

Auftreten von muskulärer Ermüdung in der Unterschenkel-Muskulatur bei statischer Steharbeit mit Variation von Gehanteil und Bewegungsdynamik

Lisa RÜCKER¹, Johannes BROMBACH¹, Klaus BENGLER²

¹ *Fakultät für Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Lothstr. 64, D-80335 München*

² *Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München
Boltzmannstr. 15, D-85748 Garching bei München*

Kurzfassung: In einem Laborversuch werden zwei Szenarien (mit einer Dauer von 2,5 h) mit variierenden Steh-/Gehanteilen und unterschiedlicher Dynamik der Bewegung mittels Oberflächen-Elektromyographie hinsichtlich auftretender muskulärer Ermüdung untersucht. Während sich die Szenarien in der subjektiven Beurteilung, der Volumenzunahme des Unterschenkels und der Dynamik der Bewegung unterscheiden, zeigen die hier diskutierten Ergebnisse in Bezug auf die Ermüdung – wie bei anderen Studien – lediglich Tendenzen auf. Leider wird das Kriterium der Dauer der statischen Belastung in der Literatur jedoch für die Beurteilung der Tätigkeit herangezogen. Die vorliegende Untersuchung zeigt demgegenüber, dass eine intermittierende Gehbewegung einen signifikanten Einfluss auf die Beurteilung von Steharbeit hat und somit auch die Art des Gehens („schlurfender“ vs. „echter“ Gang) entscheidend ist.

Schlüsselwörter: Muskuläre Ermüdung, JASA, statische / dynamische Muskelbeanspruchung, Bewegungsstruktur

1. Einleitung

Nach wie vor arbeitet jeder zweite Beschäftigte in Deutschland den Großteil seiner Arbeitszeit im Stehen (Lück et al. 2019). Die Integration von „Gehen“ als Entlastungsfaktor bei statischem Stehen wird in den letzten Jahren verstärkt thematisiert, wobei als entscheidendes Kriterium die Dauer des statischen Stehens ohne Entlastung gesehen wird (vgl. Balasubramanian et al. 2009; Garcia et al. 2016; Wall et al. 2020). Die im Folgenden vorgestellte Studie evaluiert demgegenüber auch den Einfluss der Gehbewegungen auf das Auftreten von Beschwerden beim statischen Stehen und diskutiert die Ergebnisse.

2. Betrachtung von physiologischen Größen zur Ermittlung muskulärer Ermüdung

Muskuläre Ermüdung wird in der Literatur definiert als eine abnehmende Fähigkeit zur Erzeugung einer bestimmten Muskelkraft in Folge einer spezifischen gewünschten Anstrengung (Garcia et al. 2015; Laurent 2010; Yousif et al. 2019). Diese kann sowohl bei hoher Krafterzeugung bzw. langanhaltenden / kontinuierlichen Muskelkontraktionen als auch bei niedriger Krafterzeugung bzw. intermittierenden Kontraktionen

auftreten (Garcia et al. 2015). Problematisch bei statischer Belastung im Stehen kann dabei eine eingeschränkte Versorgung der Muskulatur vor dem Hintergrund des tatsächlichen Durchblutungsbedarfs sein. Mehr Bewegungen bzw. die Aktivierung der sog. Muskelpumpe reduzieren diesen physiologisch ungünstigen Effekt. D.h. die bessere Versorgung mit Sauerstoff sowie der Abtransport der Stoffwechselschlacken wirken folglich einer Verkrampfung und schmerzhaften Muskelverhärtung entgegen. Eine vorzeitige Ermüdung wird vermieden (vgl. dazu Berger et al. 2009).

Zur Analyse dieser Effekte gibt es verschiedene Ansätze. Bei der Oberflächen-Elektromyographie (EMG) wird die Muskelaktivität durch Elektroden auf der Hautoberfläche erfasst. Die Aufzeichnung erfolgt zumeist kontinuierlich über die Versuchszeit. Die Rohdaten werden anschließend auf eine spezifische Muskelkontraktion normalisiert, die anhand einer festgelegten oder maximalen Kraft vor Versuchsbeginn mittels spezieller Übungen je Muskel erhoben wird. Damit lassen sich zudem die Bewegungen hinsichtlich der statischen und dynamischen Komponenten der Tätigkeit analysieren (vgl. Kluth et al. 2013; Rücker et al. 2021).

Luttmann et al. (1996) liefern einen möglichen Ansatz zur Erfassung der Ermüdung mittels EMG. Dabei werden der zeitliche Verlauf der EA-Amplitude und die Median-/Mittenfrequenz (MF) parallel betrachtet (Kluth et al. 2013; Yousif et al. 2019), wobei eine zunehmende Kraft und gleichzeitig eine abnehmende Frequenz als Ermüdung definiert sind. Die sog. Joint Analysis of Spectrum and Amplitude Methode (JASA) von Luttmann et al. (1996, 2000) betrachtet simultan die Graphen des Amplituden- und Frequenzspektrums des EMG. Es werden vier Zustandsbereiche definiert (Ermüdung, Erholung, Kraftzunahme, Kraftabnahme). Die Ergebnisse aus den Regressionsgeraden des Amplituden- und Frequenzspektrums sind in ein Vier-Quadranten-Koordinatensystem eingebettet (vgl. Abb. 1), wobei Ermüdung mit zunehmender Amplitude der EA und gleichzeitigem Abfall der Median-/Mittenfrequenz auftritt (Luttmann et al. 1996). Luttmann et al. (1996) bewertet diese Darstellung anhand der Anzahl der Wertepaare in den jeweiligen Quadranten.

Eine interessante weitere Methode ist das sog. Muscle Twitch Force (MTF). Hier werden durch kurzzeitige niedrige elektrische Stimulationen mittels auf der Haut aufgebrachter Elektroden Muskelkontraktionen und hierdurch Muskelzuckungen ausgelöst, welche über einen Kraftaufnehmer erfasst werden. Über mehrere Serien an Muskelzuckungen wird der MTF-Wert gemittelt. Ein sinkender MTF-Wert wird hierbei als ein Anzeichen für auftretende Muskelermüdung definiert (Wall et al. 2020). Diese Messung erfolgt im Sitzen und kann als eine in den Prozess eingreifende Methode dementsprechend nur zu bestimmten Zeiten angewendet werden (Johnson et al. 2013; Wall et al. 2017, 2020).

Das Ziel der vorgestellten Untersuchung ist es, nicht in den Versuchsablauf mit stehender Körperhaltung eingreifen zu müssen und die Tätigkeit über eine längere Zeit beobachten zu können. Deshalb wird eine parallele Analyse der Bewegungsdynamik und der Ermüdung (JASA) angestrebt.

3. Vorstellung der experimentellen Studie und der Ergebnisse

Die Studie umfasst zwei Versuchstage von je 2,5 h mit zwei **Szenarien** in randomisierter Reihenfolge. Die Versuchszeit ist in Anlehnung an die LV 50 (Berger et al. 2009) festgelegt, welche Steharbeit in verschiedene Risikolevel einstuft (geringes Risiko bis 2,5 h Stehanteil). Gewählt wird eine im industriellen Bereich (z.B. Maschinenbedienung) typische Arbeitszykluszeit von 90 s mit unterschiedlichen Steh-

und Gehanteilen (Szenarien S1 / S2). Fünf Frauen und sechs Männer ($MV_{age} = 44,1$ Jahre; $SD_{age} = \pm 13,3$) nehmen an der Studie teil. Während der stehenden Zeitanteile des Experiments verfolgen die Probanden selbstgewählte PC-Aufgaben. Abb. 2 (rechts) spezifiziert Szenario S1 und S2 im Detail. In S1 müssen die Probanden zunächst 87 s stehen und dann 3 s gehen (Wechsel zwischen WP1 / WP2), eine typische Situation in der Vormontage, in der Werker nur wenige Schritte im Arbeitsablauf zur Seite treten. In S2 stehen sie 63 s lang (WP1) und gehen dann 27 s auf dem Laufband (TM) mit einer typischen Gehgeschwindigkeit von 3,2 km/h (vgl. BAuA 2019), d.h. ca. 1 Schritt pro Sekunde und somit im Einklang mit der Schrittfrequenz in S1. Die Einhaltung des Taktes von 90 s wird durch einen programmierten Timer und einen Supervisor kontrolliert und sichergestellt. Die **Hypothese** ist, dass S2 gegenüber S1 messbar erhöhte dynamische Bewegungen aufweist und weniger ermüdend ist.

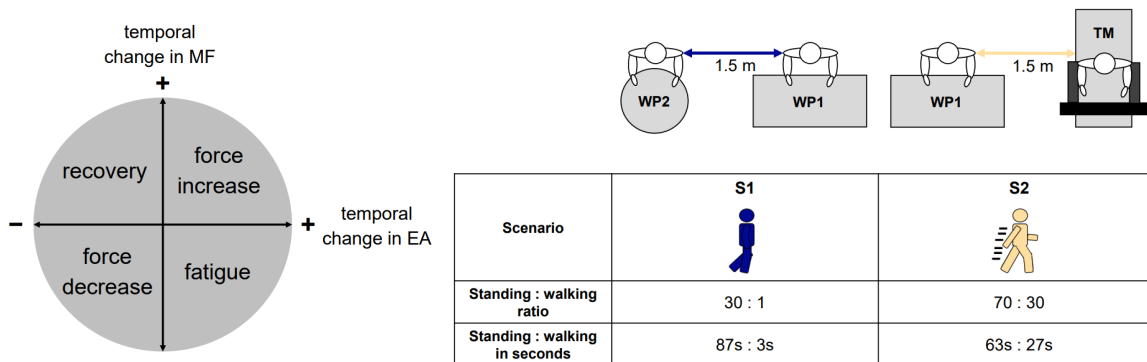


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Joint Analysis of Spectrum and Amplitude Methode (JASA; Luttmann et al. 2000) (links) und Studiendesign für S1 und S2 (rechts)

Die **Ergebnisse** der Studie in Bezug auf die statischen und dynamischen Anteile der Tätigkeit, die Volumenzunahme des Unterschenkels und die subjektive Beurteilung durch die Versuchspersonen sind bereits in Rücker et al. (2021) dargestellt. Wichtig ist es hier nochmal darauf hinzuweisen, dass eine Gehbewegung (vgl. S2) statistisch signifikant mit bis zu doppelt so hohen dynamischen Komponenten einhergeht wie wenige Schritte zur Seite (S1).

Mit der JASA Methode nach Luttmann et al. (1996) werden zunächst die Regressionsgeraden über den gesamten Versuchsablauf von 2,5 h für jeden der drei Muskeln (vgl. Tab. 1) gebildet. Die ersten und letzten fünf Zyklen werden u.a. aufgrund von Akklimatisierungseffekten ausgeschlossen, d.h. es werden 90 Zyklen betrachtet. Aufgrund einer fehlerhaften EMG-Ableitung eines Probanden umfassen die Ergebnisse zehn Datensätze.

Tabelle 1: Ergebnisse der JASA Methode (Luttmann et al. 1996) für S1 und S2 für drei Muskeln über eine Versuchsdauer von 2,5 h (90 Zyklen)

	Gastrocnemius medialis		Gastrocnemius lateralis		Tibialis anterior	
	Ermüdung	Erholung	Ermüdung	Erholung	Ermüdung	Erholung
S1	5	3	4	3	6	0
S2	2	6	2	7	1	7

Ein Vergleich der Wertepaare im Ermüdungsbereich zeigt, dass die Anzahl bei allen drei Muskeln bei S2 geringer ist als bei S1 (z.B. für Gastrocnemius medialis S1 = 5

und $S2 = 2$). Im Erholungsbereich zeigt sich ein gegenläufiges Bild, denn die Anzahl der Wertepaare bei $S2$ ist in diesem Fall höher als bei $S1$ (z.B. $S1 = 3$ und $S2 = 6$).

Aufgrund der unterschiedlichen Gehanteile in beiden Szenarien $S1$ und $S2$ nehmen die Autoren an, dass sich innerhalb der Versuchszeit Ermüdung auf- und auch wieder abbauen kann. Zur Analyse temporärer Effekte während der Versuchszeit wurde eine Weiterentwicklung der Methode angestrebt. Dabei werden gleitende Mittelwerte über jeweils fünf Zyklen (= 450 s) betrachtet, d.h. die Regressionsgeraden (EA / MF) werden sekundlich über die darauffolgenden fünf Zyklen mit auftretender Ermüdung „+1“ oder Erholung „-1“ in Kumulation analysiert. Ausgenommen sind die ersten und letzten fünf Zyklen. In Abb. 2 ist beispielhaft der akkumulierte temporäre Verlauf für den Gastrocnemius medialis für die Szenarien $S1$ und $S2$ eines Probanden dargestellt. In dieser kumulierten Darstellung zeigen Bereiche, in denen vorrangig Ermüdung auftritt, eine positive Steigung, wohingegen der Graph im Falle von überwiegender Erholung fällt. Bei beiden Szenarien finden sich im Zeitverlauf sowohl Bereiche, die im JASA-Quadrant der Ermüdung liegen als auch Bereiche im Quadrant der Erholung.

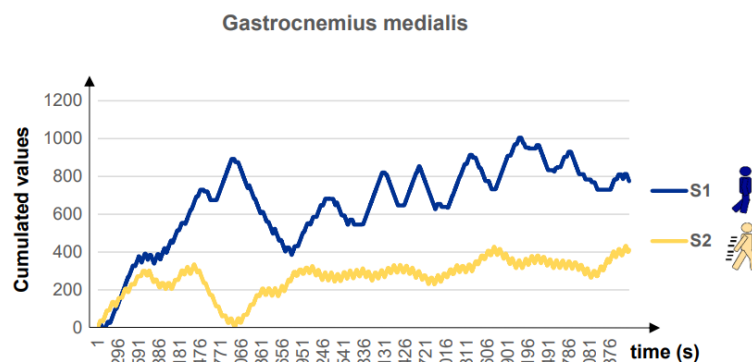
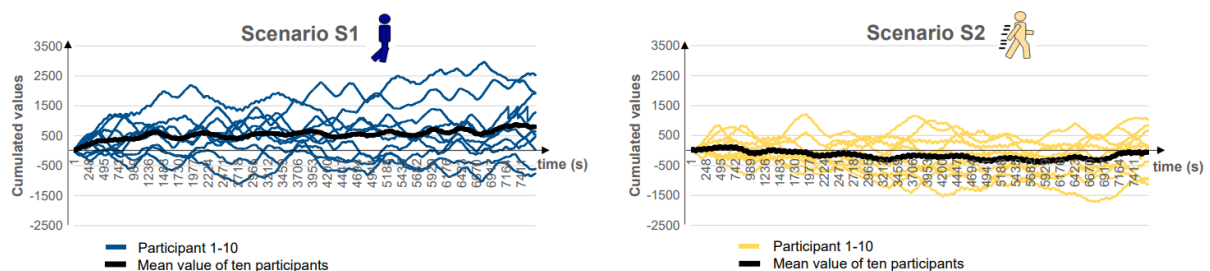


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der kumulierten Werte für den Muskel Gastrocnemius medialis für einen Probanden (kumulierte Werte über die Zeit: Ermüdung +1, Erholung -1)

Für den Gastrocnemius medialis zeigen acht von zehn Probanden im Mittel höhere kumulierte Werte in $S1$ als in $S2$. Für den Gastrocnemius lateralis liegt das Verhältnis bei sieben von zehn und für den Tibialis anterior bei neun von zehn.



Zur Analyse, in welcher Größenordnung S1 im Mittel höhere Ermüdungskomponenten zeigt als S2, werden die Mittelwerte der kumulierten Verläufe zum einen je Muskel und zum anderen für alle drei Muskeln zusammen statistisch untersucht. Für den Gastrocnemius medialis ($z=-2.293$, $p=.022$, $r=.73$), den Tibialis anterior ($z=-2.599$, $p=.009$, $r=.82$) sowie die kombinierte Betrachtung aller drei Muskeln ($z=-2.599$, $p=.009$, $r=.82$) zeigen sich signifikante Unterschiede.

4. Diskussion

Ähnliche Studien mit verschiedenen Ansätzen zeigen die im Folgenden diskutierten Ergebnisse. Garcia et al. (2016) und Wall et al. (2020) untersuchten statisches Stehen und Gehen auf einem Laufband mit einer Versuchszeit von 275 min (unterbrochen durch zwei Pausen). Sie ermittelten keine bzw. geringe Anzeichen für muskuläre Ermüdung nach 110 min. Balasubramanian et al. (2009) zeigten demgegenüber bereits nach 60 min Ermüdung in der Muskulatur der unteren Extremitäten bei *allerdings* statischem Stehen im Vergleich zu Stehen *mit einem Wechsel* zwischen sechs Arbeitsplätzen. Leider ist in den oben genannten Studien die Art der Gehbewegung nicht ausreichend vergleichbar dargestellt.

Die Autoren möchten im Ergebnis lediglich eine tendenziell höhere **Ermüdung** bei S1 gegenüber S2 ableiten. Zum einen liegt das daran, dass die hier vorgestellte Studie mit *Stehen und Gehen* in Kombination, die sich an realen Tätigkeiten in der Industrie orientiert, nicht unbedingt eine Ermüdung im Vergleich zu den oben erwähnten Studien erwarten lassen muss. Kritisch zu erwähnen ist zum anderen, dass die Verläufe aller zehn Probanden eine große Bandbreite aufweisen (vgl. Abb. 3). Teilweise liegen für einzelne Probanden sowohl S1 als auch S2 jeweils im Erholungsbereich (= unter 0) oder zeigen sogar gegenläufige Effekte. Zudem ist nicht auszuschließen, dass Probanden Gegenmaßnahmen ergreifen (kräftigere Schritte, unterbewusste Muskelanspannungen/-entspannungen). Abschließend sei noch erwähnt, dass eine zeitliche Mittelung plus eine Mittelung über die Muskulatur Effekte überdecken könnten.

Gegenüber der Betrachtung der Muskelermüdung zeigen die bereits publizierten Ergebnisse (vgl. Rücker et al. 2021) stets konsistente und signifikante Unterschiede zwischen S1 und S2. So treten bei S1 gegenüber S2 höhere Volumenzunahmen auf und es zeigen sich für die Merkmale „Beanspruchung des Unterschenkels“ und „Bewegungsdrang“ bei S1 gegenüber S2 signifikant höhere und früher eintretende subjektive Beschwerden. Während die statische Komponente der Muskelbeanspruchung erwartungsgemäß keinen signifikanten Unterschied zwischen S1 und S2 zeigt, ist die dynamische Komponente dagegen bei S2 signifikant höher als bei S1.

Es stellt sich deshalb die Frage, ob die bisherigen Ansätze zur Erfassung der Muskelermüdung nicht ausreichen oder ob Muskelermüdung nicht das ausschlaggebende Kriterium für die Beanspruchung ist, die durch dauerhaftes Stehen entsteht. Physiologische Aspekte des langanhaltenden Stehens (z.B. verminderte Durchblutung) werden in der LV 50 zwar durchaus beschrieben, finden sich aber in den Spezifikationen nicht wieder, in denen „wie bei allen statischen Haltungen die *Dauer ohne Entlastung* das Kriterium für Beschwerden bzw. gesundheitliche Auswirkungen ist“ (Berger et al. 2009, S.14). Auch andere Empfehlungen, wie die Leitmerkmal-methode (BAuA 2019) klassifizieren statisches Stehen lediglich nach dessen Dauer.

Im Ergebnis zeigt die vorliegende Studie, dass die Dauer des Stehens nicht das einzige Kriterium zur Beurteilung von Steharbeit sein sollte. Vielmehr haben die Bewegungsstruktur bzw. die Aktivierung der Muskelpumpe (mit messbar höheren

dynamischen Anteilen der Bewegung) einen signifikanten Einfluss auf die Beanspruchung. Die Art der Bewegung scheint ein entscheidender Faktor zu sein, d.h. ein „schlurfender“ Gang in Form eines gelegentlichen Schrittes zur Seite (S1) ist nicht zu empfehlen und darf nicht gleichgestellt werden mit einem ausgeprägten Gehen (S2).

5. Literatur

- Balasubramanian V, Adalarasu K, Regulapati R (2009) Comparing dynamic and stationary standing postures in an assembly task. In: *Int J Ind Ergon* 39(5):649–654.
- BAuA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.) (2019) MEGAPHYS. Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. Abschlussbericht Band 1, Dortmund.
- Berger H, Caffier G, Schultz K, Trippler D (2009) Bewegungsergonomische Gestaltung von andauernder Steharbeit (LV 50). Potsdam: Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik LASI (Hrsg).
- Carayon P (2006) *Handbook of Human Factors and Ergonomics in Health Care and Patient Safety*. Boca Raton: CRC Press.
- Garcia MG, Läubli T, Martin BJ (2015) Long-term Muscle Fatigue After Standing Work. In: *HFES* 57(7):1162–1173.
- Garcia MG, Wall R, Steinhilber B, Läubli T, Martin BJ (2016) Long-Lasting Changes in Muscle Twitch Force during Simulated Work While Standing or Walking. In: *HFES* 58(8):1117–1127.
- Halim I, Omar AR (2011) A review on health effects associated with prolonged standing in the industrial workplaces. In: *IJRRAS* 8(1):14–21.
- Halim I, Omar AR, Saman AM, Othman I (2012) Assessment of Muscle Fatigue Associated with Prolonged Standing in the Workplace. In: *Saf Health Work* 3(1):31–42.
- Johnson PW, Ciriello M, Kerin KJ, Dennerlein JT (2013) Using electrical stimulation to measure physiological changes in the human extensor carpi ulnaris muscle after prolonged low-level repetitive ulnar deviation. *Appl Ergon* 44(1):35–41.
- Kluth K, Steinhilber B, Anders C, Jäger M, et al. (2013) S2k-Leitlinie Oberflächen-Elektromyographie in der Arbeitsmedizin, Arbeitsphysiologie und Arbeitswissenschaft. München: Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e.V. (DGAUM) (Hrsg).
- Laurent R (2010) Disorders of Skeletal Muscle. In: *The Musculoskeletal System – Systems of the Body*. 2nd Ed., Elsevier:109-122.
- Luttmann A, Jäger M, Sökeland J und Laurig W (1996) Electromyographical study on surgeons in urology II. Determination of muscular fatigue. In: *Ergonomics* 39(2):298–313.
- Luttmann A, Jäger M und Laurig W (2000) Electromyographical indication of muscular fatigue in occupational field studies. In: *Int J Ind Ergon* 25(6):645–660.
- Lück M, Hünefeld L, Brenscheidt S, Bödefeld M, Hünefeld A (2019) Grundausswertung der BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2018. Vergleich zur Grundausswertung 2006 und 2012. 2. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg).
- MacLeod D (2012) *The Rules of Work: A Practical Engineering Guide to Ergonomics*. 2nd Ed., London: Taylor & Francis.
- Parker KG, Imbus HR (1992) *Cumulative Trauma Disorders: Current Issues and Ergonomic Solutions*. London: Taylor & Francis.
- Rücker L, Brombach J, Bengler K (2021) Steharbeit mit variierenden Gehanteilen – Einfluss auf Muskelaktivität und Volumenzunahme des Unterschenkels sowie subjektive Beschwerden. In: *Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg). Arbeit HumAine Gestalten*. Dortmund: GfA-Press.
- Wall R, Lips O, Seibt R, Rieger MA, Steinhilber B (2017) Intra- and Inter-Rater Reliability of Lower Leg Waterplethysmography, Bioelectrical Impedance and Muscle Twitch Force for the Use in Standing Work Evaluation. In: *Physiol Meas* 38(5):701–714.
- Wall R, Garcia G, Läubli T, Seibt R, Rieger MA, Martin B, Steinhilber B (2020) Physiological changes during prolonged standing and walking considering age, gender and standing work experience. In: *Ergonomics* 63(5):579–592.
- Waters TR, Dick RB (2014) Evidence of health risks associated with prolonged standing at work and intervention effectiveness. In: *Rehabil Nurs* 40(3):148–165.
- Yousif HA, Zakaria A, Rahim NA, Salleh AF, Mahmood M, Alfarhan KA, Kamarudin LM, Mamduh SM, Hasan AM, Hussain MK (2019) Assessment of Muscles Fatigue Based on Surface EMG Signals Using Machine Learning and Statistical Approaches: A Review. In: *IOP Conf. Ser., Mater Sci Eng* 705:012010.



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