

Produktionslogistische und ergonomische Bewertung U-förmiger Montagesysteme

Michael ZÜLCH, Gert ZÜLCH

*gefora – Beratungs-Gesellschaft für Organisation und Arbeitswirtschaft mbH
Silvanerweg 10, D-76356 Weingarten (Baden)*

Kurzfassung: U-förmige Systeme weisen vielfach bezüglich der Produktionslogistik einige Vorteile auf. Einzelne Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass diesen Vorteilen möglicherweise ergonomische Nachteile gegenüber stehen. Es zeigt sich weiterhin, dass die zu Planung eingesetzten statischen Methoden wegen ihrer allzu optimistischen Ergebnisse wenig geeignet sind und daher einer dynamischen Absicherung mittels Simulation bedürfen. Auf diese Weise lässt sich dann erst erkennen, ob die geplanten produktionslogistischen Kriterien erreicht werden können. Zusätzlich erlaubt die Simulation dann auch eine realitätsnähere Aussage zu ergonomischen Kriterien.

Schlüsselwörter: Montagelayout, hybrides Montagesystem, Mehrproduktprogramm, Tabellenkalkulation, Simulation, Wegezeiten

1. Produktionslogistische Vorteile U-förmiger Montagesysteme

Im Vergleich zu geradlinigen Montagesystemen weisen die vor allem für relativ kleinvolumige Erzeugnisse realisierten U-förmigen einige produktionslogistische Vorteile auf: Da Eingangs- und Ausgangsstation auf derselben Schmalseite des Systems liegen, können zumindest das Ausgangsteil sowie das Fertigerzeugnis an derselben Seite an- bzw. abgeliefert werden. Da in aller Regel von einem Mitarbeiter mehrere Stationen bedient werden, lassen sich verschiedene Formen der Arbeitsorganisation realisieren, die von der Bedienung einer einzelner Stationen über Zuordnungen zu benachbarten oder auch gegenüber liegenden Stationen sowie Mischformen dieser Möglichkeiten bis hin zum Materialfluss begleitenden Personaleinsatz reichen. Wichtige produktionslogistische Bewertungskriterien sind dabei der Ausstoß pro Zeiteinheit, die Durchlaufzeit des Erzeugnisses sowie der Auslastungsgrad der Stationen und Mitarbeiter.

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Zahl der Mitarbeiter je nach Auftragslage variiert werden kann. Sie kann von einer Ein-Stationen-Bedienung über kurzzyklische Formen, bei der einem Mitarbeiter nur wenige Stationen bedient (gelegentlich als Chaku-Chaku-Linie charakterisiert), bis hin zu einer Materialfluss begleitenden Arbeitsorganisation (oftmals als One-Piece-Flow-System bezeichnet) reichen. Dies setzt naturgemäß voraus, dass jeder eingesetzte Mitarbeiter die notwendige Qualifikation und damit ein entsprechendes Training aufweist.

2. Ergonomische Aspekte von Montagesystemen

Enriquez Diaz et al. (2010) weisen auf die Notwendigkeit der ergonomischen Analyse des Materialfluss begleitenden Personaleinsatzes hin. Im Prinzip lassen sich

geradlinige und U-förmige Montagesysteme mit denselben Kriterien ergonomisch bewerten. Hierzu zählt zunächst der Arbeitsenergieumsatz, während auf die aufzubringenden Kräfte und Drehmomente aufgrund der relativ kleinen Gewichte der zu handhabenden Arbeitsgegenstände sowie aufgrund weitgehender Automatisierung der technischen Einrichtungen vielfach als Bewertungskriterium verzichtet werden kann.

Als ein wichtiges Kriterium erweisen sich die durch die Mitarbeiter zurückzulegenden Wegstrecken sowie die Wegzeiten hierfür. Diese können bei U-förmigen Montagesystemen mit Mehrstationenbedienung geringer sein als bei geradlinigen. Andererseits müssen entsprechende Arbeits- und Wegeflächen zur Verfügung stehen (vgl. hierzu die Werte für „Bewegungsflächen“ nach ASR A1.2 und „Fußgängerverkehr“ nach ASR A1.8; siehe z.B. Abbildung 1). Bei den ergonomischen Kriterien sind nicht nur die Mittelwerte von Bedeutung, sondern auch deren Streuungen. Höhere Werte der Streuung weisen auf eine Ungleichförmigkeit hin, die in der Arbeitsgruppe als ungleiche Arbeitsverteilung wahrgenommen werden kann. Als Streuungsmaß wird hier aufgrund der relativ geringen Anzahl der Mitarbeiter die (prozentuale) mittlere Abweichung (vgl. Clauß et al. 2012, S. 39) verwendet.

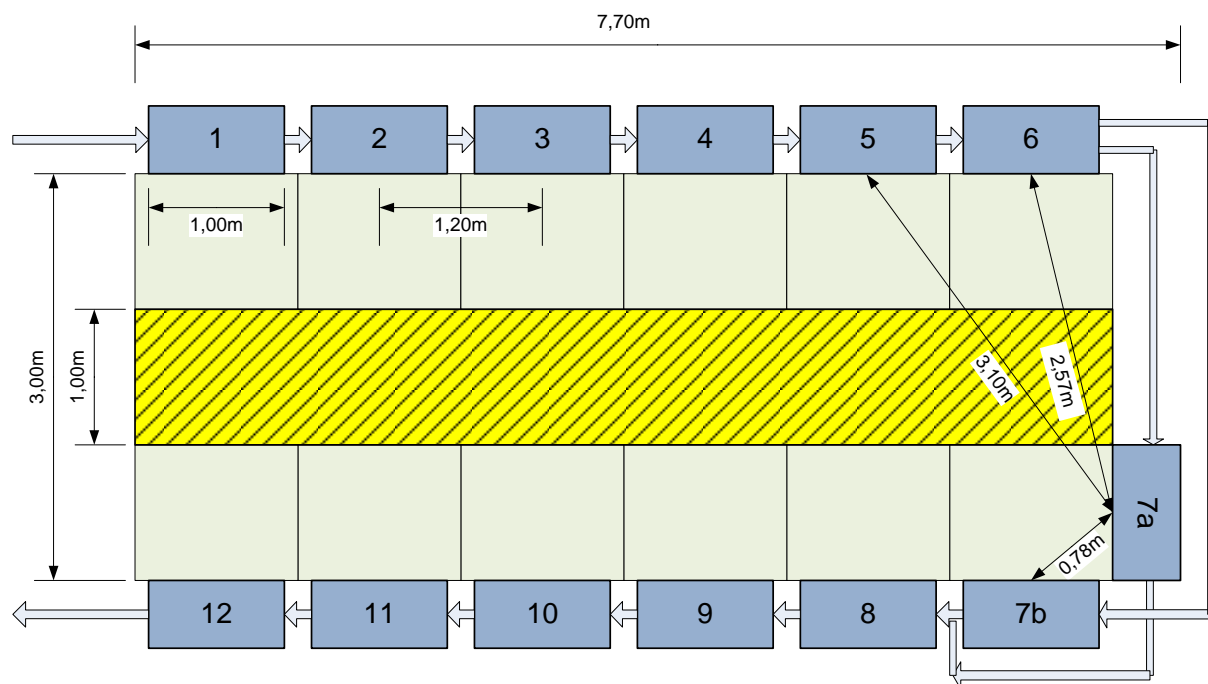


Abbildung 1: U-förmiges Montagesystem für das hybride Buxey-Problem

3. Statische Planung und dynamische Analyse U-förmiger Montagesysteme

In statischer Hinsicht kann die Planung von Teilefertigungs- und Montagesystemen als mehrstufige Abbildung von Netzgraphen interpretiert werden (vgl. hierzu Zülch, Zülch 2014a). Hierbei ist zunächst der Vorranggraph der Aktivitäten auf einen Kapazitätsgraphen der Stationen abzubilden und schließlich dessen Abbildung auf einen Personaleinsatzgraphen der einzusetzenden Mitarbeiter durchzuführen. In Bezug auf U-förmige Montagesysteme zeigen Zülch & Zülch (2014b, S. 2181 f.) auf, dass für die erstgenannte Abbildung dieselben Methoden verwendet werden können wie für die Stationsauslegung geradliniger Montagesysteme. Hingegen sind für die Ableitung des Personaleinsatzgraphen spezielle Methoden erforderlich, die sich in

den von ihnen berücksichtigten Restriktionen unterscheiden. Die Autoren verwenden hierfür den Phantomgraphen nach Urban (1998).

Diese Methoden resultieren allerdings in statischen Lösungen: Bei einigen Methoden werden die Wegezeiten nicht berücksichtigt, bei vielen anderen lediglich die Mittelwerte der Aktivitätszeiten an den Stationen im Falle eines Mehrproduktprogramms nur. Hybride Montagesysteme, bei denen die manuellen Tätigkeitszeiten geringer sind als die Stationszeiten, werden nach Kenntnis der Verfasser nicht berücksichtigt. Darüber hinaus verwenden diese statischen Methoden nur eine einzige Zielfunktion.

Die Ergebnisse der statischen Planung sind daher insbesondere bei Mehrproduktprogrammen durch eine Simulation zu ergänzen. In dieser Weise ersetzt das Simulationsverfahren die „Zielfunktion“, und dies möglicherweise unter Verwendung einer Vielzahl produktionslogistischer, personalbezogener und ggf. auch monetärer Kriterien. Hierfür ist allerdings ein personalorientiertes Simulationsverfahren (VDI 3633, Blatt 6, 2001) erforderlich, beispielsweise das am Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation des Karlsruher Instituts für Technologie entwickelte Verfahren *FEMOS* (*Fertigungs- und Montagesimulator*; vgl. erstmals Grobel 1992, S. 25 ff.).

4. Fallbeispiel zur arbeitsorganisatorischen Gestaltung und Bewertung

Die Planung eines hybriden Mehrprodukt-Montagesystems in U-Form sollte daher in drei Phasen erfolgen: Aus der Abbildung des Vorranggraphen der Montageaktivitäten auf einen Kapazitätsgraphen der Stationen, dessen Abbildung auf einen Personaleinsatzgraphen der einzusetzenden Mitarbeiter mit den daraus resultierenden Qualifikationen sowie der Simulation und deren Auswertung anhand mehrerer Kriterien. Dieser Drei-Phasen-Ansatz soll nachfolgend unter dem Aspekt einer produktionslogistischen und ergonomischen Bewertung anhand eines Fallbeispiels veranschaulicht werden.

Hierfür wird auf ein Modell von Buxey (1974) zurückgegriffen, das für diesen Zweck um einen hybriden Planungsfall mit gemischtem Montageprogramm erweitert wurde (Zülch, Zülch 2014b, S. 2184 ff.). Die manuellen Tätigkeitszeiten betragen dabei ein Drittel der Stationszeiten, während die Wegezeiten einschließlich der notwendigen Beinbewegungen und Körperdrehungen mittels MTM ermittelt wurden. Die Autoren weisen für dieses Fallbeispiel nach, dass ein Materialfluss begleitender Personaleinsatz unter produktionslogistischen Aspekten die beste Lösung darstellt, gefolgt von der Personalzuordnung zu benachbarten Stationen. Die Lösungen beinhalten dabei jeweils zwölf Stationen, wobei eine davon zwei parallele Arbeitsplätze aufweist, sowie vier Mitarbeiter.

Um auch ergonomische Aspekte einzubeziehen, wird dieses Fallbeispiel in der Form abgewandelt, dass die manuellen Tätigkeitszeiten an den Stationen etwa ein Drittel der Stationszeiten betragen (Tabelle 1). Das funktionale Layout des Montagesystems, das für die Berechnung der Wegezeiten notwendig ist, entspricht der Abbildung 1. Zusätzlich wird angenommen, dass aufgrund begrenzter Qualifikationen der Mitarbeiter die Lösung als Materialfluss begleitender Personaleinsatz nicht realisiert werden kann, weshalb auf die bereits genannte zweitbeste Lösung des Personaleinsatzes an benachbarten Stationen ausgegangen wird (Lösung 1). Weiterhin wird angenommen, dass zwei der Mitarbeiter einen permanenten Leistungswandel aufweisen, der bei jedem von ihnen zu einem Zeitgrad (REFA 2011, S. 100) von 75 % führt.

Tabelle 1: Montageprogramm, Stationsstruktur und Personalbedarf des hybriden Buxey-Problems

Buxey-Problem, hybrid														Td [sec]	324	
technisch	ES [h/d*ma]	qBR [sec/d*ma]		CT [sec]		CT [min]		QBE=QBA [sec/d]		CBE=CBA [sec/d]						
personell	ES [h/d*pe]	qMR [sec/d*pe]						CME=CMA=CBE [sec/d]		QME=QMA=QBE [sec/d]						
Montageprogramm Modelmix		s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
		j	1, 2	6, 7, 9, 10	3, 4, 14, 25	5, 24	8, 12, 13, 16, 26	11, 15	17, 18, 20	19, 21	22	23, 27	28			
		i	mi [1/mon]											teB,i [sec]	CMB,i [sec/d]	
teB,is [sec]	1	500	26	26	26	26	26	26	52	25	25	25	21	20	324	162.000
modifiziert	2	300	26	26	24	25	24	23	52	25	24	24	21	20	314	94.200
	3	150	26	24	26	26	23	23	50	28	24	24	24	24	322	48.300
	4	50	21	22	25	24	24	24	50	24	24	24	24	24	310	15.500
teB,s [sec]	(gew.) Summe	1.000	25,75	25,50	25,35	25,60	24,85	24,55	51,60	25,40	24,50	24,50	21,60	20,80	CBA [sec/d]	320.000
															Stationsausl.	0,912
CBA,is [sec/d]	1	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000	26.000	12.500	12.500	12.500	10.500	10.000			
	2	7.800	7.800	7.200	7.500	7.200	6.900	15.600	7.500	7.200	7.200	6.300	6.000			
	3	3.900	3.600	3.900	3.900	3.450	3.450	7.500	4.200	3.600	3.600	3.600	3.600			
	4	1.050	1.100	1.250	1.200	1.200	1.200	2.500	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200			
CBA,s [sec/d]	Summe	25.750	25.500	25.350	25.600	24.850	24.550	51.600	25.400	24.500	24.500	21.600	20.800			
Stationsstruktur																
nBA,is [1]	1	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,481	0,963	0,463	0,463	0,463	0,389	0,370			
	2	0,289	0,289	0,267	0,278	0,267	0,256	0,578	0,278	0,267	0,267	0,233	0,222			
	3	0,144	0,133	0,144	0,144	0,128	0,128	0,278	0,156	0,133	0,133	0,133	0,133			
	4	0,039	0,041	0,046	0,044	0,044	0,044	0,093	0,044	0,044	0,044	0,044	0,044			
nBA,s [1]	Summe	0,954	0,944	0,939	0,948	0,920	0,909	1,911	0,941	0,907	0,900	0,770	0,770	nBA [1]	11,852	
nBA,s [1] aufgerundet		1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	nBA [1] ger.	13	
														CBA [sec/d]	320.000	
														Stationsnutz.	0,912	
Personalbedarf		s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	nBA	13
		j	1, 2	6, 7, 9, 10	3, 4, 14, 25	5, 24	8, 12, 13, 16, 26	11, 15	17, 18, 20	19, 21	22	23, 27	28			
		i	mi [1/mon]											te,i [sec]	CMA,i [sec/d]	
te,is [sec]	1	500	9	9	9	9	9	9	18	9	7	7	7	7	109	54.500
33% von teB,is	2	300	9	9	8	9	8	8	18	9	6	6	7	7	104	31.200
aufgerundet	3	150	9	8	9	9	8	8	17	10	6	6	6	6	102	15.300
	4	50	7	8	9	8	8	8	17	8	6	6	8	8	101	5.050
te,s [sec]	(gew.) Summe	1.000	8,90	8,80	8,70	8,95	8,50	8,50	17,80	9,10	6,50	6,50	6,90	6,90	CMA [sec/d]	106.050
															nMA [1] ger.	4
															Personalausl.	0,982
CMA,is [sec/d]	1	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	4.500	9.000	4.500	3.500	3.500	3.500	3.500			
	2	2.700	2.700	2.400	2.700	2.400	2.400	5.400	2.700	1.800	1.800	2.100	2.100			
	3	1.350	1.200	1.350	1.350	1.200	1.200	2.550	1.500	900	900	900	900			
	4	350	400	450	400	400	400	850	400	300	300	400	400			
CMA,s [sec/d]	Summe	8.900	8.800	8.700	8.950	8.500	8.500	17.800	9.100	6.500	6.500	6.900	6.900			

Zur produktionslogistischen Bewertung werden neben dem Ausstoß pro Arbeitstag von 7,5 Stunden die Stationsnutzung und die Personalauslastung herangezogen, außerdem die mittlere Abweichung der Personalauslastung. Für die ergonomische Bewertung wird die Gruppenbewertungstabelle für den Energieumsatz nach Spitzer et al. (1982, S. 143) verwendet sowie die nach MTM ermittelte Schrittzahl (als Einflussgröße für den MTM-Code LM-[cm]). Für diese beiden ergonomischen Kriterien wird zusätzlich das genannte Streuungsmaß ermittelt.

5. Vergleich von statischer und dynamischer Bewertung

Die statische Lösung des Problems kann für den vorgestellten Fall mittels Tabellenkalkulation berechnet werden. Die Abbildung des Kapazitätsgraphen auf den Personaleinsatzgraphen (Abbildung 2) weist aus, dass bei Zuordnung zu benachbarten Stationen einer der Mitarbeiter vier Stationen bedienen muss, während zwei davon für drei Stationen und einer für zwei Stationen einschließlich der beiden parallelen Arbeitsplätze zuständig sein muss.

Unter produktionslogistischen Aspekten ist dies die vergleichsweise beste Lösung (Tabelle 2). Hinsichtlich der ergonomischen Kriterien ergibt der Energieumsatz nach Spitzer et al. (1982, S. 151) bei vier Mitarbeitern einen Wert im Bereich schwerer Arbeit. Die beiden anderen Lösungen beinhalten fünf Mitarbeiter und sind statisch gesehen als mittelschwer zu bewerten. Statisch ergibt sich, dass der Produktionsausstoß für alle Lösungen die geplante Stückzahl von 1.000 erreicht, bei einer Stationsnutzung von gleichermaßen 91 %. Die Personalauslastung bei Lösung 1 weist mit 98 % bereits darauf hin, dass dies zu einem Engpass führen wird, weshalb dann auch bei den beiden übrigen Lösungen ein Mitarbeiter mehr eingesetzt wird.

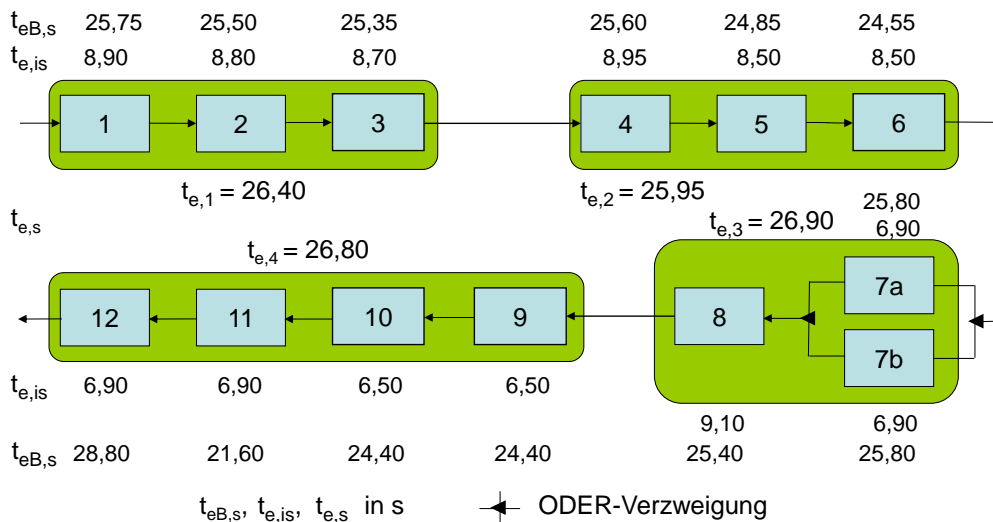


Abbildung 2: Kapazitäts- und Personaleinsatzgraph des U-förmigen Montagesystems für das hybride Buxey-Problem

Die simulative Bewertung zeigt dies entsprechend auf: Der Ausstoß bei Lösung 1 mit vier Mitarbeitern erreicht lediglich 664 Stück, während Lösung 2 mit fünf Mitarbeitern bereits 738 Stück ermittelt. Lösung 3 mit zwei von fünf leistungsgewandelten Mitarbeitern liegt in derselben Größenordnung, weist allerdings unter Einbeziehung der längeren Wegezeiten aufgrund des Leistungswandels eine höhere Personalauslastung auf. Die ergonomischen Werte liegen durchweg im Bereich mittelschwerer Arbeit, allerdings weisen sie Schrittzahlen um die 10.000 auf, die als Empfehlung für einen ganzen Tag gelten (Treut o.J.). Lösung 3 ergibt dabei aufgrund des Leistungswandels erwartungsgemäß die höchste Streuung der Schrittzahlen.

Tabelle 2: Vergleich von statischer und dynamischer Logistik- und Ergonomiebewertung

Bedienungsszenario	Anzahl		Statische Berechnung							
	Stationsbegrenzung	Bediener	Produktionslogistik				Ergonomiebewertung			
			Ausstoß pro Schicht	Stationsnutzung	Personalauslastung	Abweichung Personalausl.	Durchschn. Energieumsatz	Abweichung Energieums.	Durchschn. Schrittzanz.	Abweichung Schrittzanz.
Hohe Personalauslastung	4	4	1000	91%	98%	1%	6.461	6%	14.250	17%
Stationsbegrenzung	3	5	1000	91%	79%	15%	5.089	21%	10.600	27%
2 leistungsgewandelte Mitarbeiter	3	5	1000	91%	87%	9%	5.540	17%	9.800	39%

Bedienungsszenario	Anzahl		Dynamische Berechnung							
	Stationsbegrenzung	Bediener	Produktionslogistik				Ergonomiebewertung			
			Ausstoß pro Schicht	Stationsnutzung	Personalauslastung	Abweichung Personalausl.	Durchschn. Energieumsatz	Abweichung Energieums.	Durchschn. Schrittzanz.	Abweichung Schrittzanz.
Hohe Personalauslastung	4	4	664	64%	88%	5%	4.290	30%	9462	17%
Stationsbegrenzung	3	5	738	71%	78%	17%	4.494	35%	10.600	27%
2 leistungsgewandelte Mitarbeiter	3	5	736	71%	86%	10%	4078	17%	9.695	41%

6. Schlussfolgerungen zur Bewertung U-förmiger Montagesysteme

Die Ergebnisse zeigen, dass eine statische Auslegung U-förmiger Montagesysteme allzu optimistisch ist und daher durch eine dynamische Analyse mittels Simulation ergänzt werden muss. Wie auch Zülch & Zülch (2014b, S. 2186 ff.) gezeigt haben, ist ebenso eine Auslegung ohne Berücksichtigung von Wegezeiten der Mitarbeiter unzureichend. Insbesondere bei hybriden Mehrprodukt-Montagesystemen kommt es im dynamischen Ablauf zu Engpasssituationen in der Interaktion von Mitarbeitern und Stationen, die in einer statischen Lösung nicht erkannt werden können.

Als weiterführendes Forschungsthema lässt sich der Einfluss der Wegezeiten im Verhältnis zu den manuellen Tätigkeitszeiten bzw. zu den Stationszeiten benennen. Außerdem ergeben sich vielfältige Fragestellungen in Bezug auf die Einbeziehung arbeitspsychologischer Kriterien. Einen möglichen Ansatz hierzu bieten hoch kontrollierte Bewegungselemente nach MTM (vgl. Zülch, Braun 1994). Schließlich ist auch die Frage der Störungsanfälligkeit U-förmiger Montagesysteme zu klären, die insbesondere bei Material begleitendem Personaleinsatz zu nicht unerheblichen Produktionsausfällen führen können und daher mit Stationspuffern bestmöglich aufgefangen werden müssen.

7. Literatur

- ASR A1.2, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2013) Raumabmessungen und Bewegungsflächen. Ausgabe September 2013.
- ASR A1.8, Technische Regeln für Arbeitsstätten (2012) Verkehrswege. Ausgabe November 2012.
- Buxey GM (1974) Assembly Line Balancing with Multiple Stations. *Management Science*, 20:1010-1021.
- Clauß G, Finze FR, Partzsch L (2011) *Grundlagen der Statistik*. Thun, Frankfurt/M.: Harri Deutsch, 6. Aufl.
- Enriquez Diaz A, Frieling E, Thiemich J, Kreher S (2010) Auswirkung eines Chaku-Chaku-Montagesystems auf die älteren Beschäftigten am Beispiel der Abgasanlagen-Montage. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Ed), *Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten*, 801-804.
- Gobel T (1992) *Simulation der Organisation rechnerintegrierter Produktionssysteme*. Karlsruhe Uni: Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation (ifab-Forschungsberichte aus dem Institut für Arbeitswissenschaft und Betriebsorganisation der Universität Karlsruhe, Band 3 - ISSN 0940-0559)
- REFA-Bundesverband (Hrsg.) (2011) *REFA-Lexikon*. München: Carl Hanser, 2. Aufl.
- Spitzer H, Hettinger T, Kaminsky G (1982) *Tafeln für den Energieumsatz bei körperlicher Arbeit*. Berlin, Köln: Beuth, 6. Aufl.
- Treut M (o.J.) *Das Projekt 10.000 Schritte*. Berlin: Charité Hochschulambulanz für Naturheilkunde (Hrsg.). Accessed October 22, 2014. <http://zehntausendschritte.de/main/10000/index.php>.
- Urban TL (1998) Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science*, 44:738-741.
- VDI 3633, Blatt 6 (2001) *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Abbildung des Personals in Simulationsmodellen*. Berlin: Beuth.
- Zülch G, Braun WJ (1994) Bewertung von Arbeitssystemen in der manuellen Montage. In: Zink KJ, *Wettbewerbsfähigkeit durch innovative Strukturen und Konzepte*. München: Hanser, 151-168.
- Zülch G, Zülch M (2014a) Extending precedence diagrams, capacity graphs and staff assignment graphs to model-mix production systems. In: Grubbström RW, Hinterhuber HH (Eds), *Eighteenth International Working Seminar on Production Economics*, Innsbruck, February 24-28, 2014. Preprints vol. 1:543-552.
- Zülch G, Zülch M (2014b) Planning hybrid U-shaped assembly systems using heuristics and simulation. In: Tolk A, Diallo SY, Ryzhov IO, Yilmaz L, Buckley S, Miller JA (Eds) *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*: New York NY: Association for Computing Machinery Order Department, Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2180-2191.