

Titel

Objektive Bewertung des Anwenderkomforts durch den Aufbau eines Schwingungsfilters

IGF-Nr.: 21534 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: Karlsruher Institut für Technologie,
IPEK – Institut für Produktentwicklung,
Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente
Kaiserstraße 10
76131 Karlsruhe



Ansprechpartner beim IPEK:

Diana Fotler, M. Sc.
+49 721 608-48518
diana.fotler@kit.edu

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 21534 N der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. – FGW, Papenberger Straße 49, 42859 Remscheid wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Im Zuge des zunehmenden funktionalen Optimierungsgrads von Power-Tools stehen deutsche kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) immer stärker unter einem wachsenden Innovationsdruck, um sich im internationalen Wettbewerb zu behaupten. Um am Markt bestehen zu können, verfolgen Hersteller den Ansatz der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Systeme werden auf die Bedürfnisse des Anwenders angepasst, um dadurch die Leistungsfähigkeit des Systems aus Anwender und Power-Tool zu verbessern. Produktivität und Ergonomie sind dabei zentrale Stellgrößen, welche eine Möglichkeit zur deutlichen Wertsteigerung der Produkte liefern. Die Produktivität ist dabei nachweislich von dem wahrgenommenen Komfort des Anwenders während der Benutzung abhängig [1, 2]. Bei Power-Tools wird dieser Komfort maßgeblich durch ergonomische Aspekte beeinflusst. Einen besonders intensiv wahrnehmbaren Komfortaspekt stellen Vibrationsemissionen dar, welche auf den Anwender einwirken. Diese belasten den Anwender sowohl physisch als auch psychisch. Zur Vermeidung gesundheitlicher und physiologischer Schäden werden Grenzwerte für die Vibrationseinwirkung normativ vorgegeben. Neben den gesundheitlichen Aspekten sind für die Produktentwicklung Komfortaspekte hinsichtlich der Vibrationsemissionen handgehaltener Power-Tools wichtig, was bisher noch nicht ausreichend untersucht wurde (vgl. Abbildung 1). Die Ermittlung von Kennwerten, für eine gezielte Schwingungsauslegung hinsichtlich des Anwenderkomforts, führt zu einem technischen Vorsprung für deutsche Power-Tool Hersteller im internationalen Wettbewerb.

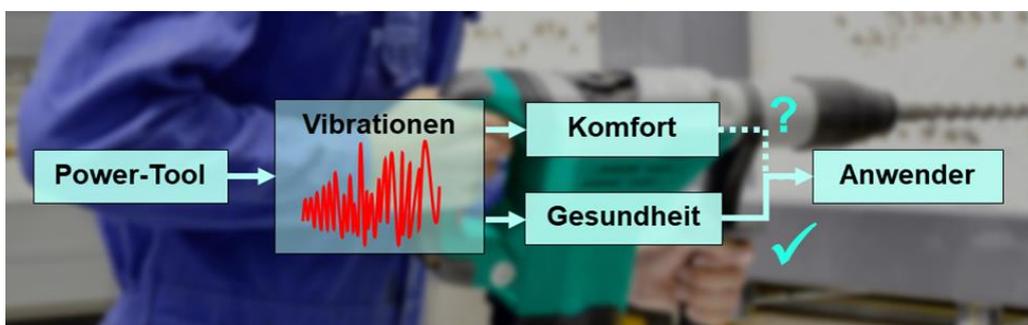


Abbildung 1: Fehlende Bewertungsgröße Vibrationskomfort bei Geräte- und Werkzeugtests

Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Bereitstellung eines Bewertungsfilters, welcher bereits in einer frühen Phase der Produktenwicklung hilft, den empfundenen Vibrations(dis)komfort bei der Nutzung eines Power-Tools zu evaluieren und mögliches Optimierungspotential aufzuzeigen. Zur einfachen und effizienten Nutzung des Filters sollen Hilfestellungen für den Einsatz des Filters erarbeitet werden. Um diese Ziele zu erreichen, wurde folgende Arbeitshypothese untersucht:

Hypothese: Durch die Bewertung von Vibrationen in einer kontrollierten, realitätsnahen Umgebung lässt sich ein Zusammenhang zwischen charakteristischen Merkmalen im Frequenzspektrum und wahrgenommenem Vibrationskomfort identifizieren, wodurch ein frequenzabhängiger Bewertungsfaktor für (Dis)Komfort bei Power-Tools aufgebaut werden kann.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Um das Forschungsziel der objektiven Bewertung des Anwenderkomforts durch den Aufbau eines Komfortfilters zu erreichen, wurde der bestehende Anwender-Interaktion Prüfstand (AIP) aus dem DFG-Forschungsgroßgerät „Validierungsumgebung für handgehaltene Geräte“ (DFG Proj. Nr.: 275571425) genutzt und mit neuen methodischen Ansätzen erweitert. Das in sechs Arbeitspaketen gegliederte Vorgehen zur Erreichung der Zielsetzung ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

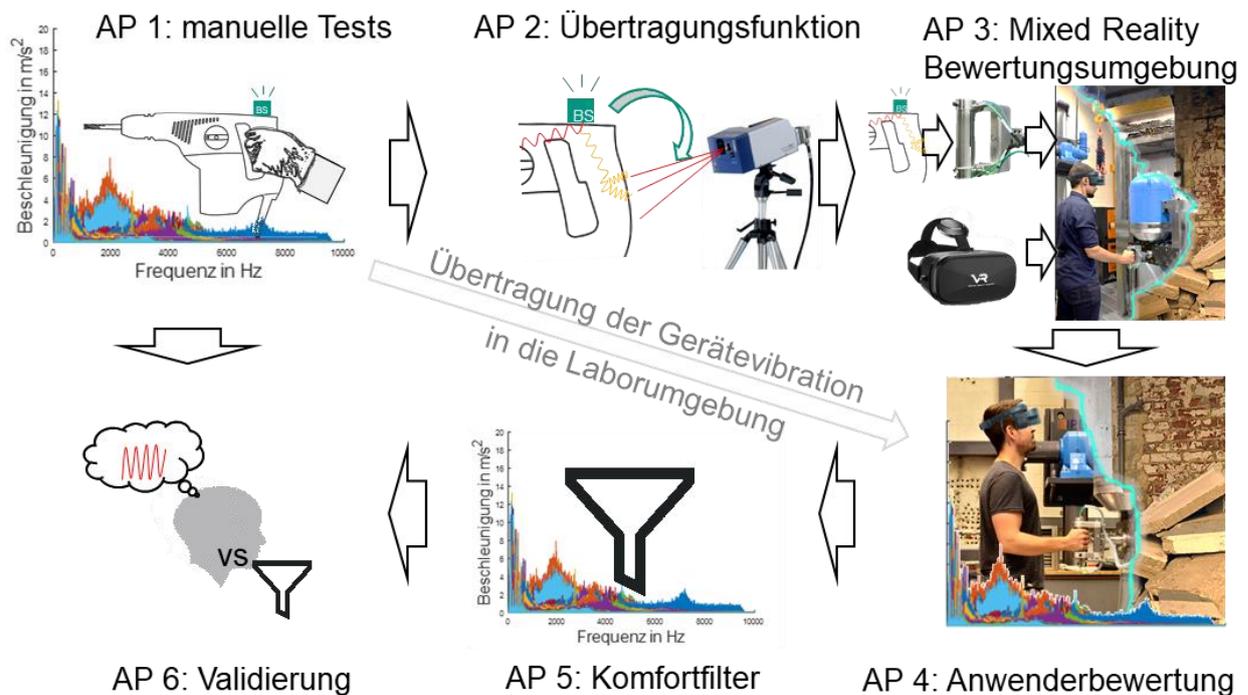


Abbildung 2: Lösungsweg - Übersicht über die Arbeitspakete

Arbeitspaket 1 – Ermittlung der Schwingungsprofile von Power-Tools

Ziel des ersten Arbeitspakets war die Erzeugung und Klassifizierung von Datensätzen zum Vibrationsverhalten von Power-Tools. Diese bildeten im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens die Grundlage für die Evaluation des menschlichen Komfortempfindens und trugen somit zur wissenschaftlichen Absicherung des Filters zur Bewertung der Gerätevibrationen bei.

METHODE

Zur Erzeugung der Datensätze wurde eine Studie mit manuellen Versuchen an den Systemen Winkelschleifer und Bohrhammer durchgeführt [3]. An den Versuchen mit dem System Winkelschleifer nahmen 16 Personen und mit dem System Bohrhammer 19 Personen teil. Die Anzahl der Probanden wurde basierend auf der in einer Vorstudie mit 6 Personen beobachtete Streuung der subjektiven Bewertung gewählt. Es wurden folgende Faktorstufen als unabhängige Variable variiert:

Gerät (vergleichbare Leistung & Gewicht)	Winkelschleifer	2 verschiedene Akkugeräte
		1 netzbetriebenes Gerät
	Bohrhammer	1 druckluftbetriebenes Gerät
		1 Akkugerät
Anwendung	Winkelschleifer	3 verschiedene netzbetriebene Geräte
		Schruppen mit Fächerscheibe
		Schleifen mit Fächerscheibe
	Bohrhammer	Trennen mit Trennscheibe
		Bohren mit Ø 10mm und 170mm Arbeitslänge
		Bohren mit Ø 16mm und 170mm Arbeitslänge
		Bohren horizontal
		Bohren vertikal

Neben den Messgrößen zur Bewertung der emittierten Vibration (u.a. Vibrationsspektrum, RMS und ahv-Wert) wurden weitere Messgrößen wie bspw. Andruckkräfte, Raumtemperatur und Anthropometrie der Versuchsperson erfasst, um im weiteren Verlauf analysieren zu können, ob diese als Störgrößen mit zu betrachten sind. Die Versuchspersonen bewerteten den empfundenen Diskomfort, die Vibrationsintensität und Komfort (als konträre Größe zum Diskomfort) sowie die Schwierigkeit der Bewertung auf einer kontinuierlichen Skala zwischen 0 und 6 (Zwischenwerte waren erlaubt).

ERGEBNIS

In dieser Studie wurde festgestellt, dass die Beurteilung des Diskomforts einfacher war als die Beurteilung von Komfort, da ein Erleben von Lärm und Vibrationen im manuellen Versuch nicht als Komfort bezeichnet werden kann. Daher wurde im weiteren Verlauf des Projektes der Fokus auf die Erhebung der Größe Diskomfort gelegt und die Größe Komfort als Kontrollgröße weiterhin erhoben. Es konnten klare Unterschiede in der Bewertung des Diskomforts der einzelnen Geräte und Anwendungen festgestellt werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Bewertung sehr personenspezifisch war, was in den weiteren Studien zum Aufbau des frequenzabhängigen Vibrationsfilters berücksichtigt wurde.

Die hier durchgeführte Arbeit dient als Referenzmessung für die nachfolgenden Arbeitspakete. Die Messdaten wurden entsprechend der Faktorstufen (Geräte, Anwendungen, Werkzeuge), Vibrationskennwerte, Probandenmerkmale (Demographie, Anthropometrie), Vibrationsspektren, subjektive Bewertungen der Vibrationen in Gruppen unterteilt und für die spätere Verwendung archiviert. Es wurden 1042 Datensätze für den Winkelschleifer und 1064 Datensätze für den Bohrhammer erzeugt.

Arbeitspaket 2: Ermittlung des Griffeinflusses auf die Übertragungsfunktion

Ziel des zweiten Arbeitspakets war das Aufstellen von Übertragungsfunktionen, um den Zusammenhang der im ersten Arbeitspaket nach DIN EN ISO 28927-1:2020-04 [4] gemessenen Vibrationen und den an der Griffflächen auftretenden Vibrationen, welche auf die menschliche Hand wirken, zu beschreiben. Diese Übertragungsfunktionen berücksichtigen

und beschreiben die Besonderheiten der verschiedenen, auf dem Markt verbreiteten Griffe und gewährleisten eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Power-Tools.

METHODE

Zur Erreichung des Ziels wurden für die acht im ersten Arbeitspaket verwendeten Geräte eine Modalanalyse mittels Impulsanregung durchgeführt (vgl. Abbildung 3). Die Einleitungsstelle des Kraftimpulses erfolgte über einen Aluwürfel an der Werkzeugaufnahme in drei Raumrichtungen. Mithilfe von Beschleunigungssensoren wurde die Beschleunigung am Seiten- und Hauptgriff (nach DIN EN ISO 28927-1:2020-04 [4]) sowie den ursprünglichen Messstellen im ersten Arbeitspaket gemessen. Anschließend wurden Übertragungsfunktionen zwischen diesen beiden Messstellen der Beschleunigung, jeweils am Seiten- und Hauptgriff, berechnet. Zusätzlich wurden die Übertragungsfunktionen zwischen der Einleitungsstelle und jeder der 4 Beschleunigungs-Messstellen eines Geräts berechnet.



Abbildung 3: Versuchsaufbau der Modalanalyse mittels Impulsanregung. Die Aufbringung des Kraftimpulses erfolgte von Hand.

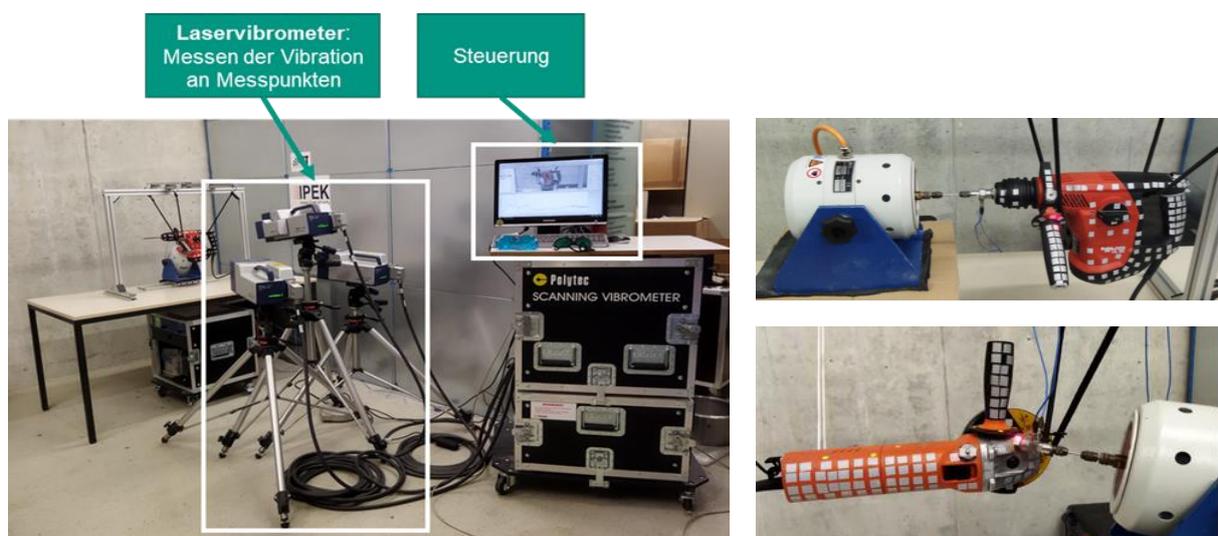


Abbildung 4: Aufbau der Modalanalyse mittels 3D Laser Doppler Vibrometer zur Ermittlung der Übertragungsfunktion (links) sowie Darstellung der Messstellen des Bohrhammers (rechts oben) und Winkelschleifers (rechts unten).

Weiterhin wurden Modalanalysen an einem Winkelschleifer und an einem Bohrhämmer mittels 3D Geometriescanning (Modell PSV-400, Polytec GmbH, Waldbronn, Deutschland) (vgl. Abbildung 4) während einer kontinuierlichen Anregung durchgeführt. Als Anregungssignal wurde über einen Modalshaker mit Stinger Anschluss ein Pseudo Random Rauschen in drei Raumrichtungen auf die Geräte aufgeprägt. Abhängig vom Gerät wurden die Vibrationen an circa 50 Messstellen auf der Gehäuseoberfläche erfasst. Die Anregung wurde an zwei verschiedenen Stellen eingeleitet. In der Auswertung wurde jeweils die Übertragungsfunktion zwischen der Einleitungsstelle und dem Messpunkt am Seitengriff, dem Messpunkt am Hauptgriff, sowie den Messpunkten am Seiten- und Hauptgriff nach DIN EN ISO 28927-1:2020-04 [4] erstellt (siehe Abbildung 4). Durch die Messpunkte auf dem Gehäuse konnte zudem das Schwingungsverhalten des gesamten Geräts betrachtet werden.

ERGEBNIS

Die Anwendung des 3D Laser Doppler Vibrometers ermöglichte eine erfolgreiche Messung der Übertragungsfunktionen und die Bestimmung des gesamten Schwingungsverhaltens der Geräte. Weiterhin war es möglich eine Übertragungsfunktion zwischen Messpunkten am Seiten- und Hauptgriff nach DIN EN ISO 28927-1:2020-04 [4] und der Handposition zu ermitteln. Dabei wiesen die Geräte ein nichtlineares Systemverhalten zwischen ISO Messpunkt und Handposition auf. Dies führt zu der Erkenntnis, dass bei menschlicher Interaktion mit den Geräten unterschiedliche Übertragungsfunktionen je nach Belastungszustand und Betriebspunkt zu erwarten sind. Bei einer Probandenstudie ist davon auszugehen, dass die mechanische Interaktion der einzelnen Versuchspersonen mit dem Handgriff sehr individuell ausfällt. Schlussfolgernd wird bei einer Shaker-Studie davon abgeraten, Original-Gehäuseteile zu verwenden, da diese eine präzise Kontrolle der auf die Versuchsperson wirkende Vibration erschweren. Im Arbeitspaket 4 werden daher generische, modal optimierte Handgriffe verwendet, die eine unverfälschte Übertragung der Vibrationen im relevanten Frequenzbereich ermöglichen.

Arbeitspaket 3: Aufbau einer reproduzierbaren Validierungsumgebung

Ziel des dritten Arbeitspakets war der Aufbau und die Validierung einer Versuchsumgebung, die eine Bewertung des vibrationsinduzierten Diskomforts in Probandenstudien unter reproduzierbaren Bedingungen ermöglicht. Hierzu soll die Eignung einer Mixed-Reality-Umgebung beurteilt werden.

METHODE – PILOTSTUDIE I

Zur reproduzierbaren Abbildung der im ersten Arbeitspaket ermittelten Beschleunigungen sowie weiterer Beschleunigungsprofile wurde ein Vibrationsregelsystem (Modell VR9500, Vibration Research Europe GmbH, Föritzal, Deutschland) in die bestehende Prüfstandsarchitektur des AIP integriert. Weiter wurde für die Mixed-Reality-Umgebung eine Virtual-Reality (VR) -Umgebung in Unity aufgebaut, welche eine Werkstattumgebung sowie ein visuelles Bohrhämmer- und ein Winkelschleifermodell beinhalten (siehe Abbildung 5).

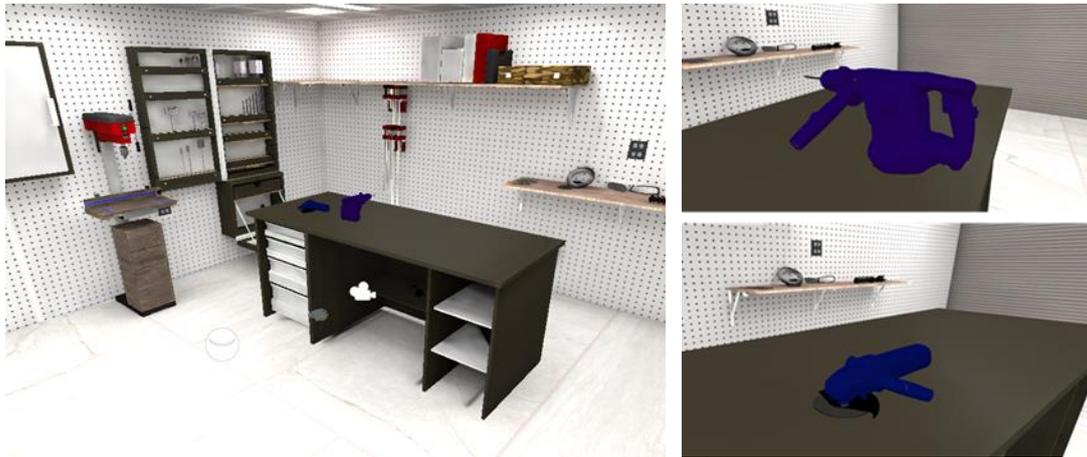


Abbildung 5: Aufgebaute VR-Umgebung – Eine Werkstattumgebung mit den Geräten Bohrhammer und Winkelschleifer.

Die Gerätedarstellung umfasste hierbei lediglich die Geometrie jedoch keine farbliche Differenzierung, um eine Beurteilungsverzerrung infolge individueller Präferenzen der Versuchspersonen zu vermeiden. Zur Bewertung der aufgebauten VR-Umgebung wurde eine Pilotstudie mit Probanden durchgeführt. In der Studie wurde die Anwenderwahrnehmung der realen Power-Tools mit der Anwenderwahrnehmung der virtuellen Power-Tools in der VR-Umgebung verglichen (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 6: Vergleich von Power-Tool und VR-Umgebung ohne Simulation haptischer Interaktionen.

ERGEBNISSE – PILOTSTUDIE I

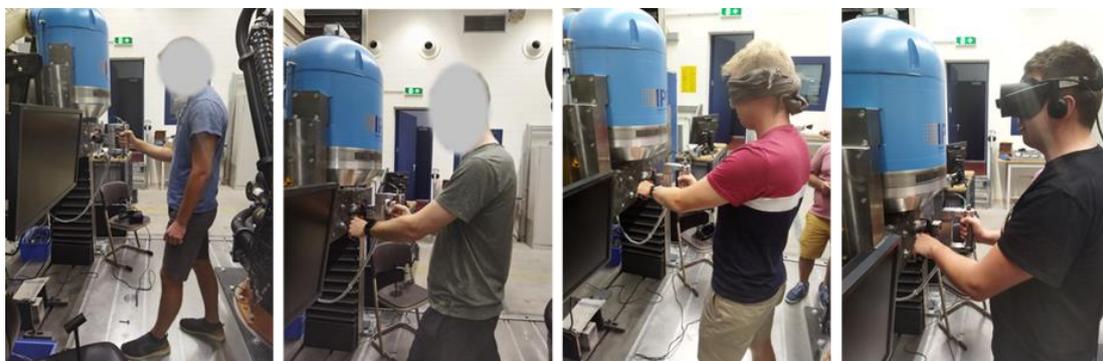
Die Pilotstudie ergab eine hohe Präsenz (die Illusion vor Ort zu sein) sowie eine gute, jedoch eingeschränkte Interaktivität und Kreditibilität (Erwartungen) der Probanden mit bzw. gegenüber dem Power-Tool. Folglich können die individuelle Einstellung und Erwartung der Probanden einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung der Geräte in der VR-Umgebung haben (Farbe, Handhaltung). Des Weiteren wurden das fehlende Gerätegewicht sowie die fehlende akustische Wahrnehmung und die kaum sichtbare Rotation der Werkzeugscheiben als Störgrößen ermittelt.

Folglich lässt sich die Hypothese ableiten, dass die Art der visuellen Darbietung während der Vibrationsbelastung einen starken Effekt auf die Ergebnisse der haptischen Beurteilung hat.

Aus diesem Grund wurde in diesem Arbeitspaket weiterhin eine gesonderte Untersuchung zum Einfluss der visuellen Darbietung auf die Bewertungsergebnisse durchgeführt.

METHODE – PILOTSTUDIE II

Im weiteren Studienverlauf wurde die VR-Umgebung mit dem Shaker System des AIP gekoppelt. Die Probanden sehen somit die virtuelle Werkstattumgebung, während sie einen Messgriff greifen, der vom Shaker System mit Vibrationen beaufschlagt wird (Abbildung 7, d). Als weitere visuelle Versuchsbedingungen wurden neben der Nutzung der VR-Brille die Zustände offene Augen (Abbildung 7, a & b) und verbundene Augen (Abbildung 7, c) untersucht. Die Interaktion mit dem AIP erfolgte je visueller Bedingung ein- und zweihändig (vgl. Abbildung 7, a & b). Mit diesem Versuchsaufbau wurde eine zweite Pilotstudie durchgeführt. Zur Anregung wurde ein Einzelsinussignal mit unterschiedlichen Frequenzen verwendet.



a)

b)

c)

d)

Abbildung 7: Pilotstudie zum Vergleich der subjektiven Bewertung bei unterschiedlichen haptischen und visuellen Reizen; von links nach rechts: Offene Augen, einhändig; Offene Augen, beidhändig; Verbundene Augen, beidhändig; VR-Umgebung, beidhändig.

ERGEBNIS – PILOTSTUDIE II

Die Ergebnisse zeigten, dass die subjektive Bewertung des Vibrationsdiskomforts (VDK) bei offenen Augen sowie beim Tragen der VR-Brille stärker streut als bei verbundenen Augen, wobei die Mittelwerte aller Bewertungen ähnlich sind (vgl. Abbildung 8). Diese Ähnlichkeit gilt auch für die Mittelwerte der VDK-Bewertung beim ein- und beidhändigen Greifen. Die Übertragbarkeit auf Power-Tool-Anwendungen ist beim beidhändigen Greifen jedoch höher. Aus den Ergebnissen der Pilotstudie wurden die folgenden Versuchsbedingungen für die Studie in AP4 abgeleitet: Beidhändiges Greifen des Messgriffs mit geschlossenen Augen und zusätzlichem Tragen eines Gehörschutzes bzw. Noise-Cancelling-Kopfhörer [5].

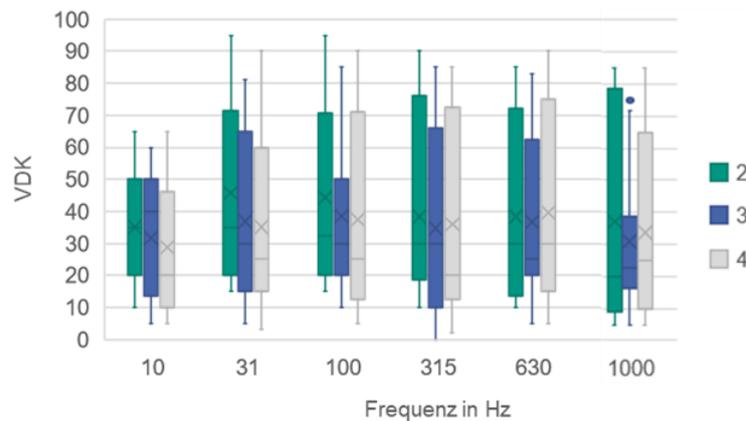


Abbildung 8: Vergleich der visuellen Versuchsbedingungen – offene Augen (2), blind (3) und VR (4) – bei der Beurteilung von Einzelsinussignalen unterschiedlicher Frequenz.

Zum weiteren Aufbau der Studiumgebung wurden basierend auf den Erkenntnissen des zweiten Arbeitspakets in diesem Arbeitspaket ebenfalls modal optimierte Handgriffe entwickelt. Im Umfeld von Bohrhämmern definiert DIN EN ISO 10819:2022-12 [6] einen Handgriff für Untersuchungen des menschlichen dynamischen Verhaltens an Schwingprüfständen (vgl. Abbildung 9, a). Dieser Handgriff ist mit Sensorik ausgestattet, welche die wirkende Andruck- und Greifkraft der Versuchsperson erfassen kann. In diesem Vorhaben wurde analog ein zusätzlicher Seitengriff (vgl. Abbildung 9, b) aufgebaut, welcher ebenfalls eine Messung der Greifkraft ermöglicht.

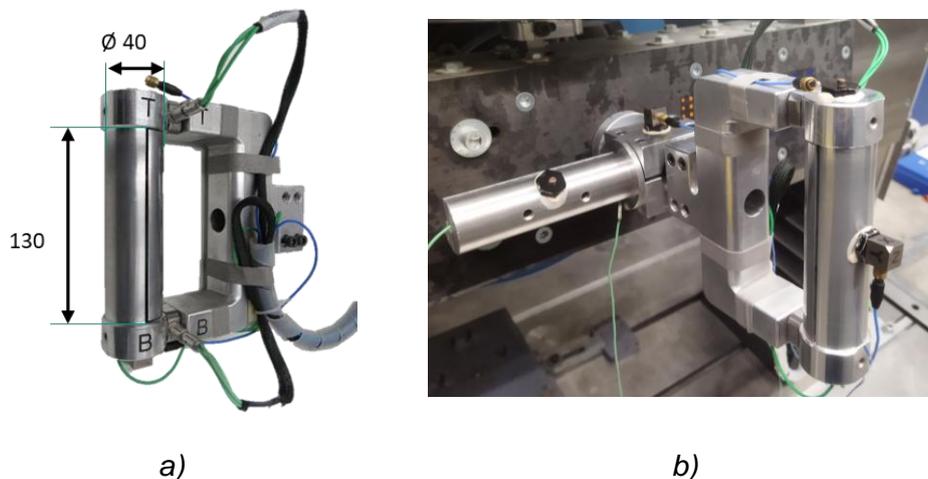


Abbildung 9: Generischer Handgriff (a) zur Abbildung von Bohrhammeranwendungen nach DIN EN ISO 10819:2022-12 [6]. Ergänzung um einen geteilten Zusatzhandgriff (b) zur Abbildung des Seitengriffs eines Bohrhammers mit Möglichkeit der Greifkraftmessung.

Im Umfeld von Winkelschleifern ist bisher kein Handgriff für Untersuchungen an Schwingprüfständen bekannt. Aus diesem Grund wurde ausgehend von der bestehenden Geometrie eines in Arbeitspaket 1 verwendeten Winkelschleifers (vgl. Abbildung 10, a) eine generische, modal optimierte Griffform zur Anbringung am AIP entworfen (vgl. Abbildung 10, b).



a)



b)

Abbildung 10: Überführung eines Winkelschleifer Handgriffs (a) in einen generischen Handgriff (b).

Der Grundgedanke war es in diesem Zusammenhang, durch die repräsentativen Messgriffe, die am Markt präsenten Produkte möglichst authentisch nachzubilden. Die generischen Griffe sind in ihren Geometrien an marktübliche Bohrhammer- und Winkelschleifergriffe angelehnt und wurden simulativ (Modalanalyse in ANSYS) sowie konstruktiv vorausgelegt. Um Eigenfrequenzen bis 2000 Hz möglichst zu vermeiden, wurden auf eine leichte und steife Bauweise geachtet. Um zu überprüfen, ob die Griffvarianten für die Anwenderstudie in Arbeitspaket 4 verwendet werden können, wurden die Griffe direkt in der Versuchsumgebung durch eine experimentelle Modalanalyse hinsichtlich ihrer Eigendynamik untersucht. Die Modalanalyse des Winkelschleifers (vgl. Abbildung 10, a) ergab bspw., dass der Originalseitengriff sowie der Original-Hauptgriff bei 350 Hz bzw. 1200 Hz Eigenmoden aufweisen und daher für die Studie in Arbeitspaket 4 ungeeignet sind. Der generische, geteilte Seitengriff (vgl. Abbildung 10, b) weist ab ca. 300 Hz ebenfalls Eigenmoden auf, ebenso wie der generische Bohrhammer-Hauptgriff ab ca. 600 Hz (vgl. Abbildung 9, b). Es wurde daher beschlossen, dass ungeteilte Handgriffe ohne Möglichkeit der Greifkraftmessung für den weiteren Projektverlauf verwendet werden. Dies Erforderte die Auslegung und Fertigung eines Bohrhammerhauptgriffes, welcher den geteilten Handgriff nach DIN EN ISO 10819:2022-12 [6] für die weiteren Studien ersetzt.

Arbeitspaket 4: Diskomfortbewertung der Vibrationsspektren

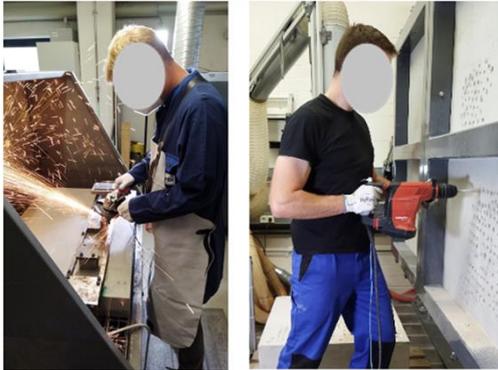
Ziel des vierten Arbeitspakets war die Identifikation von Vibrationsmerkmalen, welche zu Diskomfort des Anwenders führen. Aus den identifizierten Vibrationsmerkmalen sollte der Vibrationsdiskomfortfilter anschließend aufgebaut werden.

METHODE

Es wurde iterativ ein standardisiertes, reliables Studiendesign für eine Laborstudie mit psychisch-simulierter Studiensumgebung entwickelt. Anschließend wurde die Studie mit 35 Probanden durchgeführt. Diese wird im Folgenden als Studie 2 (psychisch simuliert) bezeichnet, Studie 1 (psychisch real) bezieht sich auf die Anwenderstudie aus Arbeitspaket 1 (siehe Abbildung 11).

Studie 1

LABORSTUDIE
physisch-reale Studienumgebung



Studie 2

LABORSTUDIE
physisch-simulierte Studienumgebung

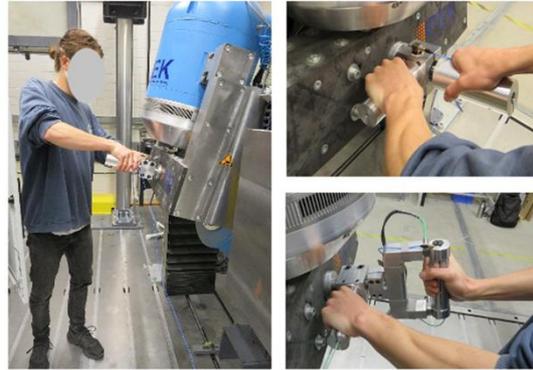


Abbildung 11: Studienaufbau in physisch-realer und physisch-simulierter Studienumgebung.

Nach einer kurzen Versuchseinleitung der Probanden wurde die IST-Situation in Form von ihrer Stimmung abgefragt. Anschließend fand eine detailliertere Einführung in die Studiendurchführung statt. Die Studienumgebung wurde auf die Körpergröße der Probanden individuell angepasst. Der AIP besitzt hierzu die Möglichkeit, die Höhe und Neigung der Shaker-Anlage über entsprechende elektromechanische Verstelleinheiten zu justieren. Die Definitionen von Vibrationsintensität (VI), Vibrationsdiskomfort (VDK) und Vibrationskomfort (VK) wurden erläutert. Deren Bewertung erfolgte anhand der CP50-Skala. Hierbei handelt es sich um eine diskrete Skala mit 50 Stufen, welche allerdings auch Werte über 50 zulässt. Der Wechsel der Bewertungsskala über den Projektverlauf hinweg ist hierbei Ergebnis von Versuchserkenntnissen und Diskussionen mit Fachexperten aus der Psychologie. Eine nach oben offene Skala ermöglicht es, den personenspezifischen Nullpunkt einer subjektiven Bewertung zu berücksichtigen.

Zu Beginn der Studie wurde in einem separaten Aufbau neben dem AIP die maximale Greif- und Andruckkraft gemessen. Die notwendigen Messgriffe stammen aus Arbeitspaket 3. Die Andruckkraft wurde über eine Kraftmessplatte unter der Versuchsperson gemessen. Da eine kontinuierliche Greifkraftmessung über den Versuch aufgrund der Eigenmoden der geteilten Griffe nicht möglich war, erfolgte eine Trainingsphase der Probanden vor dem eigentlichen Experiment. Über einen Bildschirm wurden dem Probanden Sollwerte für diese Kräfte vorgegeben und vorherrschende IST-Werte angezeigt. Die Probanden sollten ihre Greif- und Andruckkraft auf diese Werte – Greifkraft von 30N und Andruckkraft von 75N – einstellen und somit ein Gefühl für die notwendige Muskelspannung entwickeln. Zu Auswahl der Sollkräfte wurden im Vorfeld experimentell getestet, welche Kräfte möglichst realitätsnah sind und über den Zeitverlauf der Studie gut gehalten werden können, sodass es dadurch zu möglichst geringer Abweichung der Wahrnehmung kommt. Für die beiden Griffformen variierte die Richtung der Andruckkraft, um den Anwendungsfall möglichst gut nachzubilden (Abbildung 12).

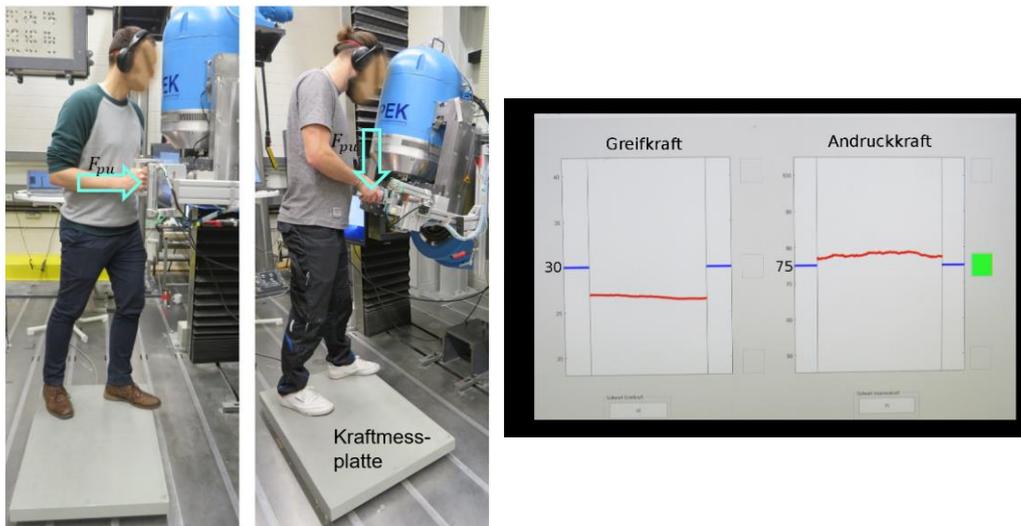


Abbildung 12: Andruckrichtungen bei Studienaufbau mit Bohrhammergriff (links), Winkelschleifergriff (Mitte), sowie Monitor zur Überprüfung der Greifkraft und Andruckkraft (rechts).

Eine Anzeige der Greif- und Andruckkraft während des Experimentes wäre wegen der Versuchsbedingung *verbundene Augen* nicht zielführend gewesen. Die Greifkraft konnte somit während der einzelnen Messung unter Vibrationsbeaufschlagung der Versuchsperson nicht gemessen werden, während die Andruckkraft über die verwendete Kraftmessplatte kontinuierlich ermittelt wurde. Bei konstanter Abweichung der Andruckkraft während der Studiendurchführung wurden die Probanden darauf hingewiesen. In regelmäßigen Abständen oder auf Wunsch der Versuchsperson während der Studiendurchführung wurde die Trainingsphase zum Einlernen der Greif- und Andruckkräfte wiederholt.

Anhand der zweiten Pilotstudie (beschrieben in AP 3) sowie Selbstversuchen konnte der notwendige Grad an auditiver und visuellen Maskierung des Probanden ausbalanciert werden. Damit die Probanden nicht von Shaker-Geräuschen beeinflusst werden, trugen sie einen In-Ear-Gehörschutz sowie Noise-Cancelling-Kopfhörer, über die weißes Rauschen abgespielt wurde. Zusätzlich trugen die Probanden eine Augenbinde, um nicht von visuellen Reizen beeinflusst zu werden.

Vor Beginn der eigentlichen Versuchsdurchläufe wurden den Probanden am Shaker acht Referenzreize präsentiert. Dabei handelt es sich um eine Auswahl an Frequenzen, die im Versuchsdurchlauf verwendet wurden, um den Probanden eine Orientierung zu bieten. Im Rahmen der Studie wurden den Probanden in drei randomisierten Durchgängen 28 Frequenzen (orientiert an der EN-ISO 5249-1:2001-12 [7]) appliziert, welche diese bzgl. Intensität, Komfort und Diskomfort auf der CP 50-Skala bewerten sollten. Die 28 Frequenzen variierten dabei von 4Hz bis 2000Hz nach dem Drittel Oktavband. Nach dem zweiten Durchlauf wurden Fragebögen zur Stimmung, Demografie und Anthropometrie ausgefüllt, wodurch die Probanden eine Pause hatten. Den drei Durchgängen angeschlossen wurde eine Bewertung von sogenannten Originalprofilen durchgeführt, welche aufgezeichneten Vibrationsemissionen aus Arbeitspaket 1 entsprachen. Es wurden sieben verschiedene Originalprofile dargeboten. Zum Schluss wurde noch einmal die Stimmung und zusätzlich in einem Abschlussfragebogen abgefragt, inwieweit Ähnlichkeiten zur Vibration eines realen Power-Tools besteht. Hier sollen in einer Korrelationsanalyse signifikante Zusammenhänge

zwischen der subjektiven Bewertung und der Demographie und Anthropometrie identifiziert und mit den selbigen signifikanten Korrelationen aus den manuellen Studien verglichen werden. Dadurch konnte die Studienumgebung im Vergleich zur real physischen Umgebung validiert werden. Im Gegensatz zur ersten Studie aus Arbeitspaket 1 konnten die audiovisuellen Reize maximal reduziert werden, wodurch es weniger potenziell störende Einflussgrößen auf die Bewertung gab.

ERGEBNIS

Der Zusammenhang zwischen den Variablen VDK, VK und VI für Bohrhammergriff und Winkelschleifergriff wurden mit den Korrelationstest nach Pearson für die verschiedenen Studienbedingungen ermittelt. Dabei ergab sich eine signifikant positive Korrelation von VDK und VI, eine signifikant negative Korrelation für VDK und VK, sowie eine signifikante und starke negative Korrelation bei VK und VI (vgl. Abbildung 13). Daraus kann auf eine „logische“ Bewertung geschlossen werden. Ein hoher Diskomfort führt somit zu niedrigerem Komfort, welcher allerdings schwerer beurteilbar ist, sowie eine hohe Vibrationsintensität zu einem hohen Diskomfort. Die Abfrage des subjektiven Empfindens der VI und des VDK ist in allen Studienbedingungen sinnvoll und möglich, sodass eine passende Operationalisierung und Abfrage angenommen werden kann.

Die Veränderung der Bewertung von VDK, VK und VI im Zeitverlauf wurde als nächstes betrachtet. Als statistisches Vorgehen wurden lineare gemischte Modelle für VDK, VI und VK genutzt. Dabei war erkennbar, dass VDK weder am Winkelschleifer- noch am Bohrhammergriff über den Zeitverlauf positiver oder negativer bewertet wurde. VI wurde hingegen am Bohrhammergriff in Durchgang 3 signifikant niedriger bewertet als in Durchgang 1 und VK wurde am Winkelschleifergriff in Durchgang 2 und 3 signifikant niedriger bewertet als in Durchgang 1. Dies bestätigte, dass sich der Diskomfort, griffunabhängig, am besten als Variable eignet, welche eine tendenziell zeitlich invariante Beurteilung der Vibrationen ermöglicht.

		VDK	VK
Studie 1 BH	VDK		
	VK	-0.56, $p < 0.001$	
	VI	0.51, $p < 0.001$	-0.56, $p < 0.001$
Studie 1 WS	VDK		
	VK	-0.72, $p < 0.001$	
	VI	0.73, $p < 0.001$	-0.68, $p < 0.001$
Studie 2 BH	VDK		
	VK	-0.47, $p < 0.001$	
	VI	0.44, $p < 0.001$	-0.06, $p = 0.02$
Studie 2 WS	VDK		
	VK	-0.27, $p < 0.001$	
	VI	0.56, $p < 0.001$	-0.04, $p = 0.10$

Signifikanter Zusammenhang bei $p < .05$
Cohen (1988):
 $|r| = .10$ schwach
 $|r| = .30$ mittel
 $|r| = .50$ stark

Abbildung 13: Ergebnisse der Korrelationstests nach Pearson – VDK, VK und VI in allen vier Studienumgebungen. Studie 1: physisch-reale Studie mit Power-Tools; Studie 2: physisch-simulierte Studie am Shaker-Prüfstand; BH: Bohrhammer; WS: Winkelschleifer

Im Vergleich der beiden Studienumgebungen war zu erkennen, dass der VK in Studie 2 signifikant niedriger, VI und VDK hingegen signifikant höher bewertet wurden. Die Streuung konnte in Studie 2 verringert werden. Diese Ergebnisse wurden mit einem T-Test für verbundene Stichproben und der Nutzung individueller Originalprofile ermittelt (Abbildung 14).

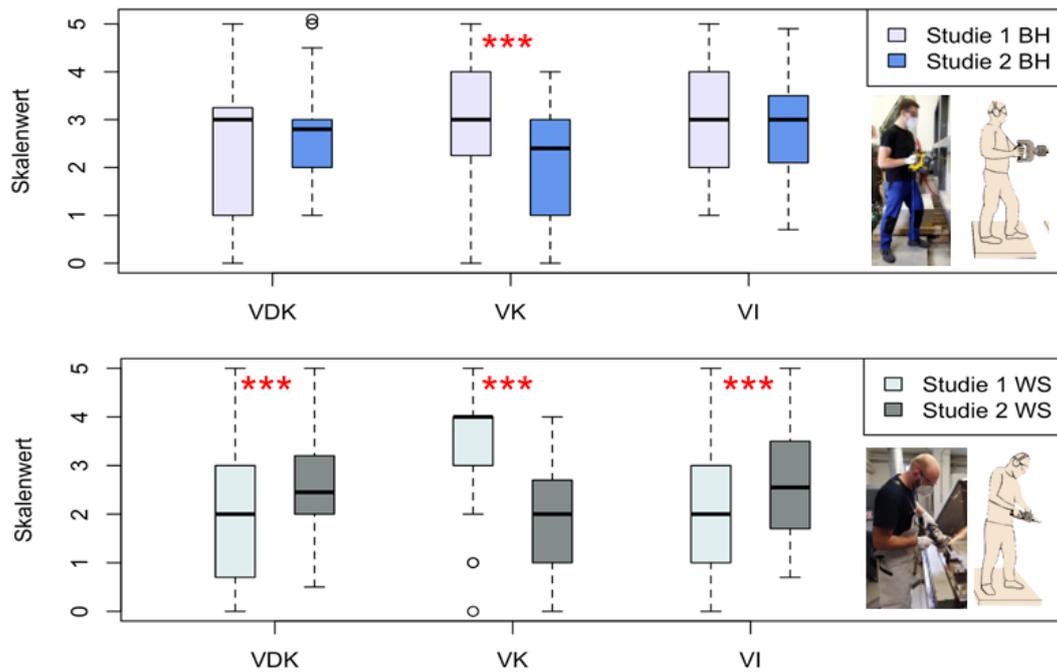


Abbildung 14: Ergebnisse aus T-Tests für verbundene Stichproben in verschiedenen Studienumgebungen. Studie 1: physisch-real mit Power-Tool; Studie 2: physisch-simuliert am Shaker-Prüfstand; BH: Bohrhammer; WS: Winkelschleifer

Zur Untersuchung des Einflusses der Personenmerkmale auf die Bewertung von VDK, VI und VK wurden linear gemischte Modelle mit zufälligen Effekten genutzt (vgl. Abbildung 15). Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass die abgefragten Personenmerkmale für die vier Studienbedingungen nicht verallgemeinerbare Effekte aufzeigen. Ein bedeutender Einfluss von anthropometrischen und demografischen Merkmalen konnte in Studie 1 nicht nachgewiesen werden. Befindungsmerkmale scheinen in Studie 1 und Studie 2 einen bedeutsamen Einfluss auf VDK, VK und VI zu haben. Die entsprechende Handlungsempfehlung für die Praxis ist daher, entsprechende Befindungsmerkmale in Studien zu subjektiven Eindrücken als zusätzliche Variable zu erfassen, um mögliche Effekte oder Tendenzen in den Studienergebnissen interpretieren zu können.

Prädiktor	VDK		VK		VI	
	B	p	B	p	B	p
Alter					0.58	0.037
Geschlecht (w)			-27.60	0.021		
Körpergröße					0.10	0.050
Körpergewicht	-0.34	0.019			-0.52	0.012
Händigkeit (links)					7.69	0.004
Häufigkeit_PT					0.48	0.015
Krafttraining					2.99	0.017
HL_R					-3.99	0.011
HB_R					7.13	0.012
Aufmerksamkeit	-0.29	0.004	0.26	0.003	-0.18	0.047
			0.25	0.011		
Motivation	1.87	0.011	-0.32	0.028	-1.73	0.012
			1.65	0.014		
Ermüdung	1.94	0.012			1.55	0.053

Studie 1 BH
 Studie 1 WS
 Studie 2 BH
 Studie 2 WS

Abbildung 15: Auswertung des Einflusses von Personenmerkmalen auf die Bewertung mit Hilfe von linearen gemischten Modellen mit zufälligen Effekten für VDK, VK und VI.

Arbeitspaket 5: Aufbau des Vibrationsdiskomfortfilters

Ziel des fünften Arbeitspakets war die Entwicklung eines Filters zur Bewertung von auftretenden Vibrationen hinsichtlich des durch den Anwender wahrgenommenen Diskomforts, dieser sollte an EN ISO 5349-1:2001-12 [7] orientiert werden.

Zur Erarbeitung des Bewertungsfilters für den wahrgenommenen VDK erfolgte zunächst ein Vergleich der Studienergebnisse der physisch-simulierten Studie am Shaker-Prüfstand für die Griffsysteme Bohrhammer und Winkelschleifer. Dafür wurden die Verläufe des VK, VDK und der VI zwischen den beiden Griffsystemen verglichen. Mit den Verläufen aus den Daten der Anwenderstudie aus Arbeitspaket 4 konnte festgestellt werden, dass die Verläufe bei einer Einzelsinusanregung bei den verschiedenen Griffsystemen ähnlich sind (vgl. Abbildung 16).

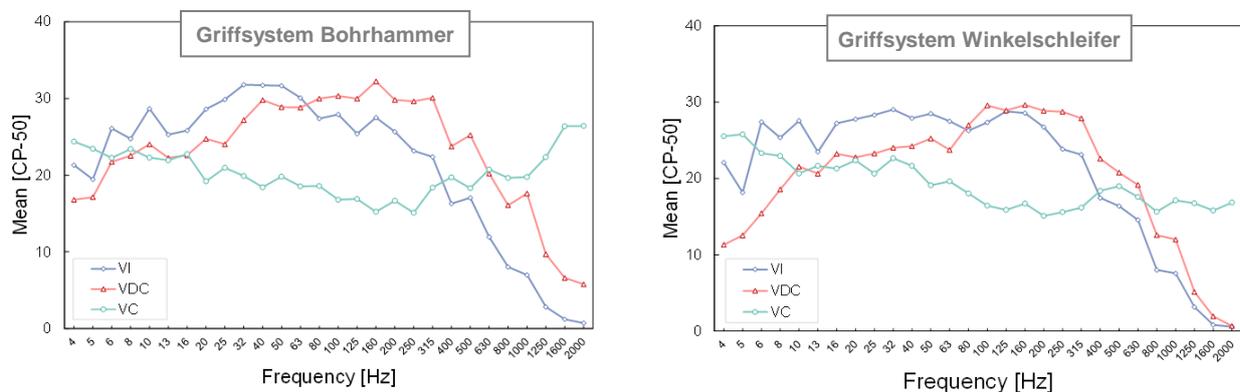


Abbildung 16: Verläufe der frequenzabhängigen Bewertungen für den Vibrationsdiskomfort (VDC), Vibrationskomfort (VC), Vibrationsintensität (VI) an den Griffsystemen Bohrhammer (links) und Winkelschleifer (rechts).

Eine statistische Untersuchung der vorliegenden Studiendaten aus Arbeitspaket 4 mittels Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben und Berechnung der Effektstärke stellte

fest, dass lediglich bei 9 von 28 Frequenzen signifikante Unterschiede, jedoch mit schwachem Effekt zwischen beiden Griffsystemen vorliegt (vgl. Abbildung 17).

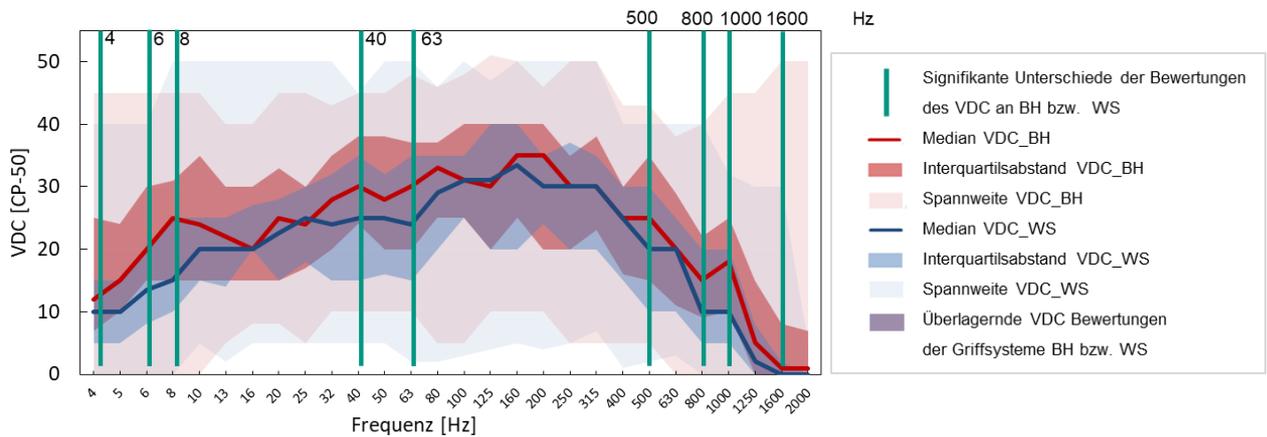


Abbildung 17: *Übereinandergelegte Verläufe des Vibrationsdiskomforts (VDC) bei der Nutzung eines Bohrhammergriffes (BH) und Winkelschleifergriffs (WS).*

Die Auswertung der in der Studie bewerteten Originalprofile ergab, dass der Diskomfort an den Griffsystemen, Bohrhammer (BH) und Winkelschleifer (WS), sehr ähnlich bewertet wurde und die Abweichung zwischen den Vibrationsmustern größer ist als zwischen den Griffsystemen (vgl. Abbildung 18). Folglich konnten die beiden Griffsysteme als gemeinsame Grundlage des Schwingungsfilters genutzt werden, indem das gemeinsame arithmetische Mittel der Griffsysteme, an den bewerteten Frequenzen berechnet wurde.

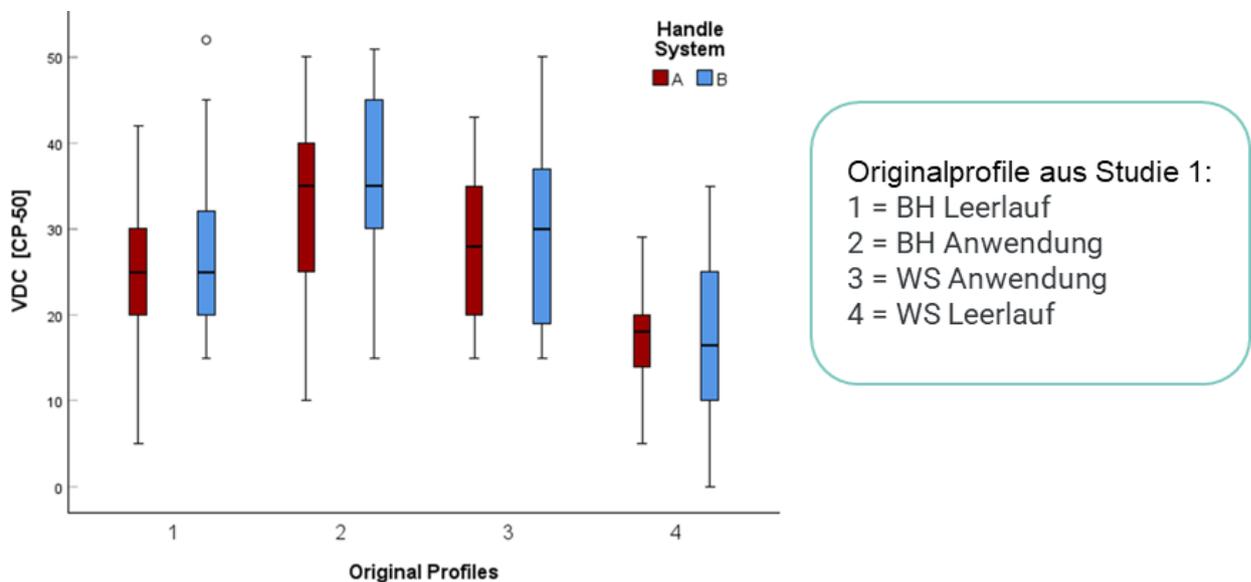


Abbildung 18: *Vergleich der Bewertung der Originalprofile für die zwei Griffsysteme Bohrhammer (A) und Winkelschleifer (B).*

Zur Beschreibung des VDK als analytische Funktion wurden zwei Ansätze gewählt. Zum einen erfolgte eine Darstellung der ermittelten absoluten Mittelwertkurve als Polynom und zum anderen als normierte rationale Funktion in Anlehnung an die Norm EN ISO 5349-1:2001-12 [7], in welcher auch die Bewertungskurven des ahv-Filters angegeben sind. Die Bestimmung der analytischen Funktionen erfolgte numerisch und hochiterativ. Weiter wurde eine generische Funktion zur frequenzabhängigen Beschreibung des VDK unter Verwendung von

Polynomregression an den zuvor ermittelten arithmetischen Mittelwerten gebildet (Abbildung 19, gelbe Kurve).

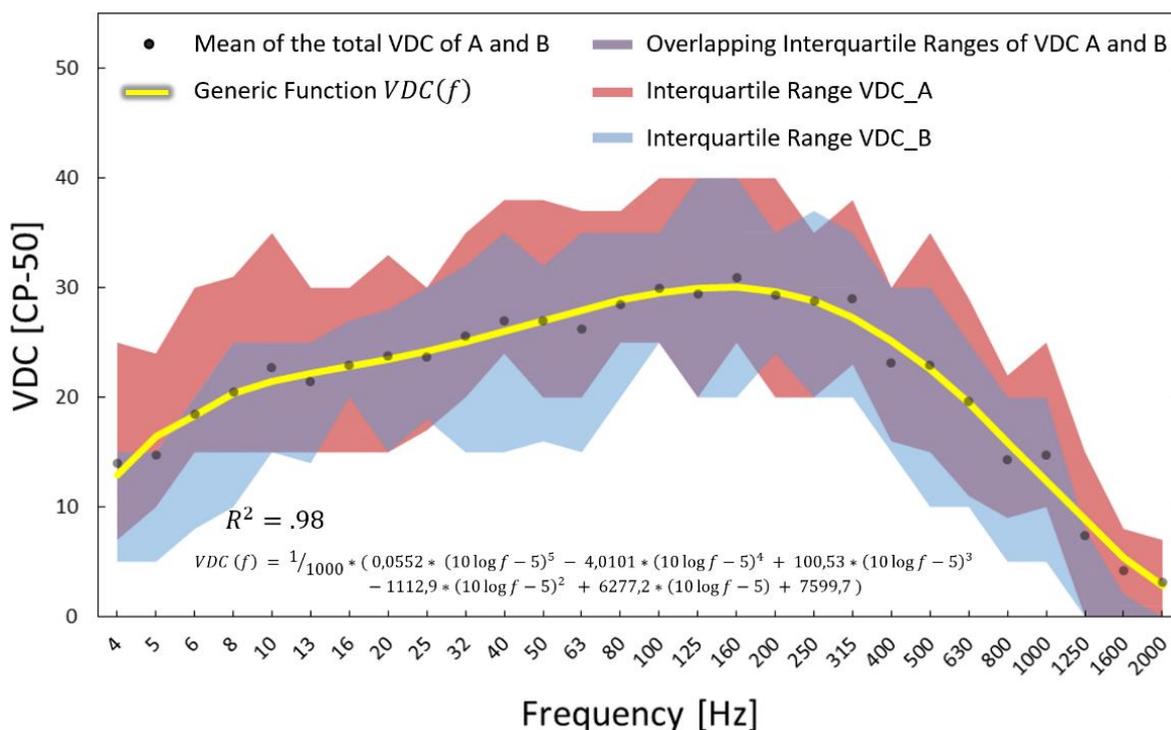


Abbildung 19: Mittels Polynomregression gebildete Funktion zur Beschreibung des Vibrationsdiskomforts.

Die normierten rationalen Funktionen in Anlehnung an EN ISO 5349-1:2001-12 [7] für den VK, VDK und die VI sind in Abbildung 20 dargestellt. Die darunter angegebene empirisch bestimmte Funktion stellt exemplarisch den Vibrationsdiskomfort-Schwingungsfilter als frequenzabhängige Funktion dar (siehe Abbildung 21).

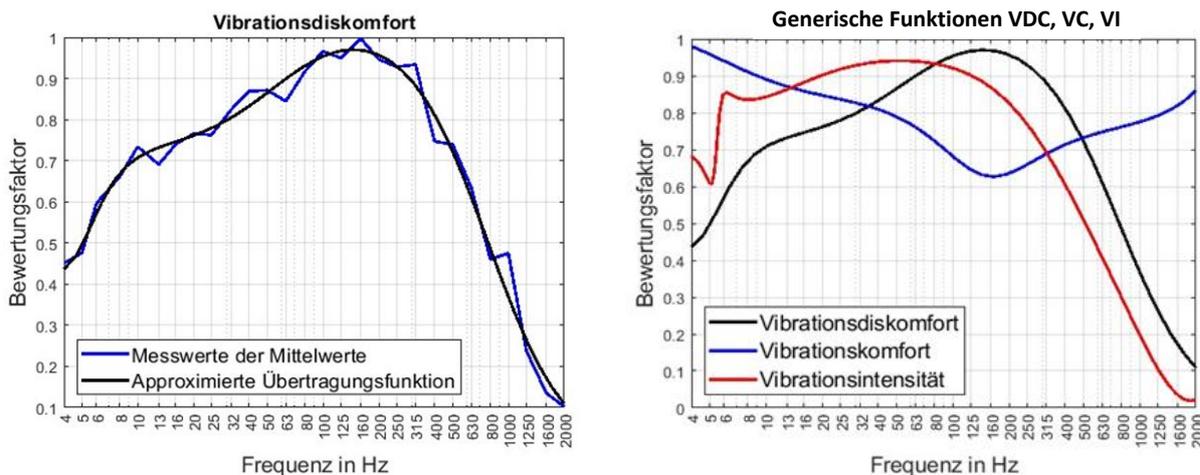


Abbildung 20: Approximierte Übertragungsfunktion des Vibrationsdiskomforts im Vergleich mit den gemittelten Studienbewertungen (links) und approximierten Übertragungsfunktionen des Vibrationskomforts und der Vibrationsintensität (rechts). [8]

VDC – Schwingungsfilter als approximierte Übertragungsfunktion:

$$\text{VDC (s)} = \frac{-4.911e10 \text{ s}^3 - 2.326e12 \text{ s}^2 - 9.424e12 \text{ s} - 4.117e13}{\text{s}^6 - 686.4 \text{ s}^5 - 3.277e06 \text{ s}^4 - 1.731e09 \text{ s}^3 - 1.046e11 \text{ s}^2 - 6.214e11 \text{ s} - 2.666e12}$$

Abbildung 21: Vibrationsdiskomfort (VDC) – Schwingungsfilter als approximierte Übertragungsfunktion.

Die Anwendung des VDK-Filters erfolgt analog zur Anwendung des ahv-Filters nach EN ISO 5349-1:2001-12 [7] durch die Messung der Beschleunigung in einer Anwendung in SI-Einheiten, Bewertung der einzelnen Frequenzanteile des entsprechenden Signals und anschließender Effektivwertberechnung. Ergebnis dieser Operation ist ein einzelner Zahlenwert, dessen Interpretation im folgenden Arbeitspaket adressiert werden soll.

Ein Vergleich des neu entwickelten VDK-Filters mit dem bisherig etablierten ahv-Filter zur bewertung der Schädlichkeit von Vibrationen (vgl. Abbildung 22) lässt einen deutlich unterschiedlichen Verlauf beider Kurven erkennen, was wiederum betont, dass der bisher existierende ahv-Filter nicht zur Beurteilung von Diskomfort geeignet ist.

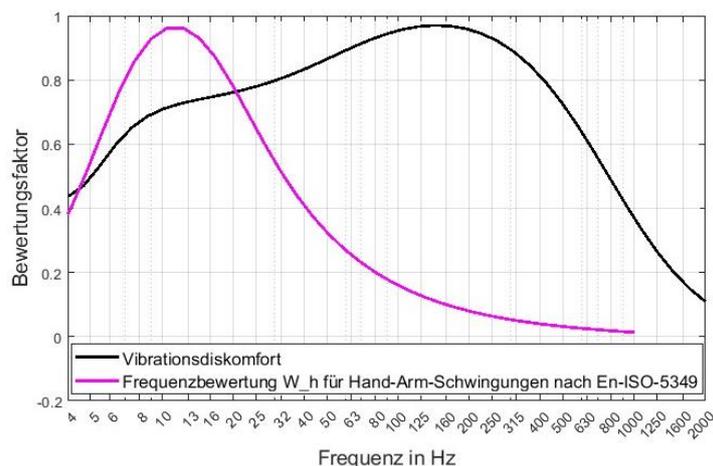


Abbildung 22: Gegenüberstellung des Verlaufes der Übertragungsfunktion des Vibrationsdiskomforts mit dem Verlauf der Übertragungsfunktion des ahv-Filters.

Arbeitspaket 6: Validierung und Optimierung des Vibrationskomfortfilters

Ziel des sechsten Arbeitspakets war die Bereitstellung des Vibrationsfilters auf einem validierten und optimierten Reifegrad sowie die Aufbereitung der Ergebnisse zur industriellen Nutzung.

METHODE

Basierend auf den im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnissen zur Bewertungsmethode erfolgte die Validierung des VDK-Filters zugunsten einer besseren Verwertbarkeit abweichend vom ursprünglichen Antragskonzept. Anstatt der initialen Studiendaten aus Arbeitspaket 1 wurden die im Arbeitspaket 4 von den Versuchspersonen angegebenen Bewertungen (auf CP-50 Skala) der simulierten Originalprofile herangezogen und mit den entsprechenden

Vorhersagewerten des VDK-Filters verglichen. Eine entsprechende Gegenüberstellung ist in Abbildung 23 dargestellt.

ERGEBNIS

Auf Basis des momentanen Entwurfs des Filters ist eine absolute Aussage zum VDK bei Vibrationen mit mehreren Frequenzanteilen noch nicht möglich. Der VDK-Filter ermöglicht zum aktuellen Zeitpunkt allerdings bereits relative binäre Aussagen, also bspw. welches von zwei Vibrationsspektren als diskomfortabler bewertet wird. Grund hierfür ist der Entwurf des VDK-Filters auf Basis von Einzelsinusschwingungen. Dieser Schritt war aufgrund des in diesem Projekt erstmals eröffneten und neuartigen Forschungsfeldes zum VDK an der Hand notwendig, um überhaupt erste belastbare Filterkurven ermitteln zu können. Wie eine Überlagerung mehrerer Sinusschwingungen oder stochastischer Signale in die menschliche Bewertung eingehen, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch unbekannt und damit hochinteressant für folgende Forschungsvorhaben auf diesem Gebiet.

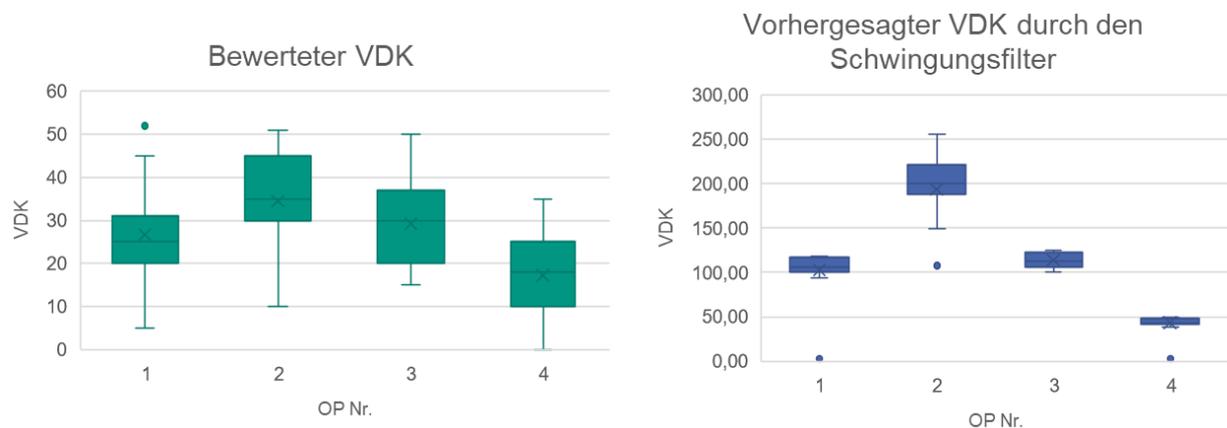


Abbildung 23: Relativer Vergleich zwischen dem von Probanden bewerteten Vibrationsdiskomfort in Studie 2 der Originalprofile (OP) (links) und dem durch den Schwingungsfilter vorhergesagten Vibrationsdiskomfort (rechts).

Zur eigenständigen Anwendung des VDK-Filters durch die Mitglieder des Projektausschusses wurde eine Beschreibung des Filters mit dem Hinweis zur Anlehnung an die Mess- und Auswertemethode nach EN ISO 5349-1:2001-12 [7] bereitgestellt.

Zur weiteren Nutzbarmachung bzw. Erprobung der Ergebnisse und Erkenntnisse erfolgte eine Präsentation des VDK-Filters vor einem Expertengremium des DIN Normenausschusses NA 001-03-12 AA (Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Hand-Arm-Schwingungen). Der VDK-Filter mit entsprechenden Handlungsempfehlungen wurde dem DIN Gremium bereitgestellt.

Zusammenfassung

KMUs stehen unter zunehmendem Innovationsdruck und verfolgen daher den Ansatz der nutzerzentrierten Produktentwicklung. Die Anpassung der Systeme an die Bedürfnisse der Anwendenden mit den Stellgrößen Produktivität und Ergonomie soll die Leistungsfähigkeit des Systems verbessern. Als entscheidende Größe wurde hierbei der wahrgenommene Komfort aus dem Stand der Forschung [1, 2] identifiziert, der insbesondere durch die

Vibrationsemissionen beeinflusst wird, die sowohl physisch als auch psychisch auf den Anwendenden wirken.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde daher die Wechselwirkung zwischen Anwendendem, Power-Tool und Untergrund mit dem Fokus auf die Wahrnehmung des Menschen und der Vibrationsemissionen untersucht.

Zum einen wurden in einer physisch realen Studie (AP 1) typische Vibrationskennwerte (ahv, RMS, RMQ etc.) von Bohrhammer- und Winkelschleifer-Anwendungen herangezogen und untersucht, ob ein direkter Zusammenhang mit dem empfundenen Komfort bzw. Diskomfort der Anwendenden festgestellt werden kann. Dabei wurden umfangreiche Kenntnisse über Störvariablen gewonnen, die eine eindeutige Aussage über einen direkten Zusammenhang zwischen Vibrationskennwert und empfundenem Komfort bzw. Diskomfort verhindern. Zum anderen wurden in einer physisch simulierten Studie (AP 4) Vibrationen unterschiedlicher Frequenzen hinsichtlich der Wahrnehmung von Intensität, Komfort und Diskomfort durch Probanden bewertet. Basierend auf den Messdaten der Studie konnte ein innovativer Schwingungsfilter entwickelt werden, der in der Lage ist, aus Vibrationsdaten den Diskomfort der Anwendenden vorherzusagen.

Der Schwingungsfilter bildet die Grundlage für weitere Forschungsarbeiten, um zusätzliche Variablen für die Vibrationsbewertung zu untersuchen. Mit den aus dem Filter gewonnenen Kennwerten können die Auswirkungen von Vibrationen auf die menschliche Gesundheit genauer untersucht werden. Dies ermöglicht die gezielte Entwicklung von Maschinen, die nicht gesundheitliche Beeinträchtigungen, sondern auch Diskomfort reduzieren und damit die Produktivität steigern.

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Frau Diana Fotler, M. Sc. unter +49 721 608-48518 oder bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing Sven Matthiesen unter +49 721 608-47156.

Literaturverzeichnis

- [1] Dianat, I., Nedaei, M. u. Mostashar Nezami, M. A.: The effects of tool handle shape on hand performance, usability and discomfort using masons' trowels. *International Journal of Industrial Ergonomics* 45 (2015), S. 13–20
- [2] Kuijt-Evers, L.F.M., Vink, P. u. Looze, M. P. de: Comfort predictors for different kinds of hand tools. Differences and similarities. *International Journal of Industrial Ergonomics* 37 (2007) 1, S. 73–84
- [3] Fotler, D., Schröder T., Germann R. u. Matthiesen S.: Objective evaluation of vibration comfort through the design of a vibration filter - Implementation of a study design for vibration comfort evaluation. 32. DfX-Symposium 2021. The Design Society
- [4] DIN EN ISO 28927-1:2020-04. Handgehaltene motorbetriebene Maschinen – Messverfahren zur Ermittlung der Schwingungsemission. Teil 1: Winkelschleifer und Vertikalschleifer (ISO 28927-1:2019); Deutsche Fassung EN ISO 28927-1:2019

- [5] Fotler, D., Schröder, T., Lindenmann, A., Matthiesen, S.: Aufbau einer Studiumgebung zur Bewertung von Vibrationsdiskomfort am Hand-Arm-System. 9. VDI-Fachtagung Humanschwingungen 2023. VDI-Berichte, Bd. 2411. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2023
- [6] DIN EN ISO 10819:2022-12. Mechanische Schwingungen und Stöße – Hand-Arm-Schwingungen – Messung und Bewertung der Schwingungsübertragung von Handschuhen in der Handfläche (ISO 10819:2013 + Amd.1:2019 + Amd.2:2021); Deutsche Fassung EN ISO 10819:2013 + A1:2019 + A2:2022
- [7] EN ISO 5349-1:2001-12. Mechanische Schwingungen - Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen. Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 5349-1:2001); Deutsche Fassung EN ISO 5349-1:2001
- [8] Matthiesen, S., Fotler D.: Objektive Bewertung des Vibrationskomforts. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP, S.26