

Untersuchung zur Gestaltung und Wahrnehmung vibrationsbasierter taktiler Rückmeldungen bei der Mensch-Maschine-Interaktion

André KAISER, Frank DITTRICH, Angelika C. BULLINGER

*Professur Arbeitswissenschaft und Innovationsmanagement, TU Chemnitz
Erfenschlager Straße 73, D-09125 Chemnitz*

Kurzfassung: Die Untersuchung taktiler Rückmeldungen der Mensch-Maschine-Interaktion stellt einen wichtigen Bestandteil zum Erkenntnisgewinn ergonomischer Forschung dar. Die passive Aufnahme von Vibrationen spielt insbesondere bei Bedienelementen außerhalb des Blickbereichs oder für Feedback bei Eingaben auf unbeweglichen Oberflächen eine wichtige Rolle. In einer Studie wurde untersucht, welche Art von Vibrationen zu als komfortabel empfundenen und gut wahrnehmbaren Rückmeldungen führen. In einem standardisierten Versuchsaufbau bewerteten 59 Probanden subjektiv den Komfortbereich taktiler Rückmeldungen. Die Probanden wurden dabei aufgefordert, selbst mittels eines stufenlosen Drehreglers den Komfortbereich zu bestimmen. Dabei wurde zudem der Einfluss des leitenden Materials anhand von vier verschiedenen Trägermaterialien untersucht. Als Ergebnis geben die komfortablen und gut wahrnehmbaren Bereiche Aufschluss über ergonomisch gestaltete taktile Rückmeldungen.

Schlüsselwörter: Bedienelemente, Vibrationen, taktile Wahrnehmung

1. Einleitung

Die Interaktion zwischen Mensch und Maschine zum Informationstausch erfolgt vorrangig über die haptischen, optischen und akustischen Kanäle (DIN EN ISO 9241-910, 2011). Dabei kann je nach Anforderung und Situation durch die Nutzung spezifischer Kanäle die Mensch-Maschine-Interaktion optimiert werden. Beispielsweise wird ein Fahrer abgelenkt, wenn er optische Bedienelemente im Cockpit (z. B. die Klimaanlage) suchen muss. Haptisch wahrnehmbare Elemente mit taktilem Feedback schaffen Abhilfe. Am Beispiel einer Schaltkonsole im Fahrzeug werden im Rahmen des Bundesexzellenzclusters MERGE neuartige und intelligente Leichtbaumaterialien erprobt, wobei haptisch angenehme und gut wahrnehmbare Strukturen als Bedienelemente in die Materialien integriert sind (Kaiser, Meyer, Dittrich & Kroll, 2017). Zur Erzeugung eines Feedbacks werden zusätzlich Vibrationen ausgestrahlt, wobei sich die Frage stellt, wie die Schwingungen gestaltet werden müssen, um als komfortabel empfundene und gut wahrnehmbare Rückmeldungen zu fungieren.

In einem standardisierten Versuchsaufbau bewerteten deshalb 59 Probanden den Komfortbereich der durch Vibration hervorgerufenen taktilen Rückmeldung. Dabei wurde ein Vibrationsmotor mit variabel verstellbarer Spannung angesteuert, wobei die Probanden besonders angenehme und besonders gut wahrnehmbare Bereiche separat einstellen und subjektiv bewerten mussten. Im Folgenden werden der Versuchsaufbau und die Ergebnisse näher beschrieben.

2. Methode

Zur Bestimmung der ergonomisch optimalen Schwingungsbereiche wurde ein Versuchsaufbau mit einem Vibrationsmotor gewählt. Um aus der anliegenden Spannung auf objektiv relevante Schwingungsparameter zu schließen, wurde ein objektiver Messversuch (Abschnitt 2.2) durchgeführt. Eine sich anschließende Probandenstudie (Abschnitt 2.3), bei der Komfort und Wahrnehmbarkeit bewertet wurden, komplettiert die Vorgehensweise. Beide Versuche wurden am selben Versuchsstand mit den gleichen Materialien durchgeführt (Abschnitt 2.1).

2.1 Versuchsstand und Materialien

Als Versuchsgegenstand wurden vier verschiedene Materialproben mit den Abmaßen von etwa 200 x 150 x 3 mm ausgewählt. Die Auswahl beinhaltete eine Kunststoffmatrix aus Polypropylen (Tepex) [Platte 1], einen kohlenstoffverstärkten Kunststoff (Tepex 202 CF) [Platte 2], einen endlos glasfaserverstärkten Kunststoff (Tepex 102 CF) [Platte 3] und einen mit Glasfasermatten verstärkten Kunststoff (Tepex flowcore GMT) [Platte 4].

Die Schwingungseinleitung in die Platten erfolgte durch vier baugleiche Vibrationsmotoren (Adafruit ADA1201), die jeweils mittig auf der Plattenunterseite befestigt wurden (Abbildung 1). Die Vibrationsmotoren sind bis maximal 5 V Spannung belastbar, haben einen Durchmesser von 10 mm bei 2,7 mm Dicke und werden hauptsächlich zur Erzeugung taktile Rückmeldungen eingesetzt. Amplitude und Frequenz der Vibration sind nicht gezielt verstellbar, sondern lediglich über die Spannung zu regeln. Zur Einstellung der Spannung wurde daher das stufenlose Netzteil Sinometer HY1502D verwendet. Das Zwischenschalten eines Relais erzeugt regelmäßige Vibrationspulse. Die Vibrationszeit von 0,5 s und die Ruhezeit von 2 s wurden konstant gehalten. Ein zuvor im 3D-Druck gefertigtes Bauteil diente als Plattenauflage. Dabei wurde durch die Lagerung auf Schaumstoff verhindert, dass die Schwingungen an den Rändern der Platte eingeschränkt werden. Abbildung 1 zeigt die Materialien mit den Vibrationsmotoren und die Plattenauflage.

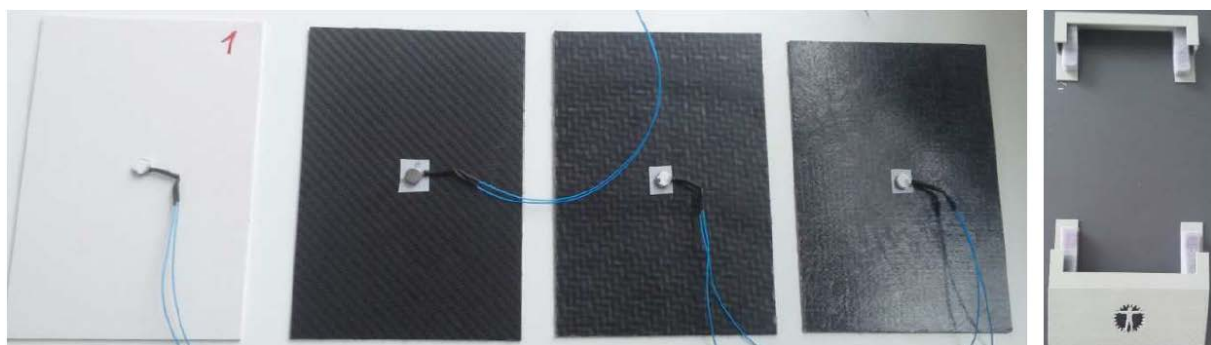


Abbildung 1: von links nach rechts: Platte 1, 2, 3, 4 und Plattenauflage

2.2 Objektive Messung

Die Messung relevanter Schwingungsparameter erfolgte mithilfe eines zweiachsigen Beschleunigungssensors der Firma Noraxon. Das Sensorsystem besitzt eine Messfrequenz von 1500 Hz und misst innerhalb von ± 10 g. Für die Messung wurde der Sensor auf der jeweiligen Plattenoberseite befestigt. Je Platte wurden 7 Messpositionen erfasst. Davon befand sich die erste direkt auf der Markierung, unter

der der Vibrationsmotor angebracht war (Abbildung 2). Zur Beschreibung des Dämpfungsverhaltens der gesamten Platte, wurde die Annahme getroffen, dass die Schwingungsausbreitung symmetrisch zur Plattenmitte erfolgt. Daher wurde auf Messungen der zweiten Plattenhälfte verzichtet. Ohnehin befanden sich bei der Probandenstudie alle Finger bis auf den Mittelfinger in der unteren Hälfte der Platte.



Abbildung 2: Von links nach rechts: Messpunkte zur Vibrationsmessung auf dem Material A und Beschleunigungssensor auf einer Materialprobe in der Plattenauflage

Zur Bestimmung der Vibrationsfrequenz aus den Rohdaten des Beschleunigungssensors wurden die Signale zunächst Offset-korrigiert und anschließend wurde das quadratische Mittel der Messspitzen gebildet. Ab einem Wert von über bzw. unter 33 % des Maximalwertes beginnt und endet das Vibrationsintervall. Innerhalb des Intervalls wurden ausgehend vom Mittelpunkt Auswertedaten bestimmt, die jeweils 50 ms vor und nach dem Mittelpunkt enden. Eine Fourier-Transformation der Auswertedaten ermittelte dann die Hauptfrequenz, die im Weiteren als Frequenz bezeichnet wird. Abbildung 3 zeigt die Auswahl der Auswertedaten aus den Rohdaten des Beschleunigungssensors.

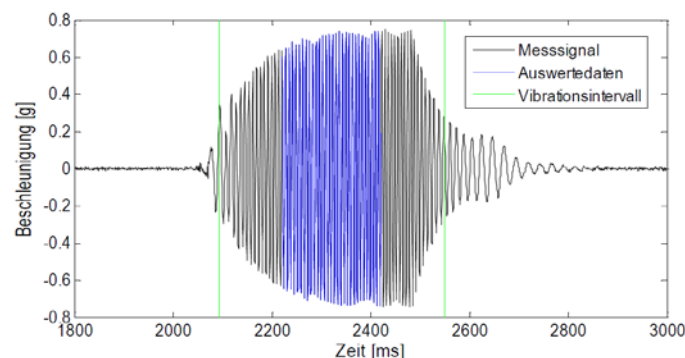


Abbildung 3: Auswahldaten innerhalb eines beispielhaften Vibrationsintervalls

2.3 Subjektive Messung

Zur Evaluierung des Komfort- und Wahrnehmungsprofils führten 59 Probanden zwischen 18 und 52 Jahren ($26,4 \pm 6,7$ Jahre) Bewertungen durch. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, den Komfort und die Wahrnehmung verschiedener Spannungen am Vibrationsmotor für die Materialien zu bewerten. Um eine möglichst reproduzierbare und vergleichbare Handposition zu erzeugen, wurde jeweils der Mittelpunkt der Platte markiert und der Mittelfinger der dominanten Hand darauf platziert. Um zu gewährleisten, dass lediglich die Fingerkuppen aufliegen, ist die

Plattenablage mit einer Fläche versehen, auf der der Handballen aufgelegt werden konnte. Durch die Verstellung von Stuhl- und Tischhöhe konnte für jeden Probanden eine komfortable Haltung eingestellt werden. Dies ist wichtig, da eine verkrampfte Haltung zu geringeren Komfortbewertung führen könnte. Ein möglicher Einfluss der akustischen Wahrnehmung der Vibrationen wurde zusätzlich ausgeschlossen, indem die Probanden geräuschunterdrückende Kopfhörer trugen. Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau.



Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Proband und geräuschunterdrückenden Kopfhörern

Im ersten Schritt stellte der Proband selbst diejenige Spannung im Bereich zwischen 1V und 5V ein, die er als am angenehmsten empfand. Die Spannung wurde erfasst und der Proband bewertete unter Zuhilfenahme einer angepassten CP-50 Skala den Komfort, wobei [0] kein Diskomfort, [-25] starken Diskomfort und [+25] hohen Komfort darstellte. CP-50 Skalen wurden ausgewählt, da diese u. a. im Bereich des Diskomforts beim Sitzen Verwendung finden (Zhang, Helander und Drury, 1996). Analog dazu bewertete der Proband auf einer weiteren CP-50 Skala die Wahrnehmung dieser Spannung mit den Anhaltspunkten [0] keine Wahrnehmung, [+25] mittlere Wahrnehmung und [+50] sehr starke Wahrnehmung. Nach der Ermittlung der Spannung mit dem optimalen Komfort, sollte der Proband die Spannung am Netzgerät einstellen, bei welcher er die Vibration am besten wahrnahm. Wieder bewertete er zu dieser Spannung unter Zuhilfenahme der CP-50 Skalen den Komfort und die Wahrnehmung. Im Anschluss stellte der Versuchsleiter die Minimal- und Maximalspannung des Motors mit 1V und 5V ein, die der Proband ebenfalls mittels der CP-50 Skalen auf Komfort und Wahrnehmung bewertete. Daraufhin wurde die nächste Platte aufgelegt. Die Reihenfolge der Platten erfolgte randomisiert.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der objektiven und subjektiven Messwerte zeigen materialübergreifend keine signifikanten Differenzen ($p > 0,05$). Wie zu erwarten, steigt der Unterschied der objektiven Werte der verschiedenen Materialien durch die Wellenausbreitung vom Mittelpunkt aus jedoch tendenziell an. Dies zeigt, dass die Materialien durch die Nähe des Motors zur Hand keinen signifikanten Einfluss auf die Bewertung hatten. Ein anderer Versuchsaufbau würde aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften bei der Wellenausbreitung zu anderen Ergebnissen führen.

Demgegenüber wurden signifikante Effekte über den Verlauf der Spannung erfasst. Alle Materialplatten zeigen etwa bei $2 \pm 0,4$ V den höchsten Komfort und etwa bei $4 \pm 0,6$ V die stärkste Wahrnehmung. Sowohl Komfort als auch Wahrnehmung fallen nach den Maximalwerten wieder ab. Übertragen auf die zugehörigen Schwingungsparameter erzeugen 2 V Spannung etwa 149 ± 6 Hz bei $0,57 \pm 0,02$ g und 4 V etwa 232 ± 5 Hz bei $0,81 \pm 0,04$ g. Die Werte für 1 V mit etwa 80 ± 8 Hz und $0,18 \pm 0,07$ g sowie bei 5 V mit etwa 275 ± 6 Hz bei $1,16 \pm 0,06$ g ergänzen die Ergebnisse. Die Frequenzen in Gegenüberstellung mit den subjektiven Bewertungen sind in Abbildung 4 dargestellt.

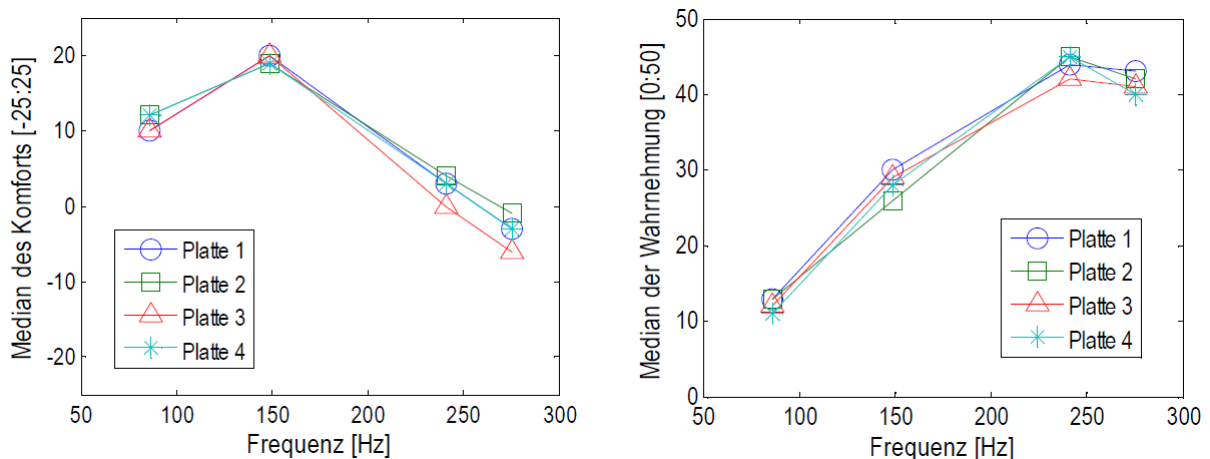


Abbildung 4: Ergebnis des Komforts und der Wahrnehmbarkeit in Abhängigkeit der Frequenz

Zur Festlegung einer Spannung bzw. einer Schwingungsfrequenz, welche den bestmöglichen Kompromiss aus Komfort und Wahrnehmung findet, ist festzulegen, ob Komfort oder Wahrnehmung im Fokus stehen. Im Vergleich der Bereiche von optimalem Komfort und optimaler Wahrnehmung ist auffällig, dass im Bereich des optimalen Komforts immer noch eine mittlere Wahrnehmbarkeit vorherrscht. Im Spannungsbereich der optimalen Wahrnehmung, nimmt der Komfort hingegen stark ab. Unter diesen Umständen sollten die Spannung und die damit verbundene Vibration im Bereich für optimalem Komfort liegen. Eine Korrektur nach oben kann erfolgen, insofern die Wahrnehmbarkeit weiter gesteigert werden soll.

Die in dieser Studie gemessenen Frequenzen liegen im Wahrnehmungsbereich der Vater-Pacini-Körperchen, von denen etwa $20/\text{cm}^2$ in der Fingerspitze vorhanden sind (Speckmann et al., 2009). Oey und Mellert (2004) beschreiben für die Vater-Pacini-Körperchen (PC): „*The PC system has its highest sensitivity in the range 125 – 160 Hz independent of probe diameter and hand location*“. Ähnliche Ergebnisse beschreibt auch Morioka (1999). Mit 149 ± 6 Hz liegt das Komfortoptimum in diesem besonders sensitiven Bereich. Es ist denkbar, dass der Komfort mit einer hohen Sensibilität der Rezeptorzellen korrespondiert.

Die erfassten Beschleunigungsamplituden sind durch das fehlende Handgewicht für weitere Verwendungen kritisch zu hinterfragen, da sich die Amplitude abhängig vom aufliegenden Gewicht ändert. Da die objektiven Kennwerte ohne Einfluss der Hand erfasst wurden, ist nicht klar, inwieweit sich die tatsächliche Amplitude unter Einfluss der Probanden verändert hat. Offen bleibt auch der Einfluss der Vibrationsdosis auf die Bewertung des Komforts, da im vorliegenden Design lediglich ein Setup mit 0,5 s Vibration zu 2 s Pause betrachtet wurde.

4. Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass eine Detektion eines Komfortbereichs über entsprechende subjektive Skalen möglich ist. Das Versuchsdesign eignete sich insbesondere, um geeignete Spannungen für die Ansteuerung der gewählten Vibrationsmotoren abzuleiten. Diese Erkenntnisse konnten direkt in die Umsetzung der Schaltkonsole im Rahmen des Bundesexzellenzclusters MERGE einfließen. Die Übersetzung der Ergebnisse in die Schwingungsparameter Frequenz und Amplitude lässt auch allgemeingültigere Aussagen zu und kann als Gestaltungsempfehlung für taktiles Feedback genutzt werden. Da eine Literaturrecherche keine Studien lieferte, die sich ebenfalls mit der Komfortbewertung von Vibrationen beschäftigten, können diese Werte als erste Referenzen betrachtet werden. Als Empfehlung werden etwa 149 Hz bei 0,57 g gegeben, wobei eine Korrektur der Schwingungsparameter nach oben erfolgen sollte, wenn die Wahrnehmbarkeit besonders relevant ist.

Spannend ist dabei die hohe Übereinstimmung mit dem sensitivsten Bereich entsprechender Rezeptorzellen. Diese Übereinstimmung kann, unter Beachtung weiterer Rezeptorzellen (z.B. Meissner-Körperchen), einen nächsten Untersuchungsschwerpunkt bilden. Auch die Vibrationsdosis und eine genauere Betrachtung der Amplituden können weitere Forschungsfelder aufzeigen.

5. Literatur

- DIN EN ISO 9241-910. (2011). Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 910: Rahmen für die taktile und haptische Interaktion. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag.
- Kaiser, A., Meyer, M., Dittrich, F., Kroll, L. (2017). Integration von Bedienelementen in Faserverbundwerkstoffe . Nutzerstudie zur haptischen Wahrnehmung verschiedener Oberflächenstrukturen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hrsg.), Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft, 63. GfA-Frühjahrskonferenz. Dortmund: GfA-Press.
- Morioka, M. (1999). Effects of contact location on vibration thresholds in the glabrous skin of the human hand. 34th U.K. Group Meeting on human responses to vibration.
- Oey, H. & Mellert, V. (2004): Vibration thresholds and equal vibration levels at the human fingertip and palm. International Congresses on Acoustics.
- Speckmann, E.-J., Hescheler, J., Köhling, R., & Alzheimer, C. (Eds.). (2009). Physiologie (5. Auflage). München: Elsevier Urban & Fischer.
- Zhang, L., Helander, M. G., & Drury, C. (1996). Identifying Factors of comfort and discomfort in sitting. Human Factors. (38), 377–389.

Danksagung: Die Autoren danken den Studenten, die im Rahmen der Messungen und Auswertungen unterstützt haben. Dies betrifft: Reino Albrecht, Andre Burek, Christian Gärtner, Wolfgang Griessl, Rico Krebs, Carlo Leilich, Toni Lorenz, Paul Lückemann, Marc Obendorf, Andy Schönherr, Benjamin Winkler und Mats Wortmann. Diese Arbeit entstand im Rahmen des Bundesexzellenzcluster EXC 1075 „Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen“ und wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

ARBEIT(s).WISSEN.SCHAF(F)T
Grundlage für Management & Kompetenzentwicklung

64. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FOM Hochschule für
Oekonomie & Management gGmbH

21. – 23. Februar 2018

GfA Press

Bericht zum 64. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 21. – 23. Februar 2018

FOM Hochschule für Oekonomie & Management

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2018

ISBN 978-3-936804-24-9

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

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.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

USB-Print:

Prof. Dr. Thomas Heupel, FOM Prorektor Forschung, thomas.heupel@fom.de

Screen design und Umsetzung

© 2018 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de