

Validierung der Messgenauigkeit von Apple AirPods Pro[®] zur Messung der Kopfhaltung bei der Bildschirmarbeit

Martin Hocquel-Hans
11. März 2025 | Berlin

Einleitung

- Digitalisierungsprozesse führen zur **Erhöhung der Bildschirmarbeitszeit**
 - Nutzung von Virtual Display Terminals (Smartphones, Tablets, Computer) nimmt zu (Jarke, 2018; Feierabend et al.; Hafer et al. 2021)
 - Belastungen der Halswirbelsäule (HWS) steigen signifikant durch die Kopfhaltung und den Neigungswinkel bei der Bildschirmarbeit (Hansraj, 2014)
 - **Hohe Inzidenz von muskuloskelettalen Erkrankungen** im Arbeitskontext bedingt durch Bildschirmarbeit (EU-OSHA, 2020)
- ➔ Notwendigkeit objektiver Messverfahren zur Detektion, Analyse und Prävention von Fehlhaltungen

Forschungsziel: Entwicklung und Validierung eines einfachen Messverfahrens als Proof of Concept

Hintergrund

- **Anatomie der HWS** - hohe Beweglichkeit, jedoch anfällig für (unbewusste) Fehlhaltungen
→ reflektorische Anspannung insbesondere bei Konzentration
- **Kopf als Hebel** - Je größer der Neigungswinkel des Kopfs, umso größer die Krafteinwirkung auf die anatomischen Strukturen der HWS (Gareiss et al. 2020).
- **Folge** - Fehlhaltungen bei der Bildschirmarbeit als potenzieller Pathomechanismus (Kempf, 2010; Oberhofer 2016; Hepp & Locher, 2014; Gareis et al., 2020)
- Bisherige Messmethoden (optische Systeme, Wearables, EMG) häufig teuer und nicht alltagstauglich in der Anwendung

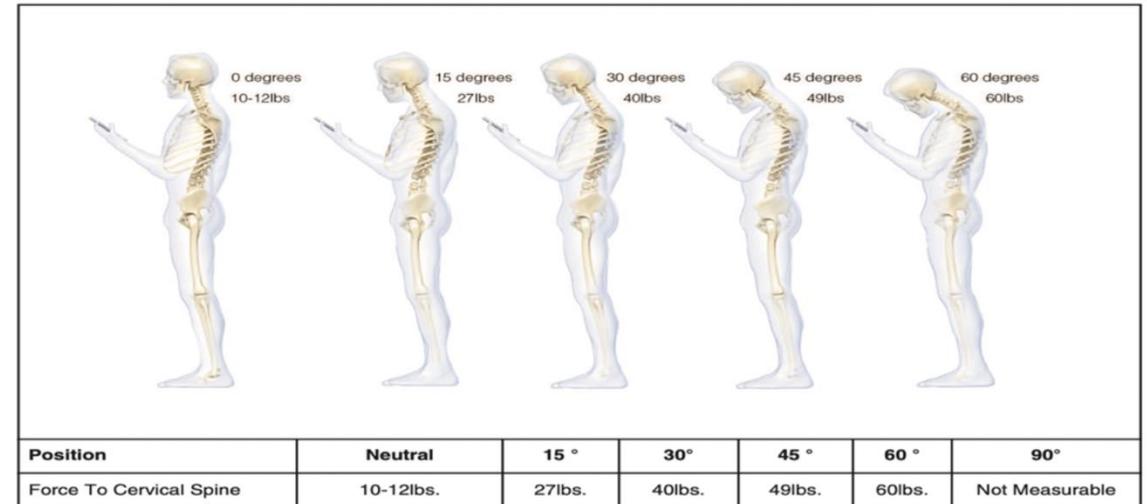


Abbildung 1: Kraftwirkung auf die Halswirbelsäule in Abhängigkeit zum Winkel der Kopfhaltung (Hansraj, 2014)

Forschungsfrage

- 1. Kann mithilfe der AirPods Pro[®] eine valide und zuverlässige Messung der Kopfhaltung realisiert werden?**
- 2. Lässt sich eine Funktion bestimmen, mit der die Kraftbelastung auf die Strukturen der Halswirbelsäule in Abhängigkeit zum Kopf-Hals-Flexionswinkel näherungsweise berechnet werden kann?**

Versuchsaufbau

System A: Apple AirPods Pro®

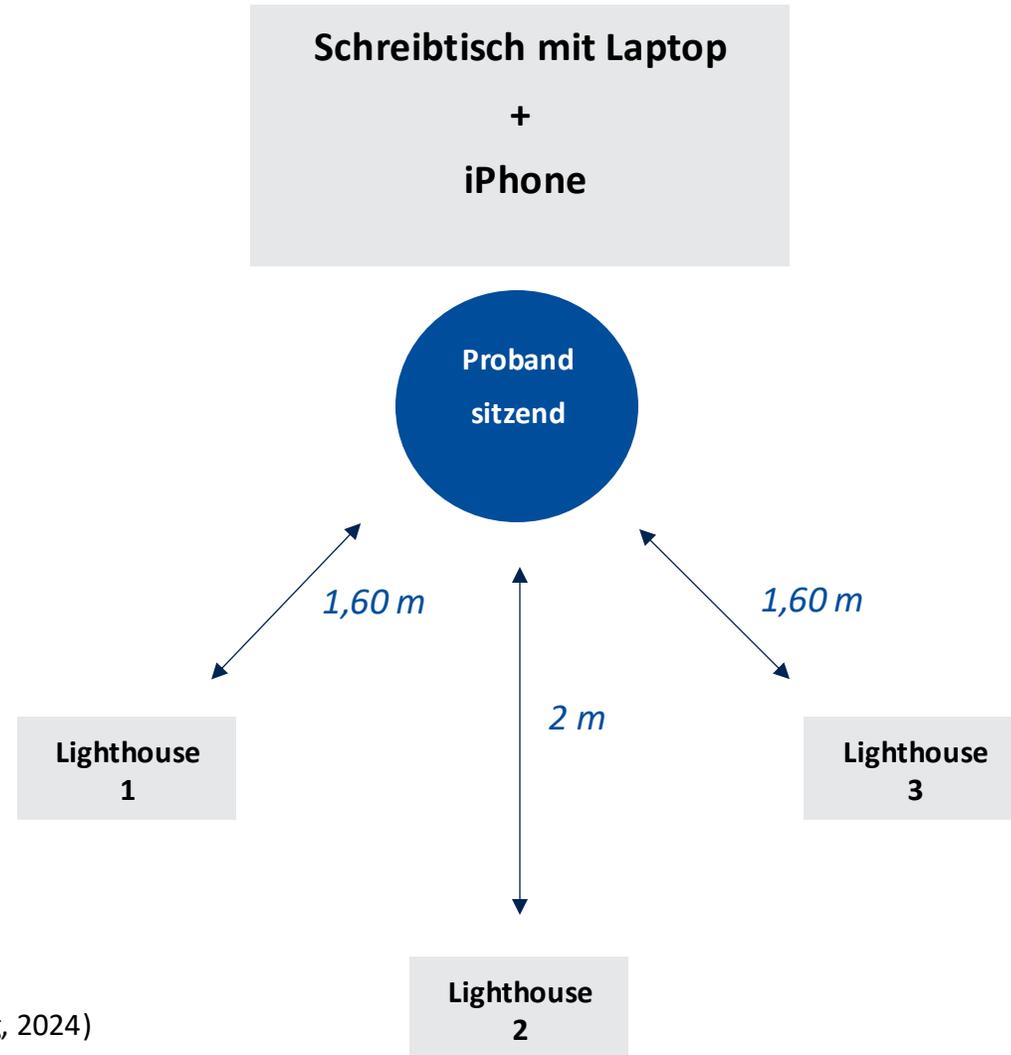


System B: HTC Vive Tracker® 1x + 3 Lighthouses



Abbildungen:

- 2: Einzelner Apple AirPod Pro® - OneEarPod.com, n.d.)
- 3: Vive Tracker® befestigt an Lärmschutzkopfhörer (eigene Darstellung, 2024)
- 4: Lighthouse (Indiamart.com, n.d.)
- 5: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus (eigene Darstellung, 2024)



Methodik

- Entwicklung einer iOS App zur Echtzeit Datenerfassung aus den Gyroskop- und Accelerometer der AirPods Pro® → Entwicklung in Swift
- Simultane Vergleichsmessung mit dem HTC Vive® Tracker als Referenzsystem → Entwicklung in Python
- Laborexperiment mit je 3 Messungen für alle Proband:innen mit je 5, 10 und 15 Minuten Messdauer
- standardisierte Sitzposition + Trageposition der Trackingsysteme → Messung der Haltung und Bewegung auf den Achsen Pitch, Yaw und Roll (Sagittal-, Transversal- und Frontalebene)
- Datenerfassung in csv-Dateien mit Samplefrequenz von 25 Hz AirPods Pro® und 60 Hz beim Vive® Tracker zur späteren Analyse

Erhobene Variablen

- **Primäre Variablen:** Pitch, Roll, Yaw (Eulerwinkel in Grad)
- **Sekundäre Variablen:** Berechnete Krafteinwirkung auf die HWS
- **Störvariablen:** Artefakte, Sensor Drifts, individuelle anatomische Unterschiede der Probanden, systematischer Offset der Sensoren durch fehlende Kalibrierungsmöglichkeit

Stichprobe & Datenerhebung

- **Größe:** $n = 10$ Proband:innen
- **Ausschluss:** Vorerkrankungen und/oder Anomalien der HWS und/oder Ohren
- Standardisierte Durchführung der Messreihen im Laborexperiment (gleiche Trageort der Sensoren + Position der Lighthouses)

Visualisierung der Messdaten

- Messwerte Pitch, Yaw, Roll entlang der Zeitachse dargestellt
- AirPods Pro[®] zeigen systematische Messverschiebung (Offset)
 - ➔ Korrektur durch Berechnung des Mittelwerts über die Gesamtlaufzeit einer Messung
- Pitch-Werte zeigen höchste Übereinstimmung, Yaw und Roll insgesamt mit größeren Differenzen im Vergleich beider Messsysteme und mit mehr Artefakten (insbesondere beim Vive[®] Tracker)

Visualisierung der Messdaten

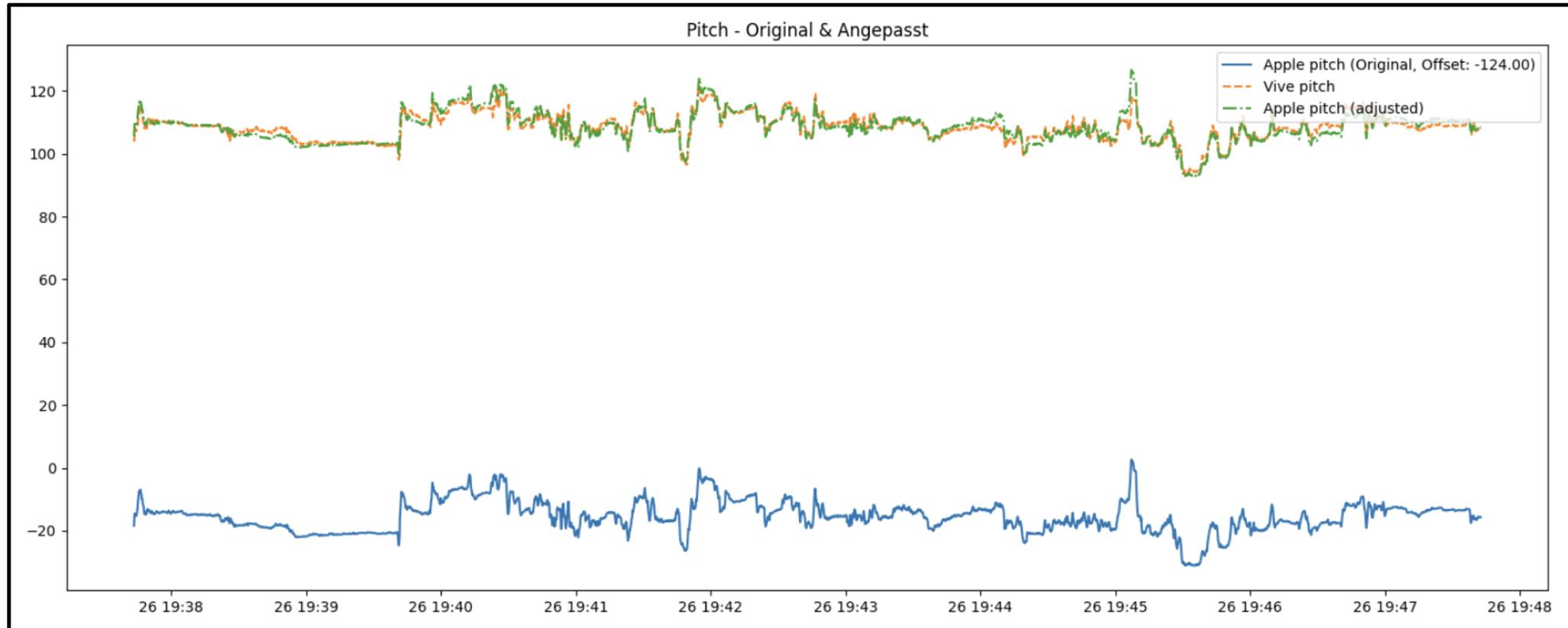


Abbildung 6: Visualisierung einer Messesequenz – Parameter Pitch, Dauer 10 Minuten (eigene Darstellung, 2024)

Vergleichsanalyse der Sensorwerte

Korrelationen der Messwerte Pitch, Roll, Yaw:

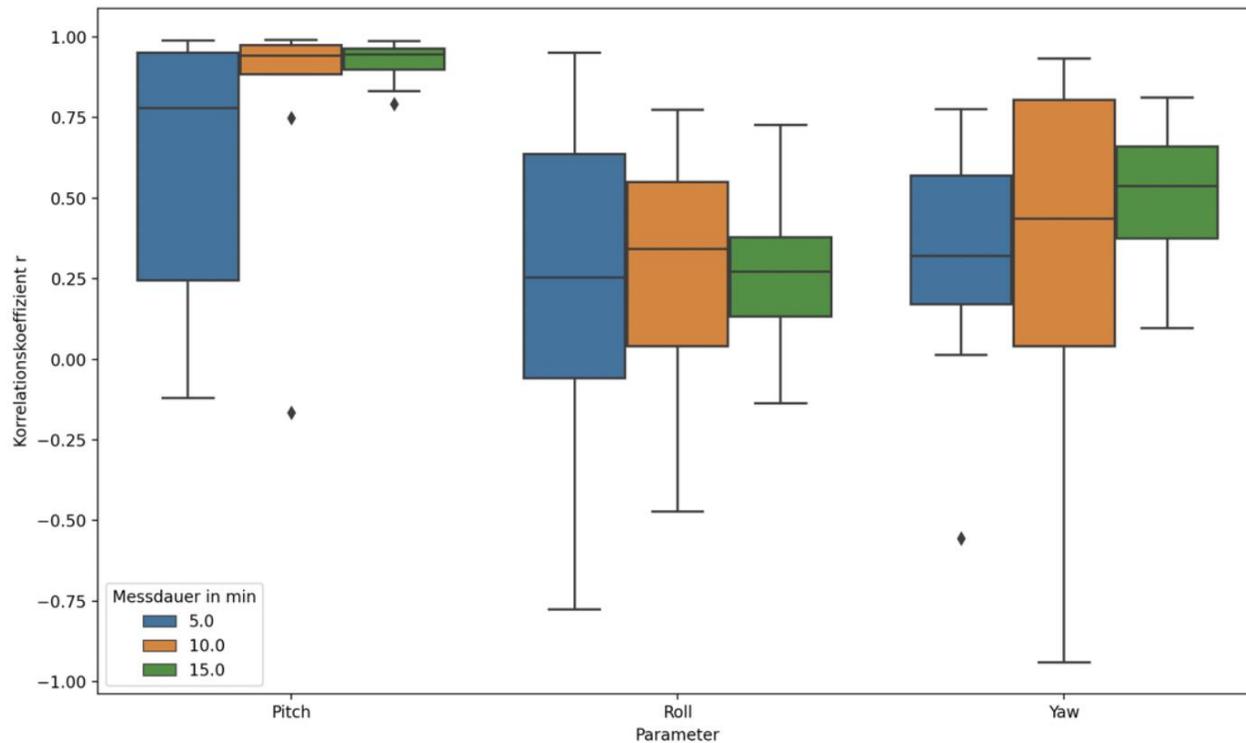


Abbildung 7: Boxplot zur Verteilung der Korrelationskoeffizienten nach Parameter und Messdauer (eigene Darstellung, 2024)

Parameter	Durchschnittliches r
Pitch	0.918*
Roll	0.474*
Yaw	0.618*

Tabelle 1: Durchschnittliche Korrelation über die Gesamtlaufzeit aller durchgeführten Messungen, * $p < .001$

Vergleichsanalyse der Sensorwerte

- Zusätzlich durchgeführte Bland-Altman-Plots zur Identifikation systematischer Unterschiede
- Drift–Problematik und Artefakte: Längere Messungen relativieren die Ungenauigkeiten
 - ➔ unsaubere Offset Korrektur, da Verschiebung über den Mittelwert der einzelnen Parameter in der Gesamtlaufzeit

Modellierung der Krafteinwirkung auf die Strukturen der HWS

Regressionsanalyse auf Basis des Datenmodells von Hansraj (2014)

- Bestimmung einer Polynomfunktion zur Berechnung der Krafteinwirkung mithilfe eines entwickelten Python Skripts auf Basis von numpy und matplotlib

In Newton:

$$f(x) = 2.634e-05 x^4 - 0.002617 x^3 + 0.04741 x^2 + 4.522 x + 49$$

In kg:

$$f(x) = 3.292e-06 x^4 - 0.0003457 x^3 + 0.008148 x^2 + 0.4111 x + 5$$

In lbs:

$$f(x) = 5.761e-06 x^4 - 0.0005679 x^3 + 0.009815 x^2 + 1.028 x + 11$$

Modellierung der Krafteinwirkung auf die Strukturen der HWS

	0°	15°	30°	45°	60°
Zielwert in lbs	11	27	40	49	60
Y aus Polynom 4. Grades*	11.00	27.00	40.00	49.00	60.01
Absolute Abweichung in lbs*	0.00	0.00	0.00	0.00	+ 0.1
Relative Abweichung in %	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02

Tabelle 2: Testergebnisse aus Polynom 4. Grades zur Bestimmung der Kraftbelastung auf die HWS-Strukturen

* nach der zweiten Nachkommastelle abgetrennt

Limitationen

- Kleine Stichprobe, Laborexperiment, begrenzte Generalisierbarkeit
- AirPods Pro[®] messen nur einseitig (bedingt durch die Spezifikation der Klasse CMHeadphoneMotionManager in Swift & Objective C innerhalb des Core Motion Framework)
- Systematischer Offset, Drifts und Artefakte, v.a. beim Referenzsystem
- Stark vereinfachte Offset Korrektur über Mittelwert der Messparameter
- Keine Goldstandard Validierung mittels bildgebender Verfahren

Quellenverzeichnis

Jarke, J. (2018). Digitalisierung und Gesellschaft. Soziologische Revu, Band 41, Heft 1, 3-20. Verfügbar unter:
<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/srsr-2018-0002/html>

Feierabend, S., Rathgeb, T., Kheredmand, H., & Glöckler, S. (Hrsg.). (2022). JIM 2022: Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger in Deutschland. Stuttgart: Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest & Landesanstalt für Kommunikation. S. 13-16.

Hafer, J., Kostädt, P., Lucke, U. (2021). Das Coronavirus als Treiber der Digitalisierung?. Dittler, U., Kreidl, C. (eds) Wie Corona die Hochschullehre verändert. Springer Gabler, Wiesbaden. 219-242. https://doi.org/10.1007/978-3-658-32609-8_15

Hansraj, K. (2014). Assessment of stresses in the cervical spine caused by posture and position of the head. Surgical technology international, 25, 255-279.

EU-OHSA (European Agency for Safety and Health at Work). (2020). Introduction to Work-Related Musculoskeletal Disorders. FACTS 71.

Gareiss, L., Krumm, A. & Otte, A. (2020). Zur Biomechanik der Halswirbelsäule beim Umgang mit dem Smartphone. MMW - Fortschritte der Medizin, 162(S7), 10–14. <https://doi.org/10.1007/s15006-020-4346-3>

Kempf H. (2010). Die Rückenschule. Rowohlt, Hamburg.

Hepp, W. R. & Locher, H. (2014). Orthopädisches Diagnostikum. Georg Thieme Verlag. S. 96.

Barsawade, V., Dangare, S., Jagadale, R., & Magdum, S. A. (2019). Study on Incorrect Sitting & Standing Posture and its Implication on Neck Pain. International Research Journal of Engineering and Technology, 6(5), 1575-1577. Abgerufen von <https://www.irjet.net/archives/V6/i5/IRJET-V6I5316.pdf>

Werner, S., Ohlendorf, D., Schallmey, W., Ter Hamsel, I., Aich, L., Möller, M. & Nagel, A. (2015).

Konservative Therapie des HWS-Syndroms. Manuelle Medizin, 53(5), 350–356. <https://doi.org/10.1007/s00337-015-0042-2>

Abbildungsverzeichnis

Kraftwirkung auf die Halswirbelsäule in Abhängigkeit zum Winkel der Kopfhaltung

Quelle: Hansraj, K. (2014). Assessment of stresses in the cervical spine caused by posture and position of the head. Surgical Technology International, 25, 255–279.

Einzelner Apple AirPods Pro®

Quelle: OneEarPod.com

Verfügbar unter: https://oneearpod.com/cdn/shop/files/AirPods_Pro_R_1_ddb19a1b-13ae-48ad-b1b1-0ea39e2f35c8.jpg?v=1727448239

Vive Tracker® befestigt an Lärmschutzkopfhörer

Quelle: Eigene Darstellung, 2024.

Lighthouse

Quelle: Indiamart.com

Verfügbar unter: <https://5.imimg.com/data5/HJ/HO/DM/ANDROID-1094211/product-jpeg-500x500.jpg>

Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

Quelle: Eigene Darstellung, 2024.

Visualisierung einer Messequenz – Parameter Pitch, Dauer 10 Minuten

Quelle: Eigene Darstellung, 2024.

Boxplot zur Verteilung der Korrelationskoeffizienten nach Parameter und Messdauer

Quelle: Eigene Darstellung, 2024.

Schlussfolgerungen

- AirPods® Pro als vielversprechendes und alltagstaugliches Messinstrument für Kopfhaltung
- Erste Annäherung an eine alltagstaugliche Lösung für ergonomische Analysen und Interventionen v.a. zur Prävention über Feedbackschleifen
- Breite Verfügbarkeit, einfache Bedienbarkeit und geringer Störfaktor beim Tragen machen die Kopfhörer zu einem attraktiven Dual-Use Wearble

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit