

Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen der kutanen elektrischen Stimulation um den Oberarm im Rahmen individueller Personenwarnung

Daniel GRÖLLICH¹, Stephan LAU², Katrin HÖHN¹, Elke HAASE³, Kathrin PIETSCH³,
Martin SCHMAUDER¹, Jens HAUEISEN², Sybille KRZYWINSKI³

¹ *Professur für Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden
Marschnerstraße 39, D-01307 Dresden*

² *Institut für Biomedizinische Technik und Informatik, Fakultät für Informatik und Automatisierung, Technische Universität Ilmenau
Gustav-Kirchhoff-Straße 2, 98693 Ilmenau*

³ *Professur für Konfektionstechnik, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, Fakultät Maschinenwesen, Technische Universität Dresden
Hohe Straße 6, D-01069 Dresden*

Kurzfassung: Tragbare Warnsysteme können Personen auf unmittelbar drohende Gefahren hinweisen. Aktuelle Systeme beruhen häufig auf akustischen oder optischen Signalen. Einen neuen Forschungsansatz stellt die Warnung durch kutane elektrische Stimulation dar. Bisher werden derartige elektrische Impulse jedoch nicht für Warnsysteme verwendet. Grenz- und Richtwerte existieren in diesem Zusammenhang nicht. Hierfür wurden in einer ersten Versuchsreihe Probanden mithilfe bipolar am Oberarm angeordneter Gelelektroden mit monophasischen Rechteckimpulsen stimuliert. Ermittelt wurden die absolute Wahrnehmungsschwelle, die Aufmerksamkeitsschwelle und die Intoleranzschwelle. Ein robustes Amplitudenfenster für tolerierbare Wahrnehmungen, konnte bei allen Teilnehmern in den lateralen bis posterioren Abschnitten des Oberarms gefunden werden.

Schlüsselwörter: Warnsystem, Elektrische Stimulation, Haut, Rechteckimpulse, Wahrnehmungsschwellen, Textilelektroden

1. Einleitung

1.1 Warnsysteme

Zurückliegende Forschungsarbeiten (Schmauder et al. 2014) zeigen, dass existierende Warnsysteme in ihrer bisherigen Form an ihre Grenzen stoßen. Gründe hierfür sind den Autoren zufolge z. B. darin zu sehen, dass optische oder akustische Signale aufgrund spezifischer Arbeitsbedingungen (Störlärmpegel von Maschinen und Geräten, eingeschränkte Sicht) nicht immer von den Beschäftigten ausreichend wahrgenommen werden. Das betrifft beispielsweise auch die Gleichzeitigkeit von Eisenbahnbetrieb und Bauarbeiten an und in der Nähe von Gleisanlagen, die schon seit jeher ein besonderes Problem darstellen.

In den Jahren 2012 bis 2014 wurden diesbezüglich im Auftrag der DB Netz AG (DB Fahrwegdienste GmbH) von der TU Dresden, Professur für Arbeitswissenschaft,

Professur für Textiltechnik, Professur für Verkehrssicherungstechnik und einem Elektronikunternehmen zwei Forschungsprojekte durchgeführt, welche erstmals den Aspekt der Warnung mittels elektrischer Signale in Verbindung mit Arbeitssicherheit zum Gegenstand hatten (Höhn 2015). Die im Rahmen dieser Forschungsprojekte durchgeführte Machbarkeitsstudie bestätigte, dass sich die kutane elektrische Stimulation grundsätzlich zur individuellen Personenwarnung eignet. Auch Geng et al. (2012) und Steenbergen et al. (2013) belegen mit ihren Studien, dass die elektrische Stimulation eine robuste komplementäre Signalisierungsmethode darstellen kann. Jedoch wurden in der Machbarkeitsstudie auch verschiedene Forschungslücken aufgedeckt. Dies betrifft vor allem die Schwellenwertermittlung. Zwar gibt es zahlreiche Untersuchungen im Rahmen der Reizstromtherapie, für die untere Auslöseschwelle existieren bislang jedoch weder Grenz- noch Richtwerte. Diese sind allerdings ausschlaggebend für die Gestaltung eines künftigen Personenwarnsystems basierend auf elektrischen Impulsen, um eine sichere Wahrnehmung des Signals auch unter Störeinflüssen gewährleisten zu können.

Dieser Thematik widmet sich das DFG geförderte Forschungsvorhaben „Taktile Warnung“. Dieser Artikel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Projekt sowie zu ersten Ergebnissen und zum weiteren Forschungsbedarf.

1.2 Elektrische Stimulation

Elektrischer Strom hat eine effektive Wirkung im menschlichen Körper. Die gesamte Steuerung und Regelung der Körperfunktionen im menschlichen Körper werden vom Gehirn über das zentrale Nervensystem mittels physikalisch-chemischer Vorgänge gesteuert. Die Besonderheit dieser physikalisch-chemischen Vorgänge liegt darin, dass sie bioelektrischer Natur sind. Das bedeutet, dass die Steuerung und Regelung des menschlichen Körpers, einschließlich der Funktionsweise des Gehirns, mittels Ionenströmen (Bolz 2009) stattfindet, wodurch sich auch erklärt, warum elektrische Reize von außen einen so großen Einfluss auf den menschlichen Körper haben. Trifft ein körperfremder Strom auf den menschlichen Körper, kann dieser bei Überschreitung bestimmter Parameter die Funktionsabläufe im menschlichen Körper stören (Löcherer et al. 2011). Generell kann festgehalten werden, dass die Wirkung des elektrischen Stroms auf den menschlichen Körper gut erforscht und bekannt ist. Das Hauptaugenmerk zurückliegender Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Arbeitswissenschaft bezog sich dabei jedoch meist auf die hauptsächliche Wirkung von Stromschlägen und besonders Stromunfällen mit Gleichstrom oder Wechselstrom bei einer Netzspannung von 50Hz sowie auf Wirkungen von Starkstrom, Drehstrom, Hochspannungsleitungen und Blitzschlägen (Kleibe 2017).

Das Hauptaugenmerk im DFG Forschungsprojekt hingegen zielt auf die Untersuchung der Wirkung kleiner gepulster Gleichströme auf den menschlichen Körper ab. Von Interesse ist dabei, welchen Einfluss körpereigene Parameter und äußere Einflüsse auf die Wahrnehmung des elektrischen Signals haben.

1.3 Anforderungen an die taktile Warnung durch elektrische Impulse

Bisher wurden elektrische Impulse nur für Zwecke der medizinischen Rehabilitation von Patienten genutzt. Bei der Reizstromtherapie wird mit eher hohen Stromstärken gearbeitet, da hier in erster Linie auf Muskelaktivität abgezielt wird. Aus dieser Therapieform lassen sich vor allem Werte für die Schmerzschwelle, die Immobilisie-

rungsschwelle und die Schwelle des Herzkammerflimmers ableiten. Bei der Einleitung elektrischer Impulse im Sinne eines Warnsignals ist das Erreichen dieser Schwellen jedoch unter allen Umständen zu vermeiden.

Um die sichere Wahrnehmbarkeit, Unterscheidbarkeit und Eindeutigkeit eines Signals, wie sie auch in DIN EN ISO 7731 (akustisch) und DIN EN 842 (optisch) gefordert werden, gewährleisten zu können, müssen für das elektrische Signal folgende Bedingungen erfüllt sein:

Der kutan eingeleitete Stromimpuls muss

1. deutlich oberhalb der (persönlich) spürbaren Wahrnehmungsschwelle liegen,
2. eindeutig von anderen Sinneswahrnehmungen unterscheidbar sein,
3. deutlich unterhalb jeglicher Schwellen liegen, die zu einer Gefährdung führen könnten.

2. Methoden

2.1 Wahrnehmungsschwellen

Für die Probandenstudie wurden folgende Schwellen definiert:

➔ (absolute) Wahrnehmungsschwelle

Diese Schwelle kennzeichnet den Empfindungsbereich, ab dem für den Probanden im Ruhezustand und ohne jegliche Störeinflüsse von außen eine Wahrnehmung aufgrund des Stromeintrages gerade so spürbar ist.

➔ Aufmerksamkeitsschwelle

Hierbei handelt es sich um den Schwellwert, ab dem das eingeleitete Signal so deutlich wahrgenommen wird, dass die Aufmerksamkeit des Probanden auf diese Sinneswahrnehmung gezogen wird.

➔ Intoleranzschwelle

Dieser Schwellwertbereich ist erreicht, wenn der Proband den Stromimpuls als unangenehm und im Sinne eines Warnsignals für nicht mehr tolerierbar befindet. In der Regel ist dieser Bereich erreicht, wenn es zu einem Gefühl von Stechen auf der Hautoberfläche kommt.

Im Fall von auftretendem Muskelzucken gilt dies als Abbruchkriterium für die Ermittlung der Intoleranzschwelle, auch wenn der Proband diese dem Gefühl nach noch nicht erreicht hat. Hintergrund hierfür ist, dass ein Warnsignal niemals zu einer körperlichen Beeinträchtigung führen darf. Ein plötzliches Muskelzucken oder gar Muskelkontraktionen, ausgelöst durch das elektrische Signal, könnten im späteren Arbeitsalltag zu unwillentlich ausgeführten Schreckbewegungen führen, wodurch beispielsweise Arbeitsgeräte fallen gelassen werden oder andere gefährliche Situationen entstehen könnten.

In den vorangestellten Forschungsprojekten hat sich im Rahmen der Machbarkeitsstudie mit der DB Netz AG der Oberarm als besonders geeigneter Stimulationsort erwiesen. Der damals entwickelte Prototyp eines Personenwarngerätes in Form einer mit Elektroden bestückten Manschette wurde am Oberarm im Vergleich zu anderen Körperregionen als am wenigsten störend empfunden. Daher erfolgt die Ermittlung der verschiedenen Schwellen im Rahmen der aktuellen Untersuchungen ausschließlich am Oberarm. Es ist zu vermuten, dass die Auslösewerte für Wahrnehmungsschwelle, Aufmerksamkeitsschwelle und Intoleranzschwelle in Abhängigkeit der Körperregion variieren, was vor allem damit zusammenhängen dürfte, wie viele Rezeptoren der Haut am jeweiligen Einleitungsort für die Stimulation vorhanden

sind. Die experimentell ermittelten Wertebereiche besitzen dementsprechend auch nur Gültigkeit für diese Körperregion.

2.2 Versuchsdesign

Die kutane elektrische Stimulation rund um den Oberarm erfolgte zunächst mithilfe handelsüblicher Gelelektroden ($\varnothing 16$ mm), welche an einen Konstantstromstimulator angeschlossen werden. Dieser liefert kurzzeitige Stromimpulse. Es wurden jeweils acht Elektrodenpaare in zwei Reihen rund um den Oberarm angebracht. Für die Positionierung der Gelelektroden wurde der Oberarm des jeweiligen Probanden in vier Zonen unterteilt; Medial, Lateral, Posterior und Anterior (vgl. Abb. 1). Der Abstand der Gelelektroden zueinander betrug ca. 5-6 cm von Mitte zu Mitte.

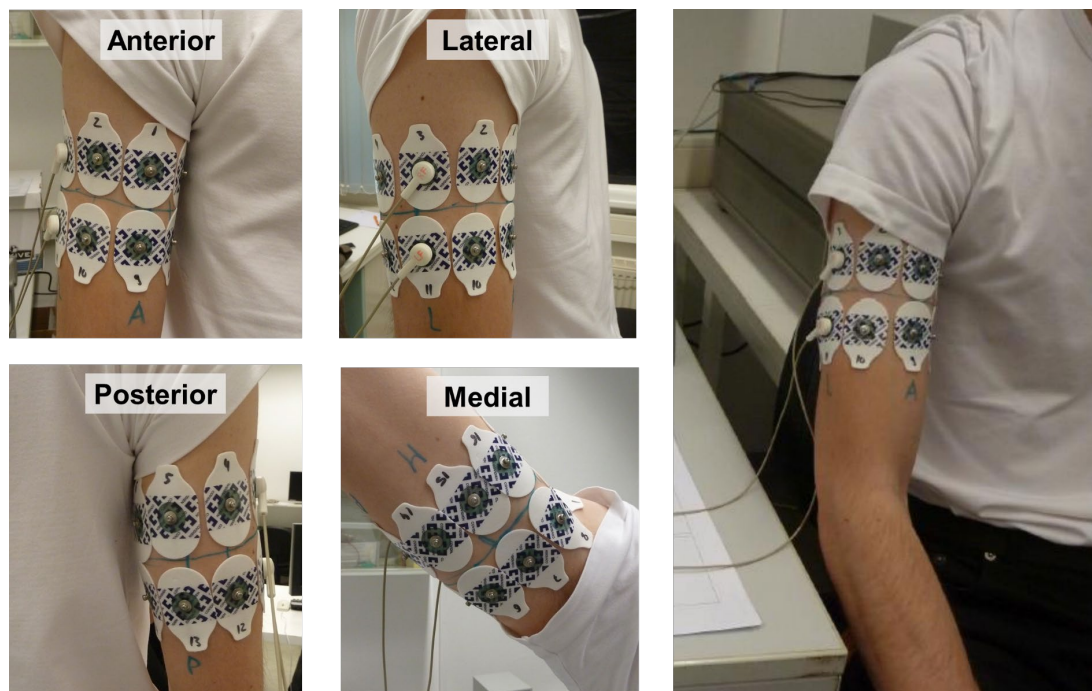


Abbildung 1: Regelmäßige Anordnung von 16 Elektroden um den Oberarm eines Teilnehmers in zwei Reihen, zur bipolaren Stimulation superior-inferior und transversal

In weiteren Versuchsreihen sollen die Messungen auch mit aktuell beim Projektpartner in der Entwicklung befindlichen Textilelektroden (Oberarmmanschette) wiederholt und mit den aktuellen Ergebnissen verglichen werden. Diese Untersuchungen sollen neue Kenntnisse zum Aufbau (Material, Geometrie) und der Platzierung der Textilelektroden und die Möglichkeiten ihrer Integration in spezielle Bekleidungsprodukte für Warnzwecke liefern.

2.3 Versuchsdurchführung

Die Probanden wurden mithilfe der Gelelektroden am jeweils rechten Oberarm stimuliert. Die Messungen erfolgten in sitzender Position mit aufgelegtem Unterarm. Durch die kontrollierte Laborumgebung ließen sich äußere Stör- und Ablenkungseinflüsse minimal halten. Die Eingangsparameter für die elektrische Reizung waren Impulsbreite, Impulsfrequenz und das Signal als solches in unterschiedlichen Stromstärken. Folgende Parameter wurden für die Messungen festgelegt:

- Impulsbreite 200 μ s,
- Impulsfrequenz 1Hz,
- Signal als monophasischer Rechteckimpuls auf bipolare Elektrodenanordnung.

Vor Beginn der Messungen wurde die Hautdicke am Oberarm der Probanden im Bereich der oberen und unteren Elektrodenreihe mit einem Skinfold Caliper (Hautdickenmesszange) bestimmt. Im nächsten Vorbereitungsschritt wurden die 16 Gелеlektroden angebracht und durchnummeriert. Anschließend erfolgte die Stimulationsphase. Stimuliert wurde mit jeweils zwei Elektroden gemäß folgendem Schema:

1. Superior-Inferior: zwei senkrecht übereinanderliegende Elektrodenpaare, z.B. Position 1-9
2. Transversal Upper: zwei nebeneinanderliegende Elektrodenpaare in der oberen Reihe, beginnend mit Position 1-2
3. Transversal Lower: zwei nebeneinanderliegende Elektrodenpaare in der unteren Reihe, beginnend mit der Position 9-10.

Den Probanden wurde mithilfe der Elektroden ein Impulsstrom auf die Haut geleitet, der beginnend bei 0mA stetig erhöht wurde. Während der Messungen gaben die Probanden an, ab wann sie die Wahrnehmungsschwelle, die Aufmerksamkeitsschwelle und die Intoleranzschwelle erreichten. Die dabei jeweils empfundenen Wahrnehmungen (Klopfen, Kratzen, Stechen, u. a.) und der jeweilige Ort des Empfindens (z. B. unter der Elektrode oder zwischen zwei Elektroden) wurden mithilfe eines standardisierten Fragebogens erfasst und dokumentiert.

3. Ergebnisse

In einer ersten Versuchsreihe wurden zur Ermittlung der individuellen Wahrnehmungsschwellen zunächst vier Probanden (2w, 2m, Alter 33 ± 6 J) gemessen. Die absoluten Wahrnehmungsschwellen (Abb. 2 rechts, grün) lagen bei $1,8 \pm 0,41$ mA (Mittelwert \pm Standardabweichung), die Aufmerksamkeitsschwellen (Abb. 2 rechts, blau) bei $3,8 \pm 1,4$ mA und die Schwellenwerte für Intoleranz (Abb. 2 rechts, rot) bei $8,5 \pm 4,4$ mA.

Während die ersten beiden Schwellen um den Arm homogen verteilt waren, variierte die Intoleranzschwelle in Abhängigkeit der Elektrodenposition. So war diese an lateralen bis posterioren Abschnitten höher ($10,3 \pm 4,7$ mA) und an medialen bis anterioren Abschnitten niedriger ($6,3 \pm 3,5$ mA). Vergleicht man Hautdicke (Abb. 2, links) und die Werte der Intoleranzschwelle (Abb. 2, rechts) lässt sich eine Korrelation feststellen, das heißt je dicker die Haut desto höher liegt im Mittel die Intoleranzschwelle.

4. Diskussion

Ein robustes Amplitudenfenster für tolerierbare Wahrnehmungen, die die Aufmerksamkeit der Person auf sich ziehen, konnte bei allen Teilnehmern in den lateralen bis posterioren Abschnitten des Oberarms gefunden werden (Lau et al. 2017).

Zur Absicherung der Ergebnisse wird die Studie mit einer größeren Probandenanzahl fortgeführt. Weiterhin sind Vergleichsmessungen mit Textilelektroden

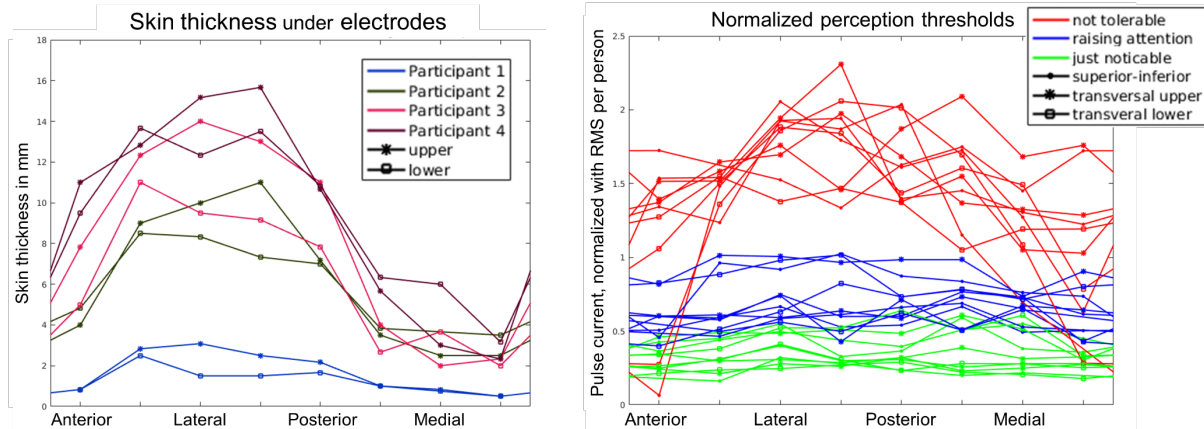


Abbildung 2: Links: Hautdicke Oberarm von vier Probanden (für obere/untere Elektrodenreihe). Rechts: Normalis. Wahrnehmungsschwellen um den Oberarm von vier Teilnehmern.

(am Produktbeispiel einer Oberarmmanschette) sowie Messungen unter Berücksichtigung von Störeinflüssen (z. B. wechselnde klimatische Bedingungen, somatosensorische Ablenkung, mentale Ablenkung) geplant. Dabei liegt der Fokus auf der Überprüfung, ob und in welchem Maße dadurch Schwellenwertverschiebungen auftreten.

5. Literatur

- Bolz A, Kikillus N, Moor C (2009) Elektrische Phänomene des Körpers und ihre Detektion. In: Wintermantel E., Ha SW. (eds) Medizintechnik. Springer, Berlin, Heidelberg, 1323-1356.
- Geng B, Yoshida K, Petrini L, Jensen W (2012) Evaluation of sensation evoked by electrocutaneous stimulation on forearm in nondisabled subjects. In: J Rehabil Res Dev 49(2):297-308
- Höhn, K (2015) Elektrische Stimulation zur Personenwarnung. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg) Arbeitswissenschaft mit Interdisziplinarität und Methodenvielfalt. Dortmund: GfA-Press.
- Kleibe CE (2017) Entwurf eines Versuchsdesigns zur Ermittlung der menschlichen Wahrnehmbarkeitsschwelle bei Nervenstimulation durch taktile Reize. TU Dresden: Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme, Professur für Arbeitswissenschaft, Studentische Belegarbeit.
- Lau S, Fiedler P, Hunold A, Haase E, Grölllich D, Pietsch K, Höhn K, Schmauder M, Rödel H, Haueisen J (2017) Perception thresholds of cutaneous electric stimulation around the upper arm. In: Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik 62(Suppl 1):S169.
- Löcherer KH, Müller H, Harriehausen T, Schwarzenau D (2011) Moeller Grundlagen der Elektrotechnik 22. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schmauder M, Rödel H, Trinkauf J (2014) Taktile Personenwarnung. Unveröffentlichter Projektabschlussbericht, Projektteil 2. Dresden: Technische Universität Dresden.
- Steenbergen P, Buitenweg JR, Troja J, Veltink PH (2013) Reproducibility of somatosensory spatial perceptual maps. In: Experimental Brain Research 224:417-427

Danksagung: Wir danken ausdrücklich der Deutschen Forschungsgemeinschaft für ihre Unterstützung unter den Projektnummern DFG-HA28899 / 23-1, DFG-RO1303 / 22-1 und DFG-SCHM1681 / 6-1.