

Nachhaltigkeit bei der Planung von Fertigungssystemen: Simulation unter dem Aspekt der Leistungsentwicklung einer Belegschaft

Sustainability on Planning Production Systems: Simulation with Respect to the Personnel's Performance Development

Gert Zülch, Marcel Becker,
Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe (Germany)

Abstract: In the face of continuously increasing costs competition, in particular with respect to Germany as a location for manufacturing systems, many questions regarding their long-term, efficient design arise. When one assumes a permanent workforce within an enterprise, their demographic development gains greatly in importance. Using the simulator *ESPE-AS*, which is geared toward age-appropriate structuring of processes and tasks, the performance development of a given workforce can be forecasted for future time spans. This article will illustrate this procedure using a practice-based pilot example.

1 Alternsadäquate Fertigungssysteme

Die allseits geforderte Effizienz von Fertigungsprozessen führt zu arbeitsteiligen Gestaltungslösungen, wie sie sich beispielsweise in getakteten Montagelinien wiederfinden. Dabei werden heutzutage wieder kurzzyklische Arbeitsinhalte bevorzugt, im Gegensatz zu Trends in den 1990er-Jahren, die durch sequenzielle Vollständigkeit und flexible Mehrstellenarbeit gekennzeichnet waren. Die Forderung nach kurzen Taktzeiten führt allerdings zu Qualifikationsprofilen der Mitarbeiter, denen in der Regel jung gebliebene Mitarbeiter besser entsprechen können als ältere. Dies macht es unter dem Gesichtspunkt der Personal- und Prozessentwicklung notwendig, frühzeitig den Entwicklungsverlauf der personellen Leistungsfähigkeit bei der Auslegung zukünftiger Fertigungssysteme zu berücksichtigen.

1.1 Mitarbeiter als Ressource der Systemgestaltung

Bei vielen Fragestellungen der Fertigungssystemplanung, insbesondere beim Einsatz von Simulationswerkzeugen, gewinnt die Berücksichtigung der Mitarbeiter und ihrer unterschiedlichen Leistungsfähigkeit zunehmend an Bedeutung. Bezüglich der

Leistungsunterschiede beim Menschen lassen sich allgemein Ansätze zur Berücksichtigung der individuellen Variabilität sowie der Heterogenität menschlicher Leistung unterscheiden. Im Bereich der individuellen Variabilität werden personenbezogene Veränderungen über einen kürzeren Zeitraum hinweg betrachtet (z. B. Fletcher et al. 2008), wohingegen bei der Heterogenität Leistungsunterschiede zwischen Personen Betrachtungsgegenstand sind (vgl. Doerr et al. 2002; Hunter et al. 1990). Aktuelle Forschungsarbeiten sehen dabei den Mitarbeiter als zentrale Einflussgröße auf die Fertigungsleistung und damit unter Umständen als maßgebliche Ressource an (siehe Buzacott 2002). Allerdings werden nur selten Personen in Simulationsverfahren als eigenständige Ressourcen modelliert, wie dies für personalorientierte Verfahren vorgesehen ist (siehe VDI 3633, Blatt 6, 2001).

1.2 Zielsetzung und Anforderungen

Die langfristige Leistung eines Fertigungssystems ist maßgeblich von dem zur Verfügung stehenden Personal abhängig. Vor dem Hintergrund einer steigenden Berufs- und Tätigkeitsdauer von Mitarbeitern und ggf. ihrer eingeschränkten Möglichkeiten zur beruflichen Weiterentwicklung wird sich die Heterogenität der Arbeitsleistung im Laufe der Jahre verstärkt bemerkbar machen. Unternehmen müssen sich demzufolge auf eine leistungsdifferenzierte Belegschaft einstellen und entsprechende gestalterische Maßnahmen in Betracht ziehen.

Eine konkrete alters- bzw. altersbezogene Betrachtungsweise bei der Simulation eines Fertigungssystems lässt sich bisher nur in Einzelfällen nachweisen: Baines et al. (2004) betrachten erstmalig die Auswirkungen einer alternden Belegschaft unter der Annahme einer veränderten menschlichen Leistungsfähigkeit über mehrere Jahre hinweg. Dabei werden allerdings keine Altersunterschiede innerhalb der Belegschaft angenommen, um die Komplexität bei der Analyse der daraus resultierenden Engpässe zu reduzieren (Baines et al. 2004, S. 521).

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die zu erwartenden Auswirkungen für ein Fertigungssystem über einen längeren Zeitraum hinweg zu prognostizieren. Zur Berücksichtigung des Einflusses einer alternden Belegschaft wird dabei die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter in Form des Zeitgrades (zur Definition siehe REFA 1992, S. 440) herangezogen.

2 Bewertung menschlicher Leistung

2.1 Grundlagen der Leistungsbeurteilung

Willnecker (2000, S. 32 ff.) zeigt die grundlegenden Faktoren auf, welche die menschliche Leistungsfähigkeit primär beeinflussen bzw. Leistungssteigerungen in Montagesystemen hervorrufen können. In diesem Zusammenhang definiert REFA (1994, S. 238 ff.) die Leistungsbeurteilung, welche durch das Verhältnis von beeinflussbarer Ist-Leistung zu beeinflussbarer Bezugsleistung ausgedrückt wird. Die Leistungsbeurteilung nach REFA erfordert dabei die Berücksichtigung ergonomischer Zusammenhänge und leistungsbeeinflussender Randbedingungen, wie beispielsweise das Alter. Jeder Mensch verfügt aufgrund seiner Vielzahl von Leis-

tungsdeterminanten über ein sehr spezifisches Leistungsspektrum und eine Leistungsgrenze, die durch äußere (Arbeitsgestaltung) und innere Einflüsse (Alter, Motivation, Qualifikation) bestimmt sind.

2.2 Alter und Arbeit

Auch wenn eine rein biologische Betrachtung des Alterungsprozesses unter dem Aspekt des Zellverfalls nur bedingt zu beruflichen Leistungseinbußen führt, ist mit dem Alter und dem Voranschreiten des Alterns eine Veränderung der Leistungsfähigkeiten zu verzeichnen (siehe hierzu Zülch und Becker 2006a, 2008).

In der Altersforschung werden zahlreiche Ursachen für eine altersstabile berufliche Leistung beispielsweise aufgrund von Selektions- und Kompensationseffekten beschrieben. Valide Modelle für die berufliche Leistung, insbesondere bei älteren Fertigungsmitarbeitern, sind jedoch bisher nicht bekannt. Warr (2001) bekräftigt zudem die Notwendigkeit einer gesonderten, arbeitsspezifischen Untersuchung altersbedingter Veränderungen.

3 Simulation der Leistungsentwicklung

3.1 Das Simulationsverfahren *ESPE-AS*

Nachfolgend wird eine spezialisierte Version des Simulationsverfahrens *ESPE* (Engpassorientierte Simulation von Personalstrukturen) verwendet, das am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (*ifab*) der Universität Karlsruhe (TH) entwickelt wurde (Heitz 1994, S. 93 ff.) und sich seit 1994 in ständiger Weiterentwicklung befindet. *ESPE* ist ein ereignisorientiertes, zeitdiskretes Simulationsverfahren, das über maschinelle Funktionalitäten hinaus eine detaillierte Modellierung personeller Qualifikationen erlaubt. Eine neuere Version des Verfahrens ist *ESPE-IP*, das auf eine integrierte Planung von Personal- und Betriebsmittelstrukturen ausgerichtet ist (vgl. Zülch und Becker 2006b).

Aufbauend auf diesem Verfahren wurde für den vorliegenden Problembereich *ESPE-AS* (*ESPE* für die altersdifferenzierte Strukturplanung) entwickelt. Ausgangspunkt für die Modellbildung ist dabei eine vorgegebene Betriebsmittelstruktur sowie ein prognostiziertes Fertigungsprogramm. Die Personalstruktur wird durch Anzahl und Qualifikationen der eingesetzten Mitarbeiter modelliert. Diese Modellierung wurde in *ESPE-AS* speziell hinsichtlich personenbezogener Qualifikations- und Leistungsentwicklungsverläufe erweitert. Dabei lassen sich mehrere Entwicklungsverläufe in Form von personenbezogenen sowie technischen Kompensationen miteinander kombinieren und beispielsweise Leistungsverluste einer Person durch technische Hilfsmittel partiell ausgleichen. Für die ausführliche Beschreibung des Verfahrens wird an dieser Stelle auf die bereits bestehende Literatur (z. B. Zülch und Becker 2006a; 2007; 2008) und die dortigen Referenzen hingewiesen.

3.2 Darstellung des Fertigungssystems

Die Funktionalitäten des Simulationsverfahrens *ESPE-AS* wurden anhand eines Beispiels aus der betrieblichen Praxis erprobt. Das betrachtete Fertigungssystem bestand aus einer Montagelinie in Form einer Reihenfertigung, unterstützt durch ein schienengebundenes Transportsystem (Abb. 1). Das Montagesystem war in drei Abschnitte aufgeteilt, in denen vorwiegend manuelle Arbeitsvorgänge auszuführen waren. Zur physiologischen Entlastung konnten einzelne Mitarbeiter des Systems an einen von der Reihenfertigung entkoppelten Pressenarbeitsplatz wechseln. Ein zusätzlich qualifizierter Mitarbeiter kontrollierte und überwachte die automatischen Schraubstationen nach den Abschnitten 1 und 3. Systemführer und Logistiker vervollständigten den Betrachtungsumfang in diesem Erprobungsbeispiel.

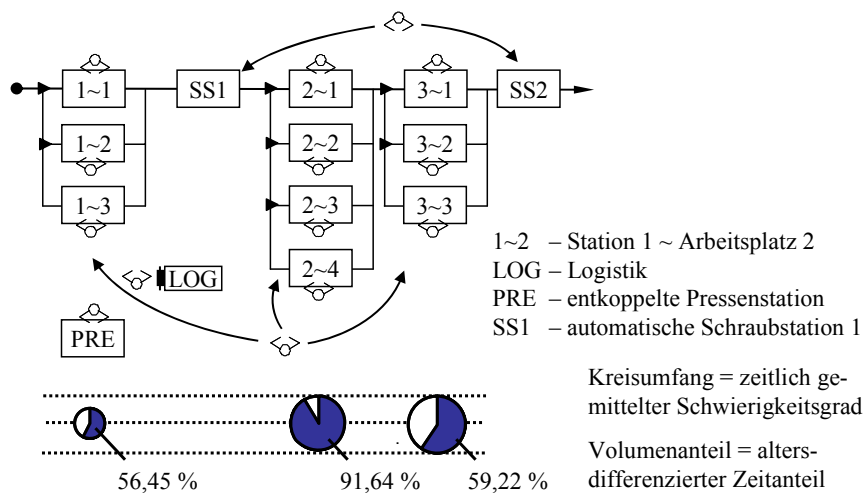


Abbildung 1: Funktionsmodell der Fertigungs- und Personalstruktur

Ein Wechsel der Mitarbeiter zwischen den einzelnen Abschnitten war in der Ausgangssituation nicht möglich, da sich die meisten Mitarbeiter des Abschnittes 1 aufgrund ihrer reduzierten Leistungsfähigkeit für eine Weiterqualifizierung in den Abschnitten 2 und 3 nicht mehr eigneten. Hierbei handelte es sich in der Regel um ältere Mitarbeiter, deren berufliche Vorgeschichte bereits zu einer Versetzung an diese eher einfachen Tätigkeiten geführt hatte. Neue Mitarbeiter wurden in der ersten Qualifizierungsstufe ebenfalls im Abschnitt 1 eingesetzt, bevor sie sich für andere Aufgaben weiter qualifizieren konnten.

Da nicht alle Arbeitsvorgänge automatisch zu einer altersbedingten Veränderung beitragen, wurden die einzelnen Arbeitsvorgänge anhand eines altersdifferenzierten Schwierigkeitsgrades mittels einer 0 bis 10 Skalenbewertung untergliedert. Dies ergab in Abschnitt 3 den höchsten zeitlich gemittelten Arbeitsschwierigkeitsgrad (verdeutlicht durch den Kreisumfang in Abb. 1); die altersdifferenzierten Zeitanteile lagen dort allerdings nur bei ungefähr 59 % der Durchführungszeit des Abschnittes. Somit traf nur für ungefähr zwei Drittel der Durchführungszeit eine Beeinflussung durch das Altern der Mitarbeiter zu, diese beinhalteten jedoch stark belastende

Tätigkeiten (zum Teil das Heben und das Tragen von schweren Teilen). Abschnitt 2 bestand fast vollständig aus altersdifferenzierten Zeitanteilen, deren zeitgewichteter Schwierigkeitsgrad nur geringfügig kleiner als bei Abschnitt 3 war. Dabei waren die Arbeitsvorgänge vom Schwierigkeitsgrad her zwar geringer, aber dafür dauerhaft auszuführen. Abschnitt 1 war im Vergleich dazu als weniger belastend für ältere Mitarbeiter einzustufen, wodurch gerade ältere und leistungsgeminderte Mitarbeiter diesen Abschnitt bevorzugten.

3.3 Zeitgradiententwicklung des Personals

Für die Simulationsstudie wird nachfolgend modellhaft angenommen, dass sich der Zeitgrad als objektiv messbares Zeitverhalten von personell durchgeführten Arbeitsvorgängen altersbedingt verändert. Der Zeitgrad ist nach REFA (1992, S. 440) das Verhältnis von vorgegebener Soll-Zeit zur erzielten Ist-Zeit, und zwar bei der hier betrachteten Fragestellung in Bezug auf den Menschen. Für die Soll-Zeit sind zusätzlich das Arbeitsverfahren, die Arbeitsmethode und die Arbeitsbedingungen des Fertigungssystems im Soll-Zustand bestimmend (REFA 1992, S. 125). Die letztgenannten Einflüsse lassen sich im Rahmen von technisch-organisatorischen Szenarien berücksichtigen.

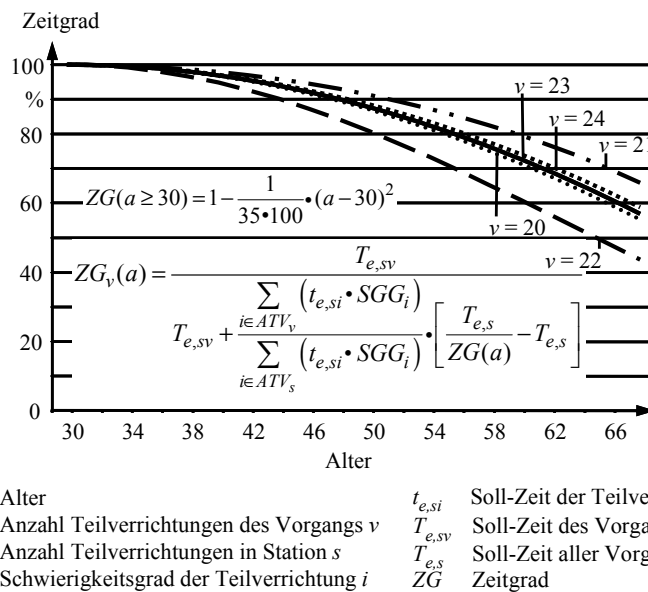


Abbildung 2: Prognostizierter Zeitgradverlauf in Montageabschnitt 3

Die vorliegende Studie nimmt Bezug auf eine von Baines et al. (2004) als allgemeingültig beschriebene Annahme der Zeitgradiententwicklung $ZG(a)$ in Abhängigkeit vom Alter a (siehe die graphische Darstellung des Arbeitsvorgangs 23 in Abb. 2). Um der unterschiedlichen Schwierigkeit von einzelnen Arbeitsvorgängen Rechnung zu tragen, wurde abweichend hierzu eine dem ermittelten Schwierigkeitsgrad entsprechende Gewichtung der zeitlichen Leistungsveränderung in Form des

altersveränderlichen Zeitgrades $ZG_v(a)$ berücksichtigt. Zudem lässt sich die Notwendigkeit einer altersdifferenzierten Engpassbetrachtung anhand von Qualifikationsrestriktionen berücksichtigen: Hierzu wurden Mitarbeiter je nach Szenario beim Unterschreiten eines minimal geforderten Zeitgrades von 25, 50 und 75 % als gesundheitlich eingeschränkt bzw. als nicht länger qualifiziert für die entsprechende Arbeitsvorgänge angesehen.

Nachfolgend wird auf das Szenario mit 75 % Zeitgraduntergrenze in Form der Ausgangs- und einer Alternativsituation eingegangen: In der Ausgangssituation wird die bereits vorhandene Personalstruktur über einen Planungszeitraum von 15 Jahre hinweg nicht verändert. Bei Erreichen eines angenommenen Rentenalters von 67 Jahren wird ein Personalersatz durch einen 30-Jährigen zugelassen. Bereits zu Beginn des Planungszeitraumes zeigen sich in diesem Szenario erhebliche Unterschiede in der Personalauslastung. Der in Abbildung 3 dargestellte Variationskoeffizient der Personalauslastung dient dabei als Maß für die Gleichmäßigkeit der Personalauslastung, wobei ein möglichst geringer Wert auf einen simulativ ermittelten harmonischen Personaleinsatz hindeutet.

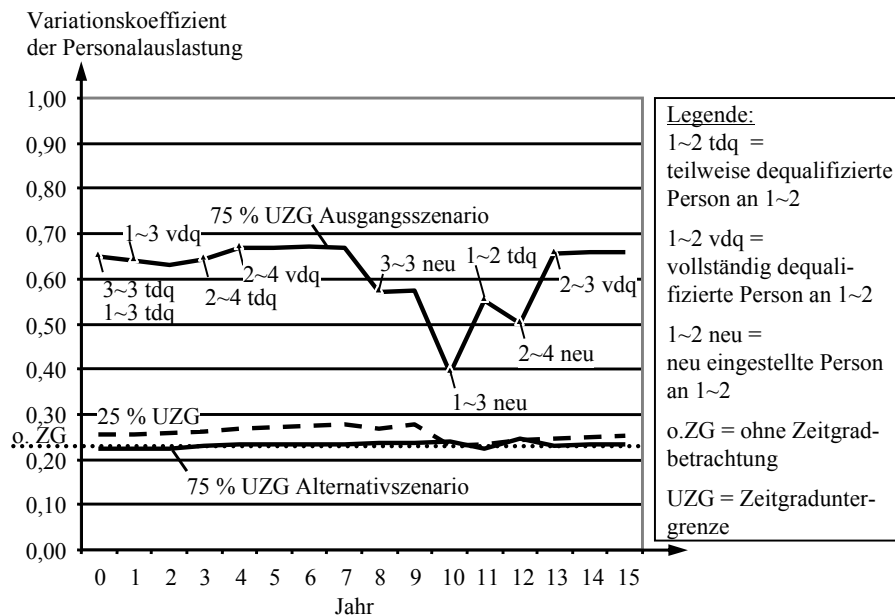


Abbildung 3: Variationskoeffizient der Personalauslastung

Im Jahr 0 sind aufgrund unzureichender Qualifikationen an den Arbeitsplätzen 1~3 und 3~3 des ersten und dritten Montageabschnitts Leistungseinbußen zu erkennen. Ein entsprechender Personalersatz ist allerdings erst in den Jahren 10 und 12 zum Renteneintritt vorgesehen. Im Jahr 3 folgt eine weitere Verringerung der Einsatzmöglichkeiten bei der dem Arbeitsplatz 2~4 zugewiesenen Person. Diese verliert im darauf folgenden Jahr vollständig ihre Qualifikation und belastet das Leistungsvermögen des Systems bis zum Personalersatz im Jahr 12.

Aus den gewonnenen Ergebnissen des Ausgangsszenarios wird nachfolgend ein Alternativszenario abgeleitet, welches den vorzeitigen Personalersatz vorsieht. Dadurch entstehende Mehrkosten des Personals fließen in die monetäre Bewertung ein. Durch Leistungsabfall bedingte vorgezogene Personalwechsel werden an Arbeitsplatz 1~3 und 3~3 im Jahr 0, 2~4 im Jahr 3, 1~2 im Jahr 11 sowie 2~3 und 3~2 im Jahr 13 vorgenommen. Diese Maßnahmen ergeben sich aufgrund der Simulationsprotokolle, in denen Qualifikationsdefizite, aber auch daraus resultierende Einsatzverluste ersichtlich werden. Einsatzverluste ergeben sich aufgrund des Nichtausführens eines Arbeitsvorgangs durch eine Person wegen fehlender Qualifikation für einen vorhergehenden Arbeitsvorgang ihrer Arbeitsstation.

Im Vergleich zu den Szenarien mit 25 % Zeitgraduntergrenze zeigt das Alternativszenario eine gleichmäßigere Personalauslastung, die fast mit der Situation ohne personenbezogene Zeitgradbetrachtung einhergeht. Die Gleichmäßigkeit der Auslastung stellt allerdings nur eine der Zielsetzungen dar.

3.4 Auswertung von Simulationsszenarien

Als produktionslogistische Bewertungskriterien sind neben dem Variationskoeffizienten der Personalauslastung beispielsweise der Ausbringungsgrad innerhalb eines Auswertungszeitraumes, die Betriebsmittelnutzung sowie die Personalauslastung zu betrachten.

Die Personalauslastung bzw. Betriebsmittelnutzung gibt die Einsatzzeit der Person bzw. des Betriebsmittels in Relation zu ihrem theoretischen Kapazitätsbestand an (vgl. REFA 1991, S. 251). Für das Personal ist dieser Kapazitätsbestand unter der Annahme eines 100 %igen Zeitgrades identisch mit der Arbeitszeit im Auswertungszeitraum. Demgegenüber setzt der theoretische Zeitgradeinsatz den zeitlich gemittelten Zeitgrad ins Verhältnis zur Einsatzzeit der Person bzw. des Personals. Dieser lässt sich einem effektiven Zeitgradeinsatz gegenüberstellen, der sich im Verhältnis zur theoretischen Arbeitszeit bestimmt.

Abbildung 4 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand einzelner Zeitgradeinsatzverläufe des Ausgangs- und des Alternativszenarios im Vergleich zu den traditionellen Ergebnissen ohne Berücksichtigung eines sich verändernden Zeitgradverhaltens der Mitarbeiter. Beim theoretischen Zeitgradeinsatz zeigt sich bei beiden Szenarien ein ähnlicher Verlauf, wohingegen das Alternativszenario, bedingt durch das Ausnutzen bisheriger ablaufbedingter Unterbrechungen, die Auslastung bei der traditionellen Planung teilweise noch übertrifft (Jahre 0 bis 2, 4, 7 und 11 bis 15).

Das produktionslogistische Kriterium der Ausbringungsmenge lässt sich zudem in ein monetäres Bewertungskriterium in Form der Personal- und Betriebsmittelkosten pro gefertigte Mengeneinheit überführen. Die Personalkosten werden auf der Basis arbeitsplatzbezogener Personalstundensätze als fix betrachtet, wohingegen sich die Betriebsmittelkosten hinsichtlich fixer und variabler Anteile bei den Betriebsmittelstundensätzen unterscheiden.

Insgesamt erweist sich das Alternativ- gegenüber dem Ausgangsszenario relativ zur Ausbringungsmenge als wesentlich kostengünstiger. Abbildung 5 zeigt aber auch beim Alternativszenario deutlich ansteigende Personalkosten in den Jahren 3 bis 7,

11 sowie 13 bis 15 im Vergleich zu dem niedrigsten relativen Personalkostenniveau im Jahr 12.

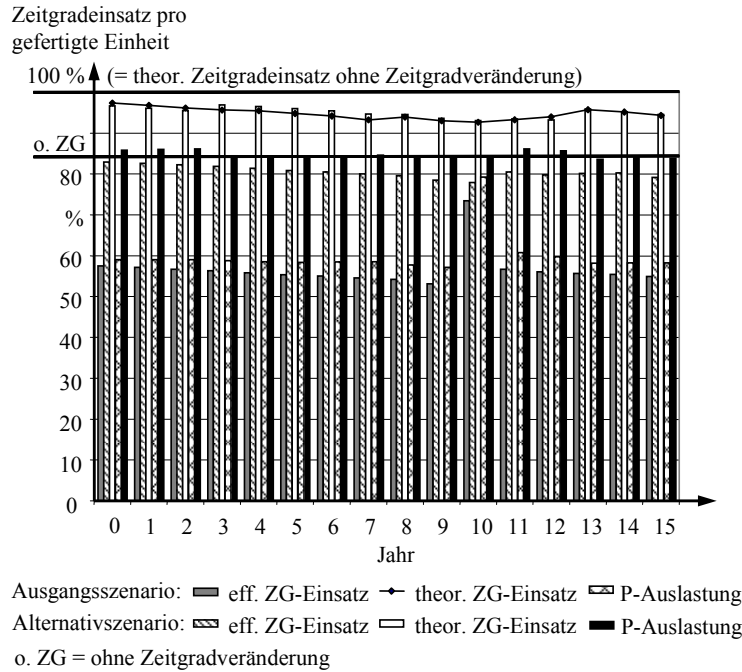


Abbildung 4: Zeitgradeinsatz pro gefertigte Einheit

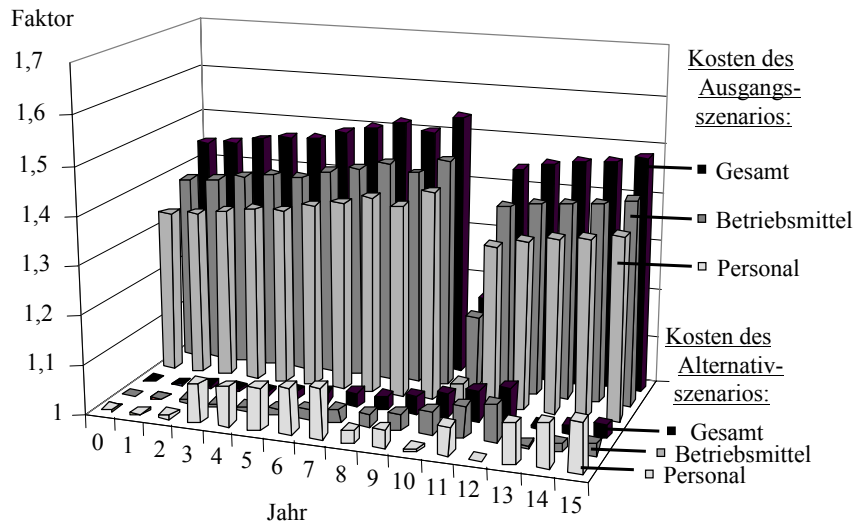


Abbildung 5: Kosten pro gefertigte Einheit relativ zum Minimum

4 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Simulationsergebnisse werden Rückschlüsse auf geeignete Kompensationsmaßnahmen möglich, anhand derer eine adäquate Verteilung von Arbeitsvorgängen auf unterschiedliche Personengruppen vorgenommen werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass es sich bei den Gestaltungslösungen nicht um eine strikte Trennung von Arbeitsaufgaben handeln muss, sondern vielmehr eine wechselnde Arbeitsbelastung gerade in Bereichen der stark repetitiven Tätigkeiten anzustreben sein wird.

Des Weiteren wird die Leistungsfähigkeit des Fertigungssystems im hohen Maße durch die kurzfristige Personaleinsatzplanung bestimmt. Hierzu wurden im Verfahren *ESPE-AS* die bereits implementierten Personaleinsatzstrategien hinsichtlich eines altersdifferenzierten Ansatzes auf Grundlage eines sich langfristig veränderbaren Qualifikationsprofils (Profilvergleichsmethode) vervollständigt. Anhand von Prioritätsregeln zur adäquaten Aufteilung von Tätigkeiten ermöglicht dies einen Quervergleich unterschiedlicher Personalzuordnungen im Verlaufe einer langfristigen Entwicklung.

Literatur

- Baines, T.; Mason, S.; Siebers, P.-O.; Ladbrook, J. (2004) Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simulation Modelling Practice and Theory*, 12 (2004) 7-8, S. 515-526
- Buzacott, J.A. (2002) The impact of worker difference on production system output. *International Journal of Production Economics*, 78 (2002) 1, S. 37-44
- Doerr, K.H.; Mitchell, T.R.; Schriesheim, C.A.; Freed, T.; Zhou, X. (2002) Heterogeneity and variability in the context of flow lines. *The Academy of Management Review*, 27 (2002) 4, S. 594-607
- Fletcher, S.R.; Baines, T.S.; Harrison, D.K. (2008) An investigation of production workers' performance variations and the potential impact of attitudes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35 (2008) 11-12, S. 1113-1123
- Heitz, M.-J. (1994) Ein engpaßorientierter Ansatz zur simulationsunterstützten Planung von Personalstrukturen. Karlsruhe Uni, Diss. (ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 7 - ISSN 0940-0559)
- Hunter, J.E.; Schmidt, F.L.; Judiesch, M.K. (1990) Individual differences in output variability as a function of job complexity. *Journal of Applied Psychology*, 75 (1990) 1, S. 28-42
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.) (1991) Planung und Steuerung, Teil 2. Carl Hanser, München
- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.) (1992) Datenermittlung. Carl Hanser, München

- REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (Hrsg.) (1994) Ausgewählte Methoden des Arbeitsstudiums. Carl Hanser, München
- VDI 3633 (2001) Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Blatt 6: Abbildung des Personals in Simulationsmodellen. Beuth, Berlin
- Warr, P. (2001) Age and Work Behaviour: Physical Attributes, Cognitive Abilities, Knowledge, Personality Traits and Motives. In: Cooper, C.L.; Robertson, I.T. (Hrsg.): International Review of Industrial and Organizational Psychology. Wiley, London, S. 1-36
- Willnecker, U. (2000) Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. München Uni, Diss (iwb-Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Band 146). Herbert Utz, München
- Zülch, G.; Becker, M. (2006a) Simulationsunterstützte Prognose der Leistungsfähigkeit von Fertigungssystemen bei alternder Belegschaft. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 60 (2006) 3, S. 151-159
- Zülch, G.; Becker, M. (2006b) Qualification-based manufacturing planning based on computer-supported modelling and simulation. In: Dolgui, A.; Morel, G.; Pereira, C. (Hrsg.): Information control problems in manufacturing 2006, Volume II: Industrial Engineering. Elsevier Science, Oxford, S. 181-186
- Zülch, G.; Becker, M. (2007) Computer-supported competence management: Evolution of industrial processes as life cycles of organizations. In: Computers in Industry 58 (2007) 2, S. 143-150
- Zülch, G.; Becker, M. (2008) Simulation nutzen: Fertigungssysteme prospektiv bewerten. In: Personal 60 (2008) 1, S. 6-8