

Überprüfung einer maschinenintegrierten Expositionserfassung von Hand-Arm-Vibrationen

Examination of a device-integrated measurement of exposure to hand-arm vibration

Benjamin Ernst, Uwe Kaulbars, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, Sankt Augustin

Kurzfassung

Die Entwicklung von Maschinenherstellern, Schwingungsaufnehmer in handgehaltene Geräte zu integrieren, sind eine einfache und kostengünstige Methode zur Erfassung der Schwingungsemission. Da bisher wenig zu der Genauigkeit dieser Expositionserfassung bekannt ist, erfolgte eine Prüfung der Messgenauigkeit anhand eines normgerechten Referenzsystems. Für die Untersuchung wurden zwei Schleifmaschinen des Herstellers Mirka verwendet, die über Bluetooth mit einer von Mirka bereitgestellten App verbunden werden. In der App kann die Tagesexposition als $A(8)$ abgelesen werden. In Voruntersuchungen variierte die von der App angezeigte Tagesexposition abhängig vom verwendeten Endgerät. Die Untersuchung erfolgte daher mit zwei Endgeräten mit dem Betriebssystem Android und zwei mit dem Betriebssystem IOS. Das Schleifen einer Fichtenholzplatte wurde für drei Versuchspersonen mit den vier Endgeräten bei den zwei Schleifmaschinen gemessen und jeweils mit dem Referenzsystem nach DIN EN ISO 8041 verglichen. Als variierende Betriebszustände wählte man bei beiden Schleifmaschinen eine niedrige, mittlere und hohe Drehzahl aus. Als vergleichende Messgröße wurde die frequenzbewertete Beschleunigung a_{hv} ausgewertet. Die Genauigkeit der Bestimmung der Tagesexposition durch die App ist abhängig vom verwendeten Endgerät und Betriebssystem. Die IOS-Endgeräte hatten eine durchschnittliche Abweichung des a_{hv} von 21,7 % ($\pm 48,7$ %) und die Android-Endgeräte von 142,0 % ($\pm 120,1$ %). Es war ein mittlerer positiver Zusammenhang (IOS: $R^2 = 0,58$, Android: $R^2 = 0,54$) zwischen dem Referenzsystem und der App erkennbar. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass es tendenziell zu einer Überschätzung der Tagesexposition durch die Vibrations-App kommt. Verbindungsabbrüche, die fehlinterpretierbare Anzeige und wechselnde Anforderungen durch Updates schränken die Anwendbarkeit der App ein.

Abstract

Developments by machine manufacturers have resulted in vibration transducers being integrated into hand-held equipment in order to provide a simple and low-cost means of measuring vibration emissions. Since little is known at this stage of the accuracy of this means of exposure measurement, the measurement accuracy was examined against a reference system compliant with the standards. For the purpose of the examination, two sanding machines manufactured by Mirka were employed. These can be connected via Bluetooth to an app also supplied by Mirka. The daily exposure $A(8)$ can be read off in the app. In preliminary examinations, the daily exposure displayed by the app varied according to the terminal device used. Two terminal devices running the Android operation system and two running the IOS operating system were therefore used in the examination. Measurements were performed during sanding of a whitewood panel by three subjects using the two sanding machines and the four terminal devices, and compared in each case with the reference system in accordance to DIN EN ISO 8041. The operating modes of low, medium and high speeds were selected for both sanding machines. The frequency-weighted acceleration a_{hv} was evaluated as the comparative measured variable. The accuracy of the daily exposure as determined by the app varied according to the terminal device (i.e. operating system) used. The IOS terminal devices exhibited an average deviation in a_{hv} of 21.7 % (± 48.7 %), the Android terminal devices of 142.0 % (± 120.1 %). A mean positive correlation (IOS: $R^2 = 0.58$, Android: $R^2 = 0.54$) between the reference system and the app was discernible. The measurement results reveal a tendency for the vibration app to overestimate the daily exposure. Dropped connections, the susceptibility of the display to misinterpretation and changing demands presented by updates limit the suitability of the app for use.

1. Einleitung

Die EU-Richtlinie 2002/44/EG [1] legt für die tägliche Exposition durch Hand-Arm-Vibrationen den Auslösewert bei $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$ und den Grenzwert bei $A(8) = 5,0 \text{ m/s}^2$ fest. Um diese Vibrationskennwerte bestimmen zu können, müssen die Schwingungsmesser den Anforderungen nach DIN EN ISO 8041 [2] entsprechen. Da Messsysteme dieser Art jedoch in der Regel kostenaufwendig und messtechnisch sehr anspruchsvoll anzuwenden sind, haben Maschinenhersteller begonnen, Schwingungsmesser in handgehaltene Geräte zu integrieren. Dies hat den Vorteil, dass der eingebaute Schwingungsmesser fortlaufend die von dem Gerät ausgehenden Schwingungen erfassen kann, ohne das hierfür weiteres Messequipment benötigt wird. Geräte mit einem integrierten Schwingungsmesser entsprechen jedoch nicht den Anforderungen eines Messgerätes nach DIN EN ISO 8041 [2]. Auch die ISO/TR 19664 [3] gibt keine Definition zu dieser Art der Schwingungserfassung.

Laut dem VDI-Bericht 2190 [4] entsprechen diese Geräte einem „Human Vibration Indicator“ und können daher als Schätzmittel von Vibrationsbelastungen gesehen werden.

Da bisher wenig zur Genauigkeit der geräteintegrierten Expositionserfassung bekannt war, fand in einer vorangegangenen Untersuchung [5] die Prüfung der Messgenauigkeit anhand eines normgerechten Referenzsystems unter Praxisbedingungen in einer Fahrzeuglackiererei statt. Der dort verwendete Exzentrerschleifer DEROS 650 CV der Firma Mirka zeigte, im Vergleich zum Referenzsystem und in Abhängigkeit vom Betriebszustand, Messabweichungen von 7 bis 38 %. Für die Expositionsbestimmung durch den geräteintegrierten Sensor wird die Schleifmaschine via Bluetooth mit einer vom Hersteller bereitgestellten App verbunden. Diese kann auf allen Geräten mit den Betriebssystemen Android oder IOS installiert und ausgeführt werden und gibt den aktuellen Stand der Tagesexposition an. Aufgrund von Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Messabweichungen im weiteren Verlauf der Untersuchungen bestand der Bedarf nach einer erneuten, umfassenden Überprüfung der geräteintegrierten Vibrationserfassung über die App. Die Unregelmäßigkeiten traten insbesondere bei Verwendung verschiedener Endgeräte auf, mit denen die Schleifmaschine via Bluetooth verbunden war. In der nachfolgenden Untersuchung wurde daher überprüft, inwiefern das Endgerät, auf dem die App installiert ist, die Genauigkeit der geräteintegrierten Vibrationserfassung bei Schleifmaschinen beeinflusst. In diesem Zusammenhang sollte für die Funktionalität der App beantwortet werden, ob die Anzeige mit dem Auslöse- und Grenzwert nach EU-Richtlinie übereinstimmt und inwiefern die Messwerte der Vibrations-App den Messwerten des Referenzsystems entsprechen.

2. Methoden

Für die Untersuchung wurden zwei Schleifmaschinen der Fa. Mirka verwendet. Sowohl der Exzentrerschleifer DEROS 650 CV als auch der Schwingschleifer DEOS 383 CV besitzen einen integrierten Schwingungsaufnehmer, der über Bluetooth mit der von Mirka bereitgestellten App „myMirka“ verbunden werden kann und in regelmäßigen Abständen Daten zur Vibrationsexposition an die App weitergibt.

Die App zeigt die Drehzahl in U/min, die Vibration in m/s^2 und die Tagesexposition (Bild 1) der aktuell verwendeten Schleifmaschine an. Die Anzeigen „Vibration“ und „Täglicher Vibrationswert“ (Tagesexposition) sind durch ein farbiges Ampelschema gekennzeichnet und haben im Vergleich zu der Drehzahlanzeige keine ablesbare Zahlenskala. Die farbliche Abstufung der Tagesexposition zeigt an, wann der Auslösewert (gelb) und Grenzwert (rot) nach der EU-Richtlinie [1] erreicht ist.



Bild 1: Grafische Benutzeroberfläche der Vibrations-App „myMirka“

Die App stellt keine Vibrationswerte bereit und bietet dem Nutzer auch keine Möglichkeit, diese in gespeicherter Form auszulesen. Jedoch besteht die Möglichkeit, die Tagesexposition zusätzlich auf einem Balkendiagramm darzustellen (Bild 2). Anhand dieses Balkendiagramms kann man den aktuellen Tagesexpositionswert $A(8)$ ablesen.

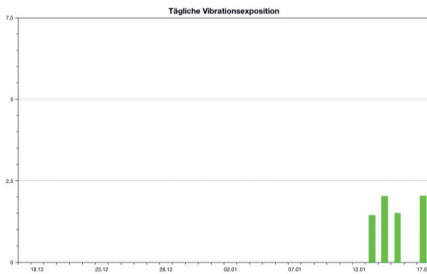


Bild 2: Diagramm zur Tagesexposition in der Vibrations-App „myMirka“

Da das Balkendiagramm die einzige Möglichkeit war, Zahlenwerte aus der App zu extrahieren, wurde ein Verfahren entwickelt, um die Balkenhöhe einem Tagesexpositionswert $A(8)$ zuzuordnen. Mithilfe eines Screenshots kann der aktuell angezeigte $A(8)$ auf dem Endgerät gespeichert und die Skalierung des Diagramms mithilfe des Bildbearbeitungsprogramms Inkscape (Version 2, Free Software Foundation, Inc., USA) festgestellt werden. Da sich die Skalierungen des Diagramms und Screenshots nicht ändern, kann für jede Balkenhöhe der $A(8)$ bestimmt werden. Abhängig von der Bildauflösung des Screenshots können auf diese Weise Veränderungen des $A(8)$ registriert werden. Ist zusätzlich zum $A(8)$ die Expositionszeit bekannt, kann ebenfalls der a_{hv} bestimmt werden.

Da in den Voruntersuchungen die von der App angezeigte Tagesexposition je nach verwendetem Endgerät und damit verbundenen Betriebssystem variierte, erfolgte die Untersuchung mit vier verschiedenen Endgeräten. Zwei dieser Endgeräte verwendeten das Betriebssystem Android und zwei das Betriebssystem IOS. Ausgewählt wurden jeweils ein Tablet und ein Smartphone mit demselben Betriebssystem. Bei allen Endgeräten erfolgte vor

der Untersuchung eine Neuinstallation der App mit der aktuellen Version (Android: Version 1.2.0, IOS: Version 1.2.1). Insgesamt drei Versuchspersonen schliffen als arbeitstypische Tätigkeit eine Fichtenholzplatte (Bild 3 links). Die Tätigkeit wurde nacheinander mit den vier Endgeräten bei den zwei Schleifmaschinen gemessen und jeweils mit dem Referenzsystem nach DIN EN ISO 8041 verglichen. Für den Vergleich der von der App gelieferten Daten mit den Daten des Referenzsystems wurde zeitsynchron am gleichen Gerät gemessen. Die Auswahl des Messortes und der Messrichtungen des Referenzsystems an der Einleitungsstelle der Hand orientieren sich an ISO 28927-3 [6]. Die Ankopplung des Beschleunigungsaufnehmers erfolgte mittels einer Klebeverbindung (Bild 3 rechts).



Bild 3: Schleifarbeiten an Fichtenholzplatte (links) und Exzentrerschleifer DEROS 650 (rechts)

Pro Person erfolgten fünf Wiederholungsmessungen von je 30 s pro Gerät mit jeweils einem Endgerät in einem Betriebszustand. Nach jeder Einzelmessung wurde der aktuelle Tagesdosiswert der App gespeichert. Als variierende Betriebszustände wurden bei beiden Schleifmaschinen die niedrigste, eine mittlere und die höchste Drehzahl ausgewählt. Für den Exzentrerschleifer DEROS 650 CV bedeutete dies Drehzahlen von 4 000 U/min, 7 000 U/min und 10 000 U/min. Für den Schwingschleifer DEOS 383 CV Drehzahlen von 5 000 U/min, 7 000 U/min und 10 000 U/min. Die Durchführung und Auswertung der Messungen erfolgten entsprechend ISO 5349-2 [7]. Als vergleichende Messgröße wurde die frequenzbewertete Beschleunigung a_{hv} ausgewertet. Die App zeichnet ausschließlich bei Betätigung des Schalters der Schleifmaschinen Vibrationen auf. Um die exakte Expositionszeit zu ermitteln und vergleichbar zu machen, wurden die Zeitsignale des Referenzsystems auf die reine Expositionszeit zugeschnitten und ausgewertet. Die hierbei ermittelte reine Expositionszeit wurde zudem für die oben genannte Ermittlung des a_{hv} aus der App verwendet.

Um zu überprüfen, ob die Anzeige mit dem Auslöse- und Grenzwert übereinstimmt, wurden die Messergebnisse nach dem Ampelschema der App in drei Kategorien eingeteilt. Messungen, deren a_{hv} nach dem Referenzsystem unterhalb des Auslösewerts lag ($<2,5 \text{ m/s}^2$), wurden der ersten Kategorie zugeordnet, Messungen mit einem a_{hv} oberhalb des

Auslösewerts und unterhalb des Grenzwerts ($\geq 2,5 \text{ m/s}^2$ und $\leq 5,0 \text{ m/s}^2$) der zweiten Kategorie und Messungen mit einem a_{hv} oberhalb des Grenzwerts ($> 5,0 \text{ m/s}^2$) der dritten Kategorie zugeteilt. Anschließend wurde untersucht, welche Unterschiede in der Kategorisierung zwischen dem Referenzsystem und der App auftraten.

Sollten die Messwerte der Vibrations-App den Messwerten des Referenzsystems entsprechen, würde im Idealfall ein linearer Zusammenhang zwischen den Messwerten bestehen. Um den Zusammenhang zwischen den Systemen zu untersuchen, wurden neben der linearen Regression ein Bland-Altman-Diagramm verwendet. Mit Letzteren kann die durchschnittliche Differenz zweier Messmethoden evaluiert werden [8].

3. Ergebnisse

Da laut dem Referenzsystem keine Messung einen a_{hv} unterhalb des Auslösewerts aufwies, wurde nur zwischen den Kategorien oberhalb und unterhalb des Grenzwerts unterschieden. In 98 % der Fälle entsprachen die Messwerte der App der gleichen Kategorie wie den Messwerten des Referenzsystems. Aufgrund der Abweichungen des a_{hv} wurde ein Unterschied hinsichtlich der Genauigkeit zwischen den verwendeten Endgeräten erkennbar. Das IOS-Tablet und das IOS-Phone wiesen eine durchschnittliche Abweichung des a_{hv} von 21,9 % ($\pm 38,5$ % Standardabweichung, IOS-Tablet) und 22,4 % ($\pm 53,3$ %, IOS-Phone) auf. Auf dem Android-Tablet und Android-Phone wurden dagegen Abweichungen von 126,3 % ($\pm 78,3$ %, Android-Tablet) und 145,6 % ($\pm 137,5$ %, Android-Phone) festgestellt. Endgeräte mit gleichem Betriebssystem zeigten somit Abweichungen in vergleichbarer Höhe. Alle Endgeräte zeigten durchschnittlich positive Abweichungen zum Referenzsystem. Die IOS-Endgeräte hatten eine durchschnittliche Abweichung des a_{hv} von 21,7 % ($\pm 48,7$ %) und die Android-Endgeräte von 142,0 % ($\pm 120,1$ %).

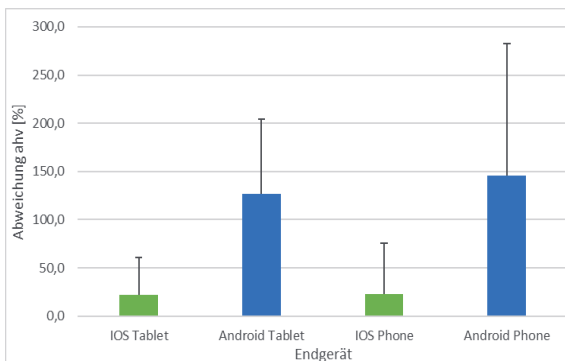


Bild 4: Durchschnittliche Abweichung des ermittelten a_{hv} der App zum Referenzsystem nach DIN EN ISO 8041 für verschiedene Endgeräte

Auch anhand der linearen Regression der Messwerte ist der Unterschied zwischen den Betriebssystemen IOS und Android deutlich erkennbar (siehe Bild 5). Beide Betriebssysteme zeigten einen mittleren positiven Zusammenhang (IOS: $R^2 = 0,58$, Android: $R^2 = 0,54$). Das 95 %-Konfidenzintervall für die Steigung der Regressiongraden lag jeweils oberhalb von Null (IOS: [1,05; 1,95], Android: [1,97; 3,84]). Das 95 %-Konfidenzintervall des Achsenabschnitts der Regressionsgeraden enthielt jeweils Null (IOS: [-5,69; 1,67], Android: [-11,11; 3,95]).

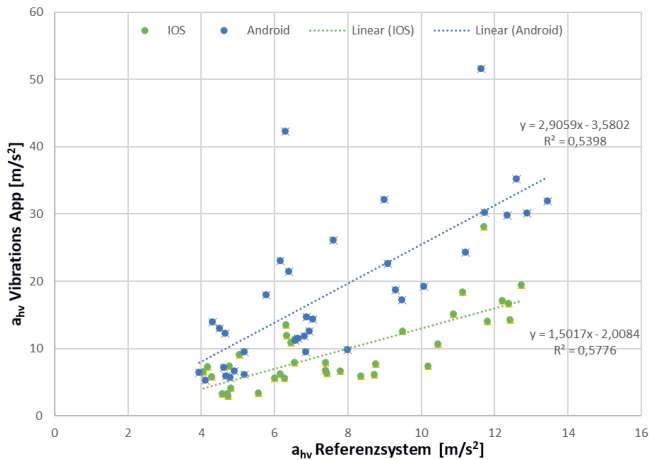


Bild 5: Lineare Regression der Messwerte der Vibrations-App und des Referenzsystems

Um den systematischen Fehler zwischen dem Schätzmittel und dem Referenzsystem näher zu untersuchen, wurde jeweils ein Bland-Altman-Diagramm pro Betriebssystem erstellt (Bild 6). Bei beiden ist ein Muster eines positiven Zusammenhangs zu erkennen. Beim Betriebssystem Android ist dieses Muster stärker vorhanden als beim Betriebssystem IOS. Bei beiden Betriebssystemen ist die mittlere Abweichung positiv (Android: 10 m/s^2 , IOS: 1 m/s^2).

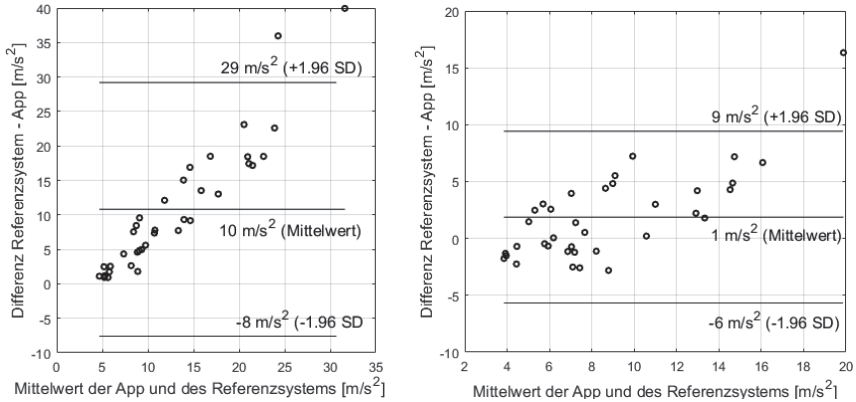


Bild 6: Bland-Altman-Diagramm für Android (links) und IOS (rechts)

4. Diskussion

Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass es tendenziell zu einer Überschätzung der Tagesexposition durch die Vibrations-App kommt. Die Genauigkeit der Bestimmung der Tagesexposition durch die App ist abhängig vom verwendeten Betriebssystem. Die App zeigte unter IOS mit ca. 22 % eine niedrigere Abweichung als unter Android mit ca. 142 %. Hierbei ist zu beachten, dass die App unter IOS die Vibrationsexposition auch teilweise unterschätzt.

Da die App eher konservativ bewertet, werden Vibrationen oberhalb des Grenzwerts auch als solche erkannt. Aufgrund fehlender Messwerte unterhalb des Auslösewerts, kann für die Schätzgenauigkeit in diesem Bereich keine Aussage gegeben werden.

Die App eignet sich nicht als Messsystem, da sie nur ca. 54 % (Android) bis 58 % (IOS) der Variabilität abdeckt und damit eine zu hohe Varianz aufweist. Außerdem ist im Bland-Altman-Diagramm bei beiden Betriebssystemen ein Muster erkennbar. Die Anforderung an die Steigungen und den Achsenabschnitte der Regressionsgraden werden dagegen erfüllt.

Neben der Genauigkeit sind für den (alltäglichen) Gebrauch der App jedoch weitere Aspekte wie die Anwendbarkeit und der Nutzen zu berücksichtigen. Während der Messungen kam es bei allen Endgeräten zu unregelmäßigen Verbindungsabbrüchen zwischen Endgerät und Schleifmaschine. Die App oder die Schleifmaschine geben in diesem Fall keine Rückmeldung über einen Verbindungsabbruch, sodass der Eindruck entsteht, dass Vibrationen weiterhin aufgezeichnet werden. Verbindungsabbrüche sind dadurch zu erkennen, dass die Drehzahl- und die Vibrationsanzeigen auch bei Betrieb der Schleifmaschine in ihrer Ausgangsposition verharren und die Tagesexposition nicht weiter zunimmt. Sobald ein Verbindungsabbruch auftrat, kam es in der Untersuchung zu keinem

erneuten, automatischen Verbindungsaufbau. Dieser erfolgte erst, wenn die Schleifmaschine vollständig vom Stromnetz getrennt und wieder angeschlossen wurde.

Grundsätzlich kann das farbliche Ampelschema der Anzeigen „Vibration“ und „Täglicher Vibrationswert“ für den Laien eine Hilfestellung zur Einordnung der Vibrationsexposition geben. Für die Tagesexposition ist dieses Schema insofern gelungen, dass beim Überschreiten des Auslösewerts der gelbe Bereich und beim Überschreiten des Grenzwerts der rote Bereich erreicht wird. Für welche Vibrationswerte der grüne, gelbe und rote Bereich in der Anzeige „Vibration“ steht, ist nach dieser Untersuchung nicht nachvollziehbar. Obwohl die Anzeige die Einheit m/s^2 angibt, ist kein Zusammenhang zwischen dem errechneten a_{hv} aus dem $A(8)$ der App und dem Ausschlag der Anzeige „Vibration“ erkennbar. Aufgrund der Messwerte ist jedoch ersichtlich, dass die Grenzwerte zwischen grün und gelb sowie zwischen gelb und rot nicht einem a_{hv} von $2,5 \text{ m/s}^2$ bzw. von $5,0 \text{ m/s}^2$ entsprechen. Insofern kann diese Anzeige nicht als Orientierung für die laufende Vibrationsbelastung dienen, da kein klarer Bezug zur Tagesexposition besteht. Vielmehr besteht die Gefahr, dass der Anwender sich bei Abschätzung der Vibrationsexposition auf diese Anzeige stützt und die Tagesexposition nach EU-Richtlinie [1] vernachlässigt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Obwohl die App nicht die Genauigkeit eines Messsystems nach DIN EN ISO 8041 erreicht, zeigt sie einen positiven Zusammenhang mit dem Referenzsystem. Da sie konservativ ist, zeigt sie Vibrationen oberhalb des Grenzwerts auch als solche an. Insofern kann sie als Schätzmittel zur Sensibilisierung von Vibrationsbelastungen genutzt werden, wobei es durchaus noch Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Schätzgenauigkeit gibt. Für eine Gefährdungsbeurteilung oder für die Beurteilung der Einhaltung eines Mess- oder Grenzwerts, ist die Genauigkeit nicht ausreichend. Sollte die App verwendet werden, macht es nach dem Stand der Untersuchung Sinn, eine Endgerät mit dem Betriebssystem IOS zu nutzen, um eine höhere Schätzgenauigkeit zu erzielen.

Ein Vorteil der App ist, dass selbst bei Verwendung verschiedener Geräte des gleichen Herstellers die gesamte Vibrationsbelastung einer Person erfasst werden kann. Die Voraussetzungen hierfür sind eine stetige Verbindung der Maschinen zum Endgerät, die Sicherstellung der Verbindung der Maschinen vor jeder Anwendung, dass alle verwendeten vibrierenden Maschinen mit der App verbunden werden können und dass die App ausschließlich die Daten einer einzigen Person aufzeichnet. Aufgrund der Verbindungsabbrüche und der unklaren Bedeutung der Anzeige „Vibration“ gibt es noch Vorbehalte zum alltäglichen Gebrauch der App. Als native App profitiert myMirka laufend von der technischen Weiterentwicklung seiner Endgeräte und kann dadurch seine Leistung und Flexibilität verändern. Da die Betriebssysteme IOS und Android unterschiedliche

Programmiersprachen verwenden, entstehen jedoch zwei Versionen der App, die sich teilweise in der Bedienung, der Reaktionszeit und besonders in der Genauigkeit der ermittelten Vibrationsexposition unterscheiden.

- [1] Richtlinie 200/44/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen) (16. Einzelrichtlinie des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG).
- [2] DIN EN ISO 8041-1: 2017, Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Messeinrichtung, Teil 1: Schwingungsmesser für die allgemeine Anwendung. Beuth, Berlin
- [3] ISO/TR 19664: 2018: Human response to vibration – Measuring instrumentation – Part 1: General purpose vibration meters
- [4] Pitts, P. M., Kaulbars, U.: Consideration of standardisation requirements for “vibration dosemeters”. VDI-Berichte Nr. 2190 (2013), S. 363–374. VDI-Verlag
- [5] Ernst, B., Kaulbars, U.: Testing of new self-measuring power tools that supply the user directly with information on his daily dose. 14th International Conference on Hand-Arm Vibration. 2019, S. 93-94
- [6] ISO 28927-3: 2009, Hand-held portable power tools – Test methods for evaluation of vibration emission – Part 3: Polishers and rotary, orbital and random orbital sanders
- [7] DIN EN ISO 5349-2: 2002/ Amd 1:2015, Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen. Praxisgerechte Anleitung zur Messung am Arbeitsplatz. Beuth, Berlin
- [8] Giavarina, D. Understanding Bland Altman analysis. *Biochemia medica*, 25 (2015) 2 S. 141–151