

Variabilität der Annäherungsgeschwindigkeiten des Menschen an Gefahrenstellen unter Berücksichtigung der Zugänglichkeitsbedingungen

Karl KLÖBER, Carolin KREIL, Martin SCHMAUDER

*Professur für Arbeitswissenschaft, TU Dresden
Dürerstraße 26, D-11062 Dresden*

Kurzfassung: Eine Möglichkeit zur Absicherung unvermeidbarer Gefahrenstellen bilden nicht trennenden Schutzeinrichtungen, wie beispielsweise Lichtschranken. Für ihre Wirksamkeit sind ausreichend bemessene Sicherheitsabstände erforderlich, welche bislang anhand der EN ISO 13855 unter Verwendung einer konstanten Bewegungsgeschwindigkeit des Menschen und starken Vereinfachungen hinsichtlich verschiedener Arbeitsbedingungen berechnet werden. Im Rahmen einer Pilotstudie erfolgte diesbezüglich eine erste differenzierte Untersuchung der tatsächlichen Annäherungsgeschwindigkeit bei Vorliegen von Hindernissen mit Hilfe eines Inertialsensormesssystems. Neben den unterschiedlichen Wirkungen von Zugangsbedingungen zeigen die Ergebnisse, dass die Normvorgaben den aktuellen Erfordernissen der Praxis nur unzureichend gerecht werden.

Schlüsselwörter: EN ISO 13855:2010-10, Menschliche Annäherungsgeschwindigkeit, Sicherheitsabstand, Lichtschranken, Zugangsbedingungen, Inertialsensormesssystem

1. Einführung und Problemstellung

Jährlich kommt es allein in Deutschland zu über 36.000 meldepflichtigen Unfällen an stationären Industriemaschinen (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2018). Dies ist aus Sicht der Arbeitswissenschaft bzw. des Arbeitsschutzes ein Umstand, den es in Bezug auf eine humane und wirtschaftliche Arbeitsgestaltung zu verbessern gilt.

So sollten Gefahren, die von Maschinen ausgehen, möglichst konstruktiv beseitigt oder minimiert werden. Reichen konstruktive Lösungen allerdings nicht aus, sieht die EU-Maschinenrichtlinie bzw. das Produktsicherheitsgesetz zur weiteren Senkung des Gefahrenpotentials Schutzeinrichtungen vor. Darunter werden technische Schutzmaßnahmen verstanden, die zwischen dem Gefahrenbereich und dem Benutzer angeordnet werden. Eine Unterteilung kann grob in trennende und nicht trennende Schutzeinrichtungen erfolgen. Trennende Schutzeinrichtungen verhindern den Zugriff bzw. Zutritt von Personen zum Gefahrenbereich. Nicht trennende Schutzeinrichtungen sichern den Gefahrenbereich auf andere Art ab. So besteht eine Möglichkeit zur Absicherung unvermeidbarer Gefahrenstellen mittels nicht trennender Schutzeinrichtungen darin, Lichtschranken zu verwenden, die bei Lichtstrahlunterbrechung eine Abschaltreaktion auslösen. Für eine Bereichsabsicherung können mehrere Lichtschranken eingesetzt werden. Lichtgitter erkennen, je nach Auflösung, bereits Finger oder Hände und werden für die Gefahrstellenabsicherung an Maschinen eingesetzt (z. B. an Pressen der Metallverarbeitung).

Alle nicht trennenden Schutzeinrichtungen sind auf ausreichend bemessene Sicherheitsabstände angewiesen, um wirksam zu sein. Als allgemeine Beziehung wird für den Sicherheitsabstand in der EN ISO 13855:2010 - *Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*, folgende Formel angegeben, welche es zu berücksichtigen gilt:

$$S = (K \times T) + C \quad (1)$$

Dabei ist

- S der Mindestabstand [mm],
- K die Annäherungsgeschwindigkeit des Körpers oder eines Körperteils [mm/s] (2,0 m/s für Hand- und Fingerschutz ($S \leq 500$ mm); 1,6 m/s für Greif- und Schreitgeschwindigkeiten (für $S > 500$ mm)),
- T die gesamte Reaktionszeit des Systems [s], inklusive der Maschinennachlaufzeit, der Reaktionszeit der Schutzeinrichtung etc.,
- C der zusätzliche Abstand vor der Schutzeinrichtung [mm] (dazu finden sich in der EN ISO 13855 für verschiedene Bedingungen einzuhaltende Werte).

Der gegenwärtigen Berechnung von Sicherheitsabständen unter Verwendung einer konstanten Bewegungsgeschwindigkeit des Menschen bzw. von einzelnen Gliedmaßen liegt eine starke Vereinfachung zugrunde. Zudem liegen bisher für die angegebenen Bewegungsgeschwindigkeiten des Menschen keine aktuellen Quellen vor, die ausreichend wissenschaftlich abgesichert sind. Gleichwohl eine Verwendung der Werte zu einer Unfallvermeidung führt, werden sie den aktuellen Erfordernissen der Praxis (u. a. hinsichtlich einer möglichst minimalen Hallennutzungsfläche bei Verwendung von Lichtschranken) nur unzureichend gerecht. Um die Annäherungsgeschwindigkeit der Mitarbeiter zu verringern, kommen bspw. Treppen, Absätze und Antirutschplatten zum Einsatz. Die durch diese Maßnahmen veränderte Annäherungsgeschwindigkeit kommt bei den aktuellen Sicherheitsabstandsberechnungen allerdings nicht zum Tragen.

2. Zielstellung

An der Professur für Arbeitswissenschaft der TU Dresden sollten aufgrund der beschriebenen Problemstellung in einer vom VDW (Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken) initiierten Pilotstudie Annäherungsgeschwindigkeiten des Menschen bzw. einzelner Gliedmaßen an Gefahrenstellen von Maschinen differenziert untersucht werden. Dabei fokussierte die Pilotstudie folgende Forschungsfragen:

- 1) Welche Annäherungsgeschwindigkeit hat der Mensch bzw. haben einzelne Gliedmaßen an Gefahrenstellen bei Maschinen unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen?
 - Physische Hindernisse (Stufen, Absätze)
 - Bodenbeschaffenheit (Rauheit)
 - Psychischer Einfluss (Räumliche Verengung)
 - Mit der Tätigkeit verbundene Reflexbewegungen
 - Personenbezogene Bedingungen (Alter, Körpergröße, Geschlecht)
- 2) Welche Wirkungen haben unterschiedliche Zugangsbedingungen auf die Annäherungsgeschwindigkeit an berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen?
- 3) Bedarf es der Erarbeitung differenzierter Werte für die Praxis?

3. Vorgehensweise

3.1 Versuchsaufbau und -szenarien

Die Pilotstudie wurde zur Gewährleistung einer guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zur Kontrolle von Störvariablen (u. a. Lärm, Ablenkung, Verunreinigungen am Boden) als Laborstudie mit einem dafür ausgelegten Versuchsaufbau konzipiert. Gemäß der Anforderung, den in der Praxis vorliegenden Bedingungen an Maschinen gerecht zu werden, wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Industrieboden (Bodenmaterial: Steinholz; Rutschhemmung R9),
- vorschriftsgemäße Umgebung (kein rutschiger Boden),
- physische Hindernisse: zwei- und vierstufige Treppe (normgerecht; tlw. kürzerer Auftritt als in Norm vorgegeben, ohne und mit Rutschhemmung R13); Bodenabsatz bzw. Bodenrost (Industriearausführung, Rutschhemmung R11),
- begrenzter Auslaufweg (1,4 m),
- räumliche Verengung auf 0,8 m und 1,2 m,
- Aufnahme von Handreflexbewegungen mit der dominanten Hand.

In Abbildung 1 sind zwei der insgesamt 18 Versuchsszenarien dargestellt. Mit einer Stufenhöhe von insgesamt 16 cm, einem Auftritt von 30 cm und der daraus resultierenden Schrittlänge von 62 cm wurde für die Szenarien „Treppe“ eine gute Begehrbarkeit gewährleistet (vgl. DIN 18065:2015-03; Ausschuss für Arbeitsstätten 2018).

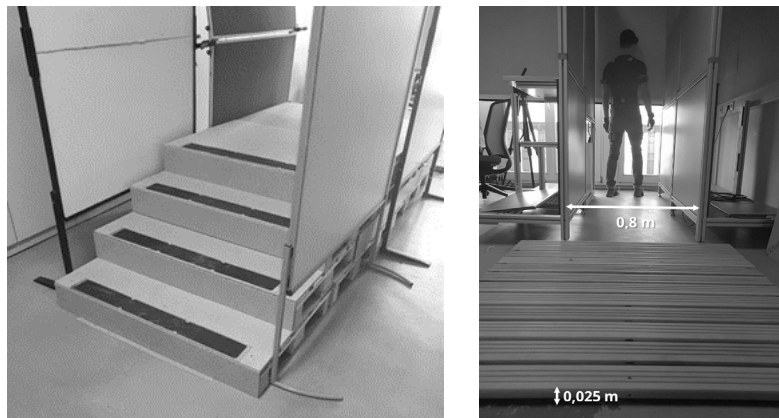


Abbildung 1: Versuchsszenario „Vierstufige Treppe mit Rutschhemmung“ (links); Versuchsszenario „Gehen mit Bodenabsatz und räumlicher Verengung“ (rechts)

Neben den unabhängigen Variablen, welche sich aus den unterschiedlichen Versuchsaufbauten ergaben, wurden als abhängige Variablen die durchschnittliche und maximale Geschwindigkeit des Menschen in m/s erfasst. Dafür wurden die Geschwindigkeiten am Körperschwerpunkt, im konkreten Fall am Becken, sowie an den Füßen und Händen gemessen. Überdies wurde je Szenario immer nur eine unabhängige Variable verändert. Im Sinne der für die Pilotstudie erforderlichen Messgenauigkeit erwies sich eine dreimalige Wiederholung jedes Versuchsszenarios als ausreichend. Die Abweichungen betragen für alle Versuchsszenarien mit Messung der Schwerpunkt-Geschwindigkeit im Mittel rund 3 %. Für Geschwindigkeitsmessungen an den Füßen bzw. Händen fielen die Abweichungen teilweise höher aus (bis zu 9 %). Als Grundlage für die Gegenüberstellung der einzelnen Messreihen diente der Mittelwert der drei aufgezeichneten Werte.

Zur Prüfung eines möglichen Zusammenhangs zwischen normaler Gehgeschwindigkeit und der Annäherungsgeschwindigkeit unter verschiedenen Einflüssen, wurde ergänzend das normale Gehverhalten der jeweiligen Probanden auf einer 10 m langen Strecke aufgenommen.

3.2 Messtechnik

Für die Untersuchungen kam das Inertialsensormesssystem Xsens MVN Awinda Biomech der Firma Xsens Technologies B.V. zum Einsatz. Es ermöglicht eine umgebungsunabhängige Ganzkörperaufnahme von menschlichen Bewegungen und basiert auf 17 kleinen, am Körper angebrachten Trägheits- und Magnetsensoren, sogenannten Motion Trackern (siehe Abbildung 2). Es gewährleistet sowohl die präzise Erfassung der Geschwindigkeit von verschiedenen Körperpunkten als auch eine 3D-Bewegungsverfolgung und -aufnahme. Eine visuelle Darstellung der Bewegung kann in Echtzeit erfolgen und aufgezeichnet werden. Laut Hersteller besteht seitens des Messsystems keine Anfälligkeit für magnetische Störungen. Neben der Hardware bietet die dazugehörige Software die Möglichkeit, die aufgenommenen Daten weiterzuverarbeiten und zu visualisieren. (Schepers et al. 2018)



Abbildung 2: Angelegtes Inertialsensormesssystem Xsens MVN Awinda Biomech

3.3 Studienpopulation

Das heterogene Probandenkollektiv setzte sich aus sieben weiblichen und neun männlichen Untersuchungsteilnehmern zusammen, welche keine körperlichen Einschränkungen aufwiesen und zwischen 18 und 65 Jahren alt waren. Das Durchschnittsalter betrug 35,5 Jahre mit einer Spannweite von 24 bis 64 Jahren. Die durchschnittliche Körpergröße der Probanden lag bei 1,78 m mit einer Spannweite von 1,65 m bis 1,93 m.

Im Hinblick auf die Untersuchung tendenzieller Einflüsse, zeigte sich, dass mit dem Erfahrungswert von 16 Probanden bereits erste signifikante Ergebnisse erzielt werden konnten. Für in der betrieblichen Praxis verwendbare Werte ist aufbauend auf dieser Pilotstudie eine umfassende Studie mit einem größeren Probandenkollektiv (und weiter differenziertem Versuchsdesign) vorgesehen.

3.4 Aufnahme und Auswertung

Mithilfe des Inertialsensormesssystems wurden Geschwindigkeitsverläufe über die Zeit für die Koordinaten einzelner Gelenkpunkte bzw. Körperteile im Raum erfasst (siehe Abbildung 3). Im Hinblick auf eine zu starke Verfälschung der Durchschnittsgeschwindigkeit durch die Reaktionszeit der Probanden, die anfängliche Beschleunigung bis zum ersten Schritt sowie das Abbremsen bzw. Verzögern vor der Zielmarkierung wurden die auszuwertenden Datensätze auf den Bereich nach dem ersten und vor dem letzten Schritt begrenzt. In Abbildung 3 ist dieser Sachverhalt dargestellt - nur der blau markierte Skalenbereich wurde für die Auswertung berücksichtigt.

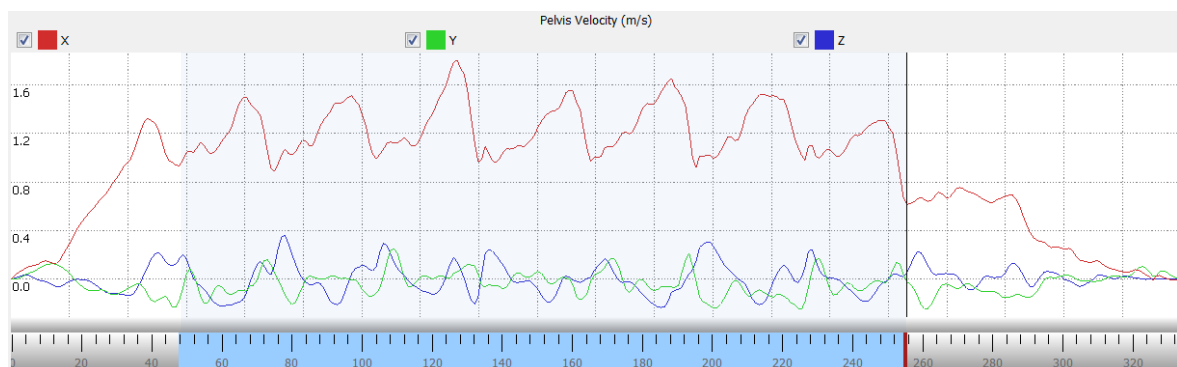


Abbildung 3: Geschwindigkeitsverlauf über die Zeit für x-, y- und z-Achse (Messpunkt: Becken)

Aufgrund des sicherheitskritischen Untersuchungsschwerpunktes, der Festlegung von Sicherheitsabständen auf Grundlage von Annäherungsgeschwindigkeiten des Menschen an Gefahrenstellen, wurden für die Auswertung perzentilierte Werte ermittelt (je Stichprobe Mittelwert und 99. Perzentil). Anhand der Ergebnisse des Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests sowie des Anderson-Darling-Anpassungstests (gute Eignung bei kleinen Stichproben $n \geq 8$ (Eckstein 2013)) wurde für die Verteilung der Messergebnisse eine Normalverteilung angenommen. Einzig bei drei Versuchsszenarien konnte diese nicht nachgewiesen werden. Auf Grundlage der normalverteilten Merkmale wurde zur Auswertung als parametrischer Signifikanztest der Zweistichproben t-Test für abhängige Stichproben (Paarvergleichstest) gewählt. Im Fall der nicht normalverteilten Stichproben sowie zur Überprüfung des t-Test-Ergebnisses kam als nicht parametrischer Test der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zum Einsatz. Für die Testverfahren wurde ein Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ gewählt.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die Auswertung der allgemeinen Gehgeschwindigkeit des 99. Perzentils (10 m Gehen ohne Hindernis) ergab eine durchschnittliche Körperschwerpunkt-Geschwindigkeit von 1,56 m/s, welche dem Wert aus der EN ISO 13855:2010 von 1,6 m/s nahekommt.

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen (Versuchsdesign, Probandenanzahl) zeigte sich weiterhin, dass physische Hindernisse wie Treppen oder Absätze einen signifikanten Einfluss auf die Annäherungsgeschwindigkeit des Menschen an Gefahrenstellen haben und diese verringern.

Überdies wirkt sich die Länge des Stufenauftritts, der Anlaufweg und die Richtung von Reflexbewegungen auf die Annäherungsgeschwindigkeit aus, wenngleich unter den gegebenen Rahmenbedingungen keine Signifikanz nachgewiesen werden konnte. So überschritt aber die maximale Greif- bzw. Reflexgeschwindigkeit (horizontal diagonales Greifen) des 99. Perzentils mit 3,76 m/s den Wert der Norm (2,0 m/s) deutlich.

Eine Verengung des Laufweges sowie Antirutschplatten ergaben keine signifikanten Wirkungen. Ebenso war aufgrund der gewählten Studienpopulation der Einfluss von personenbezogenen Größen (Alter, Körpergröße, Geschlecht) nicht nachweisbar.

Die Ergebnisse der Pilotstudie zeigen, dass unterschiedliche Gegebenheiten für die Praxis bedeutsam sind und einer weiteren Differenzierung bedürfen. Zwar ist der in der EN ISO 13855:2010 angegebene Wert für eine durchschnittliche Situation, in der sich eine Person ohne Hindernisse auf eine Gefahrenstelle zubewegt, geeignet, jedoch ist dies in der Praxis unüblich. Hier werden zur Verringerung der Annäherungsgeschwindigkeit Hindernisse wie bspw. Treppen, Abätze und Antirutschplatten verwendet werden. Die in der EN ISO 13855:2010 angegebenen Werte werden deshalb als zu starr und praxisfern angesehen.

Um einen sicherheitstechnisch fundierten Einsatz von Lichtschranken in den verschiedenen konstruktiven Variationsmöglichkeiten gewährleisten zu können, sollten deshalb weitere Untersuchungen mit einem größeren Probandenkollektiv angestrebt werden, welches eine statistische Absicherung der Ergebnisse erlaubt. Anschließend wäre die Erarbeitung von Ergänzungen für die bestehende Normvorgabe denkbar.

5. Literatur

- Ausschuss für Arbeitsstätten (2018) Technische Regeln für Arbeitsstätten. Verkehrswege. ASR A1.8. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg.) (2018) Statistik - Arbeitsunfallgeschehen 2017. Zugriff: Dez 3, 2018. <https://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/12728.pdf>.
- DIN 18065:2015-03 (2015) Gebäudetreppen – Begriffe, Messregeln, Hauptmaße, Berlin: Beuth.
- Eckstein PP (2013) Repetitorium Statistik. Deskriptive Statistik-Stochastik-Induktive Statistik. 7., überarb. u. akt. Aufl. 2013. Korr. Nachdruck 2012, Wiesbaden: Springer: 198, 334.
- EN ISO 13855:2010-10 (2010) Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen, Berlin: Beuth.
- Schepers M, Giuberti M, Bellusci G (2018) Xsens MVN. Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing. Zugriff: Dez 3, 2018. https://www.researchgate.net/publication/324007368_Xsens_MVN_Consistent_Tracking_of_Human_Motion_Using_Inertial_Sensing.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit interdisziplinär analysieren – bewerten – gestalten

65. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Professur Arbeitswissenschaft
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Institut für Arbeit und Gesundheit
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung

27. Februar – 1. März 2019

GfA-Press

Bericht zum 65. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 27. Februar – 1. März 2019

**Professur Arbeitswissenschaft, Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,
Technische Universität Dresden;
Institut für Arbeit und Gesundheit, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Dresden**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2019
ISBN 978-3-936804-25-6

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Konferenzband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Konferenzband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2019 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de