

Dynamik des Fahrverhaltens während der Steuerung mobiler Maschinen in virtuellen industriellen Gefahrenszenarien

Peter NICKEL¹, Dennis PAUL², Andy LUNGFIEL¹

¹ *Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),
Alte Heerstraße 111, D-53757 Sankt Augustin*

² *Leuphana Universität Lüneburg,
Scharnhorststraße 1, D-21335 Lüneburg*

Kurzfassung: Beim Arbeiten mit mobilen Maschinen wie z. B. Hubarbeitsbühnen (HAB) kommt es zu Risiken, Gefährdungen und Unfällen, die mit geeigneten Maßnahmen verhindert oder vermindert werden sollen. Aus einer Studie in virtueller Realität zur Gebrauchstauglichkeit einer Schutzmaßnahme für HAB wurden kontinuierlich registrierte Daten der Fahr- und Steuerbewegungen als Zeitreihen analysiert und visualisiert. Mithilfe der Ergebnisse konnten Arbeitsabläufe auch während Kollisionen der HAB oder des Fahrers mit Teilen der Arbeitsumgebung und während der Nutzung der Schutzmaßnahme detailliert rekonstruiert und analysiert werden. Dadurch ließ sich detaillierter nachvollziehen, wann und wo, was mit welchen Konsequenzen geschah und Möglichkeiten aufgezeigt werden, Informations- und Unfallanalysen zu unterstützen.

Schlüsselwörter: dynamisches Fahrverhalten, Gefahrenszenarien, Steuerungsbewegungen, mobile Maschinen, virtuelle Realität, Unfallanalyse

1. Hintergrund

Als mobile Maschinen werden in Industrie und Dienstleistung insbesondere Hubarbeitsbühnen (HAB) eingesetzt, um Beschäftigten einen flexiblen Zugang für hohe oder schwer zugängliche Arbeitsbereiche bei Montage-, Instandhaltungs- oder Reinigungstätigkeiten zu verschaffen (DIN EN 280:2014). Trotz steigender Einsatzzahlen und -zeiten konnten Maßnahmen des Arbeitsschutzes von Herstellern, Verleihern, Nutzern und Unfallversicherungsträgern dazu beitragen, einem weiteren Anstieg der Unfallzahlen entgegenzuwirken (DGUV-I 208-019:2013; Stocker et al. 2011).

Eine Not-Stopp-Funktion als ergänzende Schutzmaßnahme, die in die Joysticks zur Steuerung einer HAB integriert werden kann (Nischalke-Fehn & Bömer 2011), wurde aufgrund funktionaler Überlegungen entwickelt. Eine spezifische Ausführung einer solchen Schutzmaßnahme wurde mithilfe einer Studie in virtueller Realität (VR) zur Gebrauchstauglichkeit untersucht und dabei auch betrachtet, inwieweit sich mit dieser Maßnahme Quetschgefährdungen abwenden oder mildern lassen. Dabei wurden bisher Lage- und Streuungsparameter zur Analyse und Bewertung von Leistung und Beanspruchung der Probanden über verschiedene Szenarien und von Gebrauchstauglichkeit des Einsatzes in Gefahrensituationen herangezogen (Nickel et al. 2014). Diese statistischen Analysen erlauben allerdings nur einen begrenzten Einblick in den Prozess des Fahrverhaltens, in die gewählten Fahrwege und Stellteilbewegungen im Arbeitsablauf.

Da während der Studie Fahr- und Stellteilbewegungen der HAB kontinuierlich aufgezeichnet wurden, eröffnet sich eine Aufbereitung und explorative Analyse von Untersuchungsdaten der 20 Probanden über eine jeweils zirka dreistündige Dauer der Auftragsbearbeitung als zeitabhängige Folge von Datenpunkten i.S.e. Zeitreihe. Inwieweit sich damit ein vertiefter Einblick in das Fahrverhalten insbesondere bei Kollisionen und eine mögliche Nutzung der ergänzenden Schutzmaßnahme unter variierenden Einsatzbedingungen ergeben kann, soll exemplarisch anhand von verschiedenen, ausgewählten Sequenzen vorgestellt werden.

2. Methode

2.1 Arbeitsumgebung für Inspektions- und Fahraufgaben mit der HAB

Für die Analysen wurde Daten aus einer Usability-Studie in VR (Nickel et al. 2014) verwendet. 20 mit dem Fahren von HAB wenig oder unerfahrene Probanden wurden mit der Bearbeitung von Inspektions- und Fahraufgaben nach einem festgelegten Parcours in einer Industriehalle beauftragt. Alle Probanden erfüllten die Voraussetzungen zur Teilnahme an der Studie (z. B. ausreichende Sehschärfe, Farb- und Tiefensehen, Immersionstendenz), die im SUTAVE Labor des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) durchgeführt wurde.

Von der HAB waren Korb und Steuerung als reale Arbeitsgegenstände vor der Projektionswand im SUTAVE Labor aufgebaut und mit der VR-Simulation gekoppelt. Die übrigen Teile der HAB und die Arbeitsumgebung in der Industriehalle wurden in VR simuliert. Die wiederholten Bearbeitungen eines Arbeitsauftrages mit der HAB führten jeden Probanden jeweils auf einem Parcours durch eine Industriehalle, wobei lediglich das Gefahrenpotential leicht variiert wurde. Der Parcours war so gestaltet, dass es z. B. durch Engstellen an Inspektionsplätzen oder Hindernissen in der Dachkonstruktion leicht zu Kollisionen der HAB oder des Probanden mit der Arbeitsumgebung kommen konnte.

Es kam somit vereinzelt zu Gefährdungen, zu deren Reduzierung oder Abwendung nun auch eine Not-Stopp-Funktion genutzt werden konnte. Die Probanden der Studie wurden einer von zwei Gruppen des Kraftaufwands zum Auslösen der Funktion zugewiesen. Während die Funktion einerseits mit einem geringen Kraftaufwand von 14 N leicht und schnell ausgelöst werden könnte, bestand das Risiko, dass sie auch leicht versehentlich ausgelöst werden könnte. Andererseits könnte ein höherer Kraftaufwand von 36 N ein versehentliches Auslösen verhindern, allerdings mit dem Risiko, dass das Auslösen in Gefährdungssituationen beeinträchtigt wäre, da es zu schwer oder verzögert sein würde.

2.2 Datenaufzeichnung während der Auftragsbearbeitung mit der HAB

Während der Auftragsbearbeitung mit der HAB wurden vorab definierte, diskrete Ereignisse mit Zeitstempel aufgezeichnet. Dabei handelte es sich z. B. um Zeitpunkte von Kollisionen oder von Auslösungen der Not-Stopp-Funktion. Darüber hinaus wurden Positionsdaten der HAB in der Industriehalle sowie die Bewegungen der beiden Joysticks mit Zeitstempel als äquidistante Zeitreihen kontinuierlich mit einer Abtastrate von 10 Hz aufgezeichnet. Die Position des Untergestells der HAB wurde auf drei Dimensionen im Raum und jeweils in ihrer Ausrichtung registriert. Relativ dazu wurden Position und Ausrichtung des Korbes dokumentiert. Damit konnten Positio-

nen und Ausrichtung des Korbes in der Industriehalle berechnet und auf ein Volumenmodell für einen Fahrer im Korb geschlossen werden. Die im SUTAVE-Labor direkt erfasste Kopfposition der Probanden wurde lediglich für die VR-Simulation verwendet und blieb bei den hier dargestellten Analysen unberücksichtigt.

Die Auslenkung des linken Joysticks zur HAB-Steuerung (Heben/Senken bzw. Teleskopieren // Schwenken) und des rechten Joysticks (Vor-/Rückwärtsfahren // Lenken), jeweils mit eingebauter Not-Stopp-Funktion, wurde gleichzeitig mit derselben Aufzeichnungsrate über die Auftragsbearbeitung in VR registriert. Um nachträglich zeitliche Zuordnungen von Arbeitsprozessen oder Ereignissen klären zu können, wurde die VR-Simulation als Video aufgezeichnet.

Alle Zeitabschnitte mit Kollisionen und mit ausgelöster Not-Stopp-Funktion wurden analysiert. Bei Kollisionen i.S.v. Unfällen handelt es sich allerdings um seltene Ereignisse, die in ihrer Anzahl und dem Zeitpunkt des Auftretens in der Studie nicht vorgegeben werden konnte. Unfälle haben vielmehr in meist unbekannten Konstellationen verschiedener Bedingungen eine erhöhte Eintrittswahrscheinlichkeit (vgl. Reason 1994). Es war somit nicht davon auszugehen, dass eine in die VR-Simulation absichtlich eingebaute Gefahrensituation für alle Probanden zu einer Gefährdung wird. Daher wird nachfolgend eine exemplarische Darstellung der Ergebnisse gewählt.

3. Ergebnisse

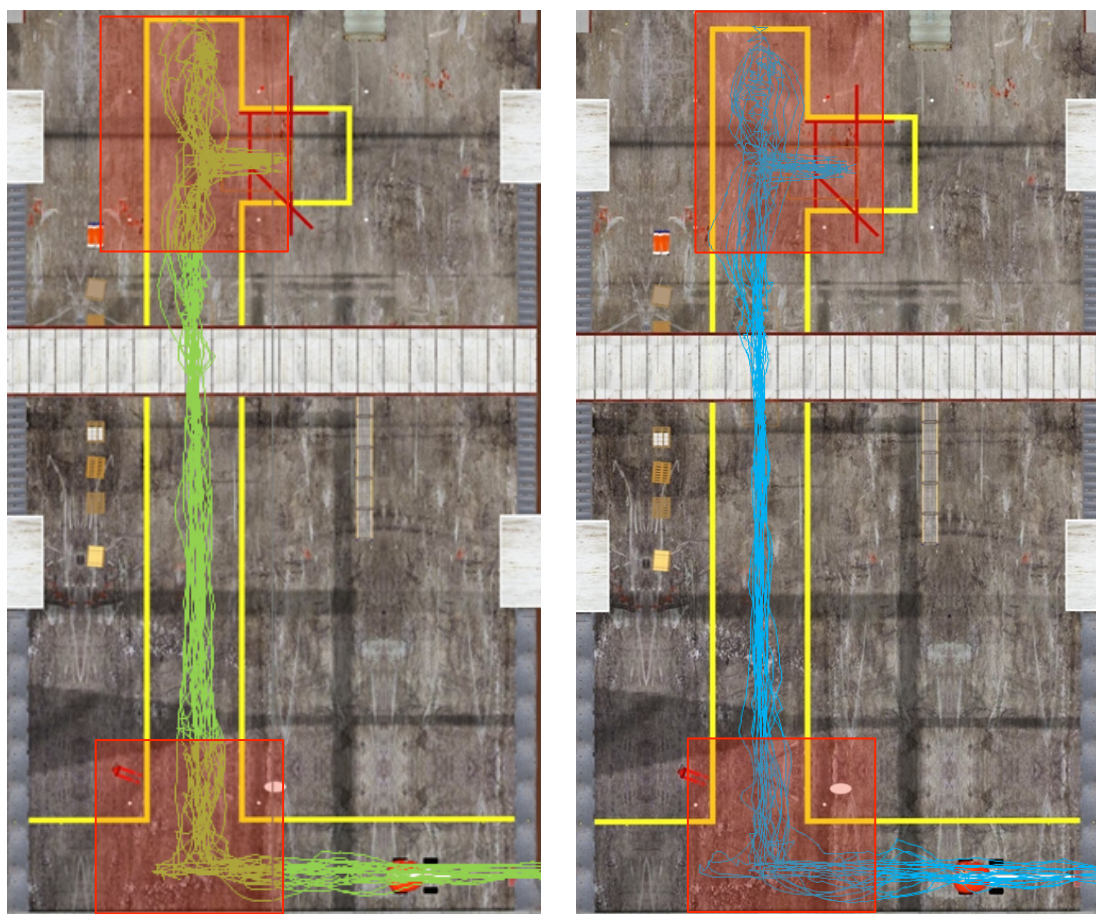


Abbildung 1: Auf den Hallenboden abgebildete Bewegungen des HAB-Korbes der 20 Probanden für eine Auftragsbearbeitung (bei geringer (links) und hoher (rechts) Auslösekraft).

Die Fahrbewegungen des Untergestells der HAB, projiziert auf den Boden der Industriehalle, wiesen weniger Variabilität auf als der Korb, der bei verwendeter Hubeinrichtung des Modells um ca. 6 m ausgelegt war. Die Fahrwege des Korbes variierten besonders in Abschnitten, die Lenkbewegungen für das Abbiegen oder Rückwärtsfahren erforderlich machten (vgl. Abb. 1, rot schraffierte Bereiche). In diesen Abschnitten bestand ein erhöhtes Risiko mit Teilen der Hubarbeitsbühne die gelbe Schutzmarkierung zu überqueren, was dann dort auch tatsächlich in einzelnen Fällen passierte. Unterschiede zwischen der Auslösekraft für den Not-Stopp wurden zwar für die Fahrbewegungen im Zeitverlauf nicht offensichtlich (vgl. Abb. 1, links versus rechts). Das häufigere versehentliche Auslösen unter geringem Kraftaufwand verlängerte dort allerdings die Auftragsbearbeitung.

Werden die Fahrbewegungen in der Industriehalle in einem dreidimensionalen Koordinatensystem dargestellt, können sie auch nach ihrer Höhe im Prozess der Auftragsbearbeitung nachvollzogen werden. Dadurch ergaben sich Hinweise darauf, wann, wo und in welche Richtung es zu Kollisionen kommt, die mit Unfällen mit Sach- und/oder Personenschaden vergleichbar sind. Kollisionen des HAB-Korbes oder sogar des Fahrers der HAB mit Teilen der Arbeitsumgebung zeigten sich meist während der Anfahrt zu bzw. der Abfahrt von den Inspektionsplätzen an der Hallenbrücke und im Stahlverbund der Dachkonstruktion mit zusätzlichen Querbalken.

Nach Einfahrt in die engen Inspektionsplätze der Hallenbrücke war für den Fahrer der HAB nur noch der Korb sichtbar. Stand der Korb sehr nah an einer der Seitenbegrenzungen des Inspektionsplatzes, bevor er zur Ausfahrt wieder abgesenkt wurde, kam es gelegentlich zur Kollision des HAB-Korbes mit der Seitenbegrenzung. Die Fahrwege ließen dann erkennen, dass ein Absenken der Teleskoparmbühne nicht senkrecht sondern in einem Kreisbogen nach unten (und damit gleichzeitig nach hinten) verläuft. Möglicherweise bezogen die Fahrer bei diesen Kollisionen nicht alle erforderlichen Informationen zum relativen Standort, zu den Steuerungsoptionen und zu den Bewegungsbahnen des Korbes ein, Schlussfolgerungen waren fehlerhaft oder Handlungen zur Steuerung des Korbes wurden mit unvollständigen Informationen umgesetzt (vgl. Leplat & Rasmussen 1984, DIN EN ISO 10075-2:2000).

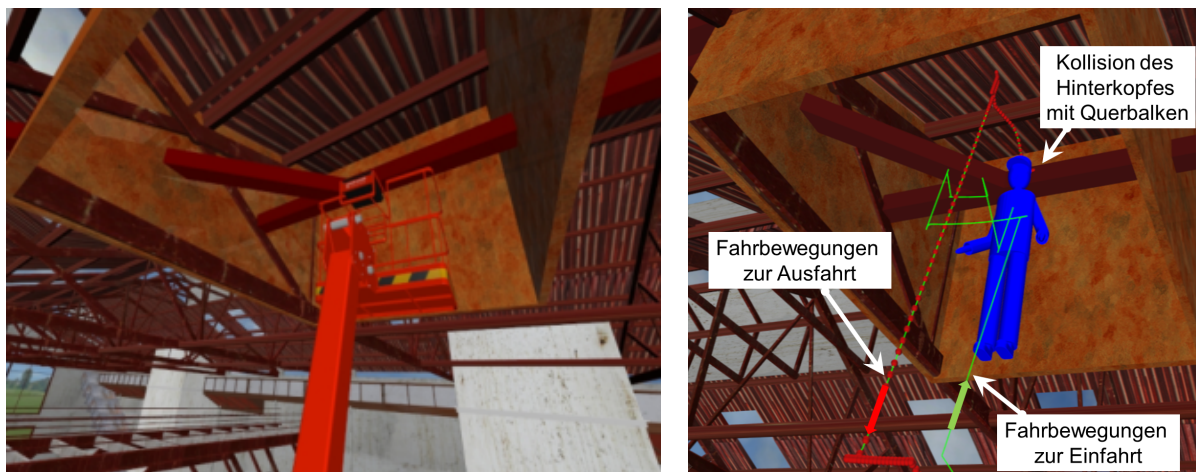


Abbildung 2: Position des HAB-Korbes (links) zum Zeitpunkt der Kollision des Fahrers mit der Arbeitsumgebung (rechts) während der Anfahrt zum Inspektionsplatz im Stahlverbund.

Während der Einfahrten zum beengten und dunkleren Inspektionsplatz im Stahlverbund der Dachkonstruktion traten in einigen Fällen Kollisionen des Fahrerhinterkopfes mit den zusätzlichen Querbalken auf. Eine Analyse der Fahrbewegungen ließ

dabei erkennen, wann, wo und wie der HAB-Korb nach einer Kollision zum Stoppen kam (vgl. Abb. 2). Beeinträchtigungen der Informationsverarbeitung als mögliche Erklärung des Unfallhergangs kommen hier ebenso infrage, die dann von weiteren Umständen wie z.B. verdeckten oder nicht direkt sichtbaren Hindernissen von schräg oben hinter dem Fahrer unter schlechten Sichtverhältnissen begleitet wurden (vgl. Nickel et al. 2013).

Durch die Analysen der Stellteilbewegungen parallel zu den Fahrbewegungen im Zeitverlauf konnte für die (virtuellen und haptisch spürbaren) Kollisionen während der Studie nachvollzogen werden, dass die Not-Stopp-Funktion in diesen Gefährdungssituationen nicht verwendet wurde. Auch bei der in Abbildung 2 dargestellten Kollisionen wurde die HAB spontan durch ein Loslassen der Joysticks und damit Rückführung in die Neutral-Stellung gestoppt (vgl. Abb. 3, rote Markierung).

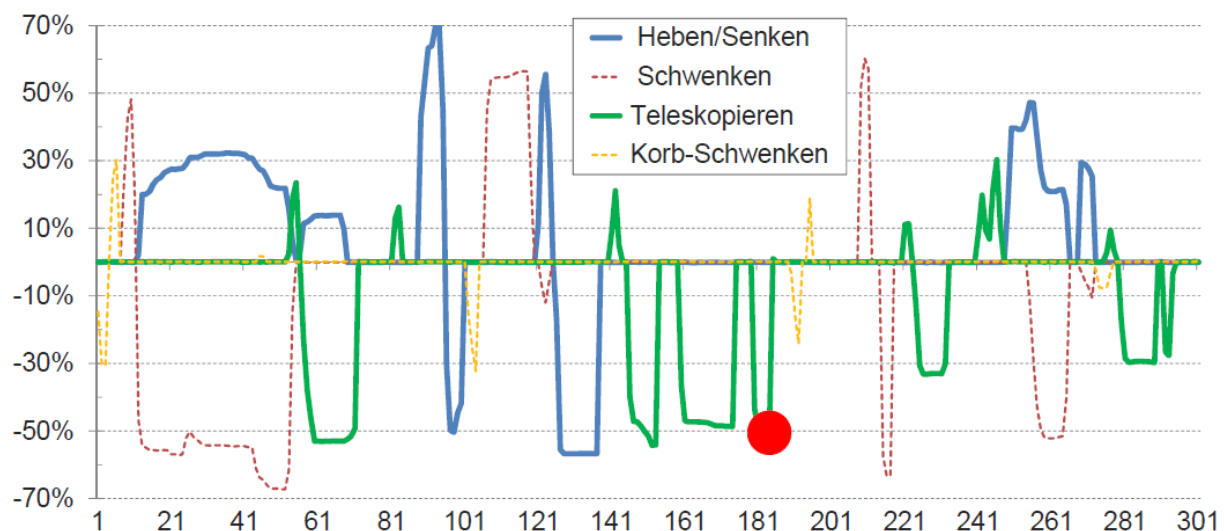


Abbildung 3: Steuerungsbewegungen beider HAB-Joysticks während der Einfahrt zum Inspektionsplatz im Stahlverbund der Deckenkonstruktion (roter Punkt: Kollision des Hinterkopfes mit Querbalken, vgl. Abb. 2).

Die Verlaufsanalysen der Stellteil- und Fahrbewegungen um Zeitpunkte des Einsatzes der Not-Stopp-Funktion verdeutlichte, dass es sich um unbeabsichtigte Betätigungen nicht in Gefährdungssituationen handelte, und die bei geringer Auslösekraft zu unerwünschten Störungen der Fahrbewegungen führten.

4. Diskussion

Die hier vorgestellte Aufbereitung und Analyse der Fahr- und Steuerbewegungen als zeitabhängige Folge von Datenpunkten erweitert die Ergebnisse der VR-Studie (Nickel et al. 2014). Mithilfe der explorativen Analysen und Darstellungen ausgewählter Zeitreihen kann der Prozess der Auftragsbearbeitung detaillierter nachvollzogen werden. Es ergeben sich insbesondere Hinweise darauf, wann (z. B. zur Halbzeit der Auftragsbearbeitung) und wo (z. B. Inspektionsplatz im Stahlverbund), was (z. B. Einfahrt des Fahrers mit dem HAB-Korb in Engstelle) mit welcher Konsequenz (z. B. Kollision des Hinterkopfes mit Querbalken) passierte und erlauben eine Modellierung zu Unfallentstehung und -hergang. Durch VR-Studien und eine Analyse von Zeitreihen zu Gefährdungssituationen und Unfällen lassen sich Prozesse simulieren und

rekonstruieren, die in realen Arbeitsumgebungen mangels Analysedaten nicht zugänglich sind; abgesehen davon, dass solche Studien in Realität gar nicht erst durchgeführt werden dürfen.

Mithilfe der Analysen der Stellteil- und Fahrbewegungen kann auch nachvollzogen werden, dass es in jeder potentiellen Gefahrensituationen nicht unbedingt zu Gefährdungen oder Kollisionen kommen konnte. Die Fahrer der HAB nutzen während der Auftragsbearbeitung in einer vorab definierten VR noch Freiheitsgrade durch z. B. ihre Wahl der Fahr- und Steuerbewegungen, so dass erst eine Verkettung verschiedener Einflussfaktoren zu Kollisionen führen kann (vgl. Reason 1994). Anhand der vorgestellten Gefährdungs- und Kollisionssituationen deutet sich auch an, dass eine Steuerung in solchen Situationen die Verarbeitung unterschiedlicher Informationen erfordert. Sind Informationen nicht vorhanden oder werden von vorhandenen nicht alle relevanten berücksichtigt, können sich Fehlhandlungen und in ihrer Konsequenz Kollisionen bzw. Unfälle ergeben (vgl. Leplat & Rasmussen 1984).

Studien in VR, in denen in potentiellen Gefahrensituationen Unfälle als selten auftretende Ereignisse untersucht werden können, sollten für diesen Anwendungskontext zukünftig häufiger genutzt werden und Möglichkeiten von arbeitsablaufbezogenen Informations- und Unfallanalysen intensiver ausschöpfen. Einschränkend ist allerdings darauf hinzuweisen, dass auch Simulationen mithilfe von VR, wie jede andere Simulation, bei der Reduktion der Realität mit Modellen arbeitet und eine Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus VR-Studien in die betriebliche Praxis weder uneingeschränkt zu gewährleisten noch unhinterfragt zu empfehlen ist.

5. Literatur

- DGUV-I 280-019 (2013). Sicherer Umgang mit fahrbaren Hubarbeitsbühnen. Berlin: DGUV.
- DIN EN 280 (2014). Fahrbare Hubarbeitsbühnen – Berechnung – Standsicherheit – Bau – Sicherheit – Prüfungen. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 10075-2 (2000). Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin: Beuth.
- Leplat J, Rasmussen J (1984) Analysis of human errors in industrial incidents and accidents for improvement of work safety. *Accident Analysis & Prevention* 16 (2), 77-88.
- Nickel P, Lungfiel A, Nischalke-Fehn G, Trabold R-J (2013) A virtual reality pilot study towards elevating work platform safety and usability in accident prevention. *Safety Science Monitor* 17 (1), 2/1-2/10.
- Nickel P, Lungfiel A, Bömer T, Koppenborg M, Trabold R-J (2014) Wirksamkeit einer ergänzenden Schutzmaßnahme in virtueller Realität zur Unfallprävention bei Hubarbeitsbühnen. In: GfA (Hrsg) *Gestaltung der Arbeitswelt der Zukunft*. Dortmund: GfA-Press, 85-87.
- Nischalke-Fehn G, Bömer T (2011) Quetschunfälle an Hubarbeitsbühnen durch modifizierte Meister-schalter verhindern. *Aus der Arbeit des IFA* 0332 (12/2011), 1-2.
- Reason, J (1994) *Menschliches Versagen: Psychologische Risikofaktoren und moderne Technologien*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Stocker K, Deuchert A, Zepp C (2011) Hubarbeitsbühnen (Sicherheit und Gesundheit). *BGHM-Aktuell* 4 (2011), 16-20.

Danksagung: Das Sachgebiet "Fördern, Lagern, Logistik im Warenumschlag" im DGUV-Fachbereich "Handel und Logistik" hat die zugrundeliegende Studie initiiert, die ebenso von der BG Holz und Metall (BGHM) und der BG Handel und Waren-distribution (BGHW) unterstützt wurde. Ein besonderer Dank gilt ebenso den Pro-banden, ohne die es für die vorliegenden Analysen keine Daten geben würde.