

Gestaltungsanforderungen an dreidimensionale Schutzräume für Fertigungszellen mit Mensch-Roboter-Interaktion – Eine Pilotstudie in virtueller Realität –

Gunnar HOYER, Michael HAUKE, Andy LUNGFIEL, Peter NICKEL,
Michael HUELKE und Thomas BÖMER

*Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin*

Kurzfassung: Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) werden zur Unfallverhütung an Arbeitsplätzen mit Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) eingesetzt. Mit innovativen dreidimensionalen BWS lassen sich Schutzräume optimiert an Gefahrenbereiche anpassen. Form und Größe von Schutzräumen haben Einfluss auf ergonomische Aspekte und betriebliche Abläufe. Mögliche Auswirkungen zweier unterschiedlicher Schutzraumgeometrien auf die Arbeitssicherheit deuten sich aus einer Pilotstudie in gemischter Realität an. Vor Beginn einer systematischen Untersuchung von Geometrien und Markierungen in Schutzräumen sind noch Veränderungen an den Aufgabenstellungen und am Arbeitsprozess in der MRI vorzunehmen.

Schlüsselwörter: Arbeitsschutz, Mensch-Roboter-Interaktion, Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen, 3D-Schutzräume.

1. Einleitung

Die Installation von Schutzeinrichtungen ist eine wichtige Gestaltungskomponente industrieller Arbeitsplätze mit Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) und befindet sich immer im Spannungsfeld zwischen garantiertem Arbeiterschutzes und höchstmöglicher Systemausnutzung (Oberer-Treitz et al. 2011). Wenn die mit den Gefährdungen verbundenen Risiken einer MRI nicht konstruktiv beseitigt werden können, dann müssen ergänzende technische Maßnahmen, wie z. B. das Installieren von berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS; vgl. DIN EN ISO 10218-1), ergriffen werden. Angemessene Sicherheitsabstände, die nach DIN EN ISO 13855 berechnet werden können, gewährleisten, dass die BWS das Eindringen in den Gefahrenbereich früh genug erkennt, um die Gefährdungen zu neutralisieren (z. B. durch Stillsetzen eines Roboters), bevor der Mitarbeiter die Gefahrenquelle erreichen kann.

Mit 3D-Kamerasystemen als BWS lassen sich komplexe Schutzräume in dreidimensionaler Geometrie einrichten, die in Größe und Form den Konturen von Gefahrenquellen anpassbar und dann sogar flexibel wählbar sind. Aus der Perspektive des Arbeitsschutzes erscheinen diese neuen Möglichkeiten des Schutzes der Mitarbeiter vor Gefährdungen vorteilhaft. Vorteile für die Betriebsabläufe können sich sowohl aus produktionstechnischer Sicht (z. B. vergrößerter gefahrenfreier Verfügbarkeitsbereich) als auch aus ergonomischer Sicht (z. B. verbesserte Einsicht in Gefahrenbereiche des Fertigungsprozesses) ergeben. Solche neuen Möglichkeiten von Schutzräumen lassen sich allerdings nur dann sinnvoll ausschöpfen, wenn sie auch für den Mitarbeiter am Arbeitsplatz wahrnehmbar und in Form eines operativen Abbildsystems (Hacker 2005) vorstellbar sind. Als bedeutsam erscheinen dabei Bedingungen wie z. B. die Wahl von Formen und Größen sowie von Markierungen dieser Geome-

trien. Informationen zu diesem Themenbereich werden auch im Projekt „Schutzrichtungen mit 3D-Schutzräumen an Maschinen: Überprüfung von Sicherheitsabständen mit VR-Methoden“ (IFA5116, www.arbeitsschutz-forschung.de) des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) zusammengetragen, das vom Fachausschuss Maschinenbau, Hebezeuge, Hütten- und Walzwerkanlagen initiiert wurde. In einer der Studien zum Projekt wird daher der Frage nachgegangen, inwieweit sich unterschiedliche Geometrien und Markierungen von Schutzräumen auf die Sicherheit einer MRI im Kontext industrieller Fertigungsprozesse auswirken.

2. Methode

Für die Pilotstudie wurde im SUTAVE-Labor (Safety and Usability through Applications in Virtual Environments) des IFA (www.dguv.de/ifa/sutave) eine industrielle Fertigungszelle zur MRI in gemischter Realität aufgebaut. Dort können Gefahrensituationen realitätsnah simuliert werden, ohne Probanden einer echten Gefährdung auszusetzen. Außerdem lassen sich unterschiedliche Geometrien und Markierungen für die Arbeitsszenarien leicht nutzen und nach Bedarf wechseln. Mit der hier vorgestellten Pilotstudie wird die eigentliche Studie vorbereitet und es werden lediglich Auswirkungen der Variation von Geometrien untersucht. In der Fertigungszelle wurde über verschiedene Arbeitsstationen hinweg ein Bestückungsprozess simuliert, bei der an einer zentralen Station ein Proband und ein virtueller Roboter in zeitlicher Trennung an einem realen motorbetriebenen Drehtisch einen Montagerahmen bestücken. Während der Aufgabenbearbeitung des Probanden am Drehtisch sind Roboter und Drehtisch sicher stillgesetzt. Während sich der Roboter bewegt oder der Drehtisch rotiert (z. B. Gefährdung durch bewegliche Maschinenteile), muss sich der Proband außerhalb des von der BWS überwachten Schutzraumes aufhalten. In dieser Zeit bereitet der Proband den nächsten simulierten Fertigungszyklus vor: er bearbeitet außerhalb des Schutzraumes zunächst eine Wiedererkennungsaufgabe, um das Muster für die Bestückung zu erfassen. Anschließend entnimmt er notwendige Bauteile dem Materialdepot, wartet auf die Freigabe, den Gefahrenbereich betreten zu dürfen (signalisiert über eine Ampel), und bestückt am Drehtisch das reale Muster im Montagerahmen als Reproduktionsaufgabe. Beim Verlassen des Drehtisches entnimmt der Proband das fertig bearbeitete Muster des vorherigen Zyklus, legt es beim Materialdepot ab und gibt am Bedienpult die nächste Drehbewegung des Drehtisches mit anschließender virtueller Bearbeitung durch den Roboter frei (vgl. Abbildung 1). Zur Absicherung von Gefährdungen durch Drehtisch und Roboter sollen unterschiedliche Geometrien und unterschiedliche Markierungsarten von Schutzräumen entwickelt und vergleichend untersucht werden. Als kontrastreiche Grundformen von Geometrien erschienen für eine erste orientierende Untersuchung ein Quader und eine Kugel geeignet, um sich später betrieblichen Varianten von Raumgeometrien weiter anzunähern. Unter diesen Bedingungen sollte eine erste Einschätzung zu Auswirkungen auf die Sicherheit und die Leistung im Arbeitssystem und die Beanspruchung der Probanden in der MRI gewonnen werden.

Beide Probanden der Pilotstudie bearbeiteten die Aufgaben in der Fertigungszelle zunächst unter der Bedingung der Absicherung über eine quaderförmige und danach über eine kugelförmige Schutzraumgeometrie oder umgekehrt. Unter jeder Bedingung wurden 20 Montagerahmen über ca. 30 Minuten bestückt. Vor, zwischen und nach der Aufgabenbearbeitung unter unterschiedlichen Schutzraumgeometrien wur-

den Informationen u. a. zur Immersion, zum Beanspruchungs- und Präsenz-Empfinden sowie zur Bewertung der MRI mithilfe verschiedener Fragebögen erfasst. Während der Aufgabenbearbeitung wurden Antwortzeiten und Fehler aus der Bearbeitung der Wiedererkennung- und Reproduktionsaufgabe erfasst und Verletzungen der Schutzräume dokumentiert.

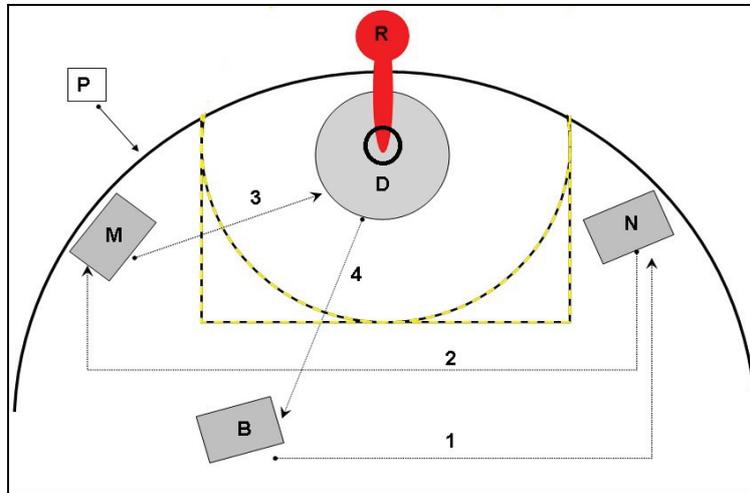


Abbildung 1: Aufbau des MRI-Arbeitsplatzes (B = Bedienpult; M = Materialdepot; P = VR-Projektionswand; D = Drehtisch; R = Roboter; N = Notebook). Die Pfeile geben die Laufwege an. Die eckige und runde Markierungslinie zeigt die beiden Schutzraumgeometrien von oben. Der Kreis stellt die punktförmige Gefahrenquelle dar

3. Auswertungen zur Pilotstudie

Die Daten der Pilotstudie erlauben allenfalls einen Einblick in mögliche Ergebnisse zu variierten Untersuchungsbedingungen. Sie stellen allerdings wertvolle Informationen zur Vorbereitung der eigentlichen Studie dar, mit der auch Gestaltungsanforderungen an Schutzräume für den praktischen Einsatz im Betrieb abgeleitet werden sollen. Zunächst wird deutlich, dass sich die Dauer eines simulierten Fertigungszyklus (in Sekunden) bei quaderförmigem (Q) oder kugelförmigem (K) Schutzraum nicht nennenswert unterscheidet ($M_Q = 81,1$, $SD_Q = 6,5$; $M_K = 88,7$, $SD_K = 7,2$). Die Wiedererkennungsaufgabe im ersten Teil des Fertigungszyklus bearbeitet der Proband außerhalb des Schutzraumes. Ein Einfluss aus den beiden Schutzraumgeometrien lässt sich weder für die Antwortzeiten in Sekunden ($M_Q = 6,5$, $SD_Q = 1,0$; $M_K = 8,0$, $SD_K = 2,8$) noch für den Anteil korrekten Wiedererkennens ($M_Q = 97,5\%$, $SD_Q = 2,5\%$; $M_K = 90\%$, $SD_K = 5\%$) ausmachen. Die Leistungsdaten aus der Reproduktionsaufgabe deuten ebenso unwesentliche Unterschiede zwischen den Bedingungen an, sowohl für die Bestückungszeit in Sekunden ($M_Q = 36,3$, $SD_Q = 5,3$; $M_K = 37,6$, $SD_K = 4,7$) als auch für den Anteil korrekter Reproduktionen ($M_Q = 96\%$, $SD_Q = 3\%$; $M_K = 94\%$, $SD_K = 4\%$). Die Aufgabenbearbeitung bewegt sich damit insgesamt auf einem hohen Niveau. Daher verwundert es umso mehr, dass trotz der ausgesprochen vagen Datenlage die Anzahl von Schutzraumverletzungen je Fertigungsabschnitt einen Unterschied für die beiden Schutzraumgeometrien nahelegt ($M_Q = 28$, $SD_Q = 5$; $M_K = 2,5$, $SD_K = 1,5$). Ein Eindringen in den Schutzraum setzte Roboter und Drehtisch still und führte zur Unterbrechung der Aufgabenbearbeitung durch den Roboter am Drehtisch. Auch wenn dadurch eine Störung im Fertigungs- oder Handlungsablauf des Probanden erwartet werden konnte, so zeigten sich die Daten aus

den Aufgaben zur Bestückung unbeeinflusst (s. o). Die Befragung zur MRI nach jedem Fertigungsabschnitt ließ erkennen, dass die Fertigungsprozesse weder unter der quaderförmigen noch unter der kugelförmigen Schutzraumgeometrie als gefährlich wahrgenommen wurden. Das deutet sich auch in den Daten zur empfundenen Beanspruchung (NASA-TLX, Hart & Staveland 1988) an, die sich ohne Unterschiede zwischen den Schutzraumgeometrien auf mittlerem Niveau befinden ($M_Q = 45,8$, $SD_Q = 1,7$; $M_K = 50$, $SD_K = 5$). Ursachen für mangelnde Unterschiede in den Leistungsdaten könnten neben den wenigen Versuchsdurchgängen auch die mangelnde Sensitivität der Bestückungsaufgabe sein, einen möglichen Einfluss aus der Geometrie abzubilden. Das Eindringen in den Schutzraum führte nach den Befragungen weder zu spürbaren negativen Konsequenzen für den Probanden noch zu als gefährlich wahrgenommenen Situationen.

4. Diskussion

Die Ergebnisse der Pilotstudie legen die Vermutung nahe, dass an Gefahrenquellen und Arbeitsabläufe angepasste Schutzräume sich auf die Häufigkeit der Schutzraumverletzungen auswirken und damit die Arbeitssicherheit mit beeinflussen könnten. In der geplanten Hauptstudie wäre zu prüfen, ob sich solche Aussagen mit Daten einer größeren Stichprobe stützen lassen. Auch der Einfluss durch die Art der Schutzraummarkierung, z.B. durch einen vorgelagerten Warnraum oder Markierungen der Schutzraumgrenzen am Boden, könnte untersucht werden. Für die Hauptstudie sind noch Veränderungen an den Aufgabenstellungen und am Arbeitsprozess in der MRI vorzunehmen. So könnte man sich vorstellen, den Arbeitsprozess des Roboters prominenter in den Fertigungszyklus einzubinden, damit die Gefährdungen deutlicher wahrgenommen werden können. Die Aufgaben des Probanden in der MRI sollten einerseits komplexer und andererseits sensitiver gegenüber Schutzraumverletzungen werden.

Wenn sich herausstellen sollte, dass die Gestaltung und Wahrnehmung von Schutzräumen durch ihre Geometrie und Markierung beeinflusst wird, wären auch Auswirkungen auf Regelungen zur Auslegung von Sicherheitsabständen (z. B. Bewegung zur Gefahrenquelle) zu erwarten. Dabei wäre zu diskutieren, ob und wie das bisher gültige Verfahren zur Ermittlung von Sicherheitsabständen (DIN EN ISO 13855), welches auf Basis von zweidimensional wirkenden BWS entwickelt wurde, auf neuartige dreidimensional wirkende BWS angepasst werden sollte.

5. Literatur

1. DIN EN ISO 10218-1: 2009, Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen. Berlin: Beuth.
2. DIN EN ISO 13855: 2010, Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen. Berlin: Beuth.
3. Hacker, W. 2005, Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit, 2. Auflage. Bern: Huber.
4. Hart, S.G. & Staveland, L.E. 1988, Development of the NASA task load index (TLX): Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), Human mental workload. Amsterdam: North-Holland, 139-183.
5. Oberer-Treitz, S., Puzik, A. & Verl, A. 2011, Sicherheitsbewertung der Mensch-Roboter-Kooperation, wt Werkstattstechnik online, 629-631.