

Maschinelles Lernen in der Sturzprävention: Aufbau einer kinematischen Datenbasis zum Einsatz maschinellen Lernens zur Erkennung von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen

*Moritz SCHNEIDER¹, Anika WEBER⁵, Kevin REICH¹, Mirko KAUFMANN^{2,4},
Ulrich HARTMANN², Ingo HERMANN¹, Christoph SCHIEFER¹,
Kiros KARAMANIDIS^{3,5}, Annette KLUGE⁴, Rolf ELLEGAST¹*

*¹Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung,
Alte Heerstr. 111, 53757 Sankt Augustin*

² Hochschule Koblenz, RheinAhrCampus, Joseph-Rovan-Allee 2, 53424 Remagen

*³ Sport and Exercise Science Research Centre, School of Applied Sciences,
London South Bank University, 103 Borough Road, London*

*⁴Lehrstuhl Arbeits-, Organisations- & Wirtschaftspsychologie,
Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstraße 150, 44801 Bochum*

*⁵Insitut für Sportwissenschaft, Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaften,
Universität Koblenz, Universitätsstraße 1, 56070 Koblenz*

Kurzfassung: In zahlreichen Betrieben führen Unfälle durch Stolpern, Rutschen und Stürzen (SRS) zu erheblichen Ausfallzeiten. Zu Zwecken der automatischen Erkennung und zukünftigen Prävention wurden in dieser Studie normierte kinematische Daten zu SRS-Vorfällen von 110 Post-/Paketzusteller*innen und Stahlarbeiter*innen erfasst. Diese Daten wurden durch das Auslösen realer, nicht simulierter SRS-Ereignisse gewonnen und durch das Tragen eines ‘Ganzkörpermessanzugs’ mit Beschleunigungsmessern, Gyroskopen und Magnetometern aufgezeichnet. Es wird erörtert, wie diese Daten für die Beurteilung der dynamischen Stabilitätskontrolle während der Bewegung im Kontext des maschinellen Lernens genutzt werden können.

Schlüsselwörter: Künstliche Intelligenz, Rutschen, Stolpern, Stürzen, SRS, KI

1. Stolpern, Rutschen und Stürzen – Gefahren für Arbeitnehmer*innen

Laut der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) wurden im Jahr 2022 insgesamt 165.420 Unfälle durch Stolpern, Rutschen und Stürzen (SRS) verzeichnet. Zwölf dieser Vorfälle endeten tödlich und 2.485 weitere Vorfälle führten zu Rentenansprüchen ((DGUV) 2022). Dies stellt für verschiedene Branchen eine große Herausforderung dar und führt zu erheblichen Fehlzeiten am Arbeitsplatz (Hsiao 2014) (BAuA 2021).

Ein Ansatzpunkt, um die Anzahl der Stürze zu reduzieren, ist die Erkennung von Beinahe-Stürzen, da diese auf ein erhöhtes Sturzrisiko hindeuten (Srygley et al. 2009) (Nagai et al. 2017) (Wang et al. 2022). In Verbindung mit der Tatsache, dass Beinahe-Stürze häufiger vorkommen als Stürze (Teno et al. 1990) (Ryan et al. 1993) (Arnold & Faulkner 2007) (Wang et al. 2022) können sie als frühe Prädiktoren dienen und die rechtzeitige Vorbereitung von Sicherheitsmaßnahmen ermöglichen.

Ein "Beinahe-Sturz" ist definiert als ein Vorfall, bei dem eine Person stolpert, ausrutscht oder einen Fehltritt begeht, aber in der Lage ist, das Gleichgewicht wiederzuerlangen. Diese vergleichsweise unscharfe Definition macht die automatische Erkennung von Beinahe-Stürzen und die Differenzierung gegenüber Alltagsbewegungen anspruchsvoll, wodurch das Forschungsfeld bisher wenig bearbeitet wurde.

2. Datenlage von SRS-Ereignissen

Einen umfassenden Überblick über frühere Arbeiten zu Beinahe-Sturzdaten gibt der Übersichtsartikel von Pang et al. (Pang et al. 2019). Die meisten der hier betrachteten Studien basieren auf Datensätzen von 40 oder oft weniger Teilnehmer*innen. Karel et al. mit Daten von 91 Proband*innen ist in der Übersichtsarbeit die Studie mit dem größten Probandenkollektiv (Karel et al. 2010). Zusätzlich zu den niedrigen Probandenzahlen konzentrieren sich die meisten Arbeiten auf die Erkennung von Beinahe-Stürzen zum Zwecke der Sturzprävention von Senior*innen, da ältere Menschen einem höheren Sturzrisiko ausgesetzt sind als junge Erwachsene. Wang et al. (Wang et al. 2020) ist die einzige uns bekannte Studie, die Beinahe-Sturzereignisse von Arbeitnehmer*innen mit dem Ziel der Verhinderung von Arbeitsunfällen analysiert hat. Allerdings hatten auch sie nur 10 Proband*innen und die Beinahe-Stürze waren simuliert. Das heißt, der Sturzvorgang wurde freiwillig von den Proband*innen zu einem ihnen bekannten Zeitpunkt initiiert. Dies führt zu Daten, die den biomechanischen Prozess von tatsächlichen Stürzen und Beinahe-Stürzen schlechter repräsentieren, als Daten von tatsächlich stürzenden oder beinahe stürzenden Proband*innen.

Diese Arbeit erweitert das Forschungsfeld zu Beinahe-Stürzen, indem ein Datensatz erstellt wurde, der mit 110 Beschäftigten mehr Proband*innen als bisherige Arbeiten aufweist und sich auf Nichtsenior*innen konzentriert. Zusätzlich wurden die Proband*innen durch das Auslösen der Fallen tatsächlich zum Stolpern, Rutschen und Fehltreten gebracht. Das heißt, die Beinahe-Stürze in dieser Arbeit waren insofern nicht simuliert, als dass die Personen den Vorgang unfreiwillig zu einem ihnen nicht bekannten Zeitpunkt durchgeführt haben.

3. Versuchsaufbau und Messprotokoll

Die Datenaufnahme fand im Rahmen des von der DGUV geförderten Projekts zur „Entwicklung zusätzlicher Trainingselemente zur Prävention von Stolper-, Rutsch- und Sturzunfällen unterstützt durch den Einsatz von virtueller Realität am Beispiel von Unternehmen der Stahlerzeugung und der Post und Paketzustellung“ (ENTRAPon) statt. Bei den Probanden handelt es sich um eine Kohorte von 110 gesunden Arbeitnehmer*innen zwischen 19 und 63 Jahren (Mittelwert 41,5 Jahre) ohne muskuloskeletale oder neurologische Erkrankungen.

Die Proband*innen manövrierten durch einen 15 Meter langen SRS-Parcours (Schneider et al. 2023), in den 18 SRS-Elemente integriert sind, die Stolpern, Rutschen oder Fehltreten verursachen können.

Damit die Teilnehmer*innen die SRS-Elemente effektiv auslösen und dadurch im Gang gestört werden, waren sie dazu angehalten auf vorgegebene Platten, mit einem Abstand von 70 cm, zu treten.

Das Rutschelement des Parcours besteht aus einer Platte, die bis zu 14 cm nach

vorne rutschen kann. Beim Stolpern wird unerwartet in der Schwungphase des gestörten Beins eine 19 cm hohe Klappe nach oben geöffnet, die durch einen Drucksensor automatisch ausgelöst wird und mit dem Fuß des Schwungbeins kollidiert. Ein 11 cm hoher Schaumstoffblock wird verwendet, um Fehlritte zu simulieren. Dieser Block staucht sich auf etwa 5 cm zusammen, wenn Druck ausgeübt wird und verursacht so eine unerwartete Höhenveränderung.

Der Parcours ist so entworfen, dass für die Proband*innen nicht ersichtlich ist, an welcher Stelle eine Störung auftritt, da diese an unterschiedlichen Stellen unerwartet ausgelöst werden können.

Nach einer Eingewöhnungsphase durchliefen die Teilnehmer*innen (N = 110) den Parcours mehrfach und in unterschiedlichen Ganggeschwindigkeiten. Jede/r Teilnehmer*in wurde dabei über einen Gurt an einer horizontalen Sicherungsschiene an der Decke vor Stürzen gesichert. Die kinematischen Daten aller Körperbereiche (Kopf, obere Extremitäten, Oberkörper, untere Extremitäten und Füße) der Proband*innen wurde während dem Gehen auf dem Parcours mittels des inertialen Messsystems XSens Link (Movella, Enschede, Niederlande), bestehend aus 17 IMU-Sensoren (Messfrequenz 120 Hz), gemessen. Dieses System ist für seine Effektivität bei der Bewertung der Gangstabilität und der Analyse menschlicher Bewegungen sowie dem Erzeugen valider Messungen weithin anerkannt (Kangas et al. 2008) (Nyan et al. 2008) (Pang et al. 2019). Zusätzlich wurden Videos von den Parcoursdurchläufen zum Zweck der Datenqualitätssicherung aufgezeichnet, um zum Beispiel die automatisch gesetzten Marker für SRS-Ereignisse und Schritte prüfen zu können. Die Datenanalyse erfolgte in Python und in der CUELA (Computer-Unterstützte Erfassung und Langzeit-Analyse von Belastungen des Muskel-Skelett-Systems) Analysesoftware (Ellegast et al. 2010).

4. Datenkategorisierung

Die methodische Vorgehensweise zur Erkennung von Beinahe-Stürzen umfasst zwei Hauptschritte: Datenerfassung und Datenklassifizierung. In der Phase der Datenerfassung wurden tragbare Sensoren verwendet, um multivariate Zeitreihendaten von Arbeitnehmer*innen zu sammeln, während sie im SRS-Parcours im Gang gestört wurden. Im zweiten Schritt werden die gesammelten Daten nach einem neu entwickelten Schema klassifiziert. Dieses Schema unterscheidet zwischen normaler Gangbewegung (kein Sturz), Beinahe-Stürzen (mit und ohne nachfolgenden Sturz) und Stürzen. Es kategorisiert auch Beinahe-Stürze nach ihrer Intensität (leicht und schwer) und der Art des SRS-Vorfalles (Stolpern, Ausrutschen und Fehltreten). Diese Klassifizierung ermöglicht ein differenzierteres Verständnis von Beinahe-Stürzen, das für die Entwicklung gezielter Präventionsstrategien genutzt werden kann.

Das Klassifizierungsschema basiert auf einer Reihe von Variablen, die sich auf die Bewegung und das Gleichgewicht beziehen. Diese Variablen sind unter anderem:

- Toleranz der Stabilität (Margin of Stability, MoS): Ein Maß für die dynamische Stabilität während des Gehens, das als Differenz zwischen dem extrapolierten Schwerpunkt (XCoM) und der Begrenzung der Standfläche berechnet wird. Eine niedrigere MoS weist auf ein höheres Sturzrisiko hin (Terry et al. 2014).
- Räumlich-zeitliche Komponenten: Parameter wie Schrittlänge, Schrittweite und Schrittzeit. Räumlich-zeitliche Komponenten werden in verschiedenen Sturz-

erkennungsmethoden verwendet, einschließlich des aufmerksamkeitsgesteuerten Long Short-Term Memories (LSTM) (Feng et al. 2020) (Zhang et al. 2020). Eine Zunahme der Schrittdauer oder eine Abnahme der Schrittlänge kann auf ein vorsichtiges Gangbild hinweisen, das eine Reaktion auf ein wahrgenommenes Sturzrisiko sein kann (Bargiotas et al. 2023). Die Schrittdauer und die Schrittlänge werden zur Bewertung des Sturzrisikos und zur Überwachung der alters- oder krankheitsbedingten Verschlechterung des Gangbildes verwendet (Hemmatpour et al. 2019).

- Zeit bis zum Aufsetzen nach einer Störung: Die Zeit, die eine Person benötigt, um nach einer Störung wieder stabil zu werden. Eine längere Zeit zur Wiederherstellung der Gangstabilität kann ein Hinweis auf ein höheres Sturzrisiko sein. Der Zeitpunkt des Aufsetzens des Fußes nach einer Störung ist ein wichtiger Faktor bei Studien zur Sturzerkennung (Wang et al. 2022) (Schneider et al. 2023).
- Geschwindigkeit des Massenschwerpunkts beim Ausgleichsschritt: Die Geschwindigkeit des Massenschwerpunkts des Körpers in dem Moment, in dem der Fuß den Boden berührt. Eine höhere Geschwindigkeit kann auf einen instabileren Gang und ein höheres Sturzrisiko hinweisen. Die Geschwindigkeit des Körperschwerpunkts wird verwendet, um altersbedingte Unterschiede und die Instabilität des Gangs zu charakterisieren, was bei der Bewertung des Sturzrisikos hilfreich ist (Lee & Chou 2006).

Jede dieser Variablen ist mit einem spezifischen Schwellenwert verbunden, anhand dessen bestimmt wird, ob es sich bei einem Ereignis um einen Beinahe-Sturz handelt. Eine hohe Toleranz der Stabilität deutet beispielsweise auf eine gute Anwendung der Präventionsmechanismen hin, während eine niedrige Toleranz auf ein potenzielles Sturzrisiko hinweist. Wenn diese Variablen und ihre Schwellenwerte berücksichtigt werden, können Beinahe-Stürze genau klassifiziert und Einblicke in die zugrunde liegenden Ursachen und die Dynamik dieser Ereignisse gewonnen werden.

Die Schwellenwerte für diese Variablen werden auf der Grundlage der Analyse der gesammelten Daten festgelegt und können je nach den spezifischen Merkmalen des Arbeitsplatzes und den Tätigkeiten der Arbeitnehmer variieren. Ziel ist es, die optimalen Schwellenwerte zu ermitteln, mit denen die verschiedenen Arten von Vorfällen genau klassifiziert werden können. Hierdurch können wertvolle Erkenntnisse für Strategien zur Sturzprävention abgeleitet werden.

5. Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellte Studie leistet einen wichtigen Beitrag zur Sicherheit am Arbeitsplatz, insbesondere in Bezug auf Stolpern, Rutschen und Stürzen. Die Studie liefert grundlegende Einblicke in die Mechanismen dieser Unfälle durch die Erfassung und Analyse kinematischer Daten von tatsächlichen SRS-Ereignissen, an denen Stahlarbeiter*innen und Paketzusteller*innen beteiligt waren.

In Zukunft könnte dieser Datensatz in maschinellen Lernprozessen zur Sturzprävention und -erkennung eingesetzt werden. Die nächsten Schritte sollten darin bestehen, diese Algorithmen zu entwickeln und sie in einer Vielzahl von realen Szenarien zu testen, um ihre Zuverlässigkeit und Wirksamkeit zu bestätigen. Dazu müssen Hindernisse wie die Übertragbarkeit der Algorithmen auf verschiedene Konfigurationen und die Sicherstellung der Spezifität der Modelle in einer Reihe von Arbeitssituationen

überwunden werden. In künftigen Studien sollte der Datensatz erweitert werden, um ein breiteres Spektrum an Berufen und Umgebungen zu erfassen. Diese Erweiterung würde die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse verbessern und die Entwicklung komplexerer maschineller Lernmodelle unterstützen. Darüber hinaus könnte die Einbeziehung zusätzlicher prädiktiver Elemente, wie z. B. kognitiver und kontextbezogener Merkmale, die Genauigkeit von Systemen zur Erkennung von Beinahe-Stürzen weiter verbessern. Das Fernziel sollte die Entwicklung eines integrierten Systems sein, das nicht nur SRS-Vorfälle erkennt und vorhersagt, sondern auch spezifische Präventivmaßnahmen empfiehlt, die auf die individuellen Profile und Arbeitsbedingungen der Arbeitnehmer zugeschnitten sind. Ein solches System könnte die Häufigkeit und Schwere von Arbeitsunfällen erheblich verringern und so zu einer sichereren Arbeitsumgebung für Arbeitnehmer führen.

6. Literatur

- (DGUV) D G (2022). Statistik Arbeitsunfallgeschehen 2022. Von <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/4759> abgerufen
- Arnold CM & Faulkner RA (2007). The history of falls and the association of the timed up and go test to falls and near-falls in older adults with hip osteoarthritis. *BMC geriatrics*, 7(1), 1–9.
- Bargiotas I, Wang D & Mantilla J (2023). Preventing falls: the use of machine learning for the prediction of future falls in individuals without history of fall. *J Neurol*, 618–631. doi:<https://doi.org/10.1007/s00415-022-11251-3>
- BAuA. (2021). Sturz, Ausrutschen, Stolpern, Umknicken. Von https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Gefaehrdungsbeurteilung/Expertenwissen/Mechanische-Gefaehrdungen/Sturz-Ausrutschen-Stolpern-Umknicken/Sturz-Ausrutschen-Stolpern-Umknicken_node.html abgerufen
- Ellegast R, Hermanns I & Schiefer C (2010). Feldmesssystem CUELA zur Langzeiterfassung und-analyse von Bewegungen an Arbeitsplätzen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, 64, 101–110.
- Feng Q, Gao C, Wang L, Zhao Y, Song T & Li Q (2020). Spatio-temporal fall event detection in complex scenes using attention guided LSTM. *Pattern Recognition Letters*, Volume 130, 242–249. doi:<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.08.031>
- Hemmatpour M, Ferreró R, Montrucchio B & Rebaudengo M (2019). A Review on Fall Prediction and Prevention System for Personal Devices: Evaluation and Experimental Results. *Advances in Human-Computer Interaction*. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/9610567>
- Hsiao H (2014). Fall Prevention Research and Practice: A Total Worker Safety Approach. *Industrial Health* 52.
- Kangas M, Konttila A, Lindgren P, Winblad I & Jämsä T (2008). Comparison of low-complexity fall detection algorithms for body attached accelerometers. *Gait & Posture*, S. 285–291.
- Karel JM, SendenR, Janssen JE, Savelberg H, Grimm B, Heyligers I ... Meijer K (2010). Towards unobtrusive in vivo monitoring of patients prone to falling. 2010 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology, 5018–5021.
- Lee H-J & Chou L-S (2006). Detection of Gait Instability Using the Center of Mass and Center of Pressure Inclination Angles. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, Volume 87 (Issue 4), 569–575. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apmr.2005.11.033>
- Nagai K, Yamada M, Komatsu M, Tamaki A, Kanai M, Miyamoto T ... Tsuboyama T (2017). Near falls predict substantial falls in older adults: A prospective cohort study. *Geriatrics & Gerontology International*, 17(10), 1477–1480.
- Nyan MN, Tay FH & Murugasu E (2008). A wearable system for pre-impact fall detection. *Journal of Biomechanics*, S. 3475–3481. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.08.009>
- Pang I, Okubo Y, Sturnieks D, Lord SR & Brodie MA (2019). Detection of Near Falls Using Wearable Devices. *Journal of Geriatric Physical Therapy*, S. 48–56.
- Ryan JW, Dinkel JL & Petrucci K (1993). Near falls incidence: a study of older adults in the community. *Journal of gerontological nursing*, 19(12), 23–28.
- Schneider M, Weber A, Kaufmann M, Kluge A, Hartmann U, Karamanidis K & Ellegast RP (2023). Generation of Consistent Slip, Trip and Fall Kinematic Data via Instability Detection and Recovery

- Performance Analysis for Use in Machine Learning Algorithms for (Near) Fall Detection. Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management – 14th International Conference (Volume 14029 of Lecture Notes in Computer Science), 298–305.
- Srygley JM, Herman T, Giladi N & Hausdorff JM (2009). Self-report of missteps in older adults: a valid proxy of fall risk? Archives of physical medicine and rehabilitation, 90(5), 786–792.
- Teno J, Kiel DP & Mor V (1990). Multiple Stumbles: A Risk Factor for Falls in Community-Dwelling Elderly; A Prospective Study. Journal of the American Geriatrics Society, 38(12), 1321–1325.
- Terry K, Stanley C & Damiano D (2014). A new perspective on the walking margin of stability. J Appl Biomech, 30(6):737-41. doi:10.1123/jab.2014-0089
- Wang C, Kim Y, Kim DG, Lee SH & Min SD (2020). Smart helmet and insole sensors for near fall incidence recognition during descent of stairs. Applied Sciences, 10(7), 2262.
- Wang S, Miranda F, Wang Y, Rasheed R, & Bhatt, T. (2022). Near-fall detection in unexpected slips during over-ground locomotion with body-worn sensors among older adults. Sensors, 22(9), 3334.
- Wetzel C (2013). Entwicklung einer Rutschhemmungsmatrix zur Auswahl von Bodenbelägen und Schuhen zur Reduzierung von Ausgleitunfällen. Fachbereich D – Abteilung Sicherheitstechnik Sicherheitstechnik / Arbeitssicherheit. Bergische Universität Wuppertal.
- Zhang J, Wu C & Wang Y (2020). Human Fall Detection Based on Body Posture Spatio-Temporal Evolution. Sensors (20). Von <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/946> abgerufen



Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeitswissenschaft in-the-loop

**Mensch-Technologie-Integration
und ihre Auswirkung auf Mensch,
Arbeit und Arbeitsgestaltung**

70. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement IAT
Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

06. – 08. März 2024

GfA-Press

Bericht zum 70. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 06. – 08. März 2024

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

In Zusammenarbeit mit: Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Sankt Augustin: GfA-Press, 2024

ISBN 978-3-936804-34-8

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle (s. u.) erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Sankt Augustin, Schriftleitung: Prof. Dr. Rolf Ellegast**

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

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

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband 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.

Geschäftsstelle der GfA

Simone John, Tel.: +49 (0)30 1300-13003, Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin

info@gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de · www.gesellschaft-fuer-arbeitswissenschaft.de

Screen design und Umsetzung

© 2024 fröse multimedia, Frank Fröse,

office@internetkundenservice.de, www.internetkundenservice.de