

Untersuchung der Hand-Auge-Koordination bei einer industriellen Anwendung von Augmented Reality

Milda Park, Christopher Schlick

Institut für Arbeitswissenschaft, RWTH Aachen

Zusammenfassung

In diesem Beitrag ist die ergonomische Untersuchung eines Schweißschutzhelms mit integrierter Augmented Reality Technologie beschrieben. Der neuartige Schweißschutzhelm verbessert die Sicht des Schweißers und ermöglicht es, zusätzliche Informationen direkt in das Sichtfeld einzublenden. Um die Hand-Auge-Koordination mit der Videobrille zu testen, welche in dem Schweißschutzhelm integriert ist, wurden Untersuchungen im Labor durchgeführt. An den Untersuchungen waren sowohl Schweißer als auch Nicht-Schweißer beteiligt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Schweißer mit gut trainierter Handmotorik bessere Leistung bei Nutzung des Augmented Reality-Schweißschutzhelms erzielen konnten. Zusätzlich wurde der Effekt der Bildwiederholungsrate auf die Benutzerakzeptanz bezüglich des Systems nachgewiesen, indem die höheren Bildwiederholungsraten zur besseren Bewertung verschiedener Aspekte beigetragen haben.

1 Einleitung

Das MIG/MAG-Schweißen zählt aufgrund seiner hohen Produktivität und seiner industriellen Anwendung zu den am weitesten verbreiteten Schweißverfahren. Beim MIG/MAG-Schweißen brennt ein Lichtbogen zwischen einer aufgespulten Drahtelektrode und dem Werkstück. Die Drahtelektrode wird als Schweißzusatzwerkstoff durch das Drahtvorschubgerät dem Werkstück zugeführt und im Lichtbogen geschmolzen. Ein Schutzgas umströmt die Draht-Elektrode und schützt den Lichtbogen vor atmosphärischen Einflüssen. Der strahlungsintensive Lichtbogen beim MIG/MAG-Schweißen ist auch der Grund dafür, dass die Sicht des Schweißers wesentlich erschwert wird. Um die Augen und das Gesicht vor der gefährlichen UV-Strahlung zu schützen, muss der Schweißer während seiner Arbeit einen Helm mit eingebauter, verdunkelter Sichtschuttscheibe tragen. Dadurch ist lediglich ein heller Punkt in der Dunkelheit zu erkennen, weshalb man auch sagt, dass ein Schweißer „mit dem Gehör“ schweißen muss. Gleichzeitig ist es aber unumgänglich, dass die Hand den Brenner gleichmäßig und exakt führt, um eine Schweißnaht mit hoher Qualität zu erzeugen.

Der Mensch erhält in der Regel eine Vielzahl von Umgebungsinformationen über sein visuelles System, das auch bei der Koordinationsfähigkeit der Hand eine wichtige Rolle spielt. Mit einem konventionellen Helm kann der Schweißer diese visuellen Informationen nur schlecht wahrnehmen. Sicherheitsrelevante Nähte müssen daher häufig zusätzlich von einem Experten geröntgt und auf Schwachstellen hin überprüft werden. Dies ist ein sehr zeit- und kostenaufwendiger Prozess. In dem vom BMBF geförderten Projekt TEREBES (Tragbares Erweitertes Realitäts-System zur Beobachtung von Schweißprozessen) wurde ein neuartiger Schweißschutzhelm mit integrierter AR-Technologie (weiter als AR-Schweißschutzhelm bezeichnet) entwickelt, welche die beschriebenen spezifischen Nachteile nicht aufweist (Abbildung 1).

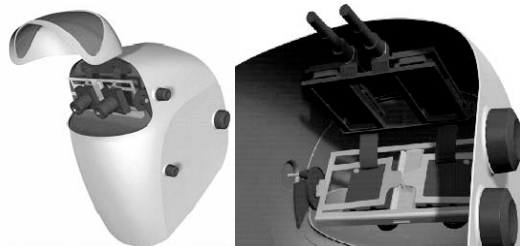


Abbildung 1: AR-Schweißschutzhelm mit integrierten Kameras und video see-through Display (Hillers et al. 2004)

Da das Schweißen zu den Prozessen zählt, die ein hohes Maß an Sicherheit erfordern, konnten die entwickelten Prototypen nicht sofort in einer realen Arbeitsumgebung getestet werden. Aus diesem Grund wurden die Handführung beim Schweißen sowie die Hand-Auge-Koordination mit verschiedenen Versuchsaufgaben im Labor simuliert und getestet. Kapitel 2 beschreibt die experimentellen Untersuchungen des AR-Schweißschutzhelms mit zwei verschiedenen Bildwiederholungsraten.

2 Experimentelle Untersuchungen

Die Bildwiederholungsrate ist einer der zeitbezogenen Qualitätsfaktoren in AR-Systemen. Niedrige Bildwiederholungsraten tragen dazu bei, dass das Realitätsbild mit einer gewissen Zeitverzögerung auf dem Head-Mounted-Display (HMD) abgespielt wird (Adelstein et al. 2000; Renkewitz & Conradi 2005). Dieser Effekt verursacht viele Probleme bei der Benutzung des AR-Systems und schränkt sogar bei einigen Szenarien die Anwendung des videobasierten HMDs ein. Die negativen Effekte der Zeitverzögerung sind das so genannte Motion-Sickness (Übelkeit bei der Anwendung von videobasierten HMDs und Simulatoren), visuelle Beschwerden sowie eine Störung des visuell-motorischen Systems. Da beim Schweißen die Hand-Auge-Koordination eine besondere Rolle spielt, ist es wichtig eine ausreichende Bildwiederholungsrate zu gewährleisten, jedoch ohne dadurch die anderen softwaretechnischen Möglichkeiten zu sehr einzuschränken.

Dabei ist bekannt, dass ab der Bildwiederholungsfrequenz von 75 – 80 Hz (Anzahl der Halbbilder pro Sekunde) das menschliche Auge ein flimmerfreies Bild wahrnimmt. Im Fernseher wird die Vertikalfrequenz von 50 Hz (oder 25 Vollbilder, frames per second – fps) benutzt.

Das Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen experimentellen Untersuchungen war die Evaluation der Prototypen in Bezug auf die Hand-Auge-Koordination mit zwei verschiedenen Bildwiederholungsraten sowie unter verschiedenen Sichtbedingungen: Videosicht und natürliche Sicht (ohne HMD, ohne Schweißhelm). Ein zusätzlicher Aspekt dieser Experimente war, dass professionelle Schweißer als Benutzer des Systems in die Evaluation einbezogen wurden.

2.1 Versuchsdesign

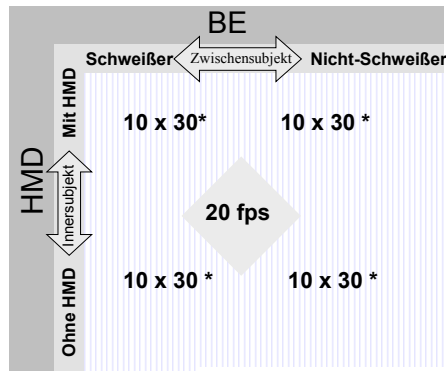
Die Stichprobe von den Schweißern, die berufsbedingt über eine überdurchschnittliche Hand-Auge-Koordination verfügen, wurde mit einer Stichprobe von Nicht-Schweißern verglichen. Insgesamt wurden zwei Versuchsreihen zu verschiedenen Zeitpunkten mit den Bildwiederholungsraten von jeweils 16 und 20 Bilder pro Sekunde (fps – frames per second), welche technisch bedingt zur Systemevaluation zur Verfügung standen, durchgeführt. Die in beiden Versuchen verwendete Hardware ist identisch: AR-Schweißschutzhelm mit integriertem video see-through HMD (DH-4400 D; Auflösung 800 (H) x 600 (V)) und High Dynamic Range COMS¹ (HDRC) Kameras (Falldorf Fuga 1000 Chipset).

Vor dem Versuch wurde das Sehvermögen jedes Versuchsteilnehmers geprüft. Die Versuchspersonen mit Presbyopie (Weitsichtigkeit) und Myopie (Kurzsichtigkeit) ohne Korrekturgläser sowie mit ungenügender räumlicher Sehschärfe (Kriterium: Die Unfähigkeit das räumliche Bild zu erkennen, beim Winkel der Stereopsie < 100") wurden von dem Versuch ausgeschlossen.

Um die Ergebnisse nicht durch interpersonelle Unterschiede zu beeinflussen, wurde zum Vergleich der Versuchsbedingungen mit und ohne HMD bei beiden Versuchsreihen das Innersubjekt-Design gewählt (eine Gruppe testete mehrere Bedingungen). Zum Vergleich der Hand-Auge-Koordination von den Schweißern und den Nicht-Schweißern sowie zum Vergleich der Leistung mit den zwei Bildwiederholungsraten wurde das Zwischensubjekt-Design angewandt, um den Lerneffekt zu minimieren. Eine Gruppe von Schweißern hat das System mit 16 fps getestet, während die andere Gruppe das System mit 20 fps zur Probe hatte.

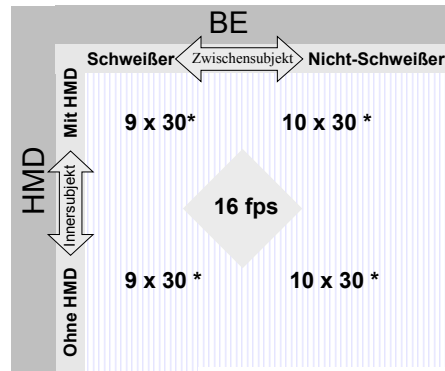
Um die Beschreibung der Evaluation übersichtlicher zu gestalten, wird die Versuchsreihe nach Versuchsdesign 1 und Versuchsdesign 2 unterschieden (Abbildungen 2 und 3). Zusätzlich wird Versuchsdesign 3 zum Vergleich der beiden Gruppen von Schweißern mit unterschiedlichen Bildwiederholungsraten verwendet (Abbildung 4).

¹ Complementary Metal Oxide Semiconductors



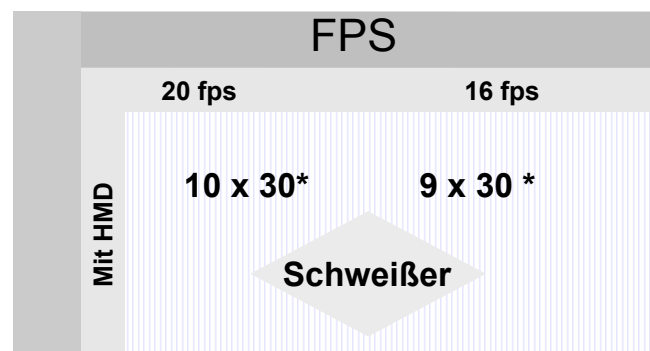
*Stichprobengröße x n-Versuchsdurchgänge

Abbildung 2: Versuchsdesign 1



*Stichprobengröße x n-Versuchsdurchgänge

Abbildung 3: Versuchsdesign 2



*Stichprobengröße x n-Versuchsdurchgänge

Abbildung 4: Versuchsdesign 3

Beim Versuchsdesign 1 betrug die Bildwiederholungsrate 20 fps und beim Versuchsdesign 2 16 fps. Die für die beiden Versuchsdesigns aufgestellten Versuchshypothesen sind gleich und sagen aus, dass die Schweißer mit der natürlichen Sicht eine genauere Hand-Auge-Koordination haben als die Nicht-Schweißer, weil sie im beruflichen Umfeld diese durch die Handführung beim Schweißen der Nähte trainieren. Eine weitere Versuchshypothese postuliert den Einfluss des HMD auf die Hand-Auge-Koordination sowohl bei der Gruppe der Schweißer, als auch der Nicht-Schweißer mit der Erwartung von einer Verschlechterung der Hand-Auge-Koordinationsgenauigkeit (definiert durch den Abweichungsfaktor) verglichen mit der Leistung ohne visuelle Sichtbeeinträchtigung. Zusätzlich wird bei diesem Versuchsdesign die Hypothese der Wechselwirkungseffekte überprüft.

Bei dem Versuchsdesign 3 handelt sich um einen Vergleich zweier Stichproben (Schweißer, die am Versuch 1 und 2 teilgenommen haben) unter zwei verschiedenen Bildwiederholungsraten (20 fps und 16 fps).

2.2 Versuchspersonen

An den beiden Versuchen nahmen insgesamt 39 Probanden im Alter zwischen 16 und 56 Jahren teil, dabei 20 unter Versuchsdesign 1 (zehn Schweißer und zehn Nicht-Schweißer) und 19 unter Versuchsdesign 2 (neun Schweißer und zehn Nicht-Schweißer).

2.3 Versuchsaufgabe

Zur Ermittlung des Abweichungsfaktors wurde eine Aufgabe zur Nachzeichnung von Linien gewählt. Bei dieser Versuchsaufgabe sollten die Versuchspersonen die auf einer Berührungsoberfläche erscheinenden Linien mit einem elektromagnetischen Stift möglichst genau und möglichst schnell nachzeichnen. Dazu wurden gerade und rechtwinklig geknickte Linien in zufälliger Reihenfolge und Ausrichtung auf der Berührungsoberfläche präsentiert, die dann von den Versuchspersonen insgesamt 30 Mal für jede Bedingung nachgezeichnet werden sollten. Dabei wurde die Abweichungsfläche zwischen vorgegebener und nachgezeichneter Linie als Integral berechnet und durch die Gesamtlänge der vorgegebenen Linie dividiert, um den standardisierten Abweichungsfaktor (AF) zu bilden. Zwecks statistischer Auswertung wurden die erhobenen Daten für jede Versuchsbedingung gemittelt.



Abbildung 5: Versuchsaufgabe

Diese sehr einfache Methode erlaubt eine ziemlich präzise Messung der Hand-Auge-Koordination, sowohl in Bezug auf Genauigkeit als auch Bearbeitungszeit. Die Versuchsaufgabe entspricht der Handführung bei vielen realen Arbeitsaufgaben (vgl. Schweißen, Schneiden, Fräsen).

2.4 Ergebnisse

Versuchsdesign 1 (20 fps). Die Varianzanalyse mit Messwiederholung (Design mit Zwischensubjektfaktor) hat mit $F(1, 18) = 42.293$, $p = 0.0001$ (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$) einen signifikanten Effekt des Innersubjektfaktors *HMD* und mit $F(1, 18) = 42.293$, $p = 0.035$ einen signifikanten Effekt des Zwischensubjektfaktors *Berufserfahrung (BE)* $F(1, 18) = 5.214$, $p = 0.0001$ aufgedeckt. Die Wechselwirkung *HMD* \times *BE* fällt mit $p > 0.05$ nicht signifikant aus.

Die Gruppe der Schweißer wies bei der Nachzeichnung von Linien mit natürlicher Sicht eine um 34% bessere Leistung auf, als die Gruppe der Nicht-Schweißer. Mit $p = 0.059$ liegt jedoch dieser Leistungsunterschied knapp über der statistischen Signifikanzgrenze. Bei der Nachzeichnung der Linien mit Videosicht erhöht sich der Leistungsunterschied auf 38% zwischen den beiden Gruppen und fällt statistisch signifikant aus ($t = -2.204$, $p = 0.048$).

Innerhalb der Gruppe wurde eine Verschlechterung der Hand-Auge-Koordinationsleistung mit der videobasierten Sicht im Vergleich zu der natürlichen Sicht um 51% ($t = 6.266$, $p = 0.000 < 0.001$) bei den Schweißern und um 55% ($t = 4.471$, $p = 0.002 < 0.05$) bei den Nicht-Schweißern beobachtet (Abbildung 6).

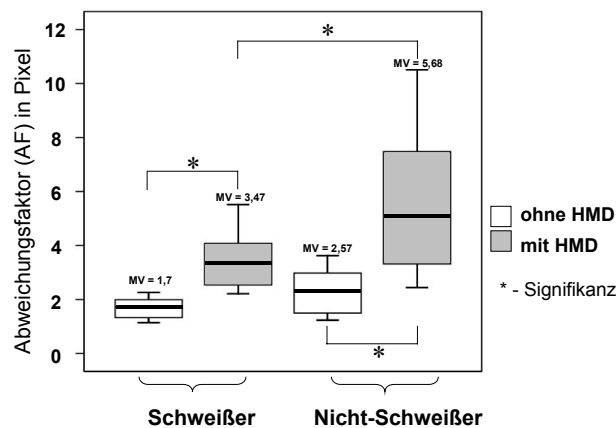


Abbildung 6: Boxplots (Median, Quartile, Extremwerte) des Abweichungsfaktors in Abhängigkeit von der beruflichen Erfahrung und Sichtbedingungen

Versuchsdesign 2 (16 fps). Durch die Varianzanalyse mit Messwiederholung (Design mit Zwischensubjektfaktor) wurde mit $F(1, 17) = 88.644$, $p = 0.0001$ ein signifikanter Effekt des Innersubjektfaktors *HMD* und mit $F(1, 17) = 7.025$, $p = 0.017$ eine signifikante Wechselwirkung *HMD* \times *BE* ermittelt. Der Effekt des Zwischensubjektfaktors *BE* war mit $p > 0.05$ nicht signifikant.

Bei der Nachzeichnung von Linien mit natürlicher Sicht erbrachte die Gruppe der Schweißer eine um 13% bessere Leistung als die Gruppe der Nicht-Schweißer. Mit $p > 0.05$ ist dieser Leistungsunterschied jedoch statistisch nicht signifikant. Mit Videosicht erhöht sich der

Leistungsunterschied zwischen den beiden Gruppen auf 37% und ist statistisch signifikant ($t = 2.191$, $p = 0.04$).

Innerhalb der Gruppe wurde bei der Hand-Auge-Koordination ein Leistungsabfall mit der videobasierten Sicht um 51% ($t = 6.292$, $p = 0.001$) bei den Schweißern und um 65% ($t = 6.042$, $p = 0.001$) bei den Nicht-Schweißern beobachtet (Abbildung 7).

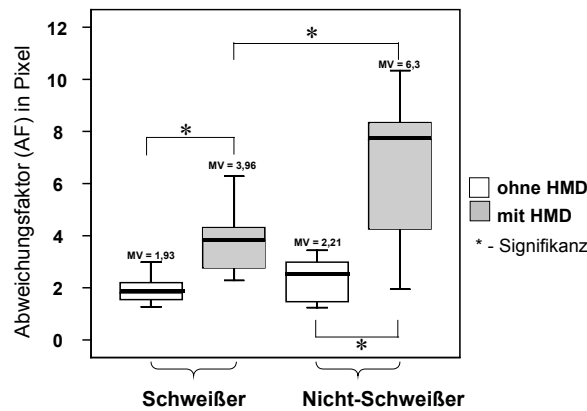


Abbildung 7: Boxplots (Median, Quartile, Extremwerte) des Abweichungsfaktors in Abhängigkeit von der beruflichen Erfahrung und Sichtbedingung

Versuchsdesign 3 (20 fps; 16 fps). Diese Daten beziehen sich auf den Vergleich von zwei Gruppen von Schweißern, die jeweils den Prototyp mit 20 fps oder den mit 16 fps getestet haben (Zwischensubjektfaktor FPS) (Abbildung 8).

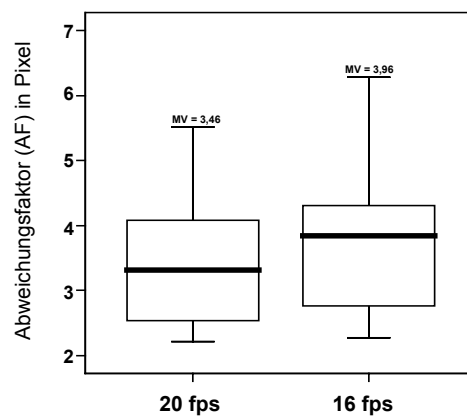


Abbildung 8: Boxplots (Median, Quartile, Extremwerte) der Bearbeitungsgenauigkeit in Abhängigkeit von der Bildwiederholungsrate und Sichtbedingung

Mittelwertevergleich mit Hilfe von t-Tests (Normalverteilungsvoraussetzung mit $p > 0.05$ bei Kolmogorov-Smirnov Test erfüllt) zeigte mit $t = 2.203$, $p = 0.059$ ein nicht signifikantes Ergebnis in Bezug auf die Bearbeitungsgenauigkeit.

Subjektive Bewertung. Die subjektive Bewertung bezieht sich auf folgende Fragen, die in Form eines Fragebogens den Benutzern gestellt wurden:

- Wie würden Sie Ihre 3D-Wahrnehmung mit Helm im Gegensatz zu Ihrer 3D-Wahrnehmung ohne Helm bewerten?
- Wie würden Sie Ihre Sehschärfe mit Helm im Gegensatz zu Ihrer Sehschärfe ohne Helm bewerten?
- Wie würden Sie Ihre Leistung mit Helm im Gegensatz zu Ihrer Leistung ohne Helm bewerten?
- Können Sie sich vorstellen mit diesem Helm zu schweißen?
- Würde dieser Helm für Sie eine Arbeitserleichterung beim Schweißen darstellen?
- Können Sie sich vorstellen, den Helm zu Ausbildungszwecken zu nutzen?

Zur Antwort nutzten die Probanden eine Skala mit den Werten: 1 (mit Helm sehr viel schlechter bzw. auf gar keinen Fall) bis 7 (mit Helm sehr viel besser bzw. auf jeden Fall) mit einem mittleren Wert von 4 (gleich bzw. unentschieden).

Für die statistische Analyse der subjektiven Daten wurde der nichtparametrische Man-Whitney-U-Test zum Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben angewandt. Die Bewertung der räumlichen Wahrnehmung war beim System mit 20 fps signifikant besser als beim System mit 16 fps (Man-Whitney-U = 91, $p = 0.005 < 0.01$). Die Bewertung weiterer Merkmale fiel beim System mit höherer Bildwiederholungsrate ebenfalls besser aus, mit $p > 0.05$ wird der Unterschied aber als statistisch nicht signifikant bewertet.

Insgesamt wurden die Fragen, die sich auf die aktuelle Situation und den Stand der Technik beziehen (räumliche Wahrnehmung, Sehschärfe, eigene Leistung) eher negativ bewertet (Werte kleiner als 4), wobei die Antworten bezüglich der Zukunft des AR-Schweißschutzhelmes etwas positiver ausfallen, insbesondere bei dem System mit 20 fps.

3 Diskussion

Ein Ziel dieser experimentellen Untersuchung war es festzustellen, ob eine Erhöhung der Bilderanzahl pro Sekunde um 4 fps signifikant zur Erhöhung der Hand-Auge-Koordinationsleistung sowie zur Benutzerakzeptanz beiträgt. Ein weiteres Untersuchungsziel war der Vergleich zwischen zwei Gruppen – den Schweißern, für die das System bestimmt ist, und den Nicht-Schweißern als Kontrollgruppe. Zusätzlich wurde die Leistung unter jeder der Versuchsbedingungen mit der natürlichen Arbeitsleistung ohne Display verglichen.

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Einfluss des HMDs auf die Nachzeichnungsgenauigkeit für alle Versuchsbedingungen. Es wurde ein Leistungsabfall von 51% bis zu 65%

mit dem HMD in Bezug auf Hand-Auge-Koordination beobachtet. Dies ist dadurch zu erklären, dass die videobasierte Sicht viele Einflussfaktoren hat (Biocca & Rolland 1998; Park et al. 2005), die das visuell-motorische System „belasten“. Die Schweißer konnten ohne HMD signifikant bessere Hand-Auge-Koordinationsleistungen erzielen als die Gruppe der Nicht-Schweißer. Dies bestätigte die Hypothese, dass die Schweißer über eine berufsbedingt bessere Handpräzision verfügen als die Probanden, die kein spezielles Hand-Auge-Koordinationstraining ausübten (Nicht-Schweißer). Durch die visuelle Kontrolle der Motorik mit videobasierter Sicht (Bedingung mit HMD) hat sich die Hand-Auge-Koordinationsleistung der Schweißer insgesamt weniger verschlechtert als die der Nicht-Schweißer. Die Schweißer arbeiten unter erschwerten visuellen Bedingungen, indem sie einen Schweißhelm mit verdunkelter Sicht während des Arbeitsprozesses tragen. So haben sie wenig an visuellem „Feedback“ während der feinmotorischen Steuerung der Hände. Mit anderen Worten sind die Schweißer beruflich trainiert, die Hand auch unter den erschwerten visuellen Bedingungen präzise zu führen. Diese Faktoren begründen die Unterschiede zwischen den Gruppen der Schweißer und Nicht-Schweißer in Bezug auf die Hand-Auge-Koordinationsleistung und sagen aus, dass die besonderen motorischen Fertigkeiten bei den AR-unterstützten Arbeitsabläufen mit hoher Präzisionsgenauigkeit von Vorteil sind.

Die Auswertung der Bearbeitungszeiten zeigt einen umgekehrten Trend der Ergebnisse verglichen mit den Genauigkeitsdaten. Dies lässt sich auf den aus der Literatur bekannten „Speed-Accuracy Trade-Off“ (Woodworth 1899; Kim et al. 1996) zurückführen, indem mit steigendem Zeitverbrauch die Genauigkeit steigt und umgekehrt.

Es konnte kein signifikanter Effekt der Erhöhung der Bildwiederholungsrate von 16 fps auf 20 fps in Bezug auf die Leistung nachgewiesen werden. Die Benutzerbefragung zeigte aber, dass dies zu einer deutlichen Steigerung der Benutzerakzeptanz des vorgestellten AR-Systems führte, was eine äußerst wichtige Rolle bei der Einführung von neuartigen Technologien in der Industrie spielt. Besonders positiv wurde die Möglichkeit des AR-Schweißschutzhelmes bei der Ausbildung der Schweißer bewertet.

Aufgrund der technischen Einschränkungen des prototypischen AR-Schweißschutzhelmes war es nicht möglich, weitere Bildwiederholungsraten zu testen. Dies ist jedoch in weiteren Untersuchungen nötig, um den Einfluss der Bildwiederholungsrate auf die Hand-Auge-Koordination genauer zu untersuchen.

Ebenso stellt sich die Frage, wie gering sollte die zeitliche Latenz sein, um eine ausreichende Qualität der visuell-motorischen Koordination zu gewährleisten, und ab welchem Genauigkeitsniveau kann die Leistung als ausreichend für die Erzeugung von Schweißnähten bezeichnet werden. Im Idealfall sollte die Hand-Auge-Koordination mit videobasierter Sicht gleich der Koordination mit natürlicher Sicht oder ihr sogar überlegen sein. Da dieses Ziel zurzeit noch bei weitem nicht erreichbar ist, ist es nötig, die Systemkomponenten im Sinne der ergonomischen Gestaltung so zu optimieren, dass Präzisionsaufgaben mit videobasierter Sicht bei ausreichender Arbeitssicherheit und Qualität durchzuführen sind.

Aus Sicherheitsgründen war es in dieser Projektphase noch nicht möglich, den Schweißhelm unter realen Bedingungen (beim Schweißen) mit mehreren Probanden zu testen. Laboruntersuchungen haben den Nachteil, dass die Störvariablen, die unter normalen Arbeitsbedingungen entstehen würden, künstlich „ausgeschaltet“ werden und sich dadurch die Generalisierbarkeit verringert. Abgesehen davon liefern die Ergebnisse der Laboruntersuchungen wichti-

ge Gestaltungshinweise, wenn sie methodisch korrekt durchgeführt werden. Durch kontrollierbare Versuchsbedingungen (z.B. konstante Beleuchtung, Belüftung, Tageszeit etc.) lassen sich Störvariablen minimieren, und somit werden die Trends der abhängigen Variablen viel ersichtlicher, sogar bei geringeren Stichproben.

Literaturverzeichnis

- Adelstein, B. D.; Elis, S. R.; Jung, J. Y. (2000): Discriminability of Prediction Artifacts in a Time-Delayed virtual Environment. In: Proceedings of the IEA 2000 / HFES 2000 Congress. San Diego: *Human Factors and Ergonomics Society, 2000*, S. 499-502
- Biocca, F. A.; Rolland, J. P. (1998): Virtual Eyes Can Rearrange Your Body: Adaption to Visual Displacement in See-Through Head-Mounted Displays. In: *Presence*, Band 7 (1998), Nr. 3, S. 262-277.
- Hillers, B.; Aiteanu, D.; Tschirner, P.; Park, M.; Gräser, A.; Balazs, B.; Schmidt, L. (2004): TEREBES: Welding Helmet with AR capabilities. In: Tagungsband: International Status Conference „Virtual and Augmented Reality“. Februar 19-20, 2004, Leipzig.
- Kim, K.; McMillan, M.; Zelaznik, H. N. (1996): Behavioral analysis of trajectory formation: The speed – accuracy trade-off as a tool to understand strategies of movement control. In: H. N. Zelaznik, (Hrsg.): *Advances in Motor learning and control*, chapter 1. Champaign (IL).
- Park, M.; Schmidt, L.; Luczak, H. (2005): Changes in Hand-Eye-Coordination with Different Levels of Camera Displacement from Natural Eye Position. In: 10th International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing: Agility and Hybrid Automation – HAAMAHA 2005, July 18th-21st, San Diego, CA, USA.
- Renkewitz, H.; Conradi, J. (2005): On the effects of tracking errors and latency for Augmented Reality interaction. In: Kuhlen, T.; Kobbelt, L.; Müller, S. (Hrsg.): *Virtuelle und Erweiterte Realität*, 2. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR. Aachen, S. 95-106.
- Woodworth, R. S. (1899): The Accuracy of voluntary movement. In: *Psychological Review* 3 (1899), S. 1-114.