

Analyse der physischen Belastungen und muskuläre Beanspruchungen an der simulierten U-Montagelinie mit unterschiedlichen Mechanisierungsgrad in der Prozesslernfabrik der TU Darmstadt

Jurij WAKULA, Konstantin FICHTNER, Ralph BRUDER

*Institut für Arbeitswissenschaft (IAD), Technische Universität Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, D-64287 Darmstadt*

Kurzfassung: Körperliche Belastungen und muskuläre Beanspruchungen der oberen und unteren Extremitäten wurden an einer U-Montagelinie mit unterschiedlichen Mechanisierungsgraden (MG) in der CIP der TU Darmstadt analysiert. Die simulierte U-Linie mit fünf Arbeitsstationen hatte eine Länge von ca. 2m. und eine Breite von ca. 1,3m. Bei der Arbeit mit MG1 betrug die Zykluszeit ca. 82 Sek und beim MG 2 ca. 74 Sek. Die körperlichen Belastungen wurden anhand des EAWS-Verfahrens analysiert. Die EA-Aktivitäten wurden an 6 Muskeln der oberen und der unteren Extremitäten mittels OEMG-Methode analysiert. 14 männliche Probanden im Alter von 19-28 Jahren nahmen an der Studie teil. Es wurden Erkenntnisse zur Auswirkung unterschiedlicher MGs der Linie auf die Beanspruchungen der Extremitäten gewonnen.

Schlüsselwörter: Physische Belastungen, muskuläre Beanspruchungen, U-Montagelinie

1. Einleitung

Montage nach dem „One Piece Flow“-Prinzip

Aus kundenspezifischen Gründen müssen heutzutage immer mehr Produkte mit vielen Teilen und Produktvarianten montiert werden, woraus eine verbrauchsnahe Bereitstellung zahlreicher unterschiedlicher Einzelteile und Werkzeuge resultiert. Hierbei stößt jedoch der Einsatz von klassischen Einzelmontageplätzen an seine Grenzen. Viele Einzelteile und Werkzeuge machen den Arbeitsplatz unübersichtlich und eine Aufteilung auf zwei Einzelplätze erhöht den Transport, die Wartezeit und die Materialpuffer. Um dennoch das Produkt mit höchst möglicher Qualität, zu niedrigen Kosten und in möglichst kurzer Zeit zu montieren, wird das Ablaufprinzip des „One-Piece-Flow“ (Einzelstückfließfertigung) verwendet. Dieses Prinzip hat ihren Ursprung im Toyota Produktionssystem und basiert auf dem Just-In-Time Prinzip des „Lean-Production“-Ansatzes (Kummer, 2009). Der Vorteil dabei ist, dass die mehrstufige Bearbeitung eines Teils ohne Zwischenlagerung an verschiedenen Arbeitsstationen stattfindet. Auf diese Weise kann trotz hoher Variantenvielfalt die Flexibilität der Ausbringungsmenge gewährleistet werden. Um lange Wege zwischen der Anfangs- und Endstation zu vermeiden, werden die Arbeitsstationen typischerweise in einem U-Layout angeordnet. Die Gesamtheit der Arbeitsstationen in dieser Anordnung wird auch U-Montagelinie genannt. Es werden zwei Betriebsarten einer U-Montagelinie unterschieden: das *Karawanensystem* und das *Handübergabesystem*. Dabei ist die Voraussetzung für den Einsatz solcher Systeme einerseits die umfassende

Qualifikation der Mitarbeiter, welche in der Lage sind, alle Arbeiten an den Stationen auszuführen, aber auch schnell umrüstbare Arbeitsstationen bzw. Werkzeuge, um die Flexibilität zu bewerkstelligen (Lotter & Wiendahl, 2006). Schließlich ergeben sich Möglichkeiten zur Erweiterung der Tätigkeit (Job Enlargement) oder zu einem rotierenden Einsatz (Job Rotation) der Mitarbeiter, wie auch zur Bildung autonomer Gruppen. In der U-Montagelinie werden Bauteile und Bauteilgruppen mit bestimmtem Gewicht und kurzen Zyklen verbaut, was oft zu einer hohen einseitigen dynamischen Belastung der oberen Extremitäten führen kann. In der U-Montagelinie entfallen meistens die Nebenaufgaben wie z.B. die Materialbereitstellung. Wird der „One-Piece-Flow“ in einer U-Montagelinie betrachtet, so sind die relevanten körperlichen Belastungen der oberen Extremitäten und des Schultergürtels durch kurze Bewegungszyklen mit hochdynamischen Hand-Armbewegungen charakteristisch. Belastung der unteren Extremitäten zeichnet sich durch den Wechsel zwischen „Stehen“ und „Gehen“ mit „seitlichem oder normalem Gehen“ aus, bedingt durch den Rundlauf der Arbeitsperson im U-Layout. Dabei muss darauf geachtet werden, dass das „seitliche“ Gehen ein anderes Belastungsmuster darstellt als ein „normales“ Gehen und zu höheren Beanspruchungen der Beinmuskulatur führen kann (WAKULA et al. 2016).

Ziel dieser Studie war es, die körperlichen Belastungen und die muskulären Beanspruchungen an den oberen und unteren Extremitäten in der U-Montagelinie in der CIP-Prozesslernfabrik zu analysieren um den Einfluss des Mechanisierungsgrades der U-Linie darzustellen.

2. Methodik und Versuchslayout

In Anlehnung an das einfache Belastungs-Beanspruchungskonzept nach Rohmert (1984) wurde die Methodik und das Versuchsdesign für die Studie erarbeitet. Dabei wird die Analyse der Belastungen der oberen Extremitäten und des Gesamtkörpers mit Hilfe des EAWS-Verfahrens (Schaub et al. 2012) durchgeführt. Die objektiven Beanspruchungsdaten an den oberen und unteren Extremitäten wurden mit Hilfe der Oberflächen Elektromyographie (OEMG, AWMF 2013) gemessen. Des Weiteren wurden Video- und Fotoaufnahmen für die Analyse der Körperbewegungen und -haltungen gemacht sowie die Zyklusdauer ermittelt.

2.1 Versuchsaufbau

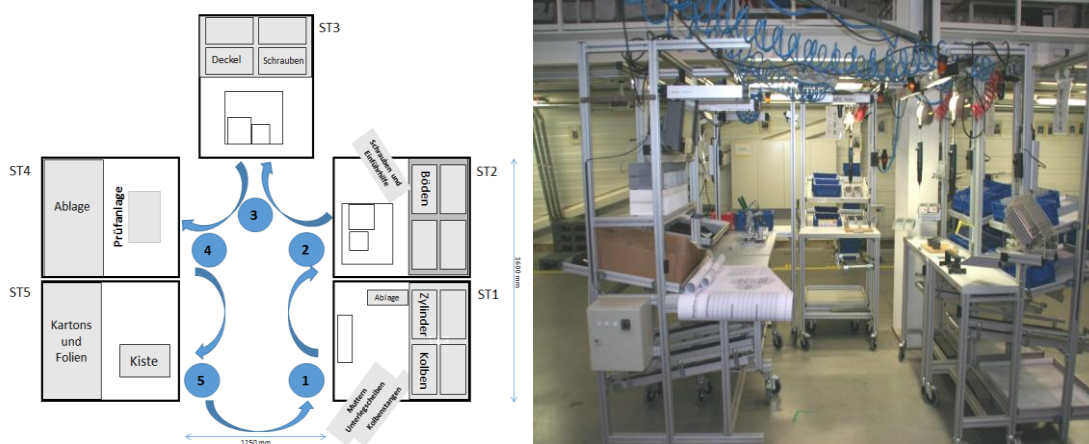


Abbildung 1: U-Linie zur Montage von Pneumatikzylinder in CIP -Lernfabrik

Tabelle 1: Eigenschaften der Probandengruppen

	Alter (Jahre)	Körpergröße (cm)	Gewicht (kg)
Probandengruppe 1	23 ± 2,2	173,4 ± 2,3	68,7 ± 8,1
Probandengruppe 2	24,2 ± 2,8	188 ± 1,0	83,1 ± 5,2

Für den Versuchsaufbau wurde das Center für industrielle Produktivität (CIP) des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt (<http://www.prozesslernfabrik.de/>) genutzt. Das CIP ist sehr stark an eine industrielle Produktionshalle angelehnt, wodurch eine realitätsnahe Arbeitsumgebung entsteht. Die Montagetätigkeit wird auf einer simulierten Montagelinie für Pneumatikzylinder mit einem Endgewicht von ca. 0,97 kg der Firma Bosch-Rexroth durchgeführt. Die Linie wurde in einem U-Layout aufgebaut und besteht aus 5 Stationen, wovon 3 Montage-, eine Prüf- und eine Verpackungsstation sind (s. Abb.1). Der Bewegungsraum ist dabei 1,25 m breit und 1,6 m lang, daraus ergibt sich pro Zyklus ein Gehweg von ca. 5,7 m. Bei der Arbeit mit MG 1 betrug die Zykluszeit ca. 82 Sek und beim MG 2 - ca. 74 Sek. Die Probanden bewegen sich in der Gegenuhrzeigerrichtung von Station 1 bis zur Station 5. Die Höhe der Arbeitsflächen ist bei jeder Station gleich groß und beträgt 100 cm.

Um den Einfluss des Mechanisierungsgrades nach Ulrich (1968) auf die Montagetätigkeit zu untersuchen, werden zwei verschiedene Verschraubungskombinationen der Bauteile unterschieden. Der erste Fall mit MG1 stellt das Verschrauben der Kolbenmutter an Station 1, sowie der 8 Schrauben an Station 2 und 3 mit Hilfe eines Pneumatikschraubers dar. Dafür ist jeweils ein Schrauber über jedem der 3 Arbeitsplätze an einem Gewichtsausgleicher befestigt und wird beim Loslassen über eine Spiralfeder automatisch in die Anfangsposition gebracht. Die Verschraubung erfolgt durch das Drücken des Schraubers auf die Schraube und stoppt automatisch beim Aufheben des Druckes. Dem gegenüber kommt im zweiten Fall (MG2) an Station 1 ein Maulschlüssel zum Einsatz. Des Weiteren teilen sich Station 2 und 3 einen Akkuschauber, welcher nach dem Fügevorgang je nach Prozessfortschritt mitgenommen bzw. seitlich auf die Arbeitsfläche abgelegt wird.

2.2 Probanden

An der Studie nahmen insgesamt 14, ausschließlich männliche Personen mit einem Durchschnittsalter von 23,6±2,5 Jahren teil. Diese wurden in zwei Gruppen nach persönlichen Merkmalen: Körpergröße und Körpergewicht aufgeteilt (s. Tabelle 1), da diese Merkmale die Arbeitshaltungen und damit die muskuläre Beanspruchungen deutlich beeinflussen.

Tabelle 2: Ausgewählte Muskeln für die Studie in CIP

Obere Extremitäten	Abkürzung	Untere Extremitäten	Abkürzung
M. biceps brachii	BICEPS	M. tibialis anterior	TIB.ANT.
M. trapezius pars descendens	UPPER TRAPS.	M. quadriceps femoris (vastus lateralis)	VLO.
M. Extensor carpi radialis	EXTENSOR CARP.RAD.	M. gastrocnemius (lateralis)	LAT. GASTRO.

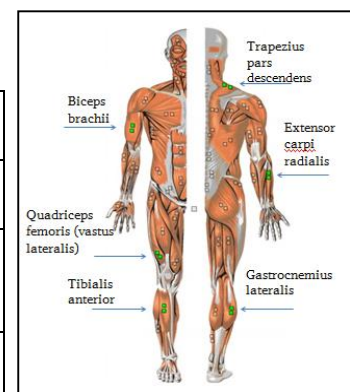


Abbildung 2: Analyzierte Muskeln

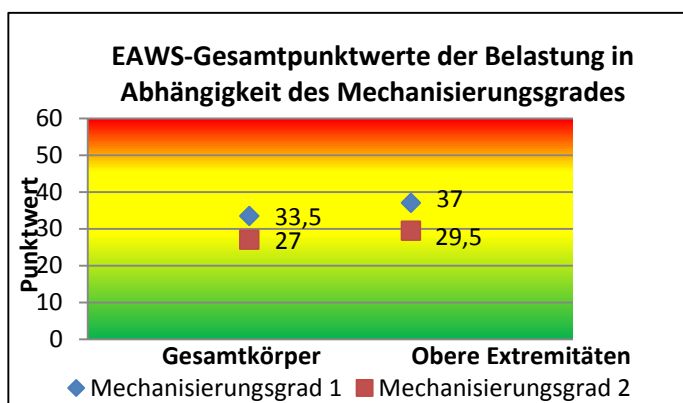


Abbildung 3: EAWS – Ergebnisse aus Belastungsanalyse

Die Auswahl der Muskeln wurde, angelehnt an die Vorarbeit am IAD (s. Wakula et al, 2016) getroffen. Für diese Studie wurden jeweils drei Muskeln in oberen und unteren Extremitäten der rechten Körperseite ausgewählt (s. Tabelle 2).

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Belastungsanalysen mit EAWS-Verfahren

Aus Abbildung 3 wird ersichtlich, dass sowohl die Belastung des gesamten Körpers (Punktwert 33,5) als auch die der oberen Extremitäten (Punktwert 37) beim Mechanisierungsgrad 1 im Vergleich zum Mechanisierungsgrad 2 höher liegt. Diese Ergebnisse stellen dar, dass eine höhere körperliche Belastung durch einen niedrigeren Mechanisierungsgrad hervorgerufen wird.

Beide Punktwerte 33,5 und 37 indizieren den gelben Bereich des EAWS-Ampelschemas, welcher vorschlägt ergonomische Maßnahmen zur Risikobeherrschung zu ergreifen, da bei dieser Tätigkeit ein mögliches gesundheitliches Risiko entstehen könnte, besonders für die älteren Arbeitspersonen.

3.2 EMG- Ergebnisse aus der Beanspruchungsanalysen

Zur Mittelung der Werte in den Abbildungen wurden die 10 Zyklen des jeweiligen Mechanisierungsgrades bei allen 14 Probanden hinzugezogen.

Bei der Betrachtung der muskulären Beanspruchung in den oberen Extremitäten (Abb. 4) ist erkennbar, dass es in allen drei gemessenen Muskeln zu einer höheren Beanspruchung bei dem Mechanisierungsgrad 1 kommt.

Dabei wird der *M. extensor carpi radialis* am höchsten beansprucht gefolgt von *M. trapezius pars descendens* (Traps). Bezogen auf diesen Muskel ist die Montage mit dem MG 2 für obere Extremitäten weniger beansprucht als beim MG 1 (um ca. 2 % von MVC (maximal voluntary contraction)).

Die Ergebnisse der Beanspruchungsanalyse in den Muskeln der oberen und unteren Extremitäten sind in der Abb. 5 dargestellt.

Aus den Werten zu den oberen Extremitäten wird deutlich, dass diese während der Montagetätigkeit an der Linie fast doppelt so hoch beansprucht werden als die unteren. Aus der Abbildung ist erkennbar, dass die Tätigkeiten an der Linie mit MG 2

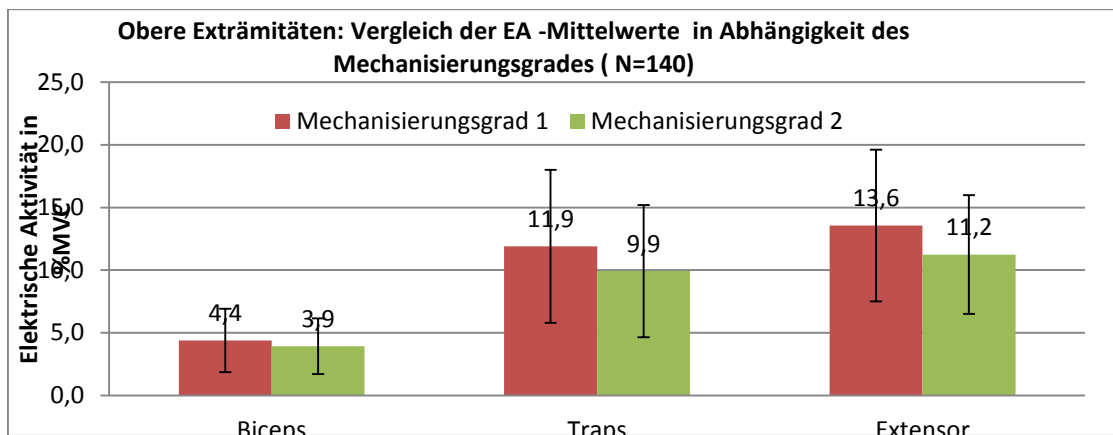


Abbildung 4: Vergleich der EA-Mittelwerte in drei Muskeln der oberen Extremitäten bei MG1 & MG2

höhere Beanspruchungen in allen drei Muskeln der unteren Extremitäten hervorrufen. Auch der Einfluss der Körpergröße auf die muskuläre Beanspruchung der oberen Extremitäten beim gleichen Mechanisierungsgrad der Linie wurde analysiert (s. Abb. 6).

Hier ist erkennbar, dass die „kleineren“ Probanden (PG 1) doppelt höhere EA-Werte im Schulterbereich (*M. trapezius pars descendens*) haben als die „größeren“ (PG 2), was hauptsächlich mit der Arbeitsflächenhöhe an der U-Linie zusammenhängt.

Zusätzlich zur Analyse der mittleren EA wurden die dynamischen und statischen EA-Anteile betrachtet, welche eine Aussage darüber treffen sollten, wie hoch der Muskel durch Stehen /Gehen bei der Montage beansprucht wird.

4. Diskussion und Fazit

Trotz eines geringen Unterschieds in Mechanisierungsgrad der U-Linie erzielt der MG 1 einen höheren EAWS-Belastungspunktwert sowohl beim Gesamtkörper, als auch bei den oberen Extremitäten. Beide Mechanisierungsgrade liegen eng im EAWS-grün-gelben Bereich.

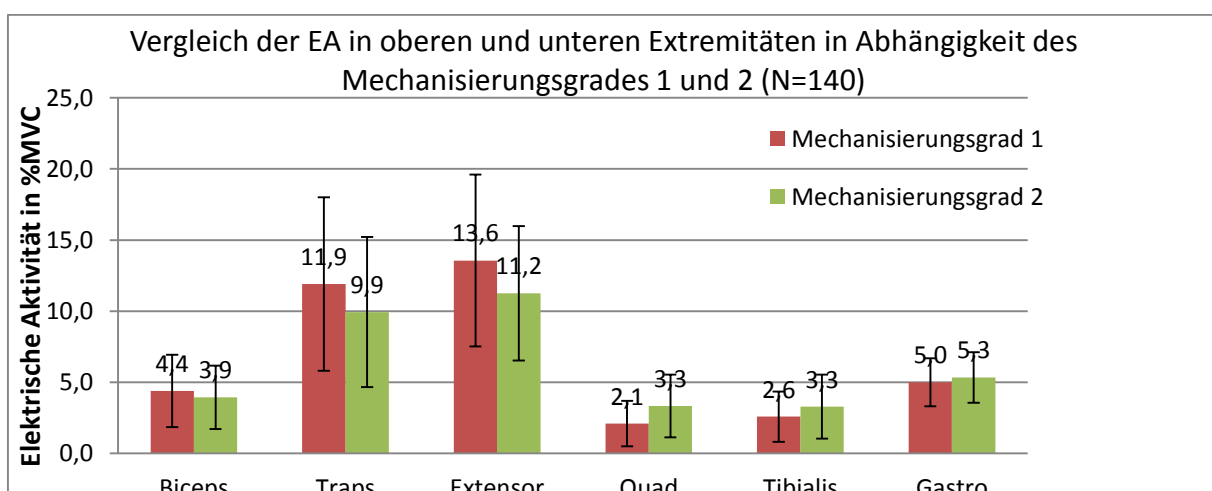


Abbildung 5: Vergleich der EA-Mittelwerte in Muskeln der oberen und unteren Extremitäten

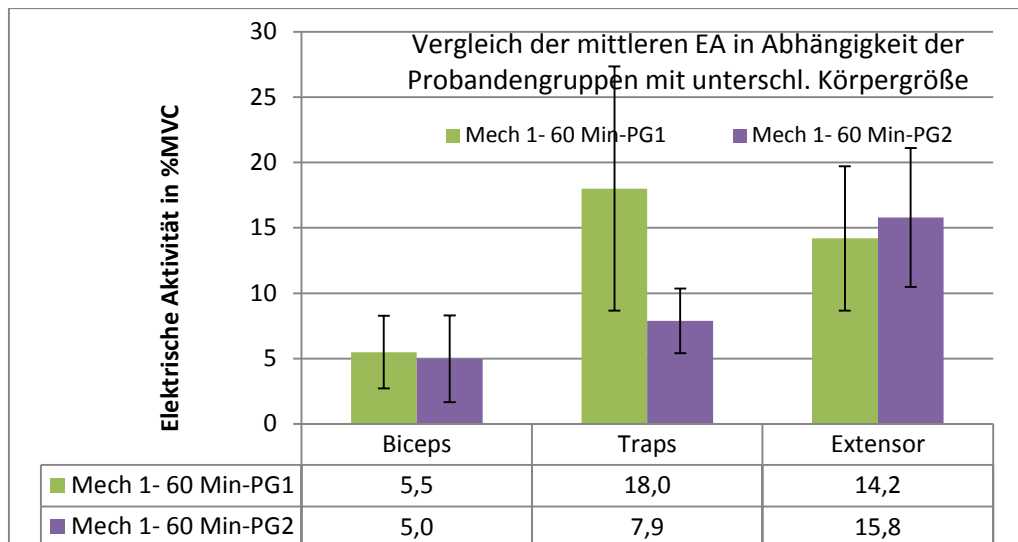


Abbildung 6: Vergleich der mittleren EA in Abhängigkeit der Körpergröße bei MG1 (N=70;10 Zyklen)

Die Beanspruchungsdaten zeigen eine niedrige elektrische Aktivität von 2-15 %MVC an. Es konnte eine geringfügig höhere Beanspruchung in den oberen Extremitäten bei MG 1 aufgezeigt werden.

Insgesamt wurden bei zwei Mechanisierungsgraden nur geringfügige Veränderungen in unteren Extremitäten im Bereich von 0,3 %MVC (Gastro) bis maximal 1,2 %MVC (Quad.) festgestellt. Hier wurden etwas höhere EA-Werte beim MG2 registriert, da die Probanden etwas schneller in der Bewegungen zwischen Stationen waren (ca. 74 Sek im Vergleich zur Zykluszeit ca. 82 Sek bei MG1).

5. Literatur

- AWMF online (2013). Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft- Arbeitsmedizinische S2k-Leitlinie der Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin (DGAUM) und der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA). AWMF online-Das Portal der wissenschaftlichen Medizin.
- Lotter B, Wiendahl H.-P. (2006). *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis: Ein Handbuch Fur Die Praxis* (Auflage: 2006). Berlin ; New York: Springer
- Rohmert, W. (1984). Belastung-Beanspruchungs-Konzept. *Z. Arb. Wiss.*, 38(IADN: 0741), 193–200
- Schaub K, Caragnano G, Britzke B, Bruder R (2012): The European Assembly Worksheet. [Online-Edition: www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1463922] In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* pp. 1-23. ISSN 146-536X (2012).
- Ulrich E. (1968). Mitteilung aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung, *Heft 3*.
- Wakula J, Möglich D, Bruder R (2016) „Normales“ vs. „seitliches Gehen“ bei simulierten einfachen Montagetätigkeiten - Analyse der muskulären Beanspruchungen in den Beinen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.) *Arbeit in komplexen Systemen. Digital, vernetzt, human?!.* Dortmund: GfA-Press.

Danksagung: Die Autoren danken der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) und der Berufsgenossenschaft BG ETEM für die Förderung des Projektes „U-Linie Montagesysteme“ in dessen Rahmen diese Studie realisiert wurde. Unser Dank gilt auch dem Fachgebiet PTW der TU-Darmstadt für die organisatorische Unterstützung im CIP.