

# Kombinierte Beurteilung physischer Belastungen in manuellen Fertigungsprozessen

Ulrich GLITSCH, Ulrike HOEHNE-HÜCKSTÄDT und Rolf ELLEGAST

*Institut für Arbeitsschutz der DGUV - IFA  
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin*

**Kurzfassung:** Das generelle Ziel der Produktivitätssteigerung, insbesondere bei manuellen Fertigungsprozessen hat zu Tätigkeiten mit moderater physischer Belastung geführt, die jedoch durch eine hohe Wiederholungsfrequenz und Monotonie gekennzeichnet sind. Da im Bereich der quantitativen Arbeitsplatzbewertung bisher geeignete Instrumente für solche Arbeitsplätze weitgehend fehlen, sollen durch einen kombinierten Ansatz von Bewegungsanalyse und Elektromyografie (EMG) mögliche Engpässe im Sinne von Monotonie, Repetition und Zwangshaltungen in Verbindung mit dauerhaft erhöhter Muskelanspannung und unzureichenden Erholzeiten aufgedeckt werden. Ziel ist die Etablierung eines standardisierten und objektiven Verfahrens zur Bewertung von hoch verdichteten manuellen Fertigungsprozessen.

**Schlüsselwörter:** Physische Belastung, Monotonie, Bewegungsanalyse, Elektromyografie, Erholzeiten.

## 1. Einleitung

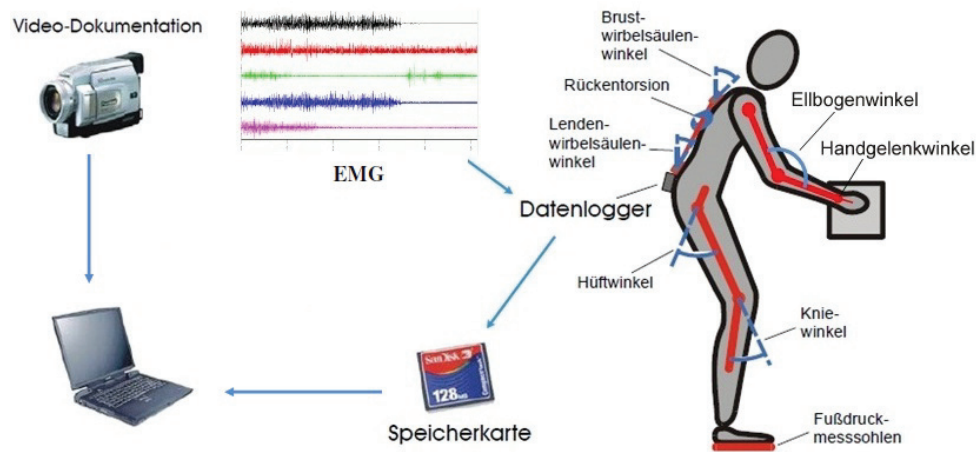
Das generelle Ziel der Produktivitätssteigerung, insbesondere bei manuellen Fertigungsprozessen, führte in den letzten Jahrzehnten zu erheblichen Veränderungen der Tätigkeiten bzw. der Arbeitsgänge. Einerseits wurde versucht, schwere, physisch belastende Tätigkeiten durch maschinelle Unterstützung zu erleichtern oder völlig zu ersetzen. Andererseits wurden Pausenzeiten durch Wegestrecken oder Wartezeiten an Fertigungsmaschinen eliminiert bzw. mit anderen Tätigkeiten aufgefüllt. Die daraus entstandenen Arbeitsplätze zeichnen sich durch eine nur moderate physische Belastung aus, wenn man nur den einzelnen Fertigungstakt betrachtet. Auf eine ganze Schicht bezogen, ergeben sich jedoch durch die Tätigkeitsverdichtung sehr große Wiederholungszahlen mit vielfach gleichartigen bis monotonen Aktionen – insbesondere der oberen Extremitäten.

Da im Bereich der quantitativen Arbeitsplatzbewertung bisher geeignete Instrumente für solche Arbeitsplätze weitgehend fehlen, sollen durch einen kombinierten Ansatz von Bewegungsanalyse und Elektromyografie (EMG) mögliche Engpässe im Sinne von Monotonie, Repetition und Zwangshaltungen in Verbindung mit dauerhaft erhöhter Muskelanspannung und unzureichenden Erholzeiten aufgedeckt werden. Ziel ist die Etablierung eines standardisierten und objektiven Verfahrens zur Bewertung von hoch verdichteten manuellen Fertigungsprozessen.

## 2. Methode

Als Basis für die Analyse der verschiedenen Körperhaltungen und Bewegungen

an realen Arbeitsplätzen dient das CUELA-System (Ellegast et al. 2006). Die Körperwinkel bzw. die Segmentlagen werden über ein kombiniertes Arrangement aus Accelerometern, Gyroskopen und Potentiometern bestimmt (vgl. Abbildung 1). Die Abtastrate beträgt 50 Hz, und mit einer Aufzeichnungsdauer über mehrere Stunden können bei Bedarf ganze Arbeitsschichten analysiert werden.



**Abbildung 1:** Prinzipskizze des CUELA-Systems zur Analyse der Körperhaltung

Ergänzt wird das CUELA-System durch ein Vierkanal-EMG-System (Fa. Biomed, Jena), das die Roh-EMG-Signale in gleitende RMS-Werte (RMS = Root Mean Square) überführt, so dass diese synchron mit den CUELA-Daten aufgezeichnet werden können. Die Normierung der RMS-Werte geschieht über isometrische Tests zur maximalen Willkürkontraktion (MVC).

Um explizit Greifkräfte bestimmen zu können, erfolgt zu Beginn einer Messung die Kalibrierung des EMG der Unterarmmuskeln mit einem elektronischen Handkraftmesser (Pablo, Fa. Tyromotion, Graz). Hierzu werden dynamisch die zyklisch aufgebrauchten Maximalkräfte in den betreffenden Greifarten aufgezeichnet und später mit den entsprechenden RMS-Werten des EMG ins Verhältnis gesetzt.

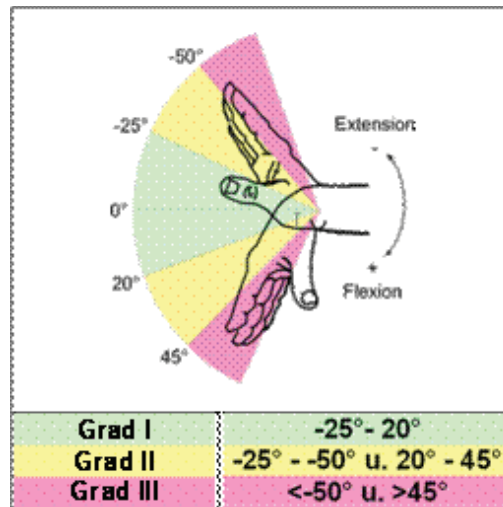
### 3. Ergebnisse

Der hier entwickelte Messansatz fokussiert die oberen Extremitäten und den oberen Rücken einschließlich des Halses. Betrachtet werden die Handgelenke (zwei Freiheitsgrade), die Ellbogengelenke (zwei Freiheitsgrade), die Schultergelenke (drei Freiheitsgrade) und der Brust- und Lendenwirbelsäulenbereich (jeweils drei Freiheitsgrade). Ausgehend von der Neutral-Null-Methode wird der jeweilige Bewegungsbereich eines Gelenks in neutral, mittelgradig und endgradig eingeteilt (vgl. Abbildung 2).

Ist das gelegentliche Erreichen von Endlagen meist als unkritisch anzusehen, so muss die häufige Einnahme solcher Stellungen oder gar das längere Verharren in diesen als ungünstig angesehen werden und gilt als Risikofaktor für MSE (Hansson et al. 2009; Silverstein et al. 1986; Steinberg et al. 2007). Eine statisch belastende Haltung wird in Anlehnung an DIN EN 1005-1 ab einer Verweildauer von über 4 s in einer nahezu unveränderten Gelenkstellung außerhalb der Neutralstellung definiert.

Als repetitiv werden Bewegungen bzw. Bewegungsabläufe (Zyklen) bezeichnet, wenn sie sich gleichförmig über einem Zeitraum von mindestens einer Stunde ohne

größere Pausen wiederholen. In der hier vorgeschlagenen Bewertung nach dem Ampelschema werden Werte bis zum angegebenen Richtwert mit grün, bei Überschreiten bis zum doppelten Wert mit gelb und oberhalb eines doppelten Richtwertes mit rot hinterlegt (vgl. Tabelle 1).



**Abbildung 2:** Einteilung des Bewegungsbereichs am Beispiel des Handgelenks

**Tabelle 1:** Richtwerte für repetitive Gelenkbewegungen der Schulter, des Arms und der Hände nach Kilbom et al. (1994)

Gelenk	Richtwert für Repetitivität
Schulter	> 2,5/Minute
Oberarm, Ellenbogen	> 10/Minute
Unterarm, Handgelenk	> 10/Minute

Die Repetition der Beuge- und Streckbewegungen des Handgelenks werden über die mittlere (Schwerpunkts-) Frequenz aus dem Leistungsspektrum des Winkel-Zeitverlaufs und dem Median der Winkelgeschwindigkeitsverteilung bestimmt (vgl. Tabelle 2).

**Tabelle 2:** Ampelschema-Bewertung für die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{Ha}$  und die mittlere Frequenz der Handgelenkbewegung  $MPF_{Ha}$  i. S. der Flexion/Extension in Anlehnung an Hansson et al. 2004 u. 2009

Parameter	Grün	Gelb	Rot
Geschwindigkeit	$\omega_{Ha} \leq 11^\circ/s$	$11^\circ/s < \omega_{Ha} < 23^\circ/s$	$\omega_{Ha} \geq 23^\circ/s$
Mittenfrequenz	$MPF_{Ha} \leq 0,25 \text{ Hz}$	$0,25 \text{ Hz} < MPF_{Ha} < 0,4 \text{ Hz}$	$MPF_{Ha} \geq 0,4 \text{ Hz}$

Zur Bewertung der muskelphysiologischen Belastung dient der bezüglich der Amplitude zwischen Ruheaktivität und maximaler Willkürkontraktion (MVC) normierte RMS-Zeitverlauf. Die RMS-Werte werden gleitend mit einer Fensterbreite von 0,2 s ermittelt. Im Sinne von Ruhepausen bzw. auch Mikro-Pausen wird der Zeitanteil der %MVC-Werte  $< 0,5 \%$  bestimmt. Bei hochintensiven manuellen Tätigkeiten liegen die Pausendauern unter 10 % der Arbeitszeit (Hansson et al. 2009). Als „statischer Belastungsanteil“ wird das 10. Perzentil (P10) der %MVC-Verteilung herangezogen (Hansson et al. 2009). Der „dynamische Belastungsteil“ wird durch das 90. Perzentil (P90) der %MVC-Verteilung gekennzeichnet. Als hochdynamisch gelten Tätigkeiten,

wenn P90 über 30 %MVC liegt (Hansson et al. 2009).

Zur Ermittlung der aufgewendeten Greifkräfte (adjusted force, nach Silverstein et al. 1986) dient der adjustierte Kraftwert der Handbeugemuskeln (adjustierte Kraft =  $(\text{Var}(\%MVC)/\text{MW}(\%MVC) + \text{MW}(\%MVC)) * F_{\text{max}}$ ). Wobei  $F_{\text{max}}$  der maximalen Greifkraft in der arbeitstypischen Greifart entspricht. Tätigkeiten mit adjustierten Kräften von 60 N und mehr werden als belastend eingestuft (Silverstein et al. 1986).

#### 4. Diskussion und Ausblick

Die hier vorgestellte Messmethodenkombination erlaubt die Erstellung von Belastungsprofilen unterschiedlichster manueller Arbeitsprozesse:

- hoch repetitive manuelle Tätigkeiten mit Beugen und Strecken des Armes ohne hohen Kraftaufwand;  
Beispieltätigkeit: Sortiervorgänge am Fließband
- repetitive manuelle Tätigkeit mit Beugen und Strecken des Armes und hoher Kraftaufwand bei der Handhabung von Arbeitsgeräten oder Werkstücken;  
Beispieltätigkeiten: Montagetätigkeiten, Polsterer
- repetitive manuelle Tätigkeit mit Beugen und Strecken des Armes und hoher Kraftaufwand ohne Handhabung von Arbeitsgeräten oder Werkstücken;  
Beispieltätigkeiten: Masseur, Polsterer
- repetitive manuelle Tätigkeit mit Beugen und Strecken des Armes und hoher Präzisionsanforderung;  
Beispieltätigkeiten: Zahntechniker, feinmechanische repetitive Montagetätigkeiten.

Je nach Arbeitsanforderung sind zunächst die relevanten Belastungsparameter einzeln zu bewerten. In der Gesamtschau wird dann die jeweilige Anzahl von gelben und roten Bewertungen im Sinne eines Malus-Systems gezählt. Die Überführung auf nur eine abschließende Bewertungsskala ist derzeit noch nicht möglich. Ein größerer Datenbestand in Verbindung mit der Häufigkeit von Muskelskelettbeschwerden könnte dies aber in der weiteren Zukunft ermöglichen.

#### 5. Literatur

1. DIN EN 1005-1: 2009, Sicherheit von Maschinen - Menschliche körperliche Leistung - Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth.
2. Ellegast, R.P., Hermanns, I., Hamburger, R., Post, M., Glitsch, U., Ditchen, D. & Hoehne-Hückstädt, U. 2006, Langzeiterfassung und -analyse von physischen Arbeitsbelastungen mit dem CUELA - Messsystem. In R. Grieshaber, M. Stadler & H.C. Scholle (Hrsg.), Prävention von arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren und Erkrankungen. Jena: Bussert & Stadler, 509-523.
3. Hansson, G., Balogh, I., Ohlsson, K. & Skerfving, S. 2004, Measurements of wrist and forearm positions and movements: effect of, and compensation for, goniometer crosstalk, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 14, 355-367.
4. Hansson, G., Balogh, I., Ohlsson, K., Granqvist, L., Nordander, C., Arvidsson, I., Akesson, I., Unge, J., Rittner, R., Strömberg, U. & Skerfving, S. 2009, Physical workload in various types of work: Part I. Wrist and forearm, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, 221-233.
5. Silverstein, B., Fine, L. & Armstrong, T. 1986, Hand wrist cumulative trauma disorders in industry, *British Journal of Industrial medicine*, 43, 779-784.
6. Steinberg, U., Behrendt, S., Caffier, G., Schultz, K. & Jakob, M. 2007, Leitmerkmalermethode Manuelle Arbeitsprozesse. Berlin: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
7. Kilbom, Å. 1994, Repetitive work of the upper extremity: Part II - The scientific basis (knowledge base) for the guide, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 14, 59-86.