

Wirtschaftliche und ergonomische Gestaltung von Arbeitsprozessen mittels digitaler Fabrik- und Arbeitsplanung

Michael SPITZHIRN, Sascha ULLMANN

imk automotive GmbH, Amselgrund 30, D-09128 Chemnitz

Kurzfassung: Bei der Planung und Gestaltung von Produktions- und Arbeitssystemen ist eine ganzheitliche Betrachtung notwendig, die sowohl die Ebene der Fabrikplanung wie auch der Arbeitsplatzgestaltung berücksichtigt. Vielmals werden diese Prozesse losgelöst voneinander betrachtet, so dass der Mensch als wichtiges Element im Arbeitssystem z.T. ungenügend und zu spät im Planungsprozess berücksichtigt wird. Die Folge ist eine zumeist zeit- und kostenintensive Umplanung und die Durchführung von Optimierungsworkshops, um Probleme im bestehenden Prozess beheben zu können.

Am Beispiel der Montage von Waschmaschinen wird eine iterative Vorgehensweise zur durchgehenden digitalen Planung zwischen Fabrik- und Arbeitsebene vorgestellt. Hierbei wird unter Einsatz der ema Software Suite, bestehend aus dem ema Plant Designer (emaPD) zur Fabrikstrukturplanung und der Arbeitsablauf- und Humansimulation mittels ema Work Designer (emaWD) eine ganzheitliche Gestaltung der Montagelinie durchgeführt. Bei der Planung und Gestaltung der Fertigung und Montage wurden verschiedene Gestaltungsalternativen unter wirtschaftlichen sowie ergonomischen Kriterien erstellt und bewertet.

Im Ergebnis konnte eine effiziente Fabrik mit optimiertem Materialfluss unter Minimierung der Herstellkosten und Durchlaufzeiten sowie Einhaltung der Flächenvorgaben und Ergonomie geplant werden. Die Übernahme von ergonomisch ungünstigen Prozessen durch Roboter in Form hybrider Arbeitsplätze ermöglicht u.a. eine Ergonomieverbesserung. Die digitale Planung und die bidirektionale Verknüpfung zwischen Fabrik- (emaPD) sowie Arbeitsebene (emaWD) ermöglicht eine frühzeitige, abgestimmte, effiziente Planung einer wirtschaftlichen und ergonomischen Produktion.

Schlüsselwörter: Digitale Arbeitsplanung, Digitale Fabrikplanung, ema Work Designer, ema Plant Designer, ema Software Suite, Virtuelle Ergonomie, Wirtschaftlichkeit

1. Gestaltung wirtschaftlicher und ergonomischer Arbeit

Ein steigender Kostendruck durch Wettbewerb, Lohn- und Materialkosten, höhere Variantenvielfalt und verkürzte Produktlebens- und Markteinführungszyklen führen dazu, dass Arbeits- und Produktionssysteme schneller und häufiger geplant und rekonfiguriert werden müssen (Spath et al. 2017; Bracht et al. 2018). Bei der Planung und Gestaltung von Produkten, Fabrikstrukturen sowie Arbeitsabläufen sind neben Kosten, Fertigungszeiten, Qualität und Flexibilität die menschengerechte Gestaltung für die spätere Nutzergruppe sowie der fähigkeitsgerechte Einsatz der Arbeitskräfte zu berücksichtigen.

Eine frühzeitige, abgestimmte und effiziente Planung der Produktion und der Fabrikgestaltung ist ebenso wichtig (Bracht et al. 2018). Hierzu können digitale Planungswerkzeuge wie die ema Software Suite unterstützen, da sie eine durchgehende digitale Planung der Fabrik und Arbeitsprozesse bereits in der Planungsphase ermöglichen (Spitzhirm et al. 2021). Am Beispiel einer Waschmaschinenproduktion wird eine iterative Vorgehensweise zur durchgehenden digitalen Planung zwischen Fabrik- und Arbeitsplatzebene vorgestellt.

2. Digitale Fabrik- & Arbeitsplanung zur ergonom. und wirtschaftl. Gestaltung

In den Planungsphasen vor Produktionsbeginn ist die ganzheitliche Betrachtung von Produkt, Prozess und Ressource erforderlich, da zwischen zahlreichen Planungsdisziplinen Interdependenzen und iterative Planungsstände bestehen (Dombrowski et al. 2018). Nachfolgend wird mittels der ema Software Suite eine Vorgehensweise zur iterativen, kombinierten Fabrik- und Arbeitsplanung anhand einer Waschmaschinenmontage vorgestellt. Die betrachtete Waschmaschine besteht, bei insgesamt drei Farbvarianten, aus 86 Einzelteilen und soll in einem verketteten manuellen Arbeitssystem sowie einer vorgelagerten Fertigung mit Spritzgussmaschinen und Arbeitsplätzen zur Teilebearbeitung hergestellt werden. Im ersten Schritt wird die Fertigung und Montage im emaPD geplant. Danach werden die Produktionsbereiche auf Arbeitsplatzebene im emaWD bzgl. Wirtschaftlichkeit, Zeiten und Ergonomie gestaltet. Die jeweils aktuellen Planungsstände können durch die bidirektionale Schnittstelle zwischen den Systemen zur Aktualisierung und Verfeinerung der Planungsdaten ausgetauscht werden.

Auf Basis mathematisch-analytischer Berechnungsmethoden (z.B. Warteschlangentheorie (Manitz 2008)) wird im emaPD eine computergestützte Modellierung, Analyse und Optimierung der Produktion bzgl. Durchlaufzeiten, Flächenbedarf und Herstellkosten durchgeführt. Als Eingaben dienen Produkt- (Planstückzahlen, Stückliste, Losgrößen), Prozess- (Arbeitspläne, Behälterdaten) und Ressourcendaten (Verfügbarkeiten, Kosten, Flächen, Schichtmodelle), die über eine XLSX-Schnittstelle eingegeben werden. Daraus wird bestimmt, ob das Produktionsprogramm (80.000 Waschmaschinen) unter den bestehenden Bedingungen (z.B. Maschinenpark, Rüstzeiten) realisiert werden kann. Zudem werden mögliche Engpässe, ungeplante Stillstände und der kritische Pfad der Produktion identifiziert sowie notwendige Maßnahmen (z. B. Hinzufügen weiterer Maschinen, Pufferplätze) abgeleitet. Die im emaPD definierten Standardarbeitsplätze werden in den emaWD automatisch per Dialog übertragen und angepasst (siehe Abb. 1 Nr.1).

Im emaWD erfolgt die detaillierte Planung und Gestaltung der Arbeitsplätze unter Nutzung anthropometrischer Menschmodelle von kleiner Frau (F05) bis großen Mann (M95) mit unterschiedlichen Fähigkeiten (altersabhängige Beweglichkeitsprofile, Kräfte) zur Gestaltung wirtschaftlicher, ergonomischer und fähigkeitsgerechter Arbeitsprozesse (Ullmann & Fritzsche 2021). Die Planung manueller und teilautomatisierter Prozesse sowie Mensch-Roboter-Interaktionen ist mittels der Prozesssimulation im emaWD möglich. Die Arbeitsplätze werden um weitere externe Objekte aus CAD-Programmen sowie parametrisierbaren Objekten aus der ema-Objektbibliothek (u.a. Werkzeuge, Tische sowie Roboter) erweitert. Auf Basis einer parametrisierten Tätigkeitsbeschreibung (ema-Verrichtungsbibliothek) erfolgt eine automatisch generierte Bewegungsausführung. Dazu agiert das Menschmodell unter Angabe von Rahmenbedingungen (z.B. zu handhabende Objekte, Zielpositionen)

eigeninitiativ. Im Ergebnis kann im emaWD je Arbeitsplatz die Ausführungszeit nach MTM-UAS berechnet und die Ergonomie nach Ausführbarkeitsanalysen (Erreichbarkeit, Sichtanalyse) sowie nach EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet) und NIOSH bewertet werden. Die Optimierung erfolgt bspw. anhand automatisch generierter Kennzahlen wie Laufwege, Flächenbedarf sowie Anteil wertschöpfender Tätigkeiten. Anschließend wird der Ist-Prozess auf Optimierungspotentiale wie z.B. den Einsatz von Robotern an hybriden Arbeitsplätzen (Komenda et al. 2021) oder das Verschieben von Arbeitsinhalten zwischen APs untersucht. Dazu werden mit emaWD geeignete Tätigkeiten und Roboter identifiziert und die Prozesse simuliert. Die Änderungen können über die bidirektionale Schnittstelle auf deren Auswirkungen auf Fabrikgestaltung und Materialfluss im emaPD untersucht und dort entsprechende Anpassungen vorgenommen werden. Die jeweiligen Daten dienen dem emaPD und emaWD jeweils zur Aktualisierung und Verfeinerung der Planungsbasis. Das finale Konzept wird zum Schluss im emaPD und emaWD ausgewertet und dokumentiert.

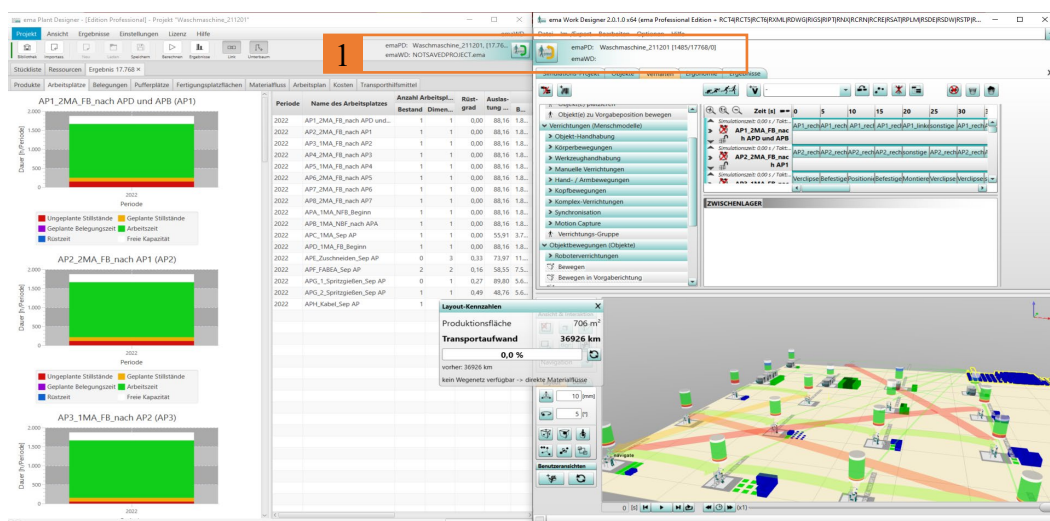


Abbildung 1: Erzeugung Standardarbeitsplätze aus emaPD (links) in emaWD (rechts)

3. Ergebnisse der Planung einer Waschmaschinenproduktion

Für das Jahr 2022 ist eine Produktion von 80.000 Waschmaschinen in drei Farbvarianten (blau: 55T, grün: 15T, orange: 10T) geplant. Auf Basis der Berechnung im emaPD kann die Produktionsmenge mit einer verketteten Montagelinie, bestehend aus 8 Arbeitsplätzen (APs) mit insgesamt 14 Mitarbeitenden in einer 5 Tage Arbeitswoche realisiert werden. Die benötigten Teile werden teilweise zugekauft (z.B. Normteile wie Schrauben, Motor) aber auch selbst gefertigt (u.a. 3 Zuschneidemaschinen, 2 FABEA sowie 3 Spritzgussmaschinen (1 Typ A & 2 Typ B)). Die Produktionsfläche beträgt 688,88 m² bei Herstellkosten von 161,58€. Die Auslastung der einzelnen APs beträgt 93,7% für die Montagelinie und 48,8% für die Spritzgussmaschine Typ A. Ein Potential sind ungeplante Stillstände zwischen den Stationen aufgrund einer unzureichenden Anzahl an Pufferplätzen. Durch die Integration von Pufferplätzen können nach Berechnung u.a. zwischen APB und AP1 (5 Pufferplätze) und AP1 und AP2 (8 Pufferplätze) Blockierzeiten am APB von 348h auf 280 h und am AP1 von 133h auf 120h und die Leerzeiten am AP1 von 86h auf 0h reduziert werden. In Abb. 2 ist ein Auszug der Ergebnisse für die Waschmaschinenproduktion dargestellt.

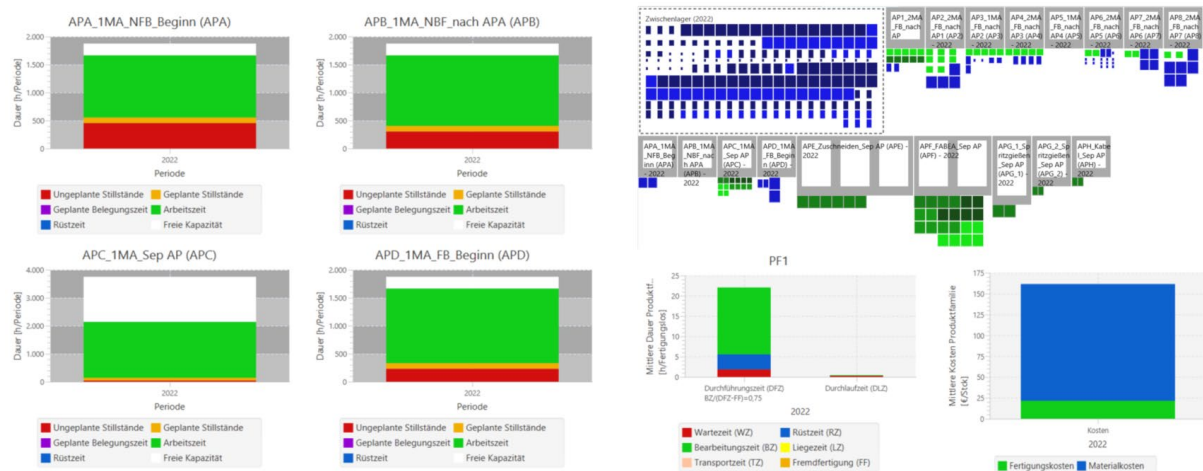


Abbildung 2: Auszug Ergebnisse aus emaPD, links: Auslastung der Arbeitsstationen / Maschinen; rechts oben: Fertigungsplatzflächen; mittig unten: Durchführungszeit, Durchlaufzeit; rechts unten: Herstellkosten (Fertigungs- und Materialkosten)

Anschließend wurden die Fertigungsbereiche und Montagelinie aus emaPD in emaWD, wie in Abb. 1 dargestellt, übertragen und bzgl. Materialfluss inkl. Wegen neu angeordnet (vgl. Abb. 3 linke obere Seite).

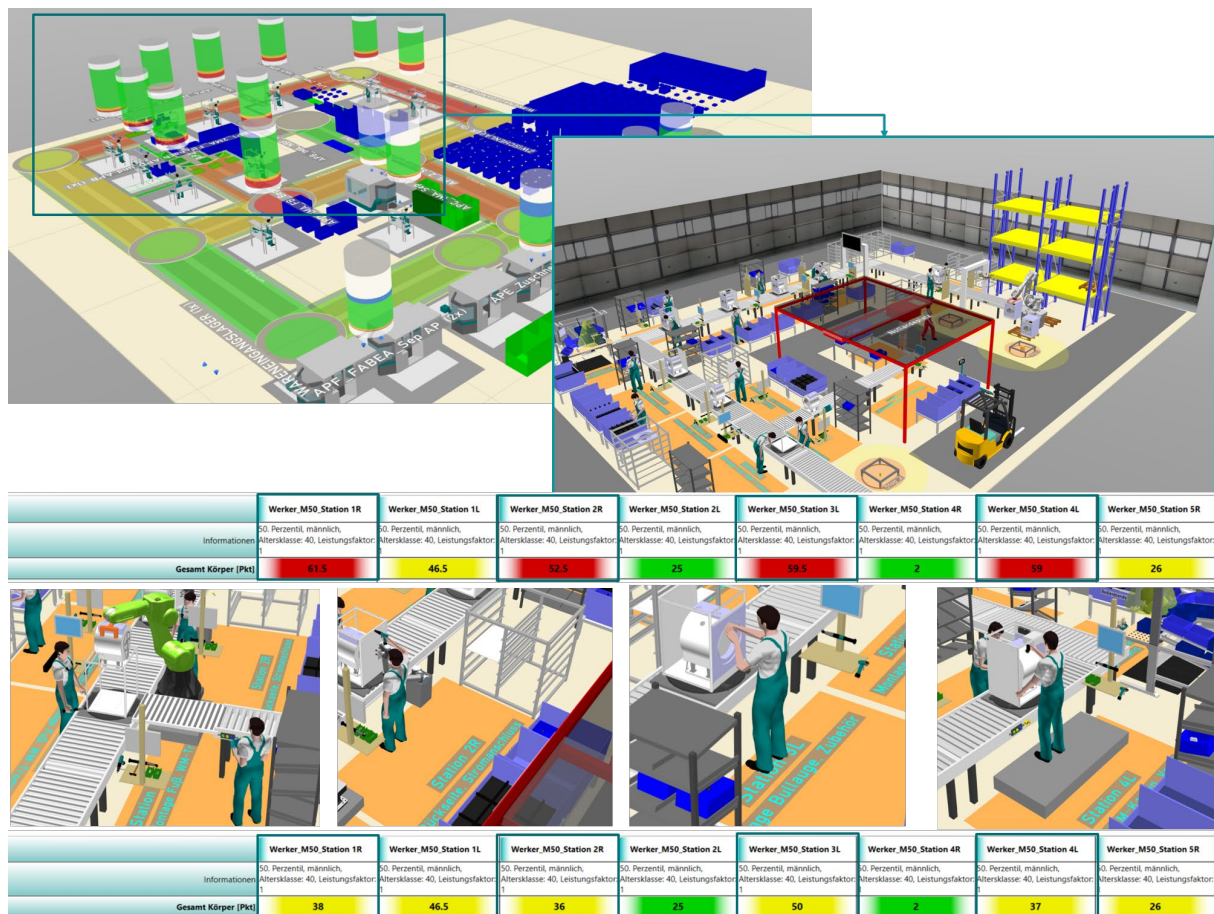


Abbildung 3: links oben: Ausgangszustand in emaWD aus emaPD zzgl. Wege; rechts oben: Detaillierte Szene inkl. Arbeitsprozesssimulation, Ergonomie- und Zeitanalyse; mittig: EAWS-Bewertung Ist-Situation; Unten: EAWS Bewertung inkl. APs nach Optimierung

Auf Basis von ema-Verrichtungen wurde die Montage in emaWD simuliert und notwendige Eingangsgrößen (Gewichte, Kräfte, Platziergenauigkeiten) für die Ergonomie- und Zeitbewertungen hinzugefügt. Wie aus Abb. 3 (mittig) ersichtlich, sind in der Montagelinie 5 rote Arbeitsplätze nach EAWS (> 50 Pkt.) vorhanden. Diese weisen ein erhöhtes Risiko zur Entstehung von muskuloskelettalen Beschwerden auf. Durch geeignete Gestaltungsmaßnahmen wie die Integration eines ©Fanuc CR35ia Roboters am AP1 (Handhabung der Waschtrommel, EAWS: 38 Pkt.), ©UR10e am AP2 (Übernahme der Rückwand, EAWS: 25 Pkt.), einem Podest an AP4L (EAWS: 37 Pkt.) sowie einer Verlagerung von Arbeitsinhalten (z.B. Relaismontage von AP3L zu AP7) wurden die ergonomischen Risiken wesentlich reduziert. Bei der Umgestaltung konnte auch der Platzbedarf und die Taktzeit nach MTM-UAS von 70 auf 65 s reduziert und eine Ausbalancierung der Arbeitsstationen vorgenommen werden. Die Ergebnisse wurden anschließend in den emaPD übertragen.

Die Aktualisierung der Plandaten im emaPD zeigt, dass die Leer- und Blockierzeiten an der Montagelinie auf weniger als 50 h sowie die Herstellkosten um knapp 5 % bei gleichzeitiger Erhöhung des möglichen Outputs reduziert werden konnten.

4. Diskussion der Planungsergebnisse

Die Kombination von Fabrik- und Arbeitsplanung ermöglicht die Nutzung der Vorteile der jeweiligen Teildisziplinen. Mit Hilfe der digitalen Fabrikplanung wird die wirtschaftliche Optimierung von Teilbereichen oder auch der Gesamtfabrik entsprechend definierter Stückzahlen unterstützt. Hierzu werden u.a. Flächenbedarfe, Puffer, Anzahl an Maschinen und Arbeitsplätze sowie Materialflüsse optimiert. Im emaWD kann eine detaillierte Planung und Analyse der Arbeitsprozesse nach wirtschaftlichen, sicherheitstechnischen und ergonomischen Kriterien erfolgen. Hierbei können Aspekte wie Ausführbarkeit (mittels Sicht- oder Erreichbarkeitsanalysen), Gesundheitsrisiko (z.B. nach NISOH, EAWS) im Detail betrachtet werden. Mit der Analyse unterschiedlicher Mitarbeiter Voraussetzungen (Körpergrößen, Beweglichkeit etc.) kann ein fähigkeitsgerechter Einsatz berücksichtigt werden. Die Mitarbeitenden rücken damit stärker in den Mittelpunkt der Planung. So kann durch eine gute ergonomische Gestaltung neben wirtschaftlichen Vorteilen (z.B. Vermeidung ungünstiger und zeitaufwendiger Bewegungen, Verringerung der Ausschussquote, Steigerung der Motivation), eine höhere Flexibilität sowie längere Einsatzfähigkeit der Mitarbeitenden erreicht werden (Fritzsche et al. 2019).

Die direkte Interaktion zwischen emaPD und emaWD ermöglicht auch eine Detaillierung und Beschleunigung der Planung. So stehen umfangreiche Daten zur Planung zur Verfügung (Vorrangfolgen), die nicht aufwendig erst aus anderen Systemen bezogen werden müssen. Weiterhin können Montagezeiten auf Basis der emaWD Simulation zur Konkretisierung der Plandaten im emaPD genutzt werden. Weiterhin bieten umfangreiche Auswertungen in Kombination mit einer grafischen Darstellung inkl. dynamischer Simulation die Grundlage für die Diskussion und Evaluation verschiedener Maßnahmen mit Prozess-Stakeholdern (Planer, Betriebsrat, Produktion etc.). Dies erhöht die Akzeptanz und kann zu einer Verbesserung der Planungsergebnisse beitragen. So konnten im Beispiel die Herstellkosten und ungeplante Stillstände wesentlich reduziert sowie die ergonomischen Bedingungen durch bspw. eine Integration von Roboter an hybriden Arbeitsplätzen verbessert werden.

Bei der Anwendung der Methodik ist der Erstellungsaufwand einzubeziehen. Hierbei unterstützen die integrierten Methoden eine effiziente Erstellung und Analyse der Fabrik und Produktion. Die mathematische Modellierung im emaPD bietet im Vergleich zu einer Simulation eine wesentliche Zeitersparnis bei der Modellerstellung (-90 %) und Rechenzeit (-99 %) bei gleichzeitig hoher Übereinstimmung der Genauigkeit der Prognose (Bolch et al. 2006). Im emaWD können verschiedene Detaillierungen der Simulationserstellung gewählt werden, so dass der Erstellungsaufwand in Abhängigkeit der Zielvorgaben und verfügbaren Daten- und Planungsstände von wenigen Minuten bis Tagen variieren kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Durch die hier vorgestellte kombinierte digitale Fabrik- und Arbeitsplanung konnten wesentliche Verbesserungen bzgl. Wirtschaftlichkeit und Ergonomie erzielt werden. Hierbei bietet die ema Software Suite durch bidirektionale Schnittstellen zwischen emaPD (Fabrikplanung) und emaWD (Arbeitsplanung) ein einfach, intuitiv nutzbares Werkzeug zur kombinierten Betrachtung aller Prozesse und Ressourcen. Dadurch kann der Planungsaufwand (z.B. Vermeidung doppelter, veralteter Planungsstände) reduziert, die Transparenz der Planung und Qualität der Planungsdaten erhöht, ergonomische Analyseergebnisse in der Fabrikplanung einbezogen sowie Kosten- und Flächenbedarfe bei der Arbeitsplanung detaillierter berücksichtigt werden. Zudem können die Gestaltungslösungen frühzeitig abgesichert werden. Die 3D-Visualisierung unterstützt zusätzlich die Kommunikation und die Akzeptanz der geplanten Maßnahmen. Zudem verfügen beide Systeme über verschiedene Schnittstellen (Import- und Export von CAD-Daten und Bewegungen), die für weiterführende Untersuchungen oder Visualisierungen u.a. in Virtual Reality genutzt werden können.

6. Literatur

- Bolch G, Greiner S, de Meer H, Trivedi KS (2006) Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications. Wiley-Interscience; 2. Auflage.
- Bracht U, Geckler D, Wenzel S (2018) Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele. Springer Berlin Heidelberg.
- Dombrowski U, Ruping A (2018) Herausforderungen der Digitalen Fabrik im Kontext von Industrie 4.0. In: ZWF 113 (12), 845–849. DOI: 10.3139/104.112030.
- Fritzsche L, Hölzel C, Spitzhirm M (2019) Weiterentwicklung der Kosten-Nutzen-Bewertung für Ergonomiemaßnahmen anhand von Praxisbeispielen der Automobilindustrie. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg), Arbeit interdisziplinär – analysieren, bewerten, gestalten. (pp. 1-6, Beitrag A.7.2). Dortmund: GfA-Press.
- Komenda T, Spitzhirm M, Spinner C, Schlund S (2021) Wirtschaftliche Mensch-Roboter-Arbeitssystemgestaltung: Erfahrungen aus der Platinenbestückung. ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116(10):657-661. DOI: 10.1515/zwf-2021-0092.
- Manitz M (2008) Queueing-model based analysis of assembly lines with finite buffers and general service times. Computers & Operations Research 35, 2520 – 2536.
- Spath D, Westkämper E, Bullinger HJ, Warnecke HJ (2017) Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Berlin, Heidelberg: Vieweg (VDI-Buch Serie).
- Spitzhirm M, Fritzsche L, Bauer S (2021) Digital Production Planning of Manual and Semi-automatic Tasks in Industry Using the EMA Software Suite. In: Black N.L., Neumann W.P., Noy I (Eds) Proceedings 21st Congress of International Ergonomics Association. IEA 2021. Vol 223. Springer.
- Ullmann S, Fritzsche L (2021) Einsatz digitaler Menschmodelle zur fähigkeitsgerechten Arbeitsgestaltung: Beispiele aus der Praxis. Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Umweltmedizin, Zeitschrift für medizinische Prävention: 10/2021, 594-597.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Technologie und Bildung in hybriden Arbeitswelten

68. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und
Fabrikautomatisierung IFF, Magdeburg

02. – 04. März 2022

GfA-Press

Bericht zum 68. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 02. – 04. März 2022

**Otto-von Guericke-Universität Magdeburg;
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Magdeburg**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Sankt Augustin: GfA-Press, 2022
ISBN 978-3-936804-31-7

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin**

Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003

Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2022 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de