

Digital Workplace Stress Management: Ein Projekt zur digitalen Ergonomiebewertung in der BMW Group

Marc SNELL, Arman DEGHANI, Fabian GUENZKOFER,
Kristina SCHREYER, Stefan KALTENBRUNNER

*BMW Group, Steuerung Arbeitssicherheit und Ergonomie
Moosacher Straße 51, D-80809 München*

Kurzfassung: Die BMW Group hat intern ein eigenes Tool für die Bewertung von ergonomischen Belastungen und Gefährdungen entwickelt: SERA (Sicherheits & Ergonomie Risikoanalyse). Dieses System wird bei BMW international übergreifend eingesetzt. Das Vorhaben DWSM (Digital Workplace Stress Management) dient dazu, Haltungen und Kräfte durch den Einsatz einer adäquaten Sensorik automatisiert zu erfassen und an SERA zu übergeben. Hierzu werden ein Motion-Capturing System und ein damit synchronisierter Kraftmesshandschuh verwendet. Die sich aus der Aufzeichnung abgeleiteten Ergonomiebelastungen werden teilweise analytisch und teilweise mittels neuronaler Netze ermittelt. Das Ziel dieser Publikation besteht in der Beschreibung des Vorhabens DWSM inkl. den damit verbundenen Belastungsdefinitionen und der Projektzeitschiene. DWSM befindet sich aktuell im internationalen Rollout, welcher eventuelle Optimierungsbedarfe und erwünschte Funktionserweiterungen aufzeigen wird. Die übergreifenden Vorteile einer Bewertung mit DWSM sind die Objektivität, erhöhte Qualität und eine kürzere Bewertungsdauer.

Schlüsselwörter: Ergonomiebewertung, Motion-Capturing, Kraftmesshandschuh, Digitalisierung, neuronales Netz, SERA, Gefährdungsbeurteilung

1. Einleitung

Laut der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) sind Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) der häufigste Grund für Arbeitsausfälle in Deutschland. Seit 2011 nimmt die Zahl der Arbeitsunfähigkeitstage aufgrund von MSEs jährlich zu (BAuA 2019). Laut dem Unfallverhütungsbericht der BAuA und des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales (BMAS) sind ca. 23,2% der Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland (126 Mio. Tage) und damit verbunden 13,2 Mrd. € Produktionsausfallkosten auf MSEs zurückzuführen.

Die laut Arbeitsschutzgesetz erforderliche Gefährdungsbeurteilung für jeden Arbeitsplatz beinhaltet auch eine Bewertung der physischen Belastungen, welche als wichtigster Risikofaktor für MSEs anerkannt sind (DGUV 2013). Wie die Bewertung dieser physischen Belastungen zu erfolgen hat, wird allerdings nicht vorgeschrieben. Dies liegt unter anderem daran, dass bisher keine Methode der Vielfalt an Arbeitstätigkeiten in den verschiedenen Industrien gerecht wird. Bei der Auswahl einer passenden Methode spielt der gewünschte Detaillierungsgrad der Belastungsbewertung eine entscheidende Rolle.

Die BMW Group wählte einen einheitlichen und international übergreifenden Ansatz. Das Projekt SERA (Sicherheits- & Ergonomie Risikoanalyse) wurde mit dem

Ziel der Vereinigung von Ergonomiebewertung und „klassischer“ Gefährdungsbeurteilung ins Leben gerufen. Das Vorhaben sollte in einer datenbankgestützten Web Applikation eines entsprechenden zentralen Risikomanagementsystems münden. Um die Vergleichbarkeit der erfassten Bewertungen zu gewährleisten, mussten internationale rechtliche und normative Anforderungen für Ergonomie, Arbeitsumfeld, psychomentele Belastungen und Gefährdungsbeurteilungen für alle Produktionsstandorte der BMW Group verglichen und harmonisiert werden. Hierfür betrieb die Steuerstelle für Arbeitssicherheit und Ergonomie internationale Forschungen sowie Vergleiche und Abstimmungen, um diese Ziele zu erreichen. Seit dem internationalen Rollout wird SERA bei der BMW Group flächendeckend in der Produktion und produktionsnahen Bereichen eingesetzt. Parallel wird SERA agil weiterentwickelt, um neue Anforderungen basierend auf Anwenderwünschen, Gesetzesänderungen oder neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen umzusetzen. In Bezug auf die Einstufung in der Bewertungshierarchie wird SERA als Experten-Screening Verfahren eingestuft und ist somit vergleichbar mit REBA, EAWS usw. Entsprechend werden für die Systemzulassung diverse Schulungen je nach Anwendungsfall angeboten.

Der typische Prozess einer SERA-Bewertung erfolgt durch Beobachtung. Auf einem Erfassungsbogen können die verschiedenen Körperhaltungen notiert werden. Kräfte werden idealerweise durch geeignete Messmittel erfasst und ebenso vermerkt. Die Belastungserfassung kann ohne Stoppuhr oder Goniometer in ausreichender Genauigkeit für ein Screening-Verfahren erfolgen, da sich die Bewertung eines kurzzyklischen Taktes auf die gesamte Schichtzeit extrapolieren lässt. Trotz der erhöhten Genauigkeit von SERA dank einer automobilindustriespezifischen Auslegung, stößt eine manuelle, auf Beobachtung beruhende Ergonomiebewertung an ihre Grenzen. Daher wird seit dem Rollout von SERA, parallel zu dessen Weiterentwicklung, eine automatisierte und digitale Erfassung der Ergonomiebelastungen angestrebt.

2. Digital Workplace Stress Management (DWSM)

2.1 Systemüberblick

Eine digitale Erfassung der ergonomischen Belastungen hat drei Hauptziele:

1. Objektive Datenerfassung.
2. Erhöhte Genauigkeit der erfassten Daten.
3. Aufwandsreduzierung bei der Erfassung.

Anhand dieser Ziele wurde eine umfangreiche Marktrecherche durchgeführt, um geeignete Technologien zu identifizieren, welche die Bedingungen einer Automobilproduktion erfüllen. Nach diversen internen Tests wurde ein IMU-basiertes (Inertial Measurement Unit) Motion-Capturing System zur Erfassung von Gelenkwinkeln und ein Kraftmesshandschuh zur Erfassung von Montagekräften gewählt. Besonders wichtig in der Auswahl der Technologien war die Erfüllung folgender Bedingungen:

- Die Systeme sind störungsfrei und verursachen selbst keine IT-Störungen.
- Die Sensorik lässt sich einfach aufbauen, ist unaufdringlich und stört nicht bei der Arbeit.
- Die Systeme sind leicht zu bedienen.

Das gewählte Motion-Capturing System [Xsens] benutzt 17 drahtlose Mini-

Sensoren, um ein Menschmodell abzubilden. Moderne Algorithmen und eine Kombination von Drehraten-, Beschleunigungs- und Magnetsensoren eliminieren hierbei den „Drift“, welcher bei bisher ähnlichen drahtlosen Motion-Capturing Systemen problematisch war. Studien belegen, dass moderne IMU-basierte Motion Capturing Systeme (speziell Xsens) eine gute Übereinstimmung mit optischen Systemen (z.B. Vicon) für die berechneten Gelenkwinkel zeigen (Benjaminse, Bolt, Gokeler, & Otten, 2020; Dinu, et al., 2016; Paulich, Schepers, Rudigkeit, & Bellusci, 2018).

Bestandteil von DWSM ist zusätzlich ein Kraftmesshandschuh, welcher direkt bei der Ausführung einer Tätigkeit die Montagekräfte erfasst. Der gewählte Kraftmesshandschuh [Novel] verwendet dünne und flexible kapazitive Sensoren, welche in einen Montagehandschuh integriert werden können. Ein Handschuh besteht aus 5 Finger- und einem Handflächensensor. Die Kraftsignale werden über eine App drahtlos erfasst.

Mithilfe beider Messsysteme ist es möglich, fast jede ergonomisch relevante Information automatisiert zu erfassen. Lediglich Gewichtskräfte (Handhaben von Lasten) und Drehmomente (Schrauben) sind hiermit nicht zu ermitteln. Die Entscheidung zum Ausschluss dieser Belastungen wurde bewusst getroffen, weil diese Informationen typischerweise prozessual festgelegt sind (Gewicht eines Teils oder erforderliches Drehmoment) und daher keine Messung erfordern.

2.2 Methodische Hintergründe

Die Belastungen in SERA wurden auf Basis verschiedener internationaler Normen und Bewertungsverfahren festgelegt (siehe Tab. 1). Belastungen aus Körperhaltungen sind entsprechend den Normen in gewisse Winkelbereiche des Bewegungsraumes eingeteilt (Nacken, Schultern und Rumpf). Entsprechend können diese Belastungsstufen direkt anhand der Motion-Capturing Daten (bzw. aus dem resultierenden Menschmodell) berechnet werden.

Für die restlichen zu berücksichtigenden Belastungen sind die Motion-Capturing Daten nicht ausreichend und erfordern die Einbindung des Kraftmesshandschuhs. Bekannterweise ist bei der Bewertung von Ganzkörperkräften und der Lastenhandhabung mit den oben genannten Methoden auch die Körperhaltung bzw. Kraftrichtung während der Ausführung relevant. Um die beiden Datenquellen zu synchronisieren, ist daher eine kurze, eindeutige Bewegung erforderlich, welche in beiden Datenströmen identifiziert werden kann. Dieses „Synchronisierungs-Event“ ermöglicht die nachträgliche, automatisierte Zuordnung der Kräfte zu den entsprechenden Körperhaltungen in SERA.

Tabelle 1: Normative und wissenschaftliche Quellen der jeweiligen Belastungen in SERA.

Belastung	Basis
Nacken, Schultern	Norm DIN EN 1005-4
Rumpf	Norm DIN EN 1005-4 EAWS (European Assembly Worksheet)
Ganzkörperkräfte, Hand- & Fingerkräfte	Norm DIN EN 1005-3 Montagespezifischer Kraftatlas, Skalierung durch interne Studien der University of Wisconsin aus USA
Lastenhandhabung	Leitmerkalmethode (LMM) (bzw. NIOSH in USA)

Die definitionsgemäße Unterscheidung einer Tätigkeit in Ganzkörperkraft oder Lastenhandhabung ist für den menschlichen Bewerter oftmals eindeutig. Bei der Erfassung von Motion-Capturing- und Kraftmesshandschuh-Daten fehlt allerdings für eine automatisierte Klassifizierung die Information zu Tätigkeit und Umgebung. Daher ist eine analytische Definition auch bei einfachen Tätigkeiten, z.B. Wagen oder Handlingsgerät bewegen, nicht möglich. Zudem kommt die natürliche interindividuelle Varianz bei der Bewegungsausführung hinzu. Um die genannten Probleme zu lösen, wird ein Machine-Learning Ansatz für die Datenbearbeitung verwendet.

Der Vorteil eines Machine-Learning Modells ist, dass anhand eines möglichst breiten Spektrums an Ausführungsbeispielen die notwendigen Algorithmen für eine Zuordnung der Kräfte und Lasten selbst optimiert werden kann. Über mehrere Wochen wurden im BMW Trainingscenter ca. 4.600 Datensätze aufgenommen, welche als Datenbasis für das neuronale Netz dienten. Nach mehreren Optimierungsschleifen lag die finale Genauigkeit der automatisierten Bestimmung der Krafrichtung, der Ein-/Zweihändigkeit und Klassifizierung Kraft vs. Last bei 80%, 95% und 89%. Speziell schwer unterscheidbare oder mit geringer Körperbewegung verbundene Krafrichtungen (z.B. $\sim 45^\circ$ nach unten gewinkelt, d.h. unklare Zuordnung zu Hauptrichtungen B-/A-) verantworten den Großteil der Fehlklassifizierungen (sh. Abb. 1).

Der wichtigste Bestandteil von Ganzkörper- und Hand-/ Fingerkräften ist die Kraft selbst. Der Kraftmesshandschuh liefert während einer Aufnahme durchgehend Kraftwerte für jeden Finger und die Handfläche. In der Regel lassen sich Kräfte in zwei Typen unterscheiden: Maximalkräfte und Einrastpunkte. Maximalkräfte sind trivial auszuwerten, da lediglich das Maximum der Kurve zu bestimmen ist. Für die Auswertung von Einrastpunkten wurde intern ein Algorithmus entwickelt, welcher mit 87% Genauigkeit den Einrastpunkt in einer Kraftkurve identifizieren kann. Fehlklassifizierungen sind in den meisten Fällen auf Abnormalitäten in den Kraftkurven zurückzuführen, z.B. Nachdrücken erforderlich, multiple Einrastpunkte usw.

Zuletzt gibt es auch zwei Belastungsarten, welche bei DWSM bewusst ausgeschlossen wurden. SERA erlaubt für verschiedene Situationen die Bewertung von Drehmomenten (z.B. Winkelschrauber, gedrehter Unterarm). Diese Belastung wurde primär ausgeschlossen, weil kein bekanntes Messmittel zur Erfassung von Drehmomenten die Bedingungen oben (siehe 2.1 Einleitung) erfüllte. Dazu werden Drehmomente oftmals vom Prozess vorgegeben und müssen daher nicht gemessen werden. Teilegewichte (relevant für die Lastenhandhabung) wurden aus ähnlichen Gründen ausgeschlossen, da Gewichte bereits bekannt sind.

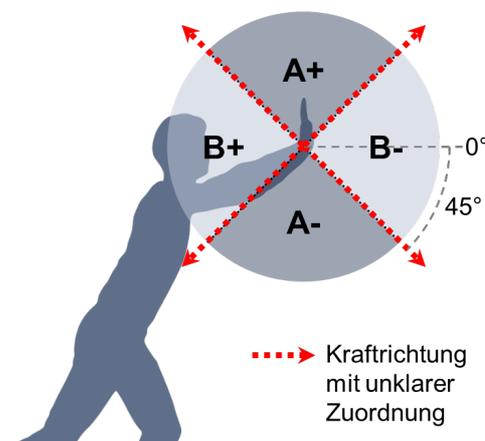


Abbildung 1: Darstellung verschiedener Ausführungsrichtungen für Ganzkörperkräfte, welche in der manuellen sowie automatisierten Zuordnung Unklarheiten aufweisen.

2.3 Projektablauf

Die Entwicklung von DWSM geschah in drei primären Phasen. Nach der initialen Recherche und Auswahl geeigneter Messmittel wurde zusammen mit der HTWK Leipzig eine Untersuchung gestartet, um die Anwendbarkeit der Daten für die automatisierte Befüllung einer SERA Ergonomiebewertung zu prüfen. Diese Daten (initial nur Motion-Capturing) wurden erstmalig über ein „standalone“ Programm ausgewertet und über eine Schnittstelle in SERA eingespielt, um die Ergebnisse zu plausibilisieren. Diese „standalone“ Version hatte zusätzlich den Vorteil, dass User in der Produktion die Messsysteme anwenden, Erfahrungen sammeln und Rückmeldungen geben konnten, welche in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt wurden.

In der nächsten Phase wurde der Kraftmesshandschuh integriert. Wie bereits beschrieben, erforderte die Berücksichtigung von Kräften in der digitalisierten Ergonomiebewertung verschiedene komplexe Funktionen. Hierbei handelt es sich um die Definition und automatisierte Detektion eines Synchronisationsevents zwischen den Messsystemen und die Erarbeitung von mehreren neuronalen Netzen, um u.a. die Krafrichtung, die Klassifizierung Kraft vs. Last und die Ein-/Zweihändigkeit der Tätigkeit zu klassifizieren. Parallel wurde der in Kapitel 2.2 beschriebene Algorithmus zur Einrastpunkterkennung erarbeitet. Zuletzt wurde das System befähigt, aus mehreren wiederholten Aufnahmen eine gemittelte Ergonomiebewertung zu berechnen und ein Verfahren für die automatisierte Erkennung von Ausreißern (je Belastungsart) wurde eingebaut.

Die letzte Phase hatte das Ziel, die bisherigen Funktionen direkt in das SERA System einzubinden. Hierzu wurden die Computer-Codes der „standalone“ Version gekapselt und an die Softwareentwickler von SERA übergeben. Die Implementierung in SERA erfolgte schrittweise und nach jedem Sprint konnten die Ergebnisse der „standalone“ Version mit denen aus SERA verglichen werden. Der große Vorteil dieser direkten Einbindung in SERA ist die Vereinfachung durch die intuitive Systembedienung und die Ankopplung an Daten aus Drittsystemen.

Nach der Einbindung der Funktionalitäten direkt in SERA wurde das Projekt vorerst abgeschlossen und ging in den Rollout. Diverse Pilotierungen werden aktuell in den Werken (national und international) durchgeführt. Die bisherigen Rückmeldungen sind sehr positiv. Die Entwicklung von DWSM schreitet auch weiter voran, z.B. wird aktuell untersucht, inwiefern einfache Kameraaufnahmen von Arbeitsvorgängen für die Ergonomiebewertung in Frage kommen könnten.

Die Vorgehensweise einer Ergonomiebewertung mit DWSM ist gegenüber einer klassischen Bewertung verhältnismäßig einfach (sh. Abb. 2). Für die Datenerfassung mit DWSM wird eine erfahrene Person mit dem Motion-Capturing System und dem Kraftmesshandschuh ausgestattet. Nach einer kurzen Kalibrierung wird die Tätigkeit wie gewohnt ausgeführt und die Daten werden direkt erfasst. Der Bewerter überwacht dabei die Aufnahme und stellt sicher, dass die Systeme reibungslos funktionieren. Danach werden die Daten aus beiden Messsystem direkt in SERA hochgeladen und automatisiert ausgewertet. Der Bewerter hat die Möglichkeit potenzielle Ausreißer auszuwerten und die Zuordnung der Krafffälle zu prüfen. Im Vergleich erfordert eine klassische Bewertung neben der händischen Erfassung/ subjektiven Einschätzung der Belastungen zusätzlich Messungen und eine Auswertung der erforderlichen Kräfte. Zuletzt werden alle Werte in die relevante Analyse übertragen. Die Vorteile einer Bewertung mit DWSM werden somit deutlich. Es wird nicht nur die Gesamtdauer der

Bewertung reduziert, sondern die Daten werden objektiv erfasst und die Genauigkeit dadurch gesteigert.



Abbildung 2: Gegenüberstellung der Vorgehensweise bei einer klassischen und DWSM Bewertung.

3. Zusammenfassung

Das System SERA ist ein internationales Tool für die Ergonomie- und Gefährdungsbeurteilung, welches intern bei der BMW Group anhand aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse entwickelt wurde. DWSM befähigt SERA dazu, die Ergonomiebewertung mittels Motion-Capturing und Kraftmesshandschuh digital vorzunehmen. Vorteile einer Bewertung mit DWSM sind die Objektivität, erhöhte Qualität und kürzere Bewertungsdauer. Je nach Ergonomiemerkmal wird die Bewertung entweder direkt bzw. analytisch von den Messsystemen berechnet oder mittels neuronaler Netze ermittelt, welche anhand realer Daten bei BMW trainiert wurden. Zusätzlich wurden diverse weitere Algorithmen entwickelt, um die Bearbeitung für den Anwender zu vereinfachen, z.B. automatisierte Einrastpunkterkennung bei Kraftverlaufskurven. DWSM befindet sich aktuell im internationalen Rollout und wird zukünftig anhand weiterer Rückmeldungen der Anwender optimiert.

4. Literatur

- Bundesanstalt Für Arbeitsschutz Und Arbeitsmedizin (2019) MEGAPHYS - Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz, Band 1.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2013) DGUV Vorschrift 1. Unfallverhütungsvorschrift „Grundsätze der Prävention“.
- Dinu D, Fayolas M, Jacquet M, Leguy E, Slavinski J, Houel N (2016) Accuracy of postural human-motion tracking using miniature inertial sensors. *Procedia engineering*, 147, 655-658.
- Benjaminse A, Bolt R, Gokeler A, Otten B (2020) A VALIDITY STUDY COMPARING XSENS WITH VICON. *ISBS Proceedings Archive*, 38(1), 752.
- Paulich M, Schepers M, Rudigkeit N, Bellusci G (2018) Xsens MTw Awinda: Miniature wireless inertial-magnetic motion tracker for highly accurate 3D kinematic applications. Xsens: Enschede, The Netherlands, 1-9.



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