

## **Etablierung objektiver Messverfahren für Belastungen am Montagearbeitsplatz**

Florian WARSCHEWSKE, Martin WOITAG, Tina HAASE,  
Alinde KELLER, Dirk BERNDT

*Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF  
Sandtorstr. 22, D-39106 Magdeburg*

**Kurzfassung:** Der Mensch muss in der heutigen Zeit immer höheren Anforderungen genügen, um sich auf dem Arbeitsmarkt zu behaupten. Flexibilität und Belastbarkeit werden in hohem Maße vorausgesetzt und steigende Leistungsanforderungen führen vor allem in Branchen mit schwer körperlicher Arbeit immer schneller zu gesundheitlichen Problemen. Für die Erfassung von Belastungen und Beanspruchungen an manuellen Arbeitsplätzen kann man auf eine Vielzahl von Methoden und Messmitteln zurückgreifen, jedoch mangelt es häufig an aussagekräftigen Messwerten und an einer einfachen und praxisnahen Umsetzung. In diesem Beitrag sollen neue Wege für eine objektive Ermittlung von physiologischen Belastungen an manuellen Arbeitsplätzen, deren Umsetzung an einem realen Anwendungsszenario und Überlegungen zur partizipativen Einführung aufgezeigt werden.

**Schlüsselwörter:** Belastungsanalyse, Handlungserkennung, Inertialsensoren, textile Sensorik, Kraftmessung, partizipative Gestaltung

### **1. Steigende Komplexität in der manuellen Montage**

Eine fünf Mal zwölf Meter große Flugzeugrumpfschale, zwei Monteure, dreitausend zu befestigende Anbauteile mit variabler Form und Ausrichtung, zwei Wochen Zeit und keine Fehlertoleranz. So oder ähnlich gestalten sich heutzutage Montage- und Fertigungsprozesse, wie z. B. die Endmontage im Innenraum eines bis zu 70 Meter langen Flugzeugrumpfes mit individuellen Arbeitsschritten für jeden Kunden. Anbauteile mit unterschiedlicher Größe und Form müssen in teilweise schwierigen Körperhaltungen in der korrekten Lage und Reihenfolge befestigt werden. Diese komplexen Montagetätigkeiten beanspruchen die Arbeitspersonen auf unterschiedliche Arten z. B. durch beschwerliche Überkopfarbeiten oder hohe Sitz- und Liegedauern in belastenden Positionen bei der Bodenmontage. Die notwendigen Körperhaltungen werden dabei selbstbestimmt und intuitiv eingenommen. Diesem Phänomen kann man durch Verhaltensprävention oder gesundheitsförderliche Modelle gezielt entgegenwirken, indem manuelle Handlungen im Arbeitsprozess erfasst und analysiert werden. Potenzial liegt darin, den Arbeitspersonen ein individualisiertes Feedback über ihren aktuellen Beanspruchungsgrad zur Verfügung zu stellen, so dass Verbesserungen unmittelbar eingeleitet werden können.

## 2. Herkömmliche Verfahren für Belastungsbeurteilungen

Eine allgemeine Kategorisierung und Bewertung von zumutbaren Belastungen im Rahmen des Arbeitsprozesses gestaltet sich vor allem vor dem Hintergrund individuell unterschiedlicher körperlicher Voraussetzungen als problematisch. Sowohl physische als auch psychosoziale Belastungen in Verbindung mit ihren Umgebungseinflüssen werden seit Einführung des Arbeitsschutzes mit Hilfe verschiedener Fragebögen (FEBA, BORG-Skala, VAS-Skala) ermittelt, welche von geschultem Personal (z. B. Arbeitswissenschaftlern) aufwändig aufgenommen, ausgewertet und beurteilt werden. Hier gehen subjektive Einflüsse seitens der Befragten, welche ihre eigenen physischen Konstitutionen nur teilweise realistisch einschätzen können, ein. In der Leitmerkalmethode (Steinberg et al. 2011) werden Arbeitsvorgänge beobachtet und Bewegungen und Haltungen analysiert, Zeiten gewichtet und die Häufigkeit einer Tätigkeit berücksichtigt.

Um die Analysen objektiv zu gestalten, können physiologische Beanspruchungen auf Basis von Biosignalen, wie Herzfrequenz und Herzratenvariabilität, Atemfrequenz, Hautleitwert oder Muskelaktivität indirekt ermittelt werden. Die Auswahl an Geräten auf dem Markt dazu ist groß, aufgrund fehlender Echtzeitfähigkeit sind sie nicht für eine ad-hoc Bewertung der Arbeitssituation einsetzbar. Zur Objektivierung stehen aber auch sogenannte Wearables zur Verfügung, die Aufschluss über Herzfrequenz, Körpertemperatur, Aktivitätskalorien oder Schrittzahlen geben. Diese Messdaten genügen laut Studien nicht den Ansprüchen einer reproduzierbaren und exakten Messung (Merkel 2014), mit denen Beanspruchungen hinreichend genau abgeleitet werden können.

Zur kontinuierlichen Messung von Belastungsparametern kann das körperbezogene Messsystem CUELA eingesetzt werden. Es besteht aus hauptsächlich mechanischen Sensoren zur Analyse von Körperhaltungen und -kräften. Die Belastungsdaten werden über eine Arbeitsschicht gemessen und gespeichert. Das Messsystem kann bis zu 5kg wiegen und ist trotz seiner vielseitigen Anwendbarkeit und Mobilität für die Arbeitsperson sehr einschränkend.

## 3. Innovative Sensortechnologien für Belastungsmessungen

Zur Analyse und Beurteilung von Belastungen sind Kenngrößen, die sich direkt aus den tatsächlich ausgeführten Handlungen ergeben, am besten geeignet. Dazu ist es notwendig zu jedem Zeitpunkt die konkrete Montagetätigkeit der Arbeitsperson zu kennen. Moderne Sensortechnik und Methoden der Human Activity Recognition kommen für diesen Einsatzzweck in Frage. Besonders geeignet sind Inertialsensoren, die u.a. gegenüber Kamerasystemen durch einen minimalen Installationsaufwand und geringe Anschaffungskosten bestechen.

### 3.1 Bewegungsdaten aus Inertialsensoren

Der Einsatz von Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) als Basistechnologie, führte in den letzten Jahren zu einer stark anwachsenden Bedeutung von Inertialsensoren (Barbour & Schmidt 2001). Die kompakte Bauweise führte dazu, dass auch die Erfassung von menschlichen Bewegungen und Gesten zunehmend an wissenschaftlichem Interesse gewinnt (Altun et al. 2010). Mit Inertialsensoren lassen sich Positionen und Orientierungen von beweglichen Objekten bestimmen, ohne

dass ein Referenzpunkt gegeben sein muss. Für eine hinreichend genaue und vollständige Bewegungserfassung sind Komponenten für Translations- und Rotationsbewegungen notwendig, die in einem Sensorsystem, der sogenannten IMU (inertial measurement unit) zusammengefasst werden.

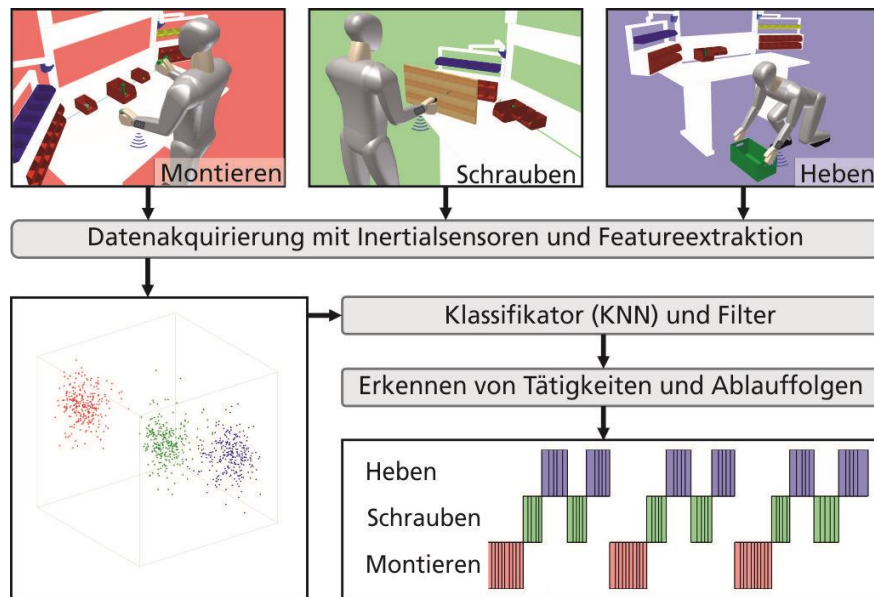


**Abbildung 1:** *Miniaturisiertes Inertialsensormodul des Fraunhofer IFF in Magdeburg für die referenzlose Erfassung von Bewegungsdaten während der Montage*

Die Erfassung von menschlichen Bewegungen mittels Inertialsensoren basiert auf zwei Aspekten. Zum einen ist die Platzierung der Sensoren von Bedeutung. Jede Sensoreinheit wird direkt am Körper der Arbeitsperson befestigt, um dessen Bewegungen exakt mitverfolgen zu können. Für einen Großteil der Montagevorgänge sind ausschließlich die Bewegungen der oberen Extremitäten von Interesse, da diese letztendlich für die Ausführung von Montagetätigkeiten zuständig sind. Anzahl und Anordnung der Sensormodule am Körper sind je nach Anwendungsfall anzupassen. Zum anderen ist die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Messwerterfassung aller IMUs über den gesamten Beobachtungszeitraum. Jede IMU misst mit einer festgelegten Frequenz und schickt die Daten an einen zentralen Empfänger. Die so entstehenden multivariaten Zeitreihen können nun für Analysen der auftretenden Belastungen während der Arbeit genutzt werden.

### 3.2 Künstliche Neuronale Netze als Schlüsseltechnologie

Technologischer Kern des vom Fraunhofer IFF in Magdeburg entwickelten Verfahrens ist eine Erkennung von Tätigkeiten, die auf Mustersuche in den Bewegungsdaten beruht. Das System ist dadurch in der Lage zu jedem Zeitpunkt die gerade ausgeführte Montagetätigkeit zu klassifizieren und mit Belastungskennzahlen zu annotieren. Der schematische Ablauf für diese Klassifikationsaufgabe ist in Abbildung 2 dargestellt. Aus den Bewegungsdaten werden zunächst Merkmale extrahiert, um die natürlichen Schwankungen der Bewegungen abzuschwächen. Als Klassifikator haben sich Künstliche Neuronale Netze (KNN) bewährt. KNNs sind eine softwaretechnische Nachbildung des menschlichen Gehirns durch die Vernetzung von künstlichen Neuronen zur Erfüllung komplexer Lernaufgaben z. B. in den Bereichen Spracherkennung und Bildverarbeitung. KNNs haben sich bei der Klassifikation von Handbewegungen gegenüber anderen Modellen durchgesetzt, da sie in der Lage sind, auch mit wenigen Trainingsdaten und einwirkenden Unsicherheitseinflüssen sehr gute Resultate zu liefern. In der praktischen Anwendung müssen dem System in einer kurzen Lernphase Bewegungsdaten mit zugeordneten Montageabschnitten zugeführt werden. Nach der Berechnung des KNN-Modells ist das System in der Lage unbekannte Tätigkeiten und Ablauffolgen in Echtzeit zu klassifizieren.



**Abbildung 2:** Ablaufschema einer automatischen Handlungserkennung zur objektiven Belastungsmessung am Arbeitsplatz (eigene Darstellung)

### 3.3 Kraftmessungen mittels textiler Sensorik

Bei der Montage von großen Bauteilen treten an der Kontaktfläche zwischen einer Arbeitsperson und einem nicht ergonomischen Untergrund oder an scharfen Kanten oft hohe Druckbelastungen auf. Auch das Handling von Werkzeugen und Bauteilen erzeugt hohe Kräfte auf den Handoberflächen. Zur Erfassung derartiger Belastungsfälle für die Arbeitsperson empfiehlt sich der Einsatz textiler Sensoren. Die Messmethode des Fraunhofer IFF basiert auf der Detektion einer kraftabhängigen Verformung von textilen Dämpfungsmaterialien. Die Abstandsänderung führt, abhängig vom genutzten Sensorprinzip, zu einer Änderung der elektrischen Kapazität oder des Widerstandes. Mit flächig angeordneten Elektroden können auftretende Kräfte nach Betrag und Ort ermittelt und in Echtzeit überwacht werden.



**Abbildung 3:** Textiles Sensorarray des Fraunhofer IFF in Magdeburg

Die vollflexible, dehnbare Sensormatte lässt sich an gekrümmte Oberflächen anpassen und ist somit sehr leicht in vorhandenes Interieur zu integrieren. Je nach Anwendungsfall können die Abmessungen, die Form, die Orts- und Kraftauflösung, die Sensordicke und das Hüllmaterial konfiguriert werden.

#### 4. Realisierung und Anwendung

Der Einsatz von inertialer und textiler Sensorik, kombiniert mit einer kognitiven Datenauswertung mit Künstlichen Neuronalen Netzen erlaubt es, im Umfeld manueller Arbeitsplätze ein individuelles Feedback über die aktuelle Belastung an die Arbeitsperson zu geben. Grundlage dafür ist die automatische Erkennung der jeweiligen Tätigkeit und Weiterverarbeitung der Informationen, die exemplarisch an einem Anwendungsszenario beschrieben werden soll.

Die Belastung einer Arbeitsperson kann nach REFA über folgende Formel zur Ermittlung zulässiger Körperkräfte bestimmt werden (REFA Bundesverband e.V. 2003):

$$F_{zul/akt} = p \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot F_{max}$$

Hierbei ist  $p$  ein personenbezogener Faktor, der Alter, Geschlecht und den individuellen Zustand der Arbeitsperson berücksichtigt.  $F_{max}$  ist eine angenommene Maximalkraft, die einer bestimmten haltungsbezogenen Tätigkeit zugeordnet wird. Durch die  $k$ -Faktoren werden Körperhaltungen, Wiederholanzahl sowie die Dauer der manuellen Tätigkeiten berücksichtigt. Herkömmlich werden die zulässigen Kräfte von einem Arbeitsgestalter durch Beobachtung der manuellen Tätigkeiten ermittelt, indem die drei Faktoren aus Tabellen und Diagrammen abgelesen werden.

Durch den Einsatz von Inertialsensoren und der beschriebenen KNN-Methode mit sehr kurzer Einlernphase ist es möglich, die aktuellen Kräfte automatisiert zu bestimmen und mit den zulässigen Kräften zu vergleichen. Das Sensorsystem stellt Informationen über Dauer und Art der Teiltätigkeiten des Arbeitsablaufes zur Verfügung, die die Grundlage für die Berechnung der  $k$ -Faktoren bilden.

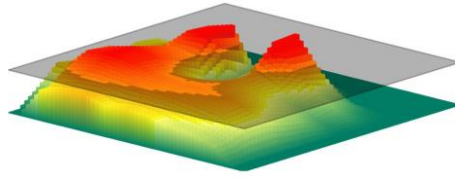
So wird der Teilfaktor  $k_1$  aus dem Zeitverhältnis von dynamischer Arbeit zu Haltearbeit sowie der Dauer und der Wiederholrate der Tätigkeit bestimmt. Die statische Körperhaltung und die Position eines Arbeitsmittels wird durch den Teilfaktor  $k_3$  berücksichtigt. Alle Faktoren werden durch das System in Echtzeit ermittelt und der zulässigen Kraft gegenübergestellt. Der Arbeitsperson kann somit z. B. per Ampelsystem ein unmittelbares Feedback über ihre aktuelle physische Belastung zur Verfügung gestellt werden.



**Abbildung 4:** Belastungsfeedback während der Montage einer Rumpfschale: Inertialsensoren im Sensorhandschuh erfassen die Arbeitsschritte und berechnen zulässige Körperkräfte

Um neben den handlungsbasierten Kräften auch Kräfte zu beurteilen, die durch das Sitzen und Liegen während der Montage auf den Körper einwirken, kann das tragbare, inertielle Sensorsystem durch Integration textiler Sensormatten in das Arbeitsumfeld, z. B. eines Sitzes, ergänzt werden. Der modulare Aufbau der flächigen Messsensorik erlaubt die Kraftüberwachung auf großen Flächen. Für den Anwendungsfall der hauptsächlich sitzenden Montage wurden mobile Rollwagen mit textilen

Sensormatten ausgestattet, um Aussagen über die Anwesenheit einer Arbeitsperson und die dort auftretenden flächigen Berührungskräfte zu treffen.



**Abbildung 5:** *Belastung beim Sitzen: Kraftverteilungsmessung und Überschreitung einer zulässigen Kraft bei der Montage im Sitzen*

## 5. Anwendungsorientierte Etablierung der Messverfahren

Aus den gemessenen ergonomischen Kenngrößen sollten Handlungsempfehlungen für individuelle Verhaltensprävention abgeleitet werden. Diese können in Form eines Assistenzsystems verfügbar gemacht werden. Dabei sind auch soziale Aspekte zu berücksichtigen: Die Verwendung personenbezogener Daten erfordert eine Sensibilisierung für den Umgang mit diesen Daten, um einem möglichen Misstrauen frühzeitig entgegenzuwirken. Die Sensibilisierung umfasst neben dem Aufzeigen der Risiken auch Potentiale: Die Arbeitsperson wird unterstützt, ihre Handlungen unter ergonomischen Gesichtspunkten zu reflektieren. Um dies zu ermöglichen sollte die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) des Assistenzsystems lernförderlich (Frieling 2006) gestaltet werden. Die Arbeitsperson soll in die Lage versetzt werden, Wissen zum Thema „Ergonomie“ aufzubauen, Auswirkungen auf die eigene Person und die Arbeitsprozesse zu erkennen und eigenverantwortlich Verbesserungen abzuleiten.

Motivation und Akzeptanz werden darüber hinaus signifikant unterstützt, wenn der Prozess zur Einführung und Entwicklung des mobilen Feedbacks ebenfalls nach lernförderlichen Kriterien gestaltet wird. Insbesondere sollten die verschiedenen Beteiligtegruppen, z. B. Führungskräfte, Sozialpartner sowie die Arbeitspersonen als zukünftige Nutzer aktiv in die konkrete Ausgestaltung der MMS eingebunden werden.

Belastende Arbeitsumgebungen können als lernhinderliche Faktoren klassifiziert werden. Sensorsysteme, z. B. Inertial- und Textilsensorik, und das mobile Feedback helfen, diese lernhinderlichen Faktoren zu minimieren. Dagegen erhöht sich die Eigenwahrnehmung der Arbeitsperson für ergonomische Faktoren und Einflüsse. Unter diesen Aspekten kann die vorgestellte Lösung als Entscheidungshilfe zur Verbesserung des individuellen, ergonomischen Verhaltens erheblich beitragen.

## 6. Literatur

- Altun K, Barshan B, Tunçel O (2010) Comparative study on classifying human activities with miniature inertial and magnetic sensors. In: Pattern Recognition 43, Oktober, Nr. 10, S. 3605-3620
- Barbour N, Schmidt G (2001) Inertial sensor technology trends, IEEE Sensors Journal 1/4, S. 332ff
- Frieling E (2006): Lernen durch Arbeit. Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Lernmöglichkeiten am Arbeitsplatz. Münster, München [u.a.]: Waxmann.
- Merkel T (2014) Smartphones und Tablets im Alltag der ergonomischen Arbeitsplatzbewertung, Zeitschrift Industrial Engineering; 1. Quartal 2015
- REFA Bundesverband e.V. (2003) Ermittlung zulässiger Körperkräfte, Dortmund: REFA (Hrsg.), Lehrunterlage, Bestellnummer 037301/3
- Steinberg U, Liebers F, Klußmann A, Gebhardt Hj, Rieger M A, Behrendt S, Latza U (2012) Leitmerkmalermethode manuelle Arbeitsprozesse, Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

