

Zentralblatt für

Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie

Elektronischer Sonderdruck für
I. Böckelmann

Ein Service von Springer Medizin

Zbl Arbeitsmed 2015 · 65:12–20 · DOI 10.1007/s40664-014-0045-1

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

I. Böckelmann · O. Chegrynets · R. Mecke · S. Darius · J.S. Sánchez Márquez

Aufmerksamkeitsleistung und objektive Beanspruchung beim Einsatz von zwei verschiedenen Head-mounted-Displays

Diese PDF-Datei darf ausschließlich für nichtkommerzielle Zwecke verwendet werden und ist nicht für die Einstellung in Repositorien vorgesehen – hierzu zählen auch soziale und wissenschaftliche Netzwerke und Austauschplattformen.

Aufmerksamkeitsleistung und objektive Beanspruchung beim Einsatz von zwei verschiedenen Head-mounted-Displays

Im Zuge des Wandels der Arbeitswelt und der zunehmenden Anforderungen an die Produkte und Arbeitsmittel entstehen sowohl für Unternehmen als auch für den Arbeitnehmer neue Herausforderungen. Diese Ansprüche müssen mit neuen Technologien und modernen Arbeitsverfahren bzw. der Digitalisierung der Produktionsprozesse, in die der Arbeitnehmer als Operateur eingebunden ist, angegangen werden. Wachsender Zeit- und Wettbewerbsdruck mit einer angestrebten Steigerung der Produktivität bringen stetig technische Neuerungen und Weiterentwicklungen der Arbeitssysteme hervor. So kann beispielweise durch Bereitstellung von produkt- und/oder prozessrelevanten Informationen vor Ort in der Arbeitsumgebung eine höhere Arbeitseffizienz erreicht werden.

Die modernen Technologien und deren Einsatz in der industriellen Fertigung können zu einer Überforderung mit entsprechenden Konsequenzen für den Gesundheitszustand und das Wohlbefinden des Arbeitnehmers führen, sobald die Arbeitsanforderungen die sich mit dem Alter verändernden Fähigkeiten übersteigen.

Der Umgang mit neuen, bis dato noch unbekanntem Arbeitsmitteln kann sich als hohe körperliche und psychomentele Belastung herausstellen. Für das Unternehmen sind diese Belastungen nicht nur aufgrund des demografischen Wandels von Bedeutung. Sie betreffen sowohl den älteren Arbeitnehmer im Betrieb als auch jüngere Generationen bereits in der Ausbildungsphase. Die daraus resultierenden negativen Belastungsfolgen können,

wenn sie langanhaltend sind, für häufigere Krankschreibungen oder Frühberentungen sorgen.

Erweiterte Realität zur Unterstützung von Arbeitsprozessen

Die erweiterte Realität (AR; „augmented reality“) beschreibt eine Mensch-Maschine-Interaktion, in der die menschliche Wahrnehmung durch computergenerierte Informationen erweitert wird. Hier erfolgt eine Überlagerung des Gesichtsfelds mit visuellen Informationen, sodass die Anreicherung der realen Umgebung ermöglicht wird. Dabei wird diese reale Umgebung ergänzt und nicht ersetzt [1, 2, 6, 19].

Die AR stellt eine Zukunftstechnologie dar, die den Arbeitnehmer durch Einblendung von situationsabhängigen

Informationen (virtuelle Inhalte) in das Sichtfeld bei der Arbeit unterstützt. Verschiedene Industriezweige streben nach einer Unterstützung des arbeitenden Menschen bei seiner Tätigkeit durch Assistenzsysteme [3, 17, 18, 20]. Diese Unterstützung kann beispielweise bei einem Monteur durch Einblendung von Montagehinweisen am realen Werkstück oder bei einem Kommissionierer durch Einblendung der Informationen zum vorgegebenen Bauteil (z. B. Lagerungsort) erfolgen.

In der manuellen Fertigung komplexer Systeme in der Industrie spielt die

Teil der Promotionsarbeit von S.J. Sánchez Márquez (2012) Arbeitsphysiologische Ansätze zur Erfassung der Beanspruchung bei der Anwendung innovativer Technologien. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Tab. 1 Visuelle Leistungen

Variable	MW ± SD	Median
Fernvisus rechts	0,98±0,30	1
Fernvisus links	0,97±0,34	1,25
Fernvisus binokular	1,12±0,27	1,25
Nahvisus rechts (55 cm)	1,03±0,30	1,25
Nahvisus links (55 cm)	0,99±0,31	1
Nahvisus binocular (55 cm)	1,11±0,20	1,25
Nahvisus rechts (40 cm)	1,07±0,20	1
Nahvisus links (40 cm)	1,02±0,28	1,25
Nahvisus binocular (40 cm)	1,16±0,16	1,25
Phorie	0,2±0,41	0
Stereopsis 35"	0,2±0,41	0
Stereopsis 100"	0±0	0
Stereopsis 200"	0,04±0,20	0
Stereopsis 600"	0±0	0

MW Mittelwert, SD Standardabweichung.

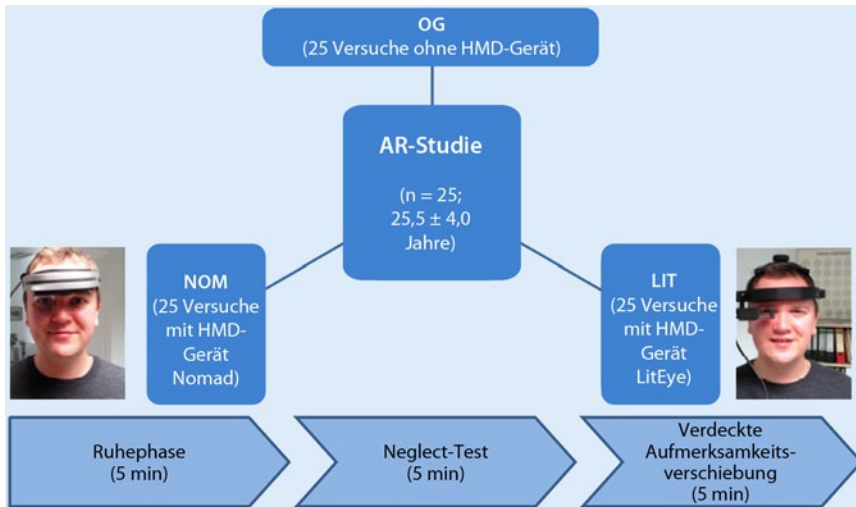


Abb. 1 ▲ Untersuchungsschema der Augmented-Reality(AR)-Studie

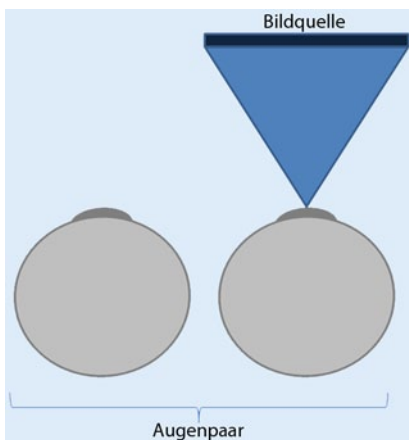


Abb. 2 ▲ Schema des Anzeigeräts nach optischem Aufbau beim monokularen Head-mounted-Display

Bereitstellung von Informationen eine wesentliche Rolle für alle Mitarbeiter. Arbeitsschritte müssen beschrieben und Hinweise auf räumliche Positionen von Bauteilen fehlerfrei dem Beschäftigten verständlich gemacht werden. Eine Möglichkeit stellt die mobile AR-Technologie, z. B. in Form von am Kopf getragenen Anzeigesystemen, Head-mounted-Displays (HMD), dar [5, 8, 10].

Bei der Bewertung der HMD unterscheidet man zwischen monokularen und binokularen Geräten sowie zwischen Look-around- und See-through-Geräten. Bei letzteren wird noch zwischen Optical- und Video-see-through-Geräten differenziert [9]. Mithilfe dieser modernen AR-Technologien ist es möglich, Daten direkt im Sichtfeld einer Person darzu-

stellen und so Arbeitsabläufe effektiver zu gestalten [1, 21, 23].

Für die arbeitsphysiologische und arbeitswissenschaftliche Forschung bedeutet das, sich mit dem Menschen im Gesamtsystem im täglichen produktiven Einsatz der mobilen AR zu befassen. Im Sinne der Humanzentrierung (Anpassung der Technik an den Menschen) sind solche Systeme zu entwickeln und zu verwenden, die ein beschwerdefreies Arbeiten und eine gute Leistung der Anwender der AR-Technologien ermöglichen [13, 22, 25]. Da eine Anpassung des Menschen an die Technik nur sehr bedingt möglich ist, muss die moderne Technik im Umkehrschluss an den (älteren) Menschen angepasst werden. Die Kenntnisse aus den Forschungsansätzen sind nicht nur für die Anwender relevant, sondern auch für die Entwickler der AR-Technologien sowie die Arbeitgeber, in deren Unternehmen diese neuen Technologien eingesetzt werden.

Hier werden die Auswirkungen des Einsatzes zweier innovativer Technologien der AR auf den Menschen in Laborversuchen untersucht. Aus dem Vergleich der Aufmerksamkeitsleistungen bei psychometrischen Tests und die Objektivierung der Beanspruchung anhand physiologischer Parameter beim Einsatz von 2 verschiedenen HMD sollen Aussagen zur Beanspruchungslage des Nutzers und Unfallpotenzial ermöglicht werden.

Probanden und Methoden

An der Studie nahmen 25 Probanden (4 Männer und 21 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 25,5±4,0 Jahren freiwillig teil. Alle Personen hatten noch keine Erfahrung mit HMD-Geräten. Nach Prüfung der visuellen Funktionen (Visus, Phorie und Kontrast) wurden bei allen 25 Probanden gute Leistungen festgestellt (■ Tab. 1).

Das Untersuchungsschema der Studie ist in ■ Abb. 1 dargestellt.

Der ganze Ablauf (5-minütige Ruhephase und 2 Aufmerksamkeitsaufgaben – Gesichtsfeld/Neglect-Test und verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung von jeweils 5-minütiger Dauer) wurde 3-mal durchgeführt, je einmal mit ausgeschaltetem HMD-Gerät [Nomad ND 2100 (NOM), Microvision Inc., Redmond/WA; USA und LitEye LE-750 A (LIT), Liteye Systems Inc., Centennial/CO, USA] und ein drittes Mal ohne Gerät (OG). Die Untersuchungsbedingungen (NOM, LIT und OG) und die Aufmerksamkeitsaufgaben wurden innerhalb der Untersuchungsreihe in randomisierter Folge vorgenommen, um Ermüdungseffekte auszuschließen.

Bei dem Gerät NOM handelt es sich um ein monokulares Look-around-HMD, das einen Laserstrahl verwendet, um die virtuellen Informationen über einen transparenten Umlenkspiegel direkt auf die Netzhaut des Anwenders zu projizieren. Bei einem derartigen Aufbau spricht man von einem Virtual-retinal-Display. Das NOM hat ein Gewicht von 226,7 g und ein „field of view“ (FOV) von 23×17,25°. Das entspricht einem Monitor von 17“ in Armlängeentfernung. Der Laser hat die Farbe monochrom rot.

Das Gerät LIT ist ein so genanntes See-through-Gerät mit organischer Leuchtdioden(OLED)-Technologie mit einem Gewicht von 80 g und einem FOV (diagonal) von 24° (640×480 mm) und 28° (800×600 mm).

Beide Geräte gehören zu den monokularen Optical-see-through(OST)-Anzeigeräten (■ Abb. 2).

Ein OST-System kombiniert die realen und synthetischen Bilder mithilfe eines halbdurchlässigen Spiegels, der sich

vor den Augen des Anwenders befindet (Abb. 3).

Ein halbdurchlässiger Spiegel des AR-Displays befindet sich vor dem rechten Auge. Beim größten Teil der Bevölkerung zeigt sich das rechte Auge als das dominante Auge. Alle Probanden unserer Studie wurden zur Augendominanz befragt, sie waren rechtsaugendominant.

Für die Erfassung der objektiven psychometrischen Leistung wurden 2 Aufmerksamkeitsaufgaben aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (TAP; [26]), Gesichtsfeld-/Neglect-Test und Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung, verwendet. Die Untersuchungen erfolgten an einem 15-Zoll-Röhrenmonitor (Bildschirmbreite 28 cm) mit einer Bildschirmauflösung 1024×768 Bildpunkten in einem mittleren Abstand des Probanden vom Bildschirm von 55 cm.

Gesichtsfeld-/Neglect-Test

Bei der Überprüfung vom Gesichtsfeld/Neglect werden in einem groben Scanning eventuelle Gesichtsfeldausfälle beim Tragen der verschiedenen AR-Displays erfasst. Ein im zentralen Bereich intaktes Gesichtsfeld ist für diesen Test Voraussetzung. Bei der Neglect-Prüfung (im abgedunkelten Raum) wird eine Maske von Zahlenreizen vorgegeben, zwischen denen ab und zu ein kritischer Reiz erscheint (Flickerreiz), um eine Extinktion zu provozieren. Extinktion kann in der visuellen Modalität auch bei im perimetrisch intakten Halbfeld dargebotenen Stimuli auftreten.

Zur Fixationskontrolle ist eine 2. Aufgabe eingeschoben. Der Proband soll wechselnde Buchstaben, die in einem quadratischen Fenster in der Mitte des Bildschirms erscheinen (Fixationspunkt), benennen. So wird die Fixation auf das Zentrum des Bildschirms gelenkt. Währenddessen sollen die Probanden eine Taste betätigen, wenn ein Flickerreiz zwischen anderen Zahlen auf dem Bildschirm angezeigt wird. Bei der Neglect-Prüfung ist die Anzahl der Reize durch das Programm auf 44 festgelegt (11 Reize pro Quadrant links oben, links unten, rechts oben und rechts unten).

Ausgegeben werden die Ergebnisse Median, Mittelwert (MW) und Streu-

Zbl Arbeitsmed 2015 · 65:12–20 DOI 10.1007/s40664-014-0045-1
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

I. Böckelmann · O. Chegrynets · R. Mecke · S. Darius · J.S. Sánchez Márquez Aufmerksamkeitsleistung und objektive Beanspruchung beim Einsatz von zwei verschiedenen Head-mounted-Displays

Zusammenfassung

Beim Einsatz zweier innovativer Technologien der erweiterten Realität (AR, „augmented reality“) wurden psychophysiologische Beanspruchungsparameter in Laborversuchen untersucht. Ziel der Arbeit war der Vergleich der Aufmerksamkeitsleistungen bei den Aufgaben aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung und die Objektivierung der Beanspruchung anhand physiologischer Parameter beim Einsatz von 2 verschiedenen Head-mounted-Displays (HMD), Nomad und LitEye, um Fragen zur Beanspruchungslage des Nutzers und zu möglichem Unfallpotenzial zu beantworten.

An der Studie nahmen 25 Probanden mit einem Durchschnittsalter von 25,5±4,0 Jahren freiwillig teil, die beide Tests, den Gesichtsfeld-/Neglect-Test und den Test zur Aufmerksamkeitsverschiebung, jeweils mit den HMD-Geräten Nomad und LitEye sowie ohne HMD-Gerät in randomisierter Folge absolviert haben.

Die Funktionen der visuell-räumlichen Aufmerksamkeitsverschiebung und die Ergebnisse des Gesichtsfeld-/Neglect-Tests waren in beiden Versuchen mit HMD-Gerät vergleichbar. Der Vergleich der verschiedenen Displays Nomad und LitEye zeigt, dass die kardiophysiologische Beanspruchung in beiden Fällen ähnlich ist und im normalen Bereich liegt. Die Beanspruchung durch diese Geräte ist demzufolge auf kardiophysiologischer Ebene gering.

Wenn diese moderne Informationstechnologie in der Zukunft zur Unterstützung des Beschäftigten eingesetzt werden soll, sind weitere Untersuchungen nutzerbezogener Aspekte z. B. hinsichtlich des Gesichtsfeldverlusts durch Verdeckung notwendig.

Schlüsselwörter

Informationssysteme · Aufmerksamkeit · Analyse der Aufgabenbewältigung · Kardiovaskuläre Physiologie · Gesichtsfeld

Attentional performance and objective strain parameters when using two different head-mounted displays

Abstract

In this study, psychophysiological strain parameters were investigated during the usage of innovative augmented reality (AR) technologies. The aim of the study was to compare the performance of tasks in the test battery for attentional performance (TAP) and to objectify strain on the basis of physiological parameters when using two different head-mounted displays (HMD) – Nomad and LitEye. We especially looked at the strain of users and the possible risk for accidents.

In all, 25 volunteers (age 25.5±4.0 years) participated in this study. They completed two tests (neglect and covert shift of attention) three times – with Nomad, with LitEye, and without any equipment.

The results of both tests (shift of attentional focus and neglect) were comparable

in the trials with HMD. The comparison of the two HMD showed that cardiophysiological strain is similar and is in the normal range. The strain involved in using these technologies is relatively minor.

If this modern information technology is to be used to support workers in the future, further investigations are required to evaluate user-related aspects, e.g., loss of visual field.

Keywords

Information systems · Attention · Task Performance and Analysis · Cardiovascular physiology · Visual fields

ung (SD) der Reaktionszeiten sowie die Anzahl nichtgesehener Reize in beiden Gesichtshälften und in den einzelnen Quadranten. In einer zusätzlichen Grafik wird die Anzahl an fehlenden Reaktionen mit „-n“ angezeigt, was die Abschätzung des ausgefallenen Sehfelds bzw. der nicht beachteten Reize im Neglect-Test erlaubt.

Verlängerte Reaktionszeiten sind ein Hinweis auf eine verminderte Kontrastempfindlichkeit in dem entsprechenden Halbfeld. Sie entsprechen aber auch einer Verlangsamung der Aufmerksamkeitsverschiebung mit erhöhten Sakkadenlatenzen nach der entsprechenden Seite, die die Explorationsleistung stört. Die Auslö-

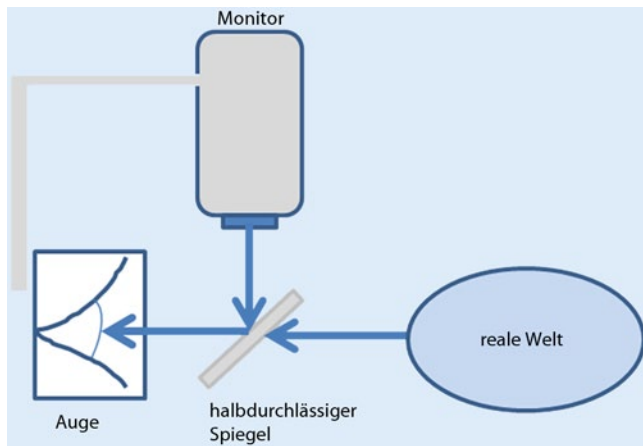


Abb. 3 ◀ Schematische Darstellung eines Optical-see-through-Anzeigegeräts für „augmented reality“

sung dieser schnellen Augenbewegungen erfolgt entweder spontan durch gezielte Verhaltenspläne bei der Inspektion und Interpretation der Umweltinformationen oder unwillkürlich, etwa durch Veränderungen im peripheren Gesichtsfeld. Galey [7] betrachtet sie als Indikator für Vigilanz und Beanspruchung.

Die Durchführungszeit dieser Aufgabe beträgt etwa 5 min.

Verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung

Aus der Literatur ist bekannt, dass der Fokus der visuellen Aufmerksamkeit ohne Augenbewegung verlagert werden kann, sodass auf Reize, die im Aufmerksamkeitsfokus liegen, schneller reagiert wird als auf Reize außerhalb des Fokus. Die verdeckte Verschiebung des visuellen Aufmerksamkeitsfokus wird als ein vorbereitender Prozess für eine sakkadische Augenbewegung angesehen. Demzufolge kann es bei Beeinträchtigungen der verdeckten Aufmerksamkeitsverlagerung auch zu Störungen der Blickbewegung kommen.

Der Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung gehört zu den Wahlreaktionsaufgaben aus mehreren Reizen (Selektivität). Es geht hier um die räumliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit des Probanden.

Die verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung wird als Fähigkeit verstanden, die visuelle Aufmerksamkeit ohne Änderung der Blickrichtung auf einen Ausschnitt im Raum zu fokussieren. Mit dieser Untersuchung soll herausgefunden werden, ob die Aufmerksamkeit im linken und rechten Gesichtsfeld unterschiedlich

ist, da sich der halbdurchlässige Spiegel vor dem rechten Auge befindet und sich die Reaktionen deshalb verlangsamen können.

Beim Testablauf wird ein Pfeil (Hinweisreiz) in der Mitte des Bildschirms 100-mal rechts oder links vom Fixationspunkt angezeigt, der die voraussichtliche Position des Zielreizes anzeigt. Auf dessen Erscheinen soll der Proband so schnell wie möglich mit Drücken der Taste reagieren. Dieser Pfeil zeigt in 80% der Darbietungen auf die Seite, wo letztendlich der Zielreiz erscheinen wird (valider Hinweisreiz). In 20% der Darbietungen ist der Hinweisreiz invalide, d. h. die Pfeilrichtung stimmt mit dem Ort des Zielreizes nicht überein.

Die Probanden orientieren sich in die angezeigte Richtung. Bei invaliden Reizen muss eine Umorientierung bzw. eine erneute Verschiebung des Fokus stattfinden. Die Wahrnehmung der jeweiligen Reize (Zielreize) muss per Tastendruck bestätigt werden, sodass die für die Umorientierung benötigte Zeitspanne messbar ist. Bei der Durchführung dieser Aufmerksamkeitsaufgabe muss beachtet werden, dass die Probanden auf den Fixationspunkt schauen und nicht zu der Seite, auf der der Pfeil erwartet wird. Die Differenz zwischen Reaktionszeiten von validen zu invaliden Hinweisreizen wird als Zeitbedarf für die verdeckte Aufmerksamkeitsverschiebung angesehen.

Für jede Position des kritischen Reizes und jede Richtung des Hinweisreizes werden jeweils Mittelwert, Median und Streuung der Reaktionszeiten sowie Anzahl der korrekten Reaktionen, Auslassungen,

Antizipationen und Ausreißer ausgegeben.

Die Durchführungszeit beträgt ohne Instruktion und Vortest 5 min.

Zur Erfassung objektiver physiologischer Beanspruchungsdaten [Herzschlagfrequenz (HR) und Herzfrequenzvariabilität (HRV) im Zeit- und Frequenzbereich sowie mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik [12]] wurde eine Sportuhr RS800CX (Polar Electro GmbH Deutschland, Büttelborn, Deutschland) verwendet. Die Auswertung der NN-Intervallreihe [Abstand zwischen 2 Herzschlägen in der Elektrokardiogramm (EKG)-Aufzeichnung] erfolgte mit der Software Kubios HRV (University of Eastern Finland). Definitionen und Erklärungen der HRV-Parameter sind in **Tab. 2** dargestellt.

Die statistische Auswertung wurde mithilfe der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics, Version 21.0 (IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland) durchgeführt. Der Vergleich der objektiven Beanspruchungsparameter und Leistungsdaten in den 3 Untersuchungsbedingungen (NOM vs. LIT vs. OG) erfolgte mit dem nichtparametrischen Test für abhängige Stichproben (Friedman-Test). Zum Vergleich der Ergebnisse beim Einsatz der jeweiligen Geräte untereinander wurde der Wilcoxon-Test angewendet. Für die Prüfung der Normalverteilung kam der Kolmogorov-Smirnov-Test zum Einsatz.

Ergebnisse

Die Aufmerksamkeitsleistung in Form von Ergebnissen der psychometrischen Tests wurde bei allen 3 Untersuchungsbedingungen (NOM, LIT und OG) verglichen.

Die Ergebnisse des Neglect-Tests sind in **Tab. 3** dargestellt. Es wurden keine statistischen Unterschiede in den psychometrischen Leistungsergebnissen der Neglect-Prüfung festgestellt. Sowohl die Reaktionszeit als auch die Anzahl der richtigen bzw. ausgelassenen Reaktionen waren im Friedman-Test vergleichbar.

Beim Vergleich der 6 einzelnen Positionsbedingungen innerhalb einer Untersuchungsbedingung zeigten sich sowohl beim Einsatz des NOM-Geräts (die Variablenbetrachtung innerhalb der Spalte NOM der **Tab. 3**) als auch bei

Tab. 2 Beschreibung der kardiophysiologischen Parameter

Analyse	HRV-Parameter	Messeinheit	Erklärung
Zeitbereich	„mean“ NN	ms	Mittelwert der NN-Intervalle
	SD NN	ms	Standardabweichung der NN-Intervalle im Messzeitbereich
	„mean“ HR	Schläge/min	Mittelwert der Herzschlagfrequenz
	SD HR	Schläge/min	Standardabweichung (SD) der Herzschlagfrequenz
	RMSSD	ms	Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen
	pNN50	%	Prozentsatz aufeinanderfolgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen
	RR-Triangular-Index	k.E.	Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle
Frequenzbereich	TINN	ms	Triangulare Interpolation aller NN-Intervalle: Länge der Basis des minimalen quadratischen Unterschieds der triangulären Interpolation für den höchsten Wert des Histogramms aller NN-Intervalle
	LF-Power	nu	Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,04 bis 0,15 Hz
	HF-Power	nu	Leistungsdichtespektrum im Frequenzbereich von 0,15 bis 0,40 Hz
Scatterplot	LF/HF	k.E.	Quotient der sympathovagalen Balance
	SD1	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser
	SD2	ms	Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser

HRV Herzfrequenzvariabilität, NN Abstand zweier Herzschläge, k.E. keine Einheit, LF „low frequency“, HF „high frequency“, nu „normalized unit“.

dem Einsatz des LIT-Geräts (Spalte LIT der **Tab. 3**) keine signifikanten Unterschiede der Reaktionszeiten (Friedman-Test $p > 0,05$). Jedoch waren die Reaktionszeiten beim Einsatz des LIT-Geräts tendenziell schlechter im rechten oberen Quadranten im Vergleich zum linken oberen Quadranten ($478,55 \pm 101,67$ ms vs. $460,15 \pm 69,24$ ms).

Die Ergebnisse des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung sind in **Tab. 4** dargestellt. Im Vergleich der 3 Untersuchungsbedingungen zeigten sich bei diesem Test keine signifikanten Unterschiede (Friedman-Test). Eine Ausnahme gab es nur bei der medianen Darstellung der Reaktionszeit in der Position „Pfeil nach links – Zielreiz rechts“ ($p = 0,031$).

Beim Vergleich der 4 einzelnen Positionsanordnungen innerhalb einer Untersuchungsbedingung zeigten sich sowohl beim Einsatz des NOM-Geräts

(die Variablenbetrachtung innerhalb der Spalte NOM der **Tab. 4**) als auch bei dem Einsatz des LIT-Geräts (Spalte LIT der **Tab. 4**) höchstsignifikante Unterschiede (Friedman-Test $p < 0,001$). Die kürzeste Reaktionszeit ($276,1 \pm 35,1$ ms) im Versuch mit dem Nomad-Gerät wurde für die Position „nach rechts gerichteter Pfeil – Zielreiz rechts“ bestimmt. Auch bei dem Einsatz des LIT-Geräts wurden die besseren Reaktionsleistungen in der Position „nach rechts gerichteter Pfeil – Zielreiz rechts“ erreicht. Die Reaktionszeit lag im Durchschnitt bei $285,7 \pm 53,0$ ms. Die wesentlich schlechteren Ergebnisse im Versuch mit dem LIT-Gerät in allen Positionen im Vergleich zum Versuch mit dem NOM-Gerät erklären sich aus dem Aufbau des Geräts (**Abb. 1**), da das rechte Auge durch das HMD verdeckt ist.

Herzfrequenz

Die physiologischen Beanspruchungsparameter HR und HRV wurden bei 2 standardisierten Bedingungen (psychometrische Aufgaben) betrachtet, beim Gesichtsfeld-/Neglect-Test (**Tab. 5**) und beim Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung (**Tab. 6**).

Die Beanspruchungsparameter waren zum größten Teil beim Neglect-Test bei unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen vergleichbar ($p > 0,05$ im Friedman-Test). Nur ein Parameter aus dem Zeitbereich, RR-Triangular-Index als Parameter der Gesamtvariabilität, war signifikant verschieden ($p = 0,025$), wobei diese Unterschiede der Vergleich zwischen dem Versuch mit dem LIT-Gerät und dem NOM-Gerät (Wilcoxon-Test $p = 0,032$) lieferte. Die HRV-Parameter im Frequenzbereich zeigten beim Friedman-Test nur tendenzielle Unterschiede ($p = 0,083$), wobei diese Tendenzen bei allen 3 Parametern (LF-Power, HF-Power und LF/HF) durch statistisch signifikante Unterschiede zwischen dem Versuch mit dem LIT-Gerät und dem Versuch ohne HMD (im Wilcoxon-Test $p = 0,020$, $p = 0,020$ und $p = 0,025$) zu erklären sind.

Auch beim Vergleich der Beanspruchungsparameter beim Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung waren nur wenige signifikante Differenzen bei diesen 3 Untersuchungsbedingungen zu verzeichnen. Nur der Mittelwert der NN-Intervalle und die durchschnittliche Herzschlagfrequenz waren bei diesen 3 Versuchsserien (Friedman-Test $p = 0,048$ bzw. $p = 0,029$) signifikant unterschiedlich. Die weitere statistische Analyse mit dem Wilcoxon-Test, die genaue Betrachtung der 2 verbundenen Stichproben, zeigte jedoch keine statistisch sicheren Differenzen dieser beiden Parameter zwischen den unterschiedlichen Versuchsbedingungen.

Etwas schlechtere Aufmerksamkeitsleistungen beim Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung im Versuch mit dem LIT-Gerät spiegelten sich in einem etwas höheren MW HR wider, wobei diese statistisch unterschiedlichen HR-Werte physiologisch nicht relevant sind.

Tab. 3 Ergebnisse des Neglect-Tests bei den 3 Untersuchungsbedingungen (Geräte Nomad, LitEye und ohne Gerät)

Position	Variable	Untersuchungsbedingung			P _{Friedman}
		NOM MW ± SD	LIT MW ± SD	OG MW ± SD	
Links	MW Reaktionszeit (ms)	447,87±61,01	462,83±71,68	450,25±65,00	0,722
	Median Reaktionszeit (ms)	432,54±63,55	439,88±63,79	432,98±58,95	0,929
	SD Reaktionszeit (ms)	90,46±27,65	111,85±61,74	105,85±51,12	0,549
	Prozentrang	12,21±8,076	10,54±5,77	11,92±8,304	0,815
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	21,08±0,584	20,92±0,584	21,00±0,511	0,586
	Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)	0,4±0,204	0,08±0,282	0,00±0,000	0,223
Links oben	MW Reaktionszeit (ms)	448,58±60,45	460,15±69,24	454,65±64,14	0,802
	Median Reaktionszeit (ms)	434,88±59,56	444,81±69,33	432,46±63,46	0,802
	SD Reaktionszeit (ms)	96,29±36,38	97,34±52,34	104,33±40,88	0,872
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	10,67±0,482	10,54±0,509	10,71±0,46	0,504
	Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)	0,4±0,204	0,00±0,000	0,00±0,000	0,368
	Links unten	MW Reaktionszeit (ms)	457,17±89,28	468,04±95,09	456,47±83,77
Median Reaktionszeit (ms)		435,19±72,00	439,71±64,03	434,37±74,89	0,990
SD Reaktionszeit (ms)		102,87±78,12	115,10±99,72	111,68±81,85	0,769
Anzahl richtige Reaktionen (n)		10,71±0,46	10,38±0,647	10,63±0,576	0,040
Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)		0,00±0,00	0,08±0,282	0,04±0,204	0,368
Rechts oben und unten		MW Reaktionszeit (ms)	460,05±66,86	462,72±80,29	448,06±69,08
	Median Reaktionszeit (ms)	435,06±57,02	440,42±68,08	428,08±61,01	0,682
	SD Reaktionszeit (ms)	110,20±63,50	109,48±43,80	101,09±38,73	0,597
	Prozentrang	12,67±7,376	12,21±7,564	13,83±8,540	0,955
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	20,96±0,624	20,96±0,550	21,00±0,590	0,763
	Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)	0,08±0,28	0,08±0,28	0,04±0,20	0,819
Rechts oben	MW Reaktionszeit (ms)	468,97±68,36	478,55±101,67	465,96±82,64	0,464
	Median Reaktionszeit (ms)	443,54±68,10	445,85±87,79	440,43±72,4	0,677
	SD Reaktionszeit (ms)	118,84±70,25	114,09±65,72	112,92±51,92	0,549
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	10,58±0,50	10,63±0,49	10,63±0,49	0,931
	Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)	0,00±0,000	0,00±0,000	0,00±0,000	–
	Rechts unten	MW Reaktionszeit (ms)	460,85±79,20	445,08±65,72	435,00±68,62
Median Reaktionszeit (ms)		441,79±69,64	439,14±73,65	419,81±63,83	0,597
SD Reaktionszeit (ms)		105,54±88,05	93,02±33,60	88,13±37,66	0,819
Anzahl richtige Reaktionen (n)		10,63±0,49	10,33±0,565	10,54±0,58	0,223
Anzahl ausgelassene Reaktionen (n)		0,08±0,28	0,04±0,20	0,04±0,20	0,779

NOM Gerät Nomad, LIT Gerät LitEye, OG ohne Gerät, MW Mittelwert, SD Standardabweichung.

Diskussion

Das Potenzial der mobilen AR-Systeme als unterstützendes Arbeitsmittel bei der mobilen Assistenz von Beschäftigten wurde in den größeren Forschungsverbundprojekten Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service (ARVIKA) und Angewandte Virtuelle Technologien im Produkt- und Produktionsmittellebenszyklus (AVILUS) nachgewiesen [16]. Letzteres beschäftigte sich auch mit den Auswirkungen der mobilen AR auf den Menschen [18]. Der Einsatz von HMD-Geräten als unterstützende Arbeitsmittel (z. B. bei einer Kommissionierungstätigkeit) zeigt bestimmte Vortei-

le. Die Hände des Beschäftigten sind frei und die visuellen Informationen bleiben unabhängig von der Körperposition sowie der Drehung des Kopfs bzw. Rumpfs immer im Sichtfeld des Nutzers [11]. In den letzten Jahren haben sich einigen Studien mit der Frage zur Eignung der AR-Technologie für die effektive Unterstützung von Tätigkeiten beschäftigt [1, 3, 14].

Diese Studie befasste sich mit der nutzerbezogenen Fragestellung der möglichen Beeinträchtigungen der Aufmerksamkeit und der visuellen Wahrnehmung, die beim Einsatz der HMD-Geräte entstehen können, auf der Basis standardisierter psychometrischer Tests.

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei der ergonomischen Gestaltung der verwendeten älteren Geräte noch einen geringen Verbesserungsbedarf gibt. Beim Einsatz des LIT-Geräts werden beispielweise bestimmte Positionen im Gesichtsfeld durch Verdeckungen etwas beeinträchtigt. Diese Beeinträchtigung führte jedoch nicht zu gravierenden Veränderungen der Aufmerksamkeitsleistungen in beiden psychometrischen Tests aus der Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung (Gesichtsfeld-/Neglect-Test und Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung). Die Fähigkeit zur visuell-räumlichen Aufmerksamkeitsverschiebung war in beiden

Tab. 4 Ergebnisse des Tests zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung bei den 3 Untersuchungsbedingungen (Geräte Nomad, LitEye und ohne Gerät)

Position	Variable	Untersuchungsbedingung			pFriedman
		NOM MW ± SD	LIT MW ± SD	OG MW ± SD	
Pfeil nach links – Zielreiz links	MW Reaktionszeit (ms)	276,8±29,5	293,7±54,5	275,9±39,2	0,289
	Median Reaktionszeit (ms)	269,3±27,2	285,3±53,4	270,0±36,0	0,295
	SD Reaktionszeit (ms)	48,5±16,6	58,3±26,1	50,2±18,3	0,087
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	38,1±1,3	37,7±1,5	37,5±2,1	0,960
	Antizipation (n)	0,6±0,9	0,8±1,1	0,8±0,9	0,442
	Anzahl Augenbewegungen (n)	0,0±0,0	0,4±0,2	0,4±0,2	0,607
	Ausreißerwerte (n)	1,0±0,7	1,1±0,6	1,0±0,8	0,724
Pfeil nach links – Zielreiz rechts	MW Reaktionszeit (ms)	332,8±71,2	365,9±100,1	331,3±72,7	0,178
	Median Reaktionszeit (ms)	330,9±66,2	357,0±79,0	324,8±67,1	0,031
	SD Reaktionszeit (ms)	61,9±28,3	97,1±96,5	63,0±32,7	0,311
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	9,5±0,6	9,6±0,6	9,6±0,6	1,0
	Antizipation (n)	0,2±0,4	0,2±0,4	0,2±0,5	1,0
	Anzahl Augenbewegungen (n)	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	–
	Ausreißerwerte (n)	0,24±0,4	0,1±0,3	0,2±0,4	0,529
Pfeil nach rechts – Zielreiz links	MW Reaktionszeit (ms)	317,0±60,0	333,8±71,3	332,6±87,3	0,674
	Median Reaktionszeit (ms)	315,8±62,7	331,8±76,5	325,3±74,8	0,181
	SD Reaktionszeit (ms)	59,3±31,4	63,9±38,5	72,3±57,6	0,688
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	9,7±0,6	9,6±0,5	9,6±0,6	0,601
	Antizipation (n)	0,2±0,5	0,1±0,3	0,2±0,5	0,641
	Anzahl Augenbewegungen (n)	0,0±0,0	0,0±0,0	0,0±0,0	–
	Ausreißerwerte (n)	0,8±0,3	0,2±0,4	0,2±0,4	0,307
Pfeil nach rechts – Zielreiz rechts	MW Reaktionszeit (ms)	276,1±35,1	285,7±53,0	270,9±41,5	0,157
	Median Reaktionszeit (ms)	268,8±33,2	279,9±54,3	263,9±39,5	0,135
	SD Reaktionszeit (ms)	53,8±28,8	51,7±15,9	48,6±18,1	0,333
	Anzahl richtige Reaktionen (n)	37,7±1,4	37,5±1,2	37,8±1,1	0,344
	Antizipation (n)	0,9±0,9	0,7±0,9	0,7±0,6	0,291
	Anzahl Augenbewegungen (n)	0,0±0,0	0,2±0,8	0,0±0,0	0,368
	Ausreißerwerte (n)	1,1±0,7	1,2±0,8	1,2±0,6	0,816

NOM Gerät Nomad, LIT Gerät LitEye, OG ohne Gerät, MW Mittelwert, SD Standardabweichung.

Versuchen mit den HMD-Geräten vergleichbar.

Um ergonomisch optimale HMD-Geräte bzw. Datenbrillen zu finden, sollten auch die Beurteilungen visueller Leistungen einbezogen werden. Zur Beurteilung des Grads der Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung beim Tragen verschiedener HMD-Modelle sind weitere Untersuchungen erforderlich, die das Gesichtsfeld beim Einsatz dieser beiden Geräte genau prüfen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Auch die psychophysiologischen Untersuchungen der Beanspruchungsparameter, hier die HR und die HRV, bestätigten frühere Forschungsergebnisse [4, 14, 15, 18, 24], die zeigen, dass der Einsatz der HMD-Geräte zu keiner erhöhten Beanspruchung im Vergleich zu her-

kömmlichen Arbeitsmitteln führt. Es lassen sich keine vegetativen Auswirkungen nachweisen. Der Vergleich der verschiedenen Geräte NOM und LIT, die verschiedene Verfahren der Augmented Reality darstellen, ergab, dass die kardiophysiologische Beanspruchung in beiden Fällen vergleichbar ist und jeweils im normalen Bereich liegt.

Die Unterschiede zwischen den beiden HMD-Geräten sind sowohl über objektiv erfasste Leistungsdaten als auch über objektiv gemessene physiologische Beanspruchungsparameter größten Teils statistisch nicht signifikant. Daher können wir aus dieser Untersuchung die Schlussfolgerung ziehen, dass wir bei der Entscheidung für den Einsatz bestimmter HMD keinen Gerätetyp besonders bevorzugen möchten. Es zeigte sich in dieser Stu-

die keines der hier verwendeten HMD-Geräte als ungünstig im Sinn der kardiophysiologischen Beanspruchung.

Für die Fragestellung der Optimierung der HMD-Geräte bzw. Datenbrillen in Bezug auf nutzerbezogene Aspekte sind auch technische Parameter der Geräte wichtig. Bei Überlegungen zum Optimierungsbedarf der HMD-Geräte muss deren Größe und Gewicht berücksichtigt werden. Hier existiert eine Schwierigkeit zwischen dem benötigten Platz für die Technik und der Gewichtsgrenze, deren Überschreitung das Gleichgewicht des Geräts beeinträchtigt und zu unausgeglichener Belastung des Kopfs führt. Bezüglich Handhabung und Design sollten diese im Idealfall kabellos sein. Obwohl für die experimentellen Untersuchungen im Labor eine geringere Rolle spielend, sollten die

Tab. 5 Vergleich der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilitätsparameter beim Neglect-Test bei unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen

Analyse	HRV-Parameter	Untersuchungsbedingung			P _{Friedman}
		NOM	LIT	OG	
Zeitbereich	MW NN (ms)	804,5±98,9	798,0±90,3	795,7±96,2	0,731
	SD NN (ms)	49,0±17,3	47,8±21,2	48,9±15,5	0,526
	MW HR (Schläge/min)	76,0±9,1	76,5±8,5	76,9±8,9	0,877
	SD HR (Schläge/min)	4,9±1,2	4,9±1,4	5,1±1,3	0,585
	RMSDD (ms)	48,6±21,1	45,8±24,0	46,6±16,8	0,610
	pNNS50 (%)	26,2±16,4	23,1±15,9	26,0±16,2	0,562
	RR-Triangular-Index (k.E.)	11,9±3,5	10,8±2,7	11,9±3,3	0,025
	TINN (ms)	228,4±73,9	232,0±91,3	235,2±79,3	0,796
Frequenzbereich	LF-Power (nu)	57,5±16,0	54,6±16,7	58,1±14,2	0,083
	HF-Power (nu)	42,5±16,0	45,4±16,7	41,9±14,2	0,083
	LF/HF (k.E.)	1,7±1,1	1,6±1,4	1,7±1,0	0,083
Scatterplot	SD1 (ms)	34,6±15,0	32,6±17,1	33,3±12,0	0,686
	SD2 (ms)	74,4±25,3	76,2±28,9	75,3±21,0	0,876

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, HR Herzfrequenz, HRV Herzfrequenzvariabilität, nu „normalized unit“, RMSDD Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen, pNNS50 Prozentsatz aufeinanderfolgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen, RR-Triangular-Index Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle, k.E. keine Einheit, TINN Triangulare Interpolation aller NN-Intervalle, NN Abstand zweier Herzschläge, LF „low frequency“, HF „high frequency“, nu „normalized unit“, SD1 Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser, SD2 Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser.

Tab. 6 Vergleich der Herzschlagfrequenz und der Herzfrequenzvariabilitätsparameter beim Test zur verdeckten Aufmerksamkeitsverschiebung bei unterschiedlichen Untersuchungsbedingungen

Analyse	HRV-Parameter	Untersuchungsbedingung			P _{Friedman}
		NOM	LIT	OG	
Zeitbereich	MW NN (ms)	810,2±97,0	797,5±93,6	802,8±98,8	0,048
	SD NN (ms)	42,5±15,3	42,3±16,7	41,8±12,3	0,540
	MW HR (Schläge/min)	75,5±8,7	76,7±9,1	76,2±9,1	0,029
	SD HR (Schläge/min)	4,4±1,1	4,6±1,3	4,5±1,0	0,134
	RMSDD (ms)	45,4±19,8	42,2±19,4	43,2±15,7	0,319
	pNNS50 (%)	24,6±15,6	21,1±15,2	23,4±14,7	0,261
	RR-Triangular-Index (k.E.)	10,8±3,0	10,3±2,9	10,6±2,4	0,809
	TINN (ms)	209,6±69,7	213,6±78,9	219,0±68,5	0,498
Frequenzbereich (FFT)	LF-Power (nu)	54,6±18,4	57,6±16,3	53,1±17,5	0,932
	HF-Power (nu)	45,4±18,4	42,4±16,3	47,1±17,3	0,932
	LF/HF (k.E.)	1,6±1,2	1,8±1,6	1,5±1,1	0,932
Scatterplot	SD1 (ms)	32,3±14,1	30,1±13,8	30,8±11,1	0,319
	SD2 (ms)	69,9±23,8	71,9±24,9	67,6±28,5	0,932

MW Mittelwert, SD Standardabweichung, HR Herzfrequenz, HRV Herzfrequenzvariabilität, nu „normalized unit“, RMSDD Quadratwurzel des Mittelwerts der Summe aller quadrierten Differenzen zwischen benachbarten NN-Intervallen, pNNS50 Prozentsatz aufeinanderfolgender NN-Intervalle, die mehr als 50 ms voneinander abweichen, RR-Triangular-Index Quotient aus der absoluten Anzahl der NN-Intervalle zur Anzahl der modalen NN-Intervalle, k.E. keine Einheit, TINN Triangulare Interpolation aller NN-Intervalle, NN Abstand zweier Herzschläge, LF „low frequency“, HF „high frequency“, nu „normalized unit“, SD1 Standardabweichung der Punktabstände zum Querdurchmesser, SD2 Standardabweichung der Punktabstände zum Längsdurchmesser.

Geräte für den industriellen Einsatz klein sein und die freie Beweglichkeit des Nutzers nicht einschränken.

Weiterer Forschungsbedarf in Richtung Optimierung dieser modernen Technologien wird bei Vereinbarkeit des gleichzeitigen Tragens einer erforderlichen Sehhilfe (Brille) und eines HMD gesehen. Mit immer älter werdenden Beschäftigten ist anzunehmen, dass der größte Anteil der älteren Arbeitnehmer eine Sehhilfe am Arbeitsplatz braucht. Bei der Entwicklung innovativer Technologien sollte das auf jeden Fall berücksichtigt werden.

Fazit für die Praxis

- Soll die AR-Informationstechnologie nutzergerecht zur Unterstützung des Beschäftigten eingesetzt werden, sind Untersuchungen nutzerbezogener Aspekte notwendig.
- Durch Kenntnis der Beanspruchungslage und quantitativer Kenngrößen zur Arbeitsleistung beim Einsatz der HMD-Geräte sowie der Auswirkungen des AR-Systems auf den Menschen ist ein objektiver Nachweis darüber möglich, ob mobile AR-Systeme tatsächlich eine Unterstützung des Nutzers bieten und ggf. sogar zu einer Effizienz- und Effektivitätssteigerung führen.
- Es wird anhand der Ergebnisse dieser Studie vermutet, dass kritische Aspekte bzgl. des Gesundheitsrisikos nicht auftreten werden. Eine generelle Aussage z. B. bezüglich des Unfallrisikos durch Ablenkung im Arbeitsfeld kann noch nicht erfolgen. Hier sind weitere Forschungsstudien notwendig.
- Die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Datenbrillen zeigen, dass die angesprochenen Aspekte zur Systemergonomie bei den Systemherstellern zunehmend Berücksichtigung finden.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. I. Böckelmann
 Bereich Arbeitsmedizin, Medizinische Fakultät,
 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
 Magdeburg
 Irina.Boeckelmann@med.ovgu.de

Danksagung. An dieser Stelle möchten wir dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) danken, das das Gesamtforschungsvorhaben unter dem Titel „AVILUS“ (Nr. 01 IM08001) von 2008–2011 gefördert hat. Besonderer Dank gilt auch unseren Kooperationspartnern Dr. Ralf Rabátje und Dr. Johannes Tümler (Wolfsburg).

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. I. Böckelmann, O. Chegrynets, R. Mecke, S. Darius, J.S. Sánchez Márquez geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle im vorliegenden Manuskript beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Von allen beteiligten Patienten liegt eine Einverständniserklärung vor. Alle Patienten, die über Bildmaterial oder anderweitige Angaben innerhalb des Manuskripts zu identifizieren sind, haben hierzu ihre schriftliche Einwilligung gegeben. Im Falle von nicht mündigen Patienten liegt die Einwilligung eines Erziehungsberechtigten oder des gesetzlich bestellten Betreuers vor.

Literatur

- Alt T (2002) Augmented Reality in der Produktion. Diss., Fak. Maschinenbau, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Azuma R (1997) A survey of augmented reality. *Presence-Teleop Virt* 6(4):255–385
- Bade C, Zhang Z, Doil F et al (2009) Probandenversuche zum Augmented Reality basierten Soll/Ist-Vergleich von Konstruktionsdaten. Konferenzbeitrag. 8. Paderborner Workshop 'Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung', 28.–29. Mai 2009 Heinz Nixdorf Institut Universität Paderborn, S 349–367
- Böckelmann I, Schenk D, Rößler T et al (2011) Physiologische Beanspruchungsreaktionen bei der Anwendung von kopfgetragenen AR-Displays. In: Dokumentationsband zur 51. Wissenschaftlichen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM), Heidelberg, S 364–367
- Darius S, Rößler T, Schenk D et al (2013) Vergleich verschiedener Navigationsarten von kopfgetragenen Augmented-Reality-Displays. *ErgoMed* 37(6):18–26
- Feiner S, Mac Intyre B, Höllere T (1999) Wearing it out: first steps toward mobile Augmented Reality Systems. In: *Mixed Reality-Merging Real and Virtual Worlds*. Ohmsha, Ltd., Tokyo
- Galley N (1989) Saccadic eye movement velocity as an indicator of (de)activation. A review and some speculations. *J Psychophysiol* 3:229–244
- Grubert J, Hamacher D, Mecke R et al (2010) Extended investigations of user-related issues in mobile industrial augmented reality. In: *The Ninth IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Science and Technology Proceedings*. Seoul, S 229–230
- Hoffmann P, Baumann H, Lawo M (2012) Entwicklung eines Testverfahrens für Datenbrillen. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg) *Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen*. Tagungsdokumentation anlässlich des Workshops „Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen“ im Rahmen des Forschungsprojektes F 2288 vom 20. Juni 2011 in Dortmund. Dortmund, S 12–18
- Huckauf A, Urbina M, Böckelmann I et al (2009) Besonderheiten der Wahrnehmung bei AR-basierten Ausgabegeräten. *Wissenschaftstage Fraunhofer IFF, Magdeburg*, S 375–384
- Odenthal B, Mayer MPH, Schlick CM (2012) Empirische Untersuchungen zur Suche von Montagefehlern mit konventioneller 2-D-Darstellung an einem TFT-Monitor gegenüber einer stereoskopischen Darstellung an einem kopfbasierten Display. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg) *Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen*. Tagungsdokumentation anlässlich des Workshops „Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen“ im Rahmen des Forschungsprojektes F 2288 vom 20. Juni 2011 in Dortmund. Dortmund, S 39–45
- Pfister EA, Böckelmann I, Rüdiger H et al (2007) Leitlinie der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. Herzrhythmusanalyse in der Arbeitsmedizin. *Aktualisiert. Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 42:348–353
- Rößler T (2011) Vergleich verschiedener Navigationsarten von kopfgetragenen Augmented-Reality-Displays: Visuelle Leistungen und „Blindheit“ durch Nichtaufmerksamkeit. Dissertation, Medizinische Fakultät, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Schega L, Hamacher D, Böckelmann I et al (2011) Wirkung unterschiedlicher mobiler Augmented Reality Systeme auf die Beanspruchung im industriellen Arbeitsprozess. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 46:402–410
- Schega L, Hamacher D, Peters J et al (2010) Psychische Beanspruchung beim Einsatz unterschiedlicher Optical-See-Through Head Mounted Displays. In: Griefahn B, Golka K, Hengstler JG, Bolt HM (Hrsg) *Tagungsband zur 50. Wissenschaftlichen Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin e. V. (DGAUM)*, Dortmund, S 539–540
- Schreiber W (2011) Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. *Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen*. Springer-Verlag, Berlin
- Schwerdtfeger B, Reif R, Günthner WA et al (2009) Pick-by-vision: a first stress test. *Eighth IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. ISMAR09*, S 115–124
- Stein S, Fedrowitz C, Herfs W et al (2011) Nutzerbezogene Entwicklung und Untersuchung AR-basierter Werkerassistenzsysteme. In: Schreiber W et al (Hrsg) *Virtuelle Techniken im industriellen Umfeld. Das AVILUS-Projekt – Technologien und Anwendungen*. Springer, Berlin, S 213–374
- Tegtmeier A (2006) Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie. Dissertation Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg
- Tümler J, Böckelmann I, Schega L et al (2010) Mobile Augmented Reality in der industriellen Anwendung: Erweiterte Nutzerstudie zum kontinuierlichen Einsatz an einem Referenzarbeitsplatz. *Digitales Engineering und Virtuelle Techniken zum Planen, Testen und Betreiben technischer Systeme*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, S 164–170
- Tümler J, Mecke R, Doil F et al (2008) Einbeziehung der Ergonomie zur Mensch-System-Integration, Beanspruchungsanalyse bei Einsatz mobiler Augmented Reality an einem Referenzarbeitsplatz. In: 50. Fachausschusssitzung Anthropotechnik: Beiträge der Ergonomie zur Mensch-System-Integration, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt – Lilienthal-Oberth e. V., Manching, S 185–200
- Tümler J, Mecke R, Rößler T et al (2012) Navigation mittels Augmented Reality in industrial applications. Approaches for solution of user-related issues. In: *Proceedings of the Seventh IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality 2008 (ISMAR 08)*. IEEE Press, Cambridge, S 87–90
- Tümler J, Roggentin A, Mecke R et al (2008) Subjektive Beanspruchung beim Einsatz mobiler Augmented Reality Systeme. *ErgoMed* 5:130–141
- Wille M, Grauel B, Adolph L (2012) Head-Mounted Displays – Bedingungen des sicheren und beanspruchungsoptimalen Einsatzes. In: *Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen*. Tagungsdokumentation anlässlich des Workshops „Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen“ im Rahmen des Forschungsprojektes F 2288 vom 20. Juni 2011 in Dortmund. (Hrsg) Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund, S 6–11
- Zimmermann P, Fimm B (2007) TAP. Testbatterie zur Aufmerksamkeitsprüfung. Version 2.1. Herzogenrath, Vera Fimm Psychologische Testsysteme