

Elektrotaktile Wahrnehmung in Abhängigkeit unterschiedlicher Arbeitsumgebungsbedingungen

Daniel GRÖLLICH

*Professur für Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und
Arbeitssysteme, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden
Marschnerstraße 39, D-01307 Dresden*

Kurzfassung: Die elektrotaktile Stimulation eröffnet einen bislang wenig genutzten Informationskanal im menschlichen Körper. Das Wirkprinzip basiert auf der Stimulation freier Nervenenden in der Haut. In einer ersten Grundlagenstudie (n=81) mit am rechten Oberarm platzierten TENS-Elektroden wurde der Einfluss von Pulsbreite, Elektrodengröße und Elektrodenposition auf die wahrgenommenen Schwellen untersucht. Gänzlich unbekannt ist, ob und wie die elektrotaktile Wahrnehmung durch verschiedene Arbeitsumweltfaktoren beeinflusst wird. Im Rahmen der hier beschriebenen Studie werden dazu in einer Klimakammer die Einflussfaktoren „Umgebungstemperatur“ und „Luftfeuchtigkeit“ genauer untersucht. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung eines neuartigen körpernah getragenen Personenwarnsystems, das auf elektrotaktile Stimulation basiert.

Schlüsselwörter: elektrotaktile Stimulation, Wahrnehmungsschwellen, TENS, Klimakammer, Warnsystem, Informationsübertragung

1. Einleitung und Zielstellung

Bei der Ausführung einer Arbeitstätigkeit muss stets sichergestellt werden, dass potentielle Gefahrensituationen auch unter verschiedenen Arbeitsbedingungen rechtzeitig signalisiert werden können. Für solche Zwecke kommen häufig akustische oder optische Personenwarnsysteme zum Einsatz. Diese Signalformen können jedoch abhängig von Umgebungsbedingungen übersehen und/oder überhört werden, was teils schwere bis tödliche Personenunfälle zur Folge hat. Die elektrotaktile Stimulation eröffnet hier einen neuen und bislang wenig genutzten Informationskanal im menschlichen Körper. Diese Technologie bietet eine praxisrelevante Möglichkeit, Warnsignale auch unter eingeschränkten Hör- und Sichtverhältnissen zu vermitteln. Bisherige Forschungsarbeiten im Bereich der elektrischen Stimulation stammen hauptsächlich aus dem medizinischen Bereich und beschäftigen sich bspw. mit der Muskelstimulation (Vargas Luna et al. 2017; Stewart et al. 2017), der Prothetik (Peerdeman et al. 2011; Li et al. 2017) oder der Untersuchung von Schmerzempfindung (Stackhouse et al. 2016). Die zugehörigen Ergebnisse können aufgrund ihrer Spezifik nur begrenzt für die Entwicklung eines elektrischen Warnsystems genutzt werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen eines laufenden DFG Projektes in einer Pilotstudie (Lau et al. 2017) sowie einer darauf aufbauenden größeren Referenzstudie (Dölker et al. 2020) an 81 Probanden (m=52, w=29) ein breites Spektrum an Stimulus- und Elektrodenparametern am rechten Oberarm untersucht. Es konnten verschiedene Arten der qualitativen und örtlichen Wahrnehmung der elektrischen Stimulation beobachtet werden. Daraus wurden folgende drei Schwellen der elektrotaktile Wahrnehmung abgeleitet: (1) die

Wahrnehmbarkeitsschwelle WS (gerade wahrnehmbarer Stimulus), (2) die Aufmerksamkeitsschwelle AS (Stimulus, der Aufmerksamkeit auf sich zieht) und (3) die Intoleranzschwelle IS (Stimulus intolerabler Wahrnehmungen). Zudem wurden Abhängigkeiten der Signalwahrnehmung von Pulsbreite, Elektrodengröße und Elektrodenposition untersucht. Gänzlich unbekannt ist, ob und wie die elektrotaktile Wahrnehmung durch verschiedene Arbeitsumweltfaktoren beeinflusst wird. Es gibt jedoch Erkenntnisse, dass äußere Umwelteinflüsse in der Arbeitsumgebung einen Einfluss auf die menschliche Wahrnehmung haben (Schmauder & Spanner-Ulmer 2014, S.394-399). Bisherige Studien zeigen bspw., dass es Zusammenhänge zwischen Temperaturänderungen und taktiler Wahrnehmung gibt. So untersuchten Liu et al. (2011) den Einfluss von thermischen Umgebungsbedingungen in Innenräumen auf die Wahrnehmungsschwelle des Menschen. Kröling & Mühlbauer (1992) fanden Zusammenhänge von Kälte und gelenknaher elektrischer Schmerzschwelle. Schmidt, Germano & Milani (2016) untersuchten, ob Wärmeanwendung einen Einfluss auf die taktile Wahrnehmungsschwelle hat. Zudem ist bekannt, dass die empfundene Vibrationsschmerzschwelle u. a. abhängig von der Erwärmung der Haut durch die Raumtemperatur ist (Harada et al.1998). Auf dem Gebiet der elektrotaktile Wahrnehmung sind hierzu bislang nur wenige Erkenntnisse vorhanden. Es lässt sich jedoch die Hypothese ableiten, dass auch die elektrotaktile Wahrnehmung durch die Umgebungs- und Hauttemperatur aufgrund der Aktivierung von Nozi-, Thermo- und Mechanorezeptoren beeinflusst wird. Ein weiterer Zusammenhang wird bei der Luftfeuchtigkeit erwartet. Die Hypothese lautet: Je höher die Luftfeuchtigkeit, desto niedriger ist der Hautleitwiderstand durch erhöhte Feuchtigkeitsbildung auf der Haut. In der im Folgenden beschriebenen laufenden Probandenstudie (geplant n=84) werden hierzu die Einflussfaktoren „Umgebungstemperatur“ und „Luftfeuchtigkeit“ auf die elektrotaktile Wahrnehmung genauer untersucht. Zusätzlich werden verschiedene Körperparameter der Testpersonen aufgezeichnet um Zusammenhänge zwischen physiologischen Körperreaktionen und elektrotaktile Wahrnehmung identifizieren zu können. Ziel ist die Entwicklung eines individuellen Personenwarnsystems mit in die Kleidung integrierten Elektroden zur kutanen elektrotaktile Stimulation der Haut.

2. Studiendesign und Untersuchungsmethodik

2.1 Studiengruppe und Messaufbau

Die Parameterstudie wird an gesunden Versuchspersonen (m/w) durchgeführt. Diese werden in einer Klimakammer verschiedenen kombinierten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereichen ausgesetzt, während der rechte Oberarm an vier Stellen elektrotaktile stimuliert wird. Untersucht werden folgende Klimabedingungen:

- (TK) konstant Trocken-Kaltes Klima (ca. 11-13°C und $\phi < 30\%$ RH),
- (FK) konstant Feucht-Kaltes Klima (ca. 11-13°C und $\phi > 85\%$ RH),
- (TW) konstant Trocken-Warmes Klima (ca. 38-42°C und $\phi < 30\%$ RH),
- (FW) konstant Feucht-Warmes Klima (ca. 38-42°C und $\phi > 85\%$ RH).

Die Versuche sind auf zwei Tage aufgeteilt. Die Versuchsdauer beträgt je 3,5 Stunden. Pro Versuchstag werden die Schwellenwerte für jeweils 2 Arbeitsumgebungsbedingungen ermittelt. Jede Versuchsperson beginnt einmal mit kalter und einmal mit warmer Klimabedingung, wobei die gewählte Luftfeuchtigkeit pro Versuchstag konstant bleibt; die Temperatur wird angepasst (Bsp. Tag 1: TK-TW; Tag 2: FW-FK).

Der Aufbau des Stimulationssetups (Abbildung 1) erfolgte analog zur Referenzstudie Dölker et al. (2020). Die Stimulationssignalinformation wird von einem PC über ein Datenaufnahmegerät NI-USB-6361 (National Instruments, Austin, TX, USA) und einen Verbindungsblock BNC NI-2120 (National Instruments) zu einem isolierten bipolaren Konstantstromstimulator DS5 (Digitimer Ltd., Letchworth Garden City, Großbritannien) weitergeleitet, welcher das Stromstimulationssignal erzeugt. Über die Verbindung zu einem Multiplexer D188 (Digitimer Ltd.) und die digitale Kanalauswahl vom BNC NI-2120 wird das Stimulationssignal an das gewünschte Elektrodenpaar übertragen.

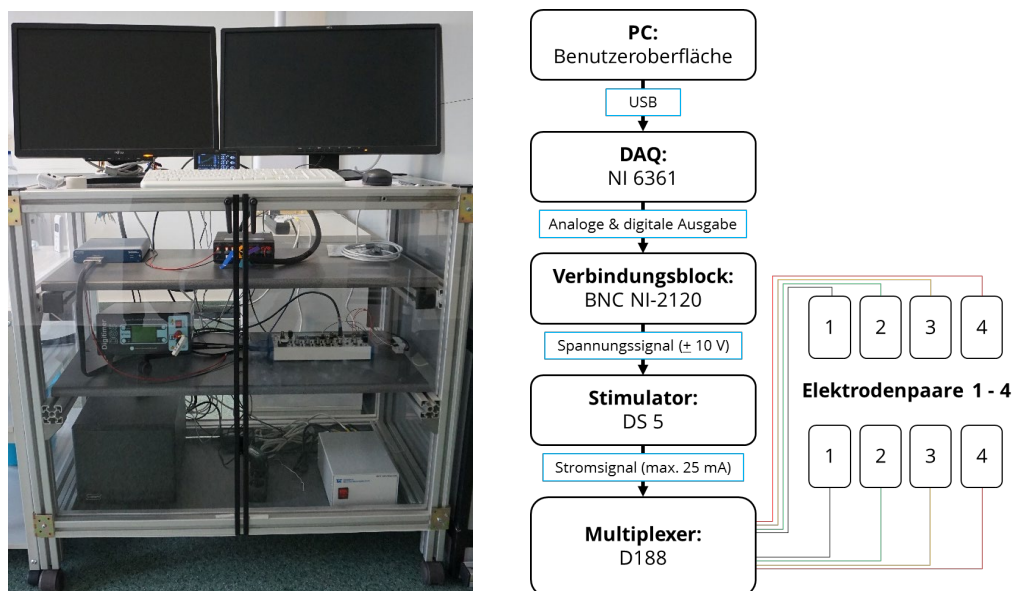


Abbildung 1: Schema des experimentellen Aufbaus. Links: Aufbau des Messequipments. Rechts: Blockdiagramm des Stimulationssetups.

Als Stimulationsparameter werden biphasische Rechteckimpulse mit einer Pulsbreite von $150 \mu\text{s}$ und einer Pulsfrequenz von 1 Hz bei einer konstanten Spannung von ± 10 V verwendet. Die Stromstimulationsamplitude beträgt max. 25 mA (einstellbare Schrittweite 0,1; 0,2 oder 0,5 mA).

Die Simulation der Arbeitsumgebungsbedingungen erfolgt in einer Klimakammer. Die Abmessungen betragen $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2,50\text{m}$ (L/B/H), so dass im Inneren (in Folgestudien) auch Arbeitstätigkeiten mit ausreichend Bewegungsfreiraum ausgeführt werden können. Über ein PT 4500S Industrieklimagerät (Trotec GmbH, Heinsberg, Germany) lassen sich Temperaturen bis $+10^\circ\text{C}$ realisieren. Das Aufheizen der Klimakammer bis zu $+45^\circ\text{C}$ erfolgt über Heizlüfter sowie eine TIH 900 S Infrarot-Heizplatte (Trotec GmbH). Über einen TTR 57-E Adsorptions-Luftentfeuchter (Trotec GmbH) kann sowohl in warmer als auch kalter Umgebung eine Raumluftfeuchtigkeit von $<30\%\text{RH}$ erreicht werden. Zur Befeuchtung der Klimakammer auf bis zu $97\%\text{RH}$ wird ein Ultraschall-Luftbefeuchter Sonic 1 (AFT GmbH & Co.KG, Roßtal, Germany) verwendet.

Die elektrotaktile Stimulation erfolgt im Rahmen der Studie mit 8 wiederverwendbaren selbstklebenden TENS-Elektroden (axon GmbH, Leonberg, Germany) der Größe $25\text{mm} \times 40\text{mm}$, welche in gleichmäßigen Abständen paarweise entlang der Mittellinie zwischen Schultergelenk und Ellenbogen des rechten Arms angebracht werden (Abbildung 2). Der Abstand zwischen oberer und unterer Elektrode beträgt jeweils 2 cm. Die 4 Elektrodenpaare sind fortlaufend nummeriert, wobei Elektrodenpaar 1 (E1) zur anterioren, E2 und E3 zur lateralen, und E4 zur posterioren Position am Arm korrespondieren.

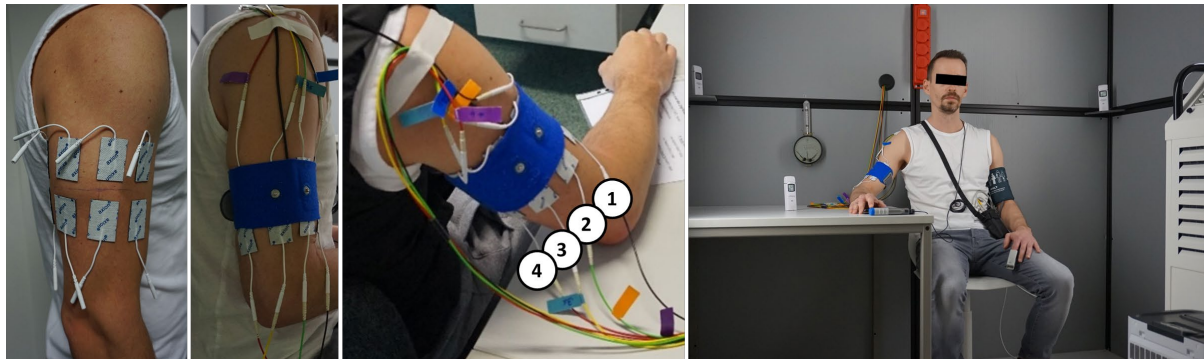


Abbildung 2: Links: Elektrodenplatzierung am rechten Oberarm. 2.v.Links: Verkabelung und platzierte Sensorik. 3.v.Links: Armhaltung während der Messungen und Elektrodenmarkierung. Rechts: Testszenario in der Klimakammer (am Bsp. TK)

2.2 Messmethode

Für die vier genannten Arbeitsumgebungsbedingungen werden die notwendigen Stromamplituden für jedes der 4 Elektrodenpaare ermittelt, die notwendig sind um jeweils die WS, AS und IS zu erreichen (entspricht 1 Messdurchlauf). Ergänzend wird der Amplitudenwert dokumentiert, ab dem ggf. Muskelzucken (MZ) eintritt. Es werden pro Klimabedingung 3 Messdurchläufe durchgeführt; immer beginnend bei 0,5 mA mit schrittweiser Erhöhung bis max. 25mA. Die Reihenfolge, in der die 4 Elektrodenpaare angesteuert werden, wird für jeden Messdurchlauf randomisiert um Gewöhnungs- und Lerneffekte zu minimieren. Zusätzlich wird vor Klimabedingung 1, zwischen Klimabedingung 1 und 2 und nach Klimabedingung 2 jeweils außerhalb der Klimakammer eine Referenzmessung (1 Messdurchlauf) bei 22°C / 50%RH durchgeführt. Vor Beginn der ersten Referenzmessung erfolgt eine Gewöhnungsmessung. Diese besteht aus mindestens 2 Messdurchläufen und dient der Versuchsperson dazu, ein Gefühl für die elektrotaktile Stimulation zu entwickeln. Neben der Dokumentation der erreichten Amplitudenwerte für WS, AS, IS und MZ werden für diese Schwellenwerte die qualitative Wahrnehmung (wie hat es sich angefühlt) und die örtliche Wahrnehmung (wo war die Empfindung zu spüren) abgefragt. Weiterhin werden während der Versuchsdurchführung bei allen Testpersonen der Blutdruck am linken Oberarm (automatisierte Messung alle 5 Minuten) sowie die Blutsauerstoffsättigung am Zeigefinger der linken Hand (Messung kontinuierlich) mittels Patient Monitor (Contec Medical Systems Co. Ltd., Qinhuangdao, China) erfasst. Ebenso werden Hautoberflächentemperatur und Hautoberflächenfeuchte im Bereich der Elektroden am rechten Oberarm (Messung kontinuierlich) mittels P5185 USB Datenlogger (PeakTech Prüf- und Messtechnik GmbH, Ahrensburg, Germany) erfasst, sowie die Körperkerntemperatur im rechten Ohr (Messung zu vorgegebenen Zeitpunkten während des Versuches) mittels Infrarot Ohr-Thermometer IRT3030 (Braun GmbH, Kronberg im Taunus, Germany).

2.3 Versuchsdurchführung

Zu Versuchsbeginn wird den ProbandInnen standardisierte Oberkörperbekleidung zur Verfügung gestellt um einen problemlosen Zugang zum Oberarm zu gewährleisten. Anschließend erfolgt eine Messung des Armumfanges, um die genauen Elektrodenabstände festzulegen. Zudem wird die Hautdicke im Bereich der Elektroden am rechten Oberarm mit einem Caliper gemessen. Soweit notwendig, erfolgt eine Hautvorbereitung (Abwischen der Haut mit Wasser; ggf. Rasur der betreffenden Oberarmpartie) bevor die TENS-Klebelektroden sowie die weiteren Sensoren (Blutdruck-,

Puls- und Sauerstoffsättigungssensoren, Hautoberflächentemperatur- und Hautoberflächenfeuchtigkeitssensor) angebracht werden. Nach Abschluss der Vorbereitungsmaßnahmen erfolgen die Messungen an Untersuchungstag 1 und 2 gemäß dem beschriebenen Vorgehen in den Abschnitten 2.1. und 2.2.

3. Datenauswertung und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer ersten Teilauswertung basierend auf 32 getesteten Personen ($w=12$ / $m=20$) im Alter von $27 \pm 5,7$ Jahre (Mittelwert \pm Standardabweichung) dargestellt und diskutiert. Personenindividuell können eindeutige Schwellenwertverschiebungen von WS, AS und IS bei verschiedenen Umgebungsbedingungen beobachtet werden. Abbildung 3 zeigt die gemittelten Messwerte (\bar{x} aus E1 bis E4) für TW, FW, FK und TK im Vergleich zur Referenzmessung (Ref.) am Beispiel einer weiblichen Probandin. Der größte Einfluss kann bei *Feucht-Warmen* (FW) Klima beobachtet werden.

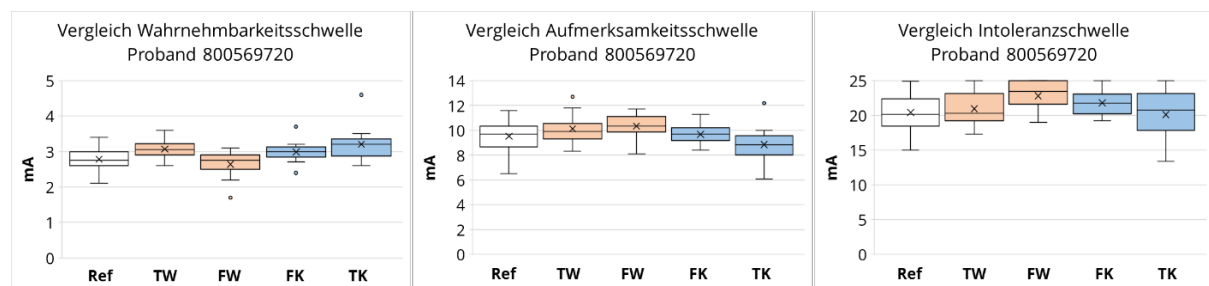


Abbildung 3: Schwellenwertverschiebung für WS (Links), AS (Mitte) und IS (Rechts) bei TW, FW, FK und TK im Vergleich zur Referenzmessung (Ref.) am Bsp. einer Einzelperson (w)

Gemittelt über alle bislang getesteten Personen sind die Schwellenwertabweichungen für WS, AS und IS im Vergleich zur Referenzmessung weniger deutlich. Hier bedarf es einer größeren Datenbasis. Offensichtliche Unterschiede ergeben sich beim Geschlecht. Frauen nehmen die elektrotaktile Stimulation im Durchschnitt früher wahr als Männer, erreichen jedoch auch früher die IS (vgl. Tabelle 1). Weiterhin konnte beobachtet werden, dass bei männlichen Probanden Muskelzucken in 83,4% der Fälle auftritt und damit doppelt so häufig als bei weiblichen Versuchsteilnehmerinnen (39,9%). Am frühesten setzt Muskelzucken am Elektrodenpaar 1 ein ($13,4 \pm 0,8$ mA), am spätesten an Elektrodenpaar 2 ($17,9 \pm 0,9$ mA).

Tabelle 1: Wahrnehmungs-, Aufmerksamkeits- und Intoleranzschwellen sowie Schwelle für Muskelzucken der 32 ProbandInnen in mA als zusammengefasste Mittelwerte der Elektrodenpaare 1-4 für die vier untersuchten Klimazustände im Vergleich zur Referenzmessung.

Zustand	Ø AS [mA]		Ø WS [mA]		Ø MZ [mA]				Ø IS [mA]	
	w	m	w	m	w	Ant.*	m	Ant.*	w	m
Ref.	3,15	4,58	8,35	11,75	16,99	38,0%	15,20	85,9%	18,42	22,24
FK	3,34	5,12	8,62	12,66	15,70	45,5%	15,64	82,1%	18,85	22,95
FW	3,10	4,93	8,68	12,95	16,74	48,3%	16,28	73,3%	18,86	23,04
TK	3,54	5,27	9,28	12,61	15,83	33,3%	15,68	87,3%	18,66	22,25
TW	3,32	4,90	9,19	13,02	18,42	34,1%	16,45	88,2%	18,71	22,67

*gibt an, bei wieviel Prozent der getesteten Probandinnen/Probanden Muskelzucken auftrat;
w = weiblich; m = männlich

Es ist anzunehmen, dass hierbei Unterschiede in Hautdicke und Hautbeschaffenheit zwischen Männern und Frauen eine Rolle spielen (mittlere gemessene Hautdicke im Bereich der Elektrodenpaare 1-4: Frauen $22,1 \pm 1,9$ mm; Männer $16,4 \pm 2,2$ mm). Zudem könnten Muskelaufbau und -masse einen Einfluss haben. Aktuell kann noch keine Aussage getroffen werden, ob Luftfeuchtigkeit, Hautfeuchtigkeit, Umgebungstemperatur oder Hautoberflächentemperatur den größeren Einfluss auf die Schwellenwertverschiebungen hat. Die bisherigen Ergebnisse weisen ferner darauf hin, dass die Schwellenwertverschiebung zunimmt, je länger eine Versuchsperson den kalten bzw. warmen Umgebungsbedingungen ausgesetzt ist. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, ebenso wie zu Einflüssen durch Alter und individuelle Tagesform. Nach Abschluss der hier beschriebenen Studie werden die ermittelten Ergebnisse zusätzlich mit denen der Referenzstudie (s. Dölker et al. 2020) verglichen. Anhand bislang vorliegender Erkenntnisse aus den Studien zeichnet sich ab, dass bei der Entwicklung eines elektrotaktilen Personenwarnsystems Einflüsse aufgrund sich ändernder Umgebungsbedingungen sowie personenindividuelle Parameter deutlich stärker berücksichtigt werden müssen, als ursprünglich angenommen.

4. Literatur

- Dölker E-M, Lau S, Gröllich D, Haase E, Krzywinski S, Schmauder M, Haueisen J (2020) Techniken zur Bestimmung von Parametern für die elektrische Personenwarnung. ASU - Zeitschrift für medizinische Prävention 55:645-652.
- Harada N, Iwamoto M, Laskar MS, Hirokawa I, Nakamoto M, Shirono S, Wakui T (1998) Effects of room temperature, seasonal condition and food intake on finger skin temperature during cold exposure test for diagnosing hand-arm vibration syndrome. Industrial Health 36:166-170.
- Krölling P, Mühlbauer M (1992) Einfluss von Eisbeutel, Kaltluft und N₂-Kaltgas auf die gelenknahe elektrische Schmerzschwelle. Phys Rehab Kur Med 2:1-6.
- Lau S, Fiedler P, Hunold A, Haase E, Gröllich D, Pietsch K, Höhn K, Schmauder M, Rödel H, Haueisen J (2017) Perception thresholds of cutaneous electric stimulation around the upper arm. Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik 62:169.
- Li K, Fang Y, Zhou Y, Liu H (2017) Non-Invasive stimulation-based tactile sensation for upper-extremity prosthesis: A Review. IEEE Sensors Journal 17:2625-2635.
- Liu H, Tan Q, Li B, Tan M-I, Ma X (2011) Impact of cold indoor thermal environmental conditions on human thermal response: J. Cent. South Univ. Technol. 18:1285–1292.
- Peerdeman B, Boere D, Witteveen H, Veld R, Hermens H, Stramigioli S, Rietman J, Veltink P, Misra S (2011) Myoelectric forearm prostheses: State of the art from a user-centered perspective. Journal of rehabilitation research and development 48:719-37.
- Schmauder M, Spanner-Ulmer B: Ergonomie (2014) Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation (1. Auflage); ISBN 978-3-446-44139-2: 394-399.
- Schmidt D, Germano A, Milani T (2017) Effects of active and passive warming of the foot sole on vibration perception thresholds. Clinical Neurophysiology Practice 2:38-43.
- Stackhouse SK, Taylor CM, Eckenrode BJ, Stuck E, Davey H (2016) Effects of noxious electrical stimulation and eccentric exercise on pain sensitivity in asymptomatic individuals. Phys Med Rehab 8:415–424.
- Stewart AM, Pretty CG, Chen XQ (2017) An evaluation of the effect of stimulation parameters and electrode type on bicep muscle response for a voltage-controlled functional electrical stimulator. IFAC-PapersOnLine 50:15109-15114.
- Vargas Luna JL, Krenn M, Mayr W, Cortés RJA (2017) Optimization of interphase intervals to enhance the evoked muscular responses of transcutaneous neuromuscular electrical stimulation. Artificial Organs 41:1145-1152.

Danksagung: Es gilt ein ausdrücklicher Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung (DFG-SCHM1681 / 6-2, DFG-HA28899 / 23-2 und DFG-KR3487 / 10-2).



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