

Vibrotaktile Wahrnehmung bei der Verwendung von Handschuhen

Martin Seeger, Tobias Stein, Ludger Schmidt

Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Universität Kassel

Zusammenfassung

Touchscreens werden zunehmend im industriellen Arbeitsumfeld bei Tätigkeiten eingesetzt, bei denen Handschuhe getragen werden, wodurch die Interaktion mit einem Touchscreen eingeschränkt wird. Um eine vibrotaktile Rückmeldung von Touchscreens beim Tragen von Handschuhen einzusetzen, wurde in einem ersten Schritt mit 47 Versuchsteilnehmern und 8265 Einzelmessungen die vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle auf einem Touchscreen in Abhängigkeit der Frequenz, Stimulusdauer und Handschuhstärke ermittelt. Die Ergebnisse zeigen eine Frequenzabhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle im Bereich von 50 bis 250 Hz sowie die Abnahme bei zunehmender Stimulusdauer. Weiterhin zeigt sich, dass für die Gestaltung einer vibrotaktilen Rückmeldung die Handschuhstärke nicht explizit berücksichtigt werden muss, da mit zunehmender Handschuhstärke die Kraft auf die Oberfläche zunimmt und keine Veränderung der Wahrnehmungsschwelle beobachtet werden konnte.

1 Einleitung

Während Touchscreens in mobilen Geräten wie Smartphones und in stationären Systemen wie Fahrkartenautomaten bereits sehr häufig eingesetzt werden, wird durch aktuelle Bestrebungen im Bereich „*Industrie 4.0*“ der Einsatz von Touchscreens auch im industriellen Umfeld weiter zunehmen (Gorecky et al., 2014). Problematisch ist, dass die Eingabe auf einem Touchscreen durch die glatte und ebene Oberfläche schwieriger wird und zu einer geringeren Eingabegeschwindigkeit führen kann (Hoggan et al., 2008). Um diesem Problem zu begegnen, werden künstlich erzeugte Vibrationen als taktile Rückmeldungen eingesetzt, woraus eine schnellere Eingabe von Texten sowie eine geringere Fehlerzahl resultiert (Brewster et al., 2007).

In industriellen Anwendungsfällen, bspw. bei Montagetätigkeiten, werden verschiedene Formen von Schutzhandschuhen getragen. Touchscreens sollen nach VDI/VDE 3850-3 für den Einsatz in industriellen Umgebungen die Möglichkeit zur Interaktion mit Handschuhen berücksichtigen. Zukünftig werden in industriellen Anlagen zunehmend kapazitive Touchscreens eingesetzt, welche auch die Interaktion mit Handschuhen ermöglichen (Breuninger &

Poppva-Dlugosch, 2017). Eine vibrotaktile Rückmeldung erscheint auch vor dem Hintergrund des möglichen Übersehens und Überhörens im Einsatzkontext nützlich. Um den Einsatz einer vibrotaktilen Rückmeldung von Touchscreens im industriellen Anwendungsfeld für die Interaktion mit Handschuhen zu ermöglichen, zeigt der folgende Beitrag in einem ersten Schritt die Ergebnisse zur Bestimmung der absoluten vibrotaktilen Wahrnehmungsschwelle.

2 Grundlagen und Forschungsbedarf

Aktuelle Gestaltungsempfehlungen greifen eine haptische Rückmeldung für Touchscreen-Oberflächen als Ergänzung zu einer visuellen und einer auditiven Rückmeldung auf (VDI/VDE 3850-3). Weitere normative Vorgaben beschreiben die haptische Stimulation der Hautoberfläche durch mechanische Schwingungen als vibrotaktile Rückmeldung (DIN EN ISO 9241-910). Die DIN EN ISO 9241-920 beschreibt für eine vibrotaktile Rückmeldung u. a. die Modulation der Schwingungsamplitude im Bereich zwischen der Wahrnehmungs- und der Schmerzschwelle. Konkrete Angaben zu der absoluten Wahrnehmungsschwelle der Amplitude werden dort allerdings nicht gegeben.

Die absolute Wahrnehmungsschwelle ist die geringste Intensität eines Reizes, welche von einem Menschen wahrgenommen werden kann (Choi & Kuchenbecker, 2013). Für die vibrotaktile Wahrnehmung sind unterschiedliche Rezeptoren mit unterschiedlicher Frequenzempfindlichkeit verantwortlich (Biswas et al., 2015; Gescheider et al., 2004; Johnson, 2001), welche über die Körperoberfläche eine unterschiedliche Verteilung und Rezeptordichte aufweisen (Treede, 2005). Die absolute Wahrnehmungsschwelle variiert dementsprechend zwischen unterschiedlichen Körperregionen (Morioka & Griffin, 2008), der behaarten und unbehaarten Haut (Mahns et al., 2006) sowie den Handinnenflächen und den Fingerspitzen (Morioka & Griffin, 2005). Die niedrigsten Wahrnehmungsschwellen an den Fingerspitzen liegen bei Frequenzen zwischen 200 und 350 Hz und Amplituden von wenigen Mikrometern (μm) (Choi & Kuchenbecker, 2013). Weiteren Einfluss auf die absolute Wahrnehmungsschwelle hat die Kontaktkraft (Hatzfeld et al., 2016; Lamoré, 1988) sowie die Stimulusdauer (Cohen & Kirman, 1986; Verrillo, 1965). Gleichermäßen konnte festgestellt werden, dass die Wahrnehmungsschwelle mit zunehmendem Alter steigt (Meh & Denišlić, 1995; Verrillo et al., 2002) und Frauen niedrigere Wahrnehmungsschwellen aufweisen als Männer (Gescheider et al., 1994).

Problematisch für die Übertragbarkeit der bestehenden Erkenntnisse auf Touchscreens ist, dass die absolute Wahrnehmungsschwelle bspw. mit Hilfe von einzelnen Pins mit definierter Kontaktfläche (Verrillo et al., 2002), mit unterschiedlich großen Kontaktflächen (Verrillo, 1965) oder für die gesamte Handinnenfläche (Morioka & Griffin, 2005) untersucht wurden. Chauvelin et al. (2014) konnten in einer Studie die Frequenzabhängigkeit der vibrotaktilen Wahrnehmungsschwelle auf einem Touchscreen bis 60 Hz an den Fingerspitzen nachweisen und bestätigen, dass Frauen bei jeder Frequenz niedrigere Wahrnehmungsschwellen aufweisen als Männer. Stein & Schmidt (2015) konnten auf einer ebenen Oberfläche für Sinusschwingungen die Frequenzabhängigkeit zwischen 50 und 1000 Hz nachweisen. Weitere

Einflussfaktoren, welche die absolute Wahrnehmungsschwelle auf ebenen Oberflächen beeinflussen, sind u. a. die durch einen Finger aufgebrachte Kraft auf die Oberfläche (Papetti et al., 2015) sowie die Stimulusdauer (Doshier & Hannaford, 2005). Papetti et al. (2017) konnten auf einer ebenen Oberfläche zeigen, dass die absolute Wahrnehmungsschwelle mit zunehmender Kraft und Stimulusdauer abnimmt.

Bisher sind keine empirischen Studien bekannt, welche die absolute vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle auf Touchscreens für unterschiedliche Handschuhstärken untersuchten. Basierend auf den bestehenden Erkenntnissen wurde daher die absolute vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle für unterschiedliche Handschuhstärken für unterschiedliche Frequenzen und Stimulusdauern unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren des Geschlechts und des Alters sowie der aufgebrachten Kraft auf eine Oberfläche untersucht.

3 Experimentelle Untersuchung

Für die Untersuchung der vibrotaktilen Wahrnehmungsschwelle wurde ein Versuchsaufbau aus Aluminium-Profilen mit einer in Höhe und Neigung verstellbaren Tischplatte konzipiert (siehe Abbildung 1 links). Ein 19-Zoll-oberflächen-kapazitives Touchscreen-Panel (3M ClearTek II mit einem USB-Controller 3M EXII-7760UC) wurde an den nicht sensitiven Flächen mit Montagekleber (Sikaflex 221) auf einen Metallrahmen geklebt. Dieser Metallrahmen ruht jeweils in den Ecken auf einem piezoelektrischen Aktor (P-820.3B von PI Ceramic) mit Kugelkopfstück, wobei jeder Aktor mit einer Feder von oben mit einer Vorspannkraft beaufschlagt wird (siehe Abbildung 1 links). Jeder der Aktoren wurde von einem Piezoverstärker (PI Ceramic E-617.00F) angesteuert. Für die Messung der Oberflächenbewegung zur Bestimmung der absoluten Wahrnehmungsschwelle sowie der aufgebrachten Kraft auf die Oberfläche während der Untersuchung wurde ein optischer Wegsensor (Keyence LK-G32) mit einer Auflösung und Wiederholgenauigkeit von 0,05 μm unterhalb des Touchscreen-Panels installiert.

Der Aufbau wurde mit einem Gehäuse erweitert, welches von der Tischplatte entkoppelt wurde, um eine Vibrationsübertragung auf die Versuchsteilnehmer zu vermeiden. Auf diesem Gehäuse wurde eine gepolsterte Platte mit einem Ausschnitt mittig über dem optischen Wegsensor positioniert (siehe Abbildung 1 rechts). Für die Bestätigung, dass ein vibrotaktiler Reiz an den Fingerspitzen wahrgenommen wird, wurde ein Handschalter eingesetzt. Für die Ansteuerung der Piezoverstärker und die Erfassung der Eingaben über den Handschalter wurde eine Messwertkarte (National Instruments USB-6002) eingesetzt. Die Aufzeichnung der Daten des optischen Wegsensors erfolgte mit 1000 Hz über die separate Messeinrichtung (BioPac MP 150).

3.1 Technische Umsetzung

Für die Bestimmung der absoluten Wahrnehmungsschwelle eines vibrotaktilen Stimulus an den Fingerspitzen wurde die Herstellungsmethode herangezogen. Bei dieser Methode wird die Intensität eines Reizes schrittweise erhöht bzw. gesenkt bis er gerade bzw. gerade nicht

mehr wahrgenommen wird (Goldstein, 2015; Jones & Tan, 2013). Für die softwareseitige Umsetzung dieser Methode wurde ein LabVIEW-Programm erstellt, welches die Amplitude für ein Sinussignal mit vordefinierter Frequenz erhöht bis der Handschalter betätigt wird. Zwischen den vibrotaktilen Stimuli wurde eine variable Pausendauer zwischen 1 und 1,5 Sekunden erstellt. Die Reihenfolge der Frequenzen und Stimulusdauern wurde randomisiert.

Die Auswahl der Frequenzen erfolgte unter Berücksichtigung der menschlichen Vibrationswahrnehmung (Choi & Kuchenbecker, 2013) und den Forderungen nach DIN EN ISO 9241-920, für eine vibrotaktile Rückmeldung Frequenzen zwischen 50 und 250 Hz einzusetzen. Dazu wurden die Frequenzen von 50, 100, 150, 200 und 250 Hz untersucht. Für die Stimulusdauern wurden 40, 80 und 160 ms gewählt, welche sich an den minimalen und durchschnittlichen Berührungsdauern während eines virtuellen Tastendrucks auf einer stationären Touchscreen-Oberfläche orientieren (Seeger et al., 2015). Für die Untersuchung des Einflusses der Handschuhstärke auf die absolute Wahrnehmungsschwelle wurden fünf unterschiedliche Gummihandschuhe für den industriellen Einsatz (MAPA Professionnel) mit steigenden Materialstärken von 0,1 mm, 0,2 mm, 0,38 mm, 0,75 mm und 1,5 mm herangezogen. Es wurden unterschiedliche Handschuhgrößen bereitgestellt, um eine vergleichbare Passung bei den einzelnen Versuchsteilnehmern zu gewährleisten.

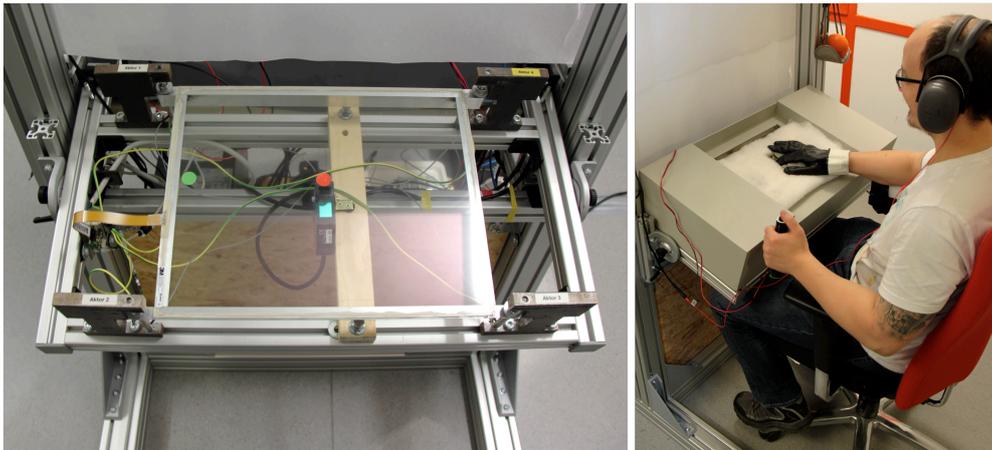


Abbildung 1: Technischer Versuchsaufbau (links) und beispielhafte Darstellung der Versuchsbedingungen (rechts)

Für die Messung der auftretenden Kraft auf die Oberfläche wurde ein bereits erprobtes Verfahren angewendet (Seeger et al., 2016), welches unter der Annahme eines elastischen Werkstoffverhaltens bei einer Biegebelastung durch die Messung der Durchbiegung im Vergleich zum unbelasteten Körper einen Rückschluss auf die aufgebrachte Kraft ermöglicht. Zur Kalibrierung wurde der Touchscreen mittig über dem optischen Wegsensor mit Gewichten von 50 bis 1000 g in 50 Gramm-Schritten belastet und die resultierende Durchbiegung mit dem optischen Wegsensor gemessen. Für die einzelnen Messpunkte wurde ein linearer Kraft-Weg-Verlauf mit $R^2 = 0,9981$ ermittelt.

3.2 Versuchsdurchführung und Auswertung

Vor der Untersuchung füllte jeder Versuchsteilnehmer nach einer Einführung in den Versuchsaufbau eine Einwilligungs- und Datenschutzerklärung aus. Es folgte ein Eingangsfragebogen, in dem Alter, Geschlecht und Händigkeit nach Edinburgh Handedness Inventory (Oldfield, 1971) sowie Ausschlusskriterien, z. B. Verletzungen an Fingern, neurologische Störungen oder bekannte Allergien gegen die eingesetzten Handschuhmaterialien, erfragt wurden. Um vergleichbare Bedingungen unter allen Versuchsteilnehmern zu erreichen, wurde ein Probedurchlauf durchgeführt. Dazu wurde in einem ersten Schritt die Position der Versuchsteilnehmer vor dem Versuchsaufbau eingestellt. Die Versuchsteilnehmer sollten mit dem Zeigefinger der dominanten Hand den Touchscreen berühren und mit der nicht dominanten Hand den Handschalter betätigen, sobald sie eine Vibration der Oberfläche spüren. Jedem Versuchsteilnehmer wurde beim Probedurchlauf für jede Frequenz und Stimulusdauer jeweils ein Stimulus dargeboten.

Für die Ermittlung der absoluten Wahrnehmungsschwelle wurde der Zeigefinger der dominanten Hand auf den Touchscreen gelegt. Die Handinnenfläche sowie die weiteren Finger ruhten auf der gepolsterten Platte. Den Versuchsteilnehmern wurden Gehörschutzkapseln mit darunterliegenden In-Ear-Kopfhörern aufgesetzt. Mit diesen wurde ein vertäubendes Rauschen eingespielt, um die Geräusche der Piezoaktoren zu verdecken. Die unterschiedlichen Handschuhstärken wurden in randomisierter Reihenfolge untersucht. Für jede Handschuhstärke sowie einmal ohne Handschuhe (sechs Durchläufe) wurde jede der fünf genutzten Frequenzen mit den drei Stimulusdauern jeweils zweimal dargeboten ($6 \times 5 \times 3 \times 2 = 180$ Einzeltests). Zwischen den einzelnen Durchläufen wurde eine Pause eingelegt. Die Durchführung betrug für einen Versuchsteilnehmer maximal 60 Minuten.

Für die Auswertung der absoluten vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle sowie der aufgetragenen Kraft auf die Oberfläche wurden die Messdaten des optischen Wegsensors mit Hilfe der Software BioPac *AcqKnowledge* analysiert. Für die Bestimmung der absoluten Wahrnehmungsschwelle wurden die Zeitpunkte für das Betätigen des Handschalters herausgesucht und die maximale Wegdifferenz des vibrotaktile Stimulus (Spitze zu Spitze in μm) ermittelt. Für die wirkende Kraft auf die Oberfläche wurde für diese Zeitpunkte die durchschnittliche Durchbiegung ermittelt. Aus der Wegdifferenz von der unbelasteten Oberfläche und den Zeitpunkten der wahrgenommenen vibrotaktile Stimuli wurde mit dem invertierten Kraft-Weg-Verlauf die Kraft berechnet.

4 Ergebnisse und Diskussion

An der Untersuchung nahmen insgesamt 47 Versuchsteilnehmer (33 männlich, 14 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 36,6 Jahren (Spannweite 19 bis 75 Jahre) teil. Unter den Versuchsteilnehmern waren drei Linkshänder und 44 Rechtshänder. Für die Auswertung der absoluten Wahrnehmungsschwelle konnten 8265 Messpunkte (von 8460, abzüglich 195 fehlerhaften Aufzeichnungen durch Messausfälle) herangezogen werden.

Die durchschnittlich niedrigste Wahrnehmungsschwelle liegt mit 2,0 μm bei einer Frequenz von 200 Hz, einer Stimulusdauer von 160 ms bei einer Handschuhstärke von 0,1 mm und die durchschnittlich höchste Wahrnehmungsschwelle liegt mit 10,7 μm bei einer Frequenz von 50 Hz, einer Stimulusdauer von 40 ms bei einer Handschuhstärke von 1,5 mm vor (siehe Tabelle 1). Die absolut niedrigste Wahrnehmungsschwelle konnte mit 0,91 μm bei einer Frequenz von 250 Hz, einer Stimulusdauer von 160 ms bei einer Handschuhstärke von 0,1 mm und die absolut höchste Wahrnehmungsschwelle mit 33,1 μm bei einer Frequenz von 100 Hz, einer Stimulusdauer von 40 ms und einer Handschuhstärke von 1,5 mm festgestellt werden.

Frequenz	Stimulusdauer	Handschuhstärke							
		Ohne Handschuhe	0,10 mm	0,20 mm	0,38 mm	0,75 mm	1,50 mm		
50 Hz	40 ms	8,7	8,7	9,4	9,4	9,8	10,7	Ø 9,5	Ø 9,1
	80 ms	8,1	8,0	9,2	9,3	8,9	10,1	Ø 8,9	
	160 ms	7,9	8,3	9,2	9,1	8,9	10,3	Ø 8,9	
100 Hz	40 ms	5,2	4,6	5,5	5,4	5,8	5,9	Ø 5,4	Ø 5,3
	80 ms	5,1	4,7	5,6	5,2	5,6	5,9	Ø 5,4	
	160 ms	5,1	4,5	5,4	5,3	5,5	5,7	Ø 5,2	
150 Hz	40 ms	2,7	2,6	2,9	3,0	3,2	2,8	Ø 2,9	Ø 2,6
	80 ms	2,5	2,4	2,5	2,6	2,6	2,5	Ø 2,5	
	160 ms	2,3	2,2	2,4	2,5	2,6	2,2	Ø 2,4	
200 Hz	40 ms	2,5	2,5	2,6	2,8	2,7	2,6	Ø 2,6	Ø 2,4
	80 ms	2,4	2,1	2,4	2,7	2,5	2,5	Ø 2,4	
	160 ms	2,4	2,0	2,3	2,2	2,6	2,2	Ø 2,3	
250 Hz	40 ms	3,1	2,9	3,1	3,4	3,0	3,0	Ø 3,1	Ø 3,0
	80 ms	3,4	2,7	3,1	3,0	3,5	3,0	Ø 3,1	
	160 ms	3,2	2,5	3,1	3,1	3,0	2,7	Ø 2,9	
		Ø 4,3	Ø 4,0	Ø 4,6	Ø 4,6	Ø 4,7	Ø 4,8		

Tabelle 1: Übersicht der vibrotaktilen Wahrnehmungsschwellen in μm (Spitze zu Spitze)

4.1 Einfluss der Frequenz und Stimulusdauer

Für die Betrachtung der Innersubjektfaktoren (Frequenz und Stimulusdauer) sowie der Zwischensubjektfaktoren (Alter und Geschlecht) wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (Repeated Measures ANOVA) und Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Analyse zeigt einen signifikanten Einfluss der Frequenz ($F=52,035$; $p \leq 0,001$), der Stimulusdauer ($F=7,094$; $p \leq 0,01$) sowie die Interaktion aus Frequenz und Stimulusdauer ($F=3,182$; $p \leq 0,01$) auf die absolute Wahrnehmungsschwelle.

Der Vergleich der Innersubjektfaktoren zeigt, dass bis 200 Hz die absolute Wahrnehmungsschwelle über die einzelnen Frequenzstufen von 50 bis 150 Hz ($p \leq 0,001$) und von 150 auf 200 Hz ($p \leq 0,05$) signifikant abnimmt und von 200 auf 250 Hz signifikant ansteigt ($p \leq 0,05$) (siehe Abbildung 2 links). Mit zunehmender Stimulusdauer sinkt die absolute Wahrnehmungsschwelle stufenweise signifikant ($p \leq 0,01$) ab (siehe Abbildung 2 rechts). In Abhängigkeit der Interaktion aus Frequenz und Stimulusdauer zeigt sich hingegen, dass bei allen Frequenzstufen lediglich eine signifikante Abnahme der Wahrnehmungsschwelle ($p \leq 0,05$) zwischen 40 ms und 80 ms vorliegt.

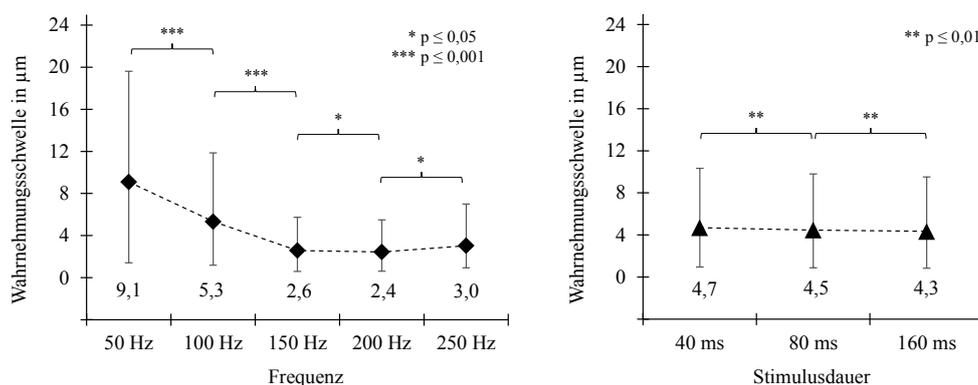


Abbildung 2: Vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von Frequenz (links) und Stimulusdauer (rechts)

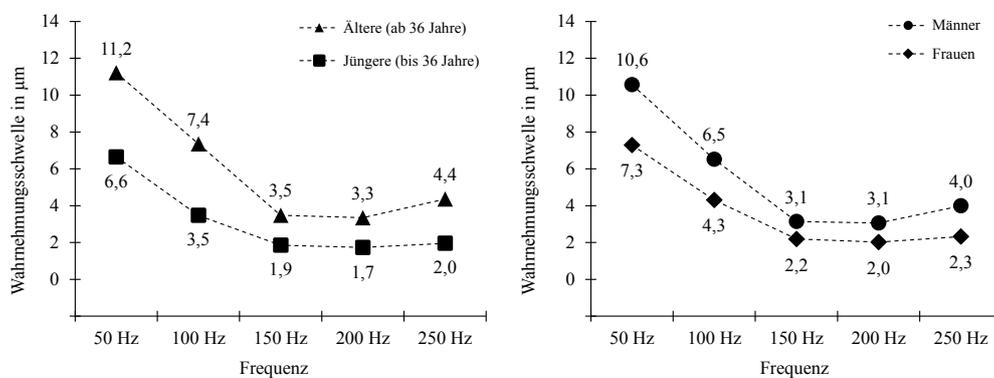


Abbildung 3: Vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von Frequenz und Alter (links) bzw. Geschlecht (rechts)

Der Vergleich der Zwischensubjektfaktoren von Alter und Geschlecht auf die absolute Wahrnehmungsschwelle ergibt, dass Frauen signifikant niedrigere Wahrnehmungsschwellen aufweisen als Männer ($p \leq 0,05$) und Versuchsteilnehmer ab 36 Jahren (Trennwert ermittelt)

über Kovariate) signifikant höhere Wahrnehmungsschwellen zeigen ($p \leq 0,01$). Bei der Interaktion von Alter und Geschlecht konnten keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden.

Bei der Interaktion von Alter und Frequenz weisen ältere Versuchsteilnehmer in allen Frequenzstufen signifikant höhere Wahrnehmungsschwellen auf ($p \leq 0,05$) (siehe Abbildung 3 links), und bei der Interaktion von Geschlecht und Frequenz zeigen Männer in allen Frequenzstufen signifikant höhere Wahrnehmungsschwellen im Vergleich zu Frauen ($p \leq 0,001$) (siehe Abbildung 3 rechts). Bei der Interaktion von Geschlecht und Stimulusdauer sowie bei der Interaktion von Alter und Stimulusdauer konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

4.2 Einfluss der auftretenden Kraft und der Handschuhstärke

Zur Ermittlung des Einflusses von Handschuhstärke und aufgebrachtener Kraft auf die Oberfläche wurde eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (Repeated Measures ANOVA) und Post-Hoc-Tests mit Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Analyse der absoluten Wahrnehmungsschwelle zeigt einen signifikanten Einfluss der Handschuhstärke ($F=5,176$; $p \leq 0,01$). Die niedrigste absolute Wahrnehmungsschwelle liegt mit $4 \mu\text{m}$ bei einer Handschuhstärke von $0,1 \text{ mm}$ vor (siehe Abbildung 4 oben) und ist signifikant niedriger im Vergleich zu keinem Handschuh ($p \leq 0,05$). Ab Handschuhstärken von $0,2 \text{ mm}$ sind zwischen den einzelnen Handschuhen keine signifikanten Unterschiede der absoluten Wahrnehmungsschwellen feststellbar, es zeigen sich allerdings jeweils signifikant höhere Wahrnehmungsschwellen im Vergleich zu Handschuhen mit $0,1 \text{ mm}$ ($p \leq 0,05$).

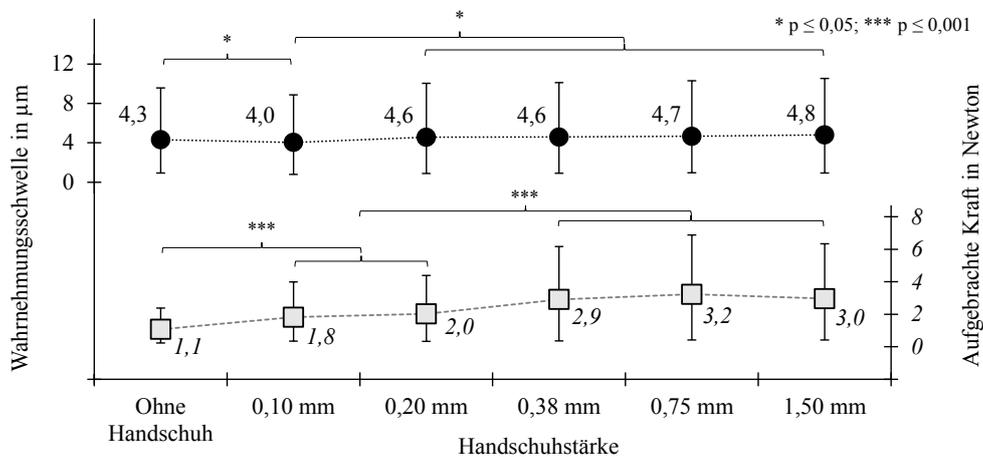


Abbildung 4: Vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle (oben) und aufgebrachte Kraft auf die Oberfläche (unten) für die unterschiedlichen Handschuhstärken

Die Analyse der aufgebrachten Kraft auf die Oberfläche (siehe Abbildung 4 unten) zeigt einen signifikanten Einfluss der Handschuhstärke ($F=49,5$; $p \leq 0,001$). Die durchschnittlich

aufgebrachte Kraft auf die Oberfläche liegt mit 2,3 N und einer Standardabweichung von 0,8 N vor. Die minimale Kraft von 0,03 N wurde ohne Handschuh und die maximale mit 8,2 N bei einer Handschuhstärke von 1,5 mm erreicht. Die aufgebrachte Kraft nimmt signifikant ($p \leq 0,001$) von der ersten Stufe (ohne Handschuh) auf die zweite Stufe (Handschuhstärken 0,1 und 0,2 mm) sowie von der zweiten auf die dritte Stufe (Handschuhstärken 0,38; 0,75 und 1,5 mm) zu (siehe Abbildung 4 unten). Innerhalb der einzelnen Stufen bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Für die Analyse der Abhängigkeit zwischen der absoluten Wahrnehmungsschwelle und der aufgetragenen Kraft wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt. Die absolute Wahrnehmungsschwelle ($R^2=0,18$) zeigt jeweils einen signifikant positiven Zusammenhang ($p \leq 0,001$) zwischen der aufgetragenen Kraft ($\beta=0,08$), dem Geschlecht ($\beta=0,23$) und dem Alter ($\beta=0,42$).

4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle auf einem Touchscreen zeigt für die Frequenzabhängigkeit Ergebnisse, die mit bestehenden Erkenntnissen unter anderen Bedingungen vergleichbar sind (Chauvelin et al., 2014; Choi & Kuchenbecker, 2013; Gescheider et al., 2004). Dass sowohl Männer (Chauvelin et al., 2014; Gescheider et al., 1994) als auch ältere Versuchsteilnehmer (Meh & Denišlić, 1995; Verrillo et al., 2002) eine höhere absolute Wahrnehmungsschwelle aufweisen, konnte bestätigt werden. Darüber hinaus führt eine längere Stimulusdauer zu einer abnehmenden vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle, was gleichermaßen bei den Studien von Doshier & Hannaford (2005) und Papetti et al. (2015) beobachtet werden konnte. Die geringere Wahrnehmungsschwelle bei einer Handschuhstärke von 0,1 mm gegenüber keinem Handschuh kann damit begründet sein, dass viele Versuchsteilnehmer diese Handschuhe als sehr eng anliegend im Vergleich zu anderen Handschuhen empfunden haben. Dadurch kann eine durch den Handschuh erzeugte Vorspannkraft auf die Fingerspitze angenommen werden, welche zu einer geringeren vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle führen könnte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass durch eine höhere aufgebrachte Kraft auf eine Oberfläche im Vergleich zu Papetti et al. (2017) keine niedrigeren Wahrnehmungsschwellen ermittelt werden konnten, sondern eine höhere aufgebrachte Kraft mit zunehmender Handschuhstärke zu keiner Veränderung der absoluten Wahrnehmungsschwelle führt. Es ist kritisch zu erwähnen, dass der erklärte Varianzanteil ($R^2=0,18$) der untersuchten Einflussfaktoren gering ist und sowohl das Alter ($\beta=0,42$) als auch das Geschlecht ($\beta=0,23$) einen größeren Zusammenhang zur absoluten Wahrnehmungsschwelle im Vergleich zu der aufgetragenen Kraft auf die Oberfläche ($\beta=0,08$) aufweisen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Um einen kapazitiven Touchscreen im industriellen Umfeld einzusetzen, müssen Randbedingungen, wie das Tragen von Handschuhen, berücksichtigt werden. Um eine vibrotaktile

Rückmeldung von Touchscreens in diesem Umfeld einzusetzen, muss weiterhin die absolute vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle bekannt sein. In der vorliegenden Untersuchung konnte die absolute vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit der Frequenz und Stimulusdauer für unterschiedliche Handschuhstärken sowie ohne Handschuhe auf einem kapazitiven Touchscreen empirisch ermittelt werden. Für die Gestaltung einer vibrotaktilen Rückmeldung muss die Abhängigkeit der vibrotaktilen Wahrnehmungsschwelle von der Frequenz und Stimulusdauer berücksichtigt werden. Die niedrigste Wahrnehmungsschwelle liegt mit durchschnittlich 2,4 μm bei einer Frequenz von 200 Hz. Eine Anpassung der vibrotaktilen Rückmeldung für unterschiedliche Handschuhstärken muss nicht vorgenommen werden, da mit zunehmender Handschuhstärke die aufgebrachte Kraft auf eine Oberfläche steigt und keine Veränderung der Wahrnehmungsschwelle festgestellt werden konnte.

Dieser Beitrag liefert damit die Grundlagen für die Ausgestaltung einer vibrotaktilen Rückmeldung auf Touchscreens. Es können auf dieser Grundlage Technologien ausgewählt werden (z. B. piezoelektrische oder elektrodynamische Aktoren), welche mindestens eine vibrotaktile Rückmeldung mit der Auslenkung der vibrotaktilen Wahrnehmungsschwelle auf eine Touchscreen-Oberfläche erzeugen, um eine wahrnehmbare Rückmeldung zu vermitteln. Für die Gestaltung einer vibrotaktilen Rückmeldung sind weitere Untersuchungen auf Basis der bestehenden Erkenntnisse notwendig. Die vibrotaktile Wahrnehmungsschwelle bestimmt die minimale Vibrationsintensität an den Fingerspitzen, welche gerade wahrgenommen werden kann. Bei einer realen Touchscreen-Interaktion werden unterschiedliche Gesten ausgeführt, bei denen der Finger die Oberfläche nur kurz berührt (Tastendruck) oder länger über die Oberfläche gezogen wird (Zieh- und Drehgesten), wobei die erhöhte Reibung mit Handschuhen sich auf die Druckausübung bei Gesten auswirken könnte. In diesem Zusammenhang sollte in weiteren Untersuchungen ermittelt werden, wie eine vibrotaktile Rückmeldung gestaltet werden muss, um eine wahrnehmbare Rückmeldung in realen Anwendungen zu realisieren.

Literaturverzeichnis

- Biswas, A., Manivannan, M. & Srinivasan, M. A. (2015). Vibrotactile sensitivity threshold: nonlinear stochastic mechanotransduction model of the Pacinian Corpuscle. *IEEE transactions on haptics*, 8(1), 102–113.
- Breuninger, J. & Poppva-Dlugosch, S. (2017). Gestaltung moderner Touchscreen-Interaktion für technische Anlagen. In Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. & Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Band 2: Automatisierung. 2. Auflage*. Berlin: Springer, S. 537–557.
- Brewster, S. A., Chohan, F. & Brown, L. M. (2007). Tactile feedback for mobile interactions. In Rosson, M. B. (Hrsg.): *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York: ACM, S. 159–162.
- Chauvelin, C., Sagi, T., Coni, P., André, J.-M., Jauze, C. & Lespinet-Najib, V. (2014). Haptics on a Touch Screen: Characterization of Perceptual Thresholds. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 30(11), 872–881.

- Choi, S. & Kuchenbecker, K. J. (2013). Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 101(9), 2093-2104.
- Cohen, B. & Kirman, J. H. (1986). Vibrotactile frequency discrimination at short durations. *The Journal of general psychology*, 113(2), 179-186.
- DIN EN ISO 9241-910 (2011). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9241-920 (2016). *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 920: Anleitung zu taktilen und haptischen Interaktionen*. Berlin: Beuth.
- Dosher, J. & Hannaford, B. (2005). Human Interaction with Small Haptic Effects. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 14(3), 329-344.
- VDI/ VDE 3850-3 (2015). *Gebrauchstaugliche Gestaltung von Benutzungsschnittstellen für technische Anlagen - Blatt 3: Merkmale, Gestaltung und Einsatzmöglichkeiten von Benutzungsschnittstellen mit Touchscreens*. Berlin: Beuth.
- Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J., Hall, K. L., Hoffman, K. E. & Verrillo, R. T. (1994). The effects of aging on information-processing channels in the sense of touch: I. Absolute sensitivity. *Somatosensory & Motor Research*, 11(4), 345-357.
- Gescheider, G. A., Bolanowski, S. J. & Verrillo, R. T. (2004). Some characteristics of tactile channels. *Behavioural Brain Research*, 148(1-2), 35-40.
- Goldstein, B. E. (2015). *Sensation and Perception*. Gegenfurtner, K. (Hrsg.): *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs (Deutsche Übersetzung)*. 9. Auflage. Berlin: Springer.
- Gorecky, D., Schmitt, M. & Loskyll, M. (2014). Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In Bauernhansl, T., Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 525-542.
- Hatzfeld, C., Cao, S., Kupnik, M. & Werthschützky, R. (2016). Vibrotactile Force Perception - Absolute and Differential Thresholds and External Influences. *IEEE transactions on haptics*, 9(4), 586-597.
- Hoggan, E., Brewster, S. A. & Johnston, J. (2008). Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens. In Burnett, M., Constabile, M. F., Catarci, T., Ruyter, B., Tan, D., Czerwinski, M. & Lund, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 26th Annual CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York: ACM, S. 1573-1582.
- Johnson, K. O. (2001). The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors. *Current Opinion in Neurobiology*, 11(4), 455-461.
- Jones, L. A. & Tan, H. Z. (2013). Application of psychophysical techniques to haptic research. *IEEE transactions on haptics*, 6(3), 268-284.
- Lamoré, P. J. J. (1988). Evidence for different types of mechanoreceptors from measurements of the psychophysical threshold for vibrations under different stimulation conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(6), 2339-2359.
- Mahns, D. A., Perkins, N. M., Sahai, V., Robinson, L. & Rowe, M. J. (2006). Vibrotactile Frequency Discrimination in Human Hairy Skin. *Journal of Neurophysiology* 95(3), 1442-1450.

- Meh, D. & Denišlić, M. (1995). Influence of age, temperature, sex, height and diazepam on vibration perception. *Journal of the Neurological Sciences*, 134(1-2), 136-142.
- Morioka, M. & Griffin, M. J. (2005). Thresholds for the Perception of Hand-transmitted Vibration: Dependence on Contact Area and Contact Location. *Somatosensory & Motor Research*, 22(4), 281-297.
- Morioka, M. & Griffin, M. J. (2008). Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot. *Journal of Sound and Vibration* 314(1-2), 357-370.
- Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Papetti, S., Järveläinen, H. & Schmid, G.-M. (2015). Vibrotactile sensitivity in active finger pressing. In Colgate, J. E. (Hrsg.): *Proceedings of the 2015 IEEE World Haptics Conference (WHC), the 6th Joint Eurohaptics Conference and IEEE Haptics Symposium*. Piscataway: IEEE, S. 457-462.
- Papetti, S., Järveläinen, H., Schmid, G.-M., Giordano, B. L., Schiesser, S. & Fröhlich, M. (2017). Vibrotactile Sensitivity in Active Touch: Effect of Pressing Force. *IEEE Transactions on Haptics*, 10(1), 113-122.
- Seeger, M., Stein, T., Borys, B.-B. & Schmidt, L. (2015). Die Berührungsdauer eines Button-Klicks bei stationären Touchscreens. In Diefenbach, S., Henze, N. & Pielot, M. (Hrsg.): *Mensch und Computer 2015 - Tagungsband*. Berlin: de Gruyter, S. 243-252.
- Seeger, M., Stein, T., Borys, B.-B. & Schmidt, L. (2016): Untersuchung der typischen Fingerkräfte bei der Eingabe auf einer stationären Touchscreen-Oberfläche. In Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V. (Hrsg.): *Arbeit in komplexen Systemen - Digital, vernetzt, human?! 62. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft*. Dortmund: GfA-Press, (Beitrag A.4.20) S. 1-6.
- Stein, T. & Schmidt, L. (2015). Die vibrotaktile Wahrnehmung von Amplituden bei unterschiedlichen Frequenzen an einer ebenen Platte. In Stoll, R. & Kreutzfeld, S. (Hrsg.): *19. Symposium Arbeitsmedizin und Arbeitswissenschaft für NachwuchswissenschaftlerInnen*. Rostock: Universität Rostock, S. 11.
- Treede, R. D. (2005). Das somatosensorische System. In Schmidt, R. F., Lang, F. & Thews, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie*. 29. Auflage. Berlin: Springer, S. 296-323.
- Verrillo, R. T. (1965). The effect of number of pulses on vibrotactile thresholds. *Psychonomic Science*, 3(1-12), 73-74.
- Verrillo, R. T., Bolanowski, S. J. & Gescheider, G. A. (2002). Effect of aging on the subjective magnitude of vibration. *Somatosensory & Motor Research*, 19(3), 238-244.