek.). Deshalb ist es vor Anwendung dieses rechnerischen Mittelwertes notwendig, Ausreißer in der Urliste zu eliminieren.

Da die Summe der Abweichungen der Einzelwerte u_h vom arithmetischen Mittel \bar{u} gleich null ist, bedarf es zum Zweiten der Größe des Streuungsmaßes zur vollständigen Beschreibung von Häufigkeitsverteilungen (BÜCKER 2003). Über die Berechnung der Varianz kann die Standardabweichung s_u einer Häufigkeitsverteilung abgeleitet werden (siehe Formel (10-2)). Sie wird durch die Quadratwurzel der mittleren quadratischen Abweichung der Messwerte h von deren arithmetisches Mittel \bar{u} beschrieben und gibt die durchschnittliche Streuung der einzelnen Messwerte um deren arithmetisches Mittel an (BÜCKER 2003).

$$s_u = \sqrt{\frac{\sum_{h=1}^n (u_h - \bar{u})^2}{n}} \quad (10-2)$$

- s_u Standardabweichung einer Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägung u
 h Laufvariable der Merkmalsausprägung [1,2,...,n]
 u Merkmalsausprägung
 \bar{u} Arithmetisches Mittel der Merkmalsausprägung

Zum Vergleich der Streuung verschiedener Messreihen mit unterschiedlicher Skalierung der Merkmalsausprägungen bedarf es deren Normierung (ECKSTEIN 2012). Dazu ergibt sich nach Formel (10-3) der Variationskoeffizient VK_u als Quotient aus Standardabweichung s_u und des zugehörigen arithmetischen Mittels \bar{u} . Dieser stellt ein relatives und dimensionsloses Streuungsmaß dar und wird in der Regel in Prozent angegeben (ECKSTEIN 2012).

$$VK_u = \frac{s_u}{\bar{u}} \quad (10-3)$$

VK_u Variationskoeffizient der Merkmalsausprägung

s_u Standardabweichung einer Häufigkeitsverteilung der Merkmalsausprägung u

\bar{u} Arithmetisches Mittel

10.2.5 Anforderungen an die Zeitmessung: Fall 2

Ergänzend zu Abschnitt 5.3.4 (Anforderungen an die Zeitmessung, S. 82) wird in nachfolgender Abbildung 10-5 Fall 2 visualisiert, bei dem t_v konstant gehalten wird. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn das Messsignal durch eine Lichtschranke ausgelöst wird, wenn der Werkstückträger in die zu untersuchende Arbeitsstation einfährt. Hierbei bezieht sich die vom Messsignal erhobene Bearbeitungszeit t_{Ist} auf den vorhergehenden Datensatz.

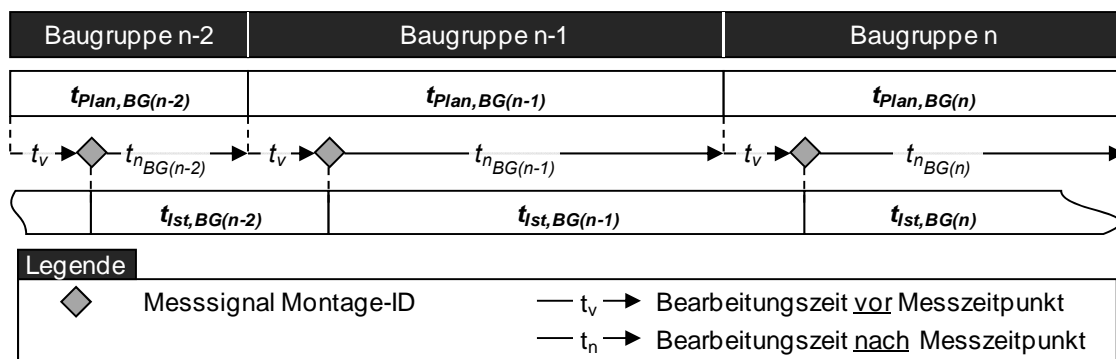


Abbildung 10-5: Beschreibung von Fall 2 ($t_v = const.$)

10.2.6 Visualisierung erhobener aber fehlerbehafteter Rohdatensätze der Bearbeitungszeit

Wurde die Checkliste vom Anwender der Methode erfolgreich abgearbeitet, ist es grundsätzlich möglich, an den ausgewählten Arbeitsstationen in Kombination mit den als valide definierten Bauteilvarianten Rohdatensätze von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten zu erheben. Diese liegen dann in einem Software-basierten Programm vor. Die Rohdatensätze stellen sich wie in der grundlegenden Datenstruktur (siehe Abschnitt 5.2, S. 76) beschrieben dar und setzen sich jeweils aus den Attributen Nr., Arbeitsplatz, Anzahl Mitarbeiter, Variante, t_{Plan} , Datum, Uhrzeit und t_{Ist} zusammen.

Zur Verbesserung des Verständnisses visualisiert Abbildung 10-6 exemplarisch ein Variantenfließmontagesystem dargestellt als Matrix mit 16 Arbeitsplätzen (AP1-AP16), auf denen insgesamt sechs Bauteilvarianten (VarA-VarF) montiert werden. Grau hinterlegte Felder zeigen Arbeitsstation-Varianten-Kombinationen, an denen die Fragen der Checkliste (siehe Abbildung 5-8) durchgehend positiv beantwortet werden können und die somit alle erläuterten Anforderungen erfüllen. Diese (im Beispiel insgesamt 20 Arbeitsstation-Varianten-Kombinationen bestehend aus AP2, AP5, AP7, AP11, AP15 sowie VarA, VarC, VarD, VarF) können für eine weitere Betrachtung verwendet werden und es können Rohdatensätze von Bearbeitungszeiten manueller Montagetätigkeiten, aus denen Handlungsempfehlungen für die zu betrachtenden Stellhebel generiert werden, erhoben werden. Weiß hinterlegte Felder erfüllen mindestens eine der gestellten Anforderungen nicht und werden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Beispiele für nicht geeignete Bauteilvarianten können in Anlehnung an die erläuterten Ansprüche nicht repräsentative Sonderläufer-Baugruppen oder Varianten ohne identifizierte Montage-ID sein. Ein Beispiel für eine ungeeignete Arbeitsstation stellt deren fehlende Einstufung als Engpassstation dar. Die visualisierte Kurve stellt plakativ Leistungsschwankungen von Montagemitarbeitern an der betreffenden Arbeitsstation dar. Je höher hierbei t_{Ist} ist, desto langsamer hat der betreffende Mitarbeiter im Betrachtungszeitraum gearbeitet.

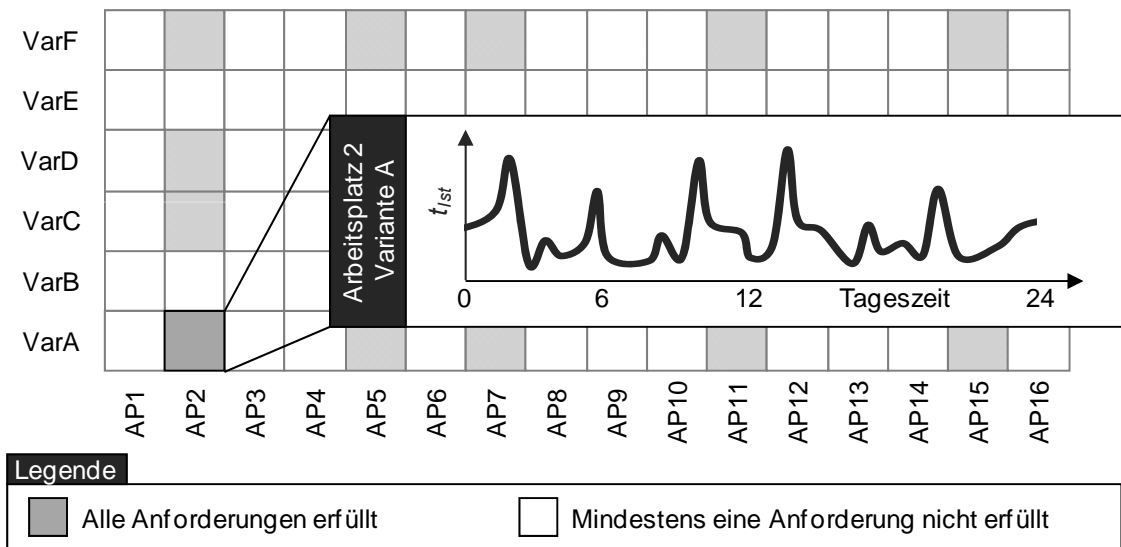


Abbildung 10-6: Exemplarisches, qualitatives und visuell aufbereitetes Ergebnis zur Erhebung von arbeitsplatz- und variantenspezifischen Rohdaten von t_{Ist}

Darüber hinaus umfassen Rohdaten jedoch noch fehlerbehaftete Datensätze (Schichtwechsel, Pausen, Störungen, etc.), die keinen Rückschluss auf das reale Leistungsangebot von Montagemitarbeitern in einem Montagesystem zulassen. Ausreißer der dargestellten Kurve vor allem hin zu großen t_{Ist} veranschaulichen die Problematik der erhobenen Rohdatensätze. Diese Ausreißer resultieren u. a. aus einer Pause, bei der z. B. der manuelle Freigabetaster letztmalig vor der Unterbrechung gedrückt wurde, um das zuletzt montierte Bauteil an die nächste Arbeitsstation freizugeben. Das Messsignal wird danach erst wieder nach der Pause ausgelöst und es entstehen sehr lange Bearbeitungszeiten t_{Ist} , die zusätzlich zur Bearbeitungszeit für eine Bauteilvariante die gesamte Pausenzeit beinhalten. Demzufolge bedarf es einer statistischen Aufbereitung der erhobenen Rohdatensätze, um daraus Rückschluss über menschliche Leistungsschwankungen geben zu können. Dazu wird im folgenden Abschnitt eine Vorgehensweise beschrieben.

10.2.7 Visualisierung des Software-Tools zu Implementierung der entwickelten Methoden

Die Applikation ist in Visual C# implementiert, das auf dem .NET-Framework von Microsoft® basiert. Das für den Anwender sichtbare GUI (Graphical User Interface, Benutzeroberfläche) stellt einen Statusbereich als Fortschritt des Programmdurchlaufs dar (siehe exemplarisches Beispiel in Abbildung 10-7). Dabei stellt beispielsweise der Fragenteil inkl. Auswahlmenü ein wesentliches Element des Abschnittes „Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen“ dar, wobei der Anwender aktiv Daten eingeben bzw. Handlungsvorschläge bestätigen muss.

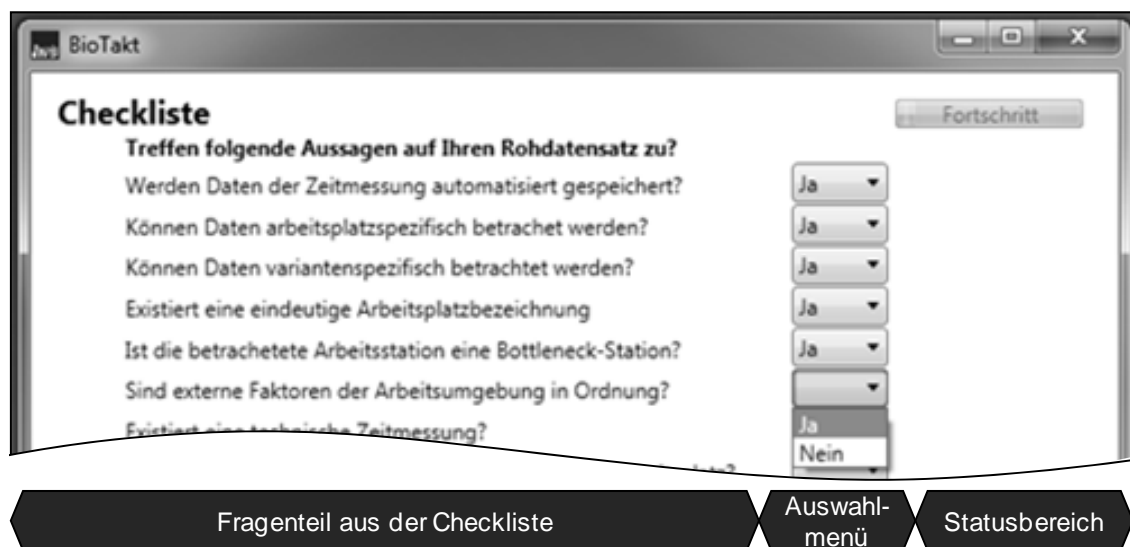


Abbildung 10-7: Graphical User Interface (GUI) des Software-Tools „BioTakt“ für den Anwender am Beispiel des Methodenschrittes „Checkliste zur Generierung von Rohdatensätzen“

10.3 Anhang C: Genannte Firmen und Verbände

BMW AG

Petuelring 130
80788 München
www.bmw.de

IBM Corporation

1 New Orchard Road
Armonk, NY 10504-1722
USA
www.ibm.com

Microsoft Corporation

One Microsoft Way
Redmond, WA 98052-6399
USA
www.microsoft.com/germany

Siemens AG

Wittelsbacherplatz 2
80333 München
<http://www.siemens.de>