

Verbundprojekt:
Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger
oder altersbedingter Beeinträchtigung (SiME)

Teilvorhaben:
Parameterstudien für die sichere Evakuierung
heterogener Personengruppen

Förderkennzeichen:
13N13950

Schlussbericht
Teile 1 und 2

Maik Boltes
Jette Schumann

Forschungszentrum Jülich
Institute for Advanced Simulation
IAS-7: Zivile Sicherheitsforschung
52425 Jülich

<http://www.fz-juelich.de/ias/ias-7>

27. November 2019

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellungen	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen	1
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand	2
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	2
2	Eingehende Darstellung	4
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	4
2.1.1	Kleinskalige Studien	4
2.1.2	Großskalige Studien	5
2.1.3	Erweiterung des Erfassungssystem	7
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	13
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	13
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans	13
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	14
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	14
A	Literatur	17

Abbildungsverzeichnis

1	Aufnahmen der zentralen Kamera und aus den Aufnahmen extrahierte Trajektorien .	6
2	Positionierung und Erfassungsbereiche der Kameras	6
3	Aufnahmen verschiedener Kameras einer Studie	7
4	Inertiale Sensore an der Rückseite eines Rollstuhls befestigt	8
5	Vorstudien zum Testen des neuen Sensorsystems	9
6	IMU-Datensatzes für die Bewegung eines Rollstuhls durch die Engstelle	11
7	Technisches Setup für die Durchführung der Validierungsexperimente	12

1 Kurzdarstellungen

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundforschungsprojektes SiME war die Erarbeitung von Vorschlägen, wie Menschen mit körperlichen, geistigen oder altersbedingten Beeinträchtigungen in Sicherheitskonzepten berücksichtigt werden können. Diese basieren auf den in den Teilvorhaben durchgeführten empirischen Studien. Die Bewegung von heterogen zusammengesetzten Personengruppen im Labor- und Feldstudienmaßstab wurde dafür ebenso berücksichtigt, wie die Sichtweisen und Bedürfnisse der Betreiber von Einrichtungen der Eingliederungshilfe sowie von Akteuren von Sicherheitsinfrastrukturen.

Ziel des Teilvorhabens „Parameterstudien für die sichere Evakuierung von Menschen mit Behinderung“ war es, die Bewegungsmuster bei Evakuierungsprozessen, an denen Menschen mit Behinderung beteiligt sind, zu analysieren. Die Ergebnisse der Parameterstudien sollten dazu beitragen, den Zeit- und Ressourcenbedarf von Evakuierungen heterogener Personengruppen besser verstehen und beschreiben zu können. Die Ergebnisse sollten so aufbereitet werden, dass sowohl eine überschlägige Abschätzung der erforderlichen Zeiten und Ressourcen möglich ist, aber auch in bestehende Simulationsmodelle, in denen Menschen mit Behinderung bislang nicht angemessen berücksichtigt werden, einfließen. Diese Werkzeuge bieten die Möglichkeit, die baulichen, anlagentechnischen und organisatorischen Randbedingungen in Bauwerken so zu planen, dass für alle Menschen - mit und ohne Behinderung - dasselbe Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann. Sie stellen damit einen wesentlichen Baustein für die im Projekt erarbeitete Sicherheitsstrategie dar.

1.2 Voraussetzungen

Im Kontext des Rahmenprogramms der Bundesregierung „Forschung für die Zivile Sicherheit 2012-2017“, wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Förderinitiative „Zivile Sicherheit - Erhöhung der Resilienz im Krisen- und Katastrophenfall“ veröffentlicht. Das Verbundforschungsprojekt SiME wurde mit einer Laufzeit vom 01.02.2016-31.05.2019 gefördert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungszentrum Jülich war inhaltlich und organisatorisch an den Arbeitspaketen 3 und 4 beteiligt. Um den Informationsfluss innerhalb des Projektes zu gewährleisten, wurde jedoch auch an Arbeitstreffen und Workshops, die in anderen Arbeitspaketen organisiert wurden, teilgenommen.

In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit wurde die Parameterstudie inhaltlich und technisch vorbereitet. Hierzu wurde eine Räumungsübung zur Erfassung von wesentlichen Unterschieden und Herausforderungen bei der Räumung eines Gebäudes mit beeinträchtigten Personen bei der Lebenshilfe in Wermelskirchen begleitet. Eine Bewertungsmatrix zur Ermittlung von Auswahlkriterien der Probanden der Parameterstudie wurde entwickelt. Tests von Techniken zur Erfassung der Bewegung von (teilweise) verdeckten Personen während der Parameterstudien wurden durchgeführt und daraufhin für diesen Zweck inertielle Sensoren beschafft. Die zu untersuchenden Geometrien und weitere Technik für die Erfassung der Laufwege wurden bestimmt und beschafft.

In der zweiten Hälfte wurden die Parameterstudien durchgeführt, die Daten erhoben und Verfahren zur Laufwegebestimmung mittels inertialer Sensoren entwickelt. In enger Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung wurden daraufhin die Ergebnisse analysiert und dienten als Baustein für die im Projekt erarbeitete Sicherheitsstrategie.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die rechtlichen Grundlagen für die baulichen und organisatorischen Maßnahmen im Kontext der Barrierefreiheit wurden in dem aus Mitteln der „Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ geförderten Projekt „Organisatorische und bauliche Maßnahmen zur Bewältigung von Notfallsituationen körperlich und sensorisch behinderter Menschen in Hochhäusern und öffentlichen Gebäuden mit hoher Benutzerfrequenz“ [1] bereits in großer Detailtiefe analysiert. Ziel der Barrierefreiheit ist es, dass „Menschen mit Behinderung im Sinne einer selbstbestimmten Teilhabe auch Notfallsituationen ohne fremde Hilfe bewältigen können“. Voraussetzung dafür ist die Barrierefreiheit des ersten und zweiten Rettungsweges sowie die Wahrnehmbarkeit der Alarmsignale. Dieses wird heute jedoch nur in Ausnahmefällen erreicht.

Im Rahmen von Evakuierungsübungen wird das Zusammenspiel von betroffenen Personen, Mitarbeitern und Einsatzkräften zwar regelmäßig geübt, analytisch nachvollziehbare Berechnungsansätze bestanden jedoch nicht. Simulationswerkzeuge, welche heute bereits regelmäßig eingesetzt werden, um im Planungsprozess die ausreichende Bemessung der Rettungswege für Versammlungsstätten oder Großveranstaltungen im Freien nachzuweisen, waren nicht in der Lage, auch beeinträchtigte Personen zu berücksichtigen.

Es fehlte die verlässliche Datenbasis, um bestehende Werkzeuge mit Kennwerten kalibrieren und validieren zu können. Erste Parameterstudien zum Zeit- und Ressourcenbedarf für die Evakuierung von Personen mit Mobilitätseinschränkung aus Hochhäusern waren durch Adams und Galea [2] im Jahr 2008 durchgeführt worden. Für die analytische Beschreibung der Evakuierungsprozesse in variablen Umgebungen reichten diese Untersuchungen aber nicht aus.

Um die für die Dynamik innerhalb einer Menschenmenge wichtigen Größen zu jeder Zeit und an jedem Ort bestimmen zu können, sind die Laufwege aller Personen innerhalb der Menge zu detektieren. Für die Detektion von Personen, die nicht visuell erfasst werden können - wie z. B. Rollstuhlfahrer innerhalb einer Menschenmenge -, wurde im Projektverlauf ein Verfahren entwickelt, das mittels Sensordatenfusion erlaubt, auch die (temporär) nicht sichtbaren Personen zu verfolgen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die folgenden direkt am Verbundprojekt beteiligten Partner/-innen haben unmittelbar oder beratend mit dem Forschungszentrum Jülich zusammengearbeitet:

- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),
- Hochschule Niederrhein, SO.CON Institut,
- Werkstatt Lebenshilfe Bergisches Land GmbH,
- Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrenstechnik, Institut für Apparate- und Umwelttechnik,
- PTV Transport Consult,
- TraffGo HT,
- Team HF - Human Factors Forschung Beratung Training,
- Assoziierte Partner:
 - Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.,

- Landeshauptstadt Düsseldorf in Person von Frau Christa Rigter (Amt für soziale Sicherung und Integration) sowie Herrn Hans-Joachim Jung (Technische; Arbeitssicherheit, Notfallmanagement) und
- Berufsfeuerwehr Düsseldorf in Person von Herrn Thomas Hussmann.

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden die wichtigsten wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse des Teilvorhabens vorgestellt. Eine vollständige Präsentation findet sich in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen (Abschnitt 2.6), die zum großen Teil auch online verfügbar sind.

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Bei der Darstellung der wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse des Teilvorhabens steht die Konfiguration, technische Begleitung und Auswertung einer klein- und großskaligen Studie im Vordergrund. Im Vergleich zu früheren Forschungsprojekten (Hermes¹, BaSiGo²) wurde der Einfluss der Heterogenität auf die Bewegung einer Menschenmenge untersucht, speziell die Auswirkung der Präsenz von Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung. Zudem wurde das bereits erprobte Kamera-Erfassungssystem um neue Sensoren erweitert, um eine lückenlose Erfassung dieser heterogenen Menschenmenge zu gewährleisten. Fortführende detaillierte Informationen zu den Studien und der Erfassungstechnik sind in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen festgehalten (Abschnitt 2.6).

2.1.1 Kleinskalige Studien

Im Rahmen von kleinskaligen Studien wurden Teilprozesse einer Evakuierung untersucht, welche besonders durch die individuellen Fähigkeiten und Einschränkungen der betroffenen Personen beeinflusst werden. Die Studien wurden im Wohnheim „Haus Drei Birken“ in Hückeswagen technisch begleitet und anschließend analysiert.

Es wurden Daten für die Pre-Movement Phase (Zeitraum, der bis zur Bewegung im Sinne der Selbstrettung verstreicht) und die Movement-Phase (Zeitraum der eigentlichen Evakuierung) erhoben. Der Zeitbedarf zur Vorbereitung verschiedener Assistenzmittel (Rollstuhl, Evakuierungsstuhl und Evakuierungsmatratze) mit Umlagerungszeiten wurde studiert. Zudem wurden auch die freie Gehgeschwindigkeit in einem Flur und auf einer Treppe untersucht. Die verschiedenen Vorgänge wurden mit Kameras erfasst, wodurch Material zur Videoanalyse bereitgestellt werden konnte. Eine Extraktion von Laufwegen wurde an dieser Stelle nicht benötigt. Die durchschnittlichen Vorbereitungszeiten beim Einsatz verschiedener Hilfsmittel sind in [3] dokumentiert. Die Ableitung weiterer allgemeiner Aussagen erwies sich aufgrund der sich stark unterscheidenden individuellen Fähigkeiten der zu rettenden Personen und der Abhängigkeit von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Helfer als schwierig.

Am Abend vor diesen Studien wurde eine unangekündigte Evakuierungsübung durchgeführt, deren Geschehen ebenfalls aufgezeichnet wurde. Dabei wurden die Vorgänge in den Fluren der oberen Etage über die Treppe bis nach draußen erfasst. Die Sichtung der Aufnahmen hat ergeben, dass es sich bei der Treppe und dem implizierten Umlagern der Personen in einen Evakuierungsstuhl um einen sehr zeitkritischen Punkt handelt.

¹BMBF-Projekt „Hermes“ Erforschung eines Evakuierungsassistenten für den Krisenfall bei Großveranstaltungen. Förderkennzeichen: 13N9952 bis 13N9960.

²BMBF-Projekt „BaSiGo“ Bausteine für die Sicherheit von Großveranstaltungen. Förderkennzeichen: 13N12043 bis 13N12052.

2.1.2 Großskalige Studien

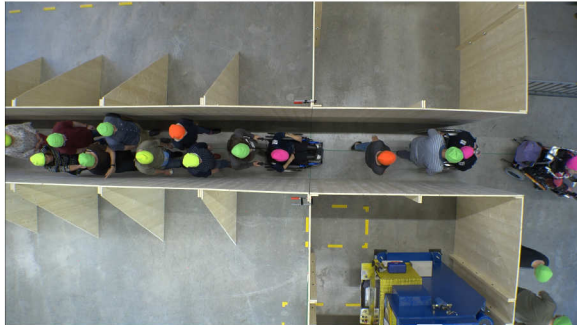
Zur Erfassung von wesentlichen Unterschieden und Herausforderungen bei der Räumung eines Gebäudes mit beeinträchtigten Personen wurde eine Räumungsübung bei der Piloteinrichtung Werkstatt Lebenshilfe Bergisches Land begleitet. Für eine anschließende ausführliche Analyse wurden Kameras in einem Teil des Gebäudes und des Außenbereichs installiert und die Positionierung und Ausrichtung ausgemessen. Die Evakuierung wurde aufgezeichnet, synchronisierte Ausschnitte extrahiert und der Evakuierungsprozess analysiert.

Im Rahmen von Expertenworkshops an der Hochschule Niederrhein sowie ergänzender Abstimmungsgespräche mit Vertretern der Hochschule Niederrhein und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung wurden die Auswahlkriterien für die an den Parameterstudien einzuladenden Probanden erarbeitet. Zu diesem Zweck wurde ein sogenannter Score entwickelt, der es ermöglicht, die verschiedenen Arten von Beeinträchtigungen zu klassifizieren [4, 5]. Hierauf aufbauend konnte die konzeptionelle Vorplanung für die Parameterstudien erfolgen.

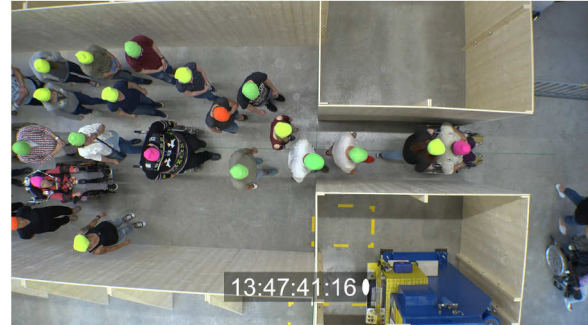
In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und der Werkstatt Lebenshilfe Bergisches Land wurden anschließend die großskaligen Bewegungsstudien konfiguriert und durchgeführt. An zwei Studientagen mit 148 Studiendurchläufen nahmen 46 Menschen mit Behinderung und ca. 135 Menschen ohne Beeinträchtigung teil. Die Bewegung verschiedener Personengruppen wurde in einem Korridor und einer Engstelle mit variierenden Breiten von $b = [0.9, 1.0, 1.1, 1.2]\text{m}$ untersucht. Die Bewegungsstudien sind damit die weltweit umfangreichsten wissenschaftlichen Untersuchungen, die sich mit dem Einfluss heterogen zusammengesetzter Populationen auf Kenngrößen der Bewegung beschäftigen. Für die Durchführung wurden Betreuer und Probanden akquiriert und während der Studientage betreut. Die geometrischen Setups eines Korridors (Abb. 1a) und einer Engstelle (1b) wurden geplant sowie auf- und umgebaut. Die technische Realisierung der Studiendurchführung umfasste zudem die Erfassungstechnik. Der gesamte Studienraum wurde örtlich referenziert und zeitlich synchronisiert von 6 hochauflösenden Kameras aufgezeichnet, sodass anschließend Laufwege extrahiert werden konnten.

Zur Erfassung der Bewegung der Menschenmenge wurden mehrere Kameras an der Decke positioniert. Neben dem Kamera-System wurden inertielle Sensoren verwendet, worauf detailliert im nächsten Abschnitt eingegangen wird. Um eine lückenlose Erfassung des gewünschten Bereichs gewährleisten zu können, wurden die Räumlichkeiten zuvor vermessen und Signalwege bestimmt. Für die vorangegangenen Projekte wurden bereits Verfahren entwickelt, um aus den Überkopf-Aufnahmen der Kameras Trajektorien zu extrahieren [6, 7]. Die Positionierung der Kameras mit den entsprechenden Erfassungsbereichen ist in Abb. 2 zu sehen.

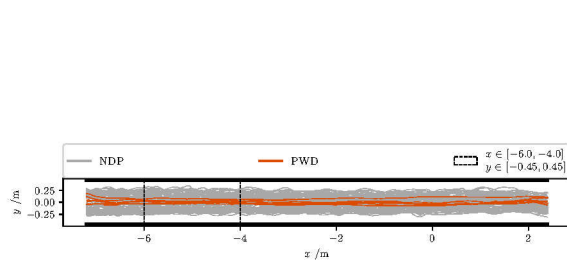
Die Probanden trugen farbige Mützen, die entsprechend ihrer Körpergröße vergeben wurde. Über die Kenntnis der Größe der Probanden, kann der Abstand der erfassten Personen zur Kamera berechnet werden, was eine genauere Extraktion der Trajektorien ermöglicht. Die Laufwege der zentralen Kamera wurden automatisch extrahiert und in ein gemeinsames globales Koordinatensystem des Studienraumes eingebettet. Die Trajektorien wurden manuell korrigiert und falls vorhanden, die Sensorsignale entsprechend zugeordnet. Die Trajektorien wurden mit den Laufwegen der Kameras fusioniert, die den Aufstellbereich und den Eintritt in die Geometrie erfasst haben. Die Daten wurden unter [8] veröffentlicht, wo auch eine detaillierte Dokumentation der Daten zu finden ist.



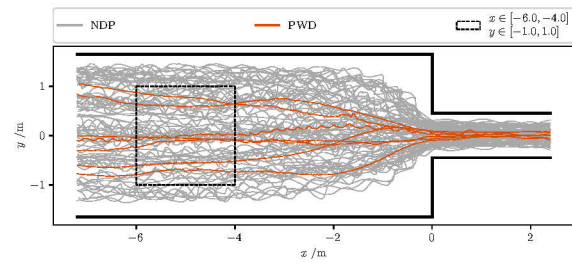
(a) Bewegungsstudie für einen Korridor



(b) Bewegungsstudie für eine Engstelle



(c) Extrahierte Trajektorien für einen Korridor



(d) Extrahierte Trajektorien für eine Engstelle

Abbildung 1 – Aufnahmen der zentralen Kamera und aus den Aufnahmen extrahierte Trajektorien

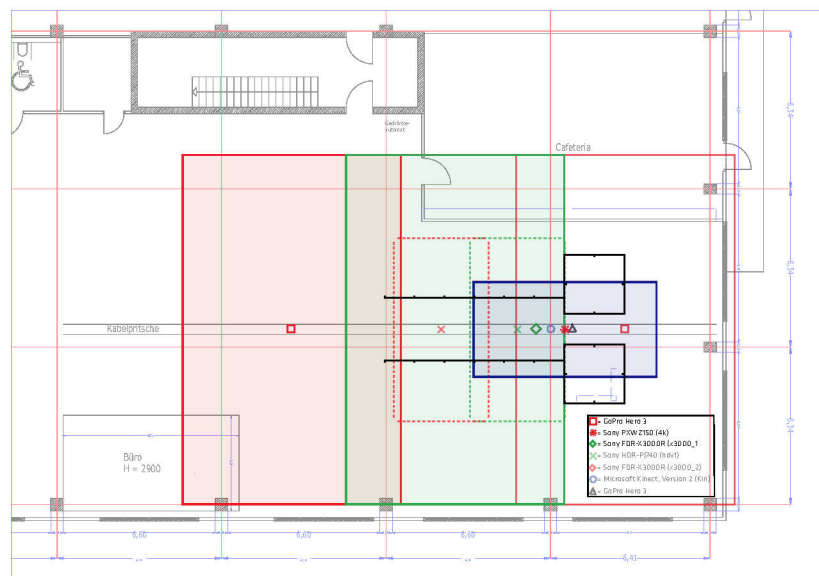


Abbildung 2 – Positionierung und Erfassungsbereiche der verschiedenen Kameras mit denen die Bewegungsstudien aufgezeichnet wurden



(a) Erfassung des Aufstellbereichs



(b) Erfassung des Betreten der Geometrie



(c) Erfassung des zentralen Bereichs der Studien

Abbildung 3 – Aufnahmen verschiedener Kameras einer Studie für welche die extrahierten Trajektorien fusioniert wurden, um vollständige und einheitliche Laufwege zur Verfügung stellen zu können

Aus den Trajektorien, die von jeder teilnehmenden Person den zeitlichen Verlauf ihrer Position im Erfassungsbereich beschreiben, wurden wichtige Kenngrößen wie Geschwindigkeit, Dichte und Fluss zur Beschreibung der Dynamik der heterogenen Personengruppen bestimmt. Durch u. a. hohe soziale Interaktionen und gegenseitige Rücksichtnahme wurden im Vergleich zu anderen Studien nur geringe Geschwindigkeiten und Dichten beobachtet. Vor allem die Anwesenheit von Personen mit nach außen klar sichtbaren Behinderungen (wie bei der Nutzung eines Rollstuhls) führte dazu, dass die geringere Geschwindigkeit der Person im Rollstuhl frühzeitig adaptiert wurde und dies unabhängig von der gemessenen Dichte. Diese Erkenntnisse stehen im Kontrast zum bisherigen Verständnis des klassischen Fundamentaldiagramms der Fußgängerbewegung und werden in [9, 10] detailliert diskutiert.

2.1.3 Erweiterung des Erfassungssystem

Die Erfassung der Bewegung einer heterogenen Menschenmenge hat neue Anforderungen an das vor Projektbeginn bestehende Kamera-Erfassungssystem gestellt. Unterschiedliche Personengrößen und die perspektivische Sicht auf die Menschenmenge führen dazu, dass kleinere Personen (insbesondere Rollstuhlfahrer) verdeckt und somit von den Kameras nicht erfasst werden können. Daraus resultiert eine unvollständige bzw. fehlerhafte Datenbasis an Trajektorien und kritische Werte wie die Dichte könnten unterschätzt werden. Um dem entgegenzuwirken und nicht sichtbare Bewegungen erfassen zu können, wurde in Ergänzung zum Kamerasystem neue Sensorik eingesetzt.

Innerhalb der letzten Jahre wurden viele Technologien weiterentwickelt mit dem Ziel die Position von Personen oder auch Objekten in Gebäuden zu bestimmen [11]. Neben kabellosen Systemen wie WiFi, Bluetooth oder Ultrasound, können auch Methoden der Koppelnavigation (Dead Reckoning) angewendet werden, um die Position von Objekten zu verfolgen. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche haben sich inertielle Sensoren, die zu den Koppelnavigations-Systemen zählen, als erfolgversprechendste Methode zur Erweiterung des Kamera-Erfassungssystems ergeben. Ausführliche Abhandlungen über die Vor- und Nachteile verschiedener Tracking-Systeme im Innenbereich sind in [11] und [12] zu finden.

Inertielle Sensoren (IMUs, Inertial Measurement Units) enthalten einen Beschleunigungs- und einen Drehratensensor und oft auch ein Magnetometer. Mit den Signalen dieser Sensoren ist es möglich ausgehend von einer absoluten Startposition durch die Verarbeitung der relativen Bewegungsänderung die Position zu verfolgen. Allerdings ergibt sich aufgrund der relativen Lokalisierungsmethode und diskreter, verrauschter Signale eine Drift in der Positionsschätzung, welche durch geeignete Verfahren eingeschränkt werden muss.

IMUs sind als in sich abgeschlossene, leichtgewichtige und robuste Messeinheiten (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) verfügbar, die an Personen befestigt werden können ohne deren Bewegung einzuschränken [13, 14]. Zudem bieten die Sensoren den Vorteil, dass keine aufwendige Infrastruktur zur Erfassung der Sensordaten benötigt wird. Inertielle Sensoren wurden schon in diversen Studien anderer Forscher eingesetzt, um die Bewegung von Fußgängern zu verfolgen. Durchgeführte Studien und verschiedene Berechnungsmethoden wurden in [15] zusammengefasst.

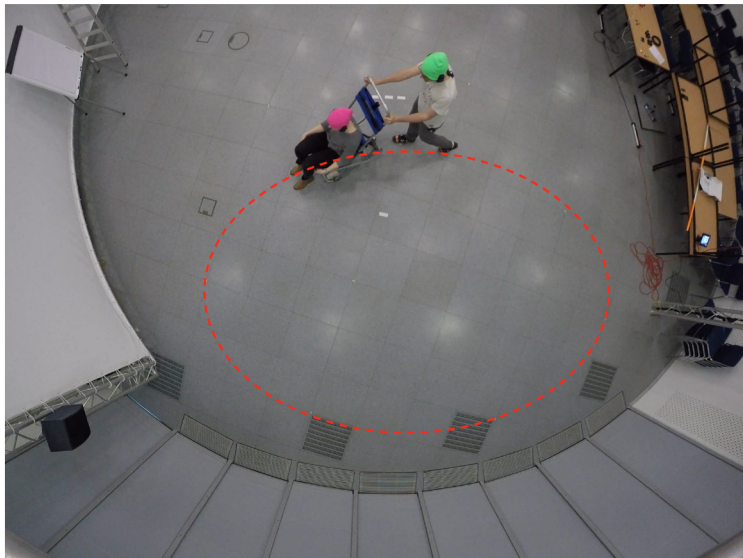
Verschiedene Hersteller inertialer Systeme wurden kontaktiert und verglichen. Letztendlich fiel die Wahl auf das System von SABELLabs [16], insbesondere aufgrund der Möglichkeit der lokalen Datenspeicherung, der Möglichkeit der zur Synchronisierung mit Videomaterial und dem Preis-Leistungs-Verhältnis. Die Sensoren sind in Abb. 4 zu sehen und können mit Hilfe von Klebeband oder Klemmen an den gewünschten Positionen befestigt werden. Es wurden 25 Sensoren mit dem zugehörigen Kommunikationssystem geordert.



Abbildung 4 – Inertielle Sensoren in blau mit Hilfe von Klemmen an der Rückseite eines Rollstuhls befestigt

Zur Vorbereitung auf die eigentlichen Bewegungsstudien wurden zwei kleinere Vorstudien durchgeführt. Um die Eignung inertialer Sensoren bezüglich des Vorhabens zu testen, wurden Vorstudien mit den in Handys verbauten inertialen Sensoren realisiert. Verschiedene Bewegungsvorgänge und die Bewegung eines Rollstuhls wurden dabei untersucht und erste Algorithmen zur Extraktion der Lauf-

wege aus den Signalen implementiert. Für die Umsetzung des Vorhabens werden genauere inertielle Sensoren benötigt, mit denen die Probanden ausgestattet werden können ohne sie in ihrer Bewegung einzuschränken (was mit Smartphones in dieser Form nicht möglich ist). Nach Erhalt des Sensorsystems von SABELLabs wurde dieses in Kombination mit dem Kamerasystem getestet. Die Synchronisierung mit dem Kamerasystem, Befestigungsmöglichkeiten der Sensoren und Anwendungsgrenzen des Systems (wie z. B. die Laufzeit) wurden erprobt (siehe Abb. 5).



(a) Aufnahme der Kamera



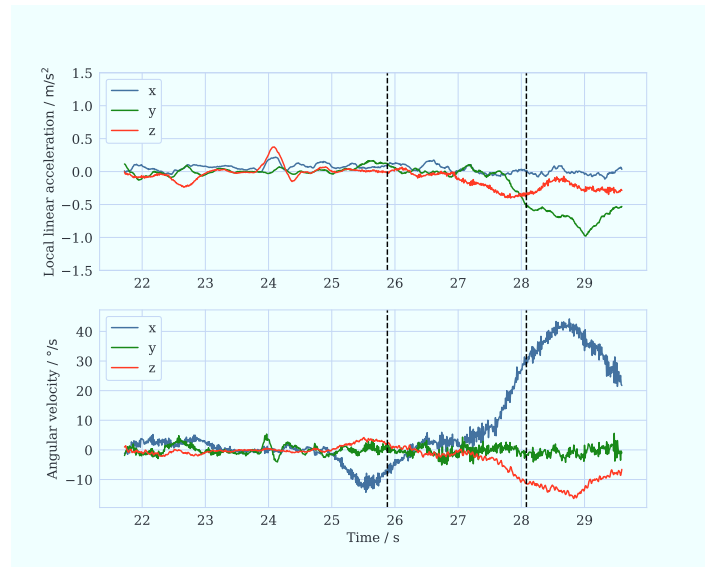
(b) Evakuierungsstuhl ausgestattet mit inertialen Sensoren

Abbildung 5 – Vorstudien zum Testen des neuen Sensorsystems: Ein Evakuierungsstuhl wurde mit IMUs ausgestattet und durch den Raum bewegt

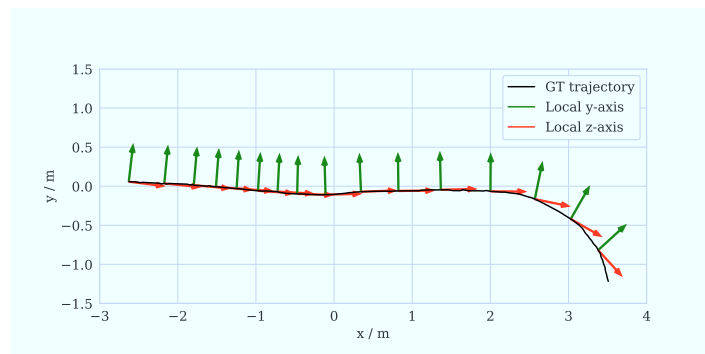
Bei den großskaligen Studien wurden aufgrund ihrer geringen Größe (und somit der hohen Wahrscheinlichkeit der Verdeckung) alle Rollstuhlfahrer mit inertialen Sensoren ausgestattet. An jedem Rollstuhl wurden zwei Sensoren an der Rückenlehne befestigt. Zusätzlich trugen die Probanden einen Sensor unter der Mütze.

Es wurden geeignete Verfahren entwickelt, um die lokalen IMU-Daten im globalen Kamera-Koordinatensystem auszurichten, sodass die Trajektorie eines Rollstuhlfahrers mit IMU-Daten angereichert werden kann und diese Daten genutzt werden können, um eventuelle Lücken in den Trajektorien aufzufüllen. Die IMUs enthalten einen Beschleunigungs- und Drehratensensor und einen Kompass. Ein Beispiel für einen IMU-Datensatz ist in Abb. 6a zu sehen. Für die Verfolgung der homogenen Bewegung eines Rollstuhls wurden Tracking-Ansätze aus dem Bereich inertialer Navigationssysteme herangezogen [17]. Durch Anwendung eines Orientierungs-Filters [18], der die Messwerte aller drei Sensor-Komponenten fusioniert, wird die Orientierung des Sensors im Raum bestimmt. Ein Ergebnis dieses Filters ist in Abb. 6b zu sehen. Die zurückgelegte Distanz wurde anfangs über Doppelintegration der Beschleunigungswerte berechnet. Diese Vorgehensweise hat sich als sehr fehleranfällig herausgestellt. Die Sensoren sind sehr sensitiv und messen Einflüsse, die nicht auf die eigentliche Bewegung des Rollstuhls zurückzuführen sind. So wird zum Beispiel bei flexiblen Rückenlehnen auch die Bewegung der Person im Rollstuhl von den Sensoren erfasst, was die Positionsbestimmung des Rollstuhls erschwert. Durch die Fusion der Daten beider IMUs von der Rückenlehne basierend auf der

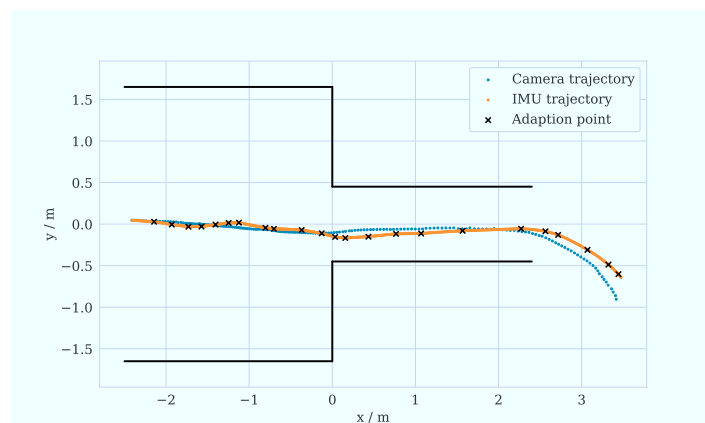
Idee eines Kalman-Filters wie er in [19, 20] verwendet wurde, ist es möglich, das Abdriften der IMU-Trajektorie einzuschränken. Allerdings sind zusätzliche Randbedingungen nötig, um eine akzeptable Genauigkeit der Trajektorie zu erhalten. Durch das Einbeziehen zusätzlicher Randbedingungen, die vom Kamera-System zur Verfügung gestellt werden, wie die Geschwindigkeit umgebender Personen, wird die IMU-Trajektorie korrigiert und die Drift weiter eingeschränkt. Mit diesen Optimierungsmaßnahmen konnte der durchschnittliche Fehler der Positionsbestimmung aus IMU-Daten von 7 m auf 0.12 m reduziert werden. Abb. 6 zeigt eine berechnete IMU-Trajektorie im Vergleich zur vom Kamera-System erfassten Trajektorie.



(a) Vorverarbeitete IMU-Signale eines Rollstuhls. Das Abbiegen am Ende ist deutlich in den Daten sichtbar



(b) Berechnete Orientierung des Sensors am Rollstuhl. Die lokale z-Achse in rot zeigt in Bewegungsrichtung



(c) Berechnete Trajektorie des Sensors am Rollstuhl durch Fusion der Daten beider IMUs und der korrekativen Einbeziehung der Kamera-Daten einer umgebenden Person

Abbildung 6 – Beispiel eines IMU-Datensatzes und der abgeleiteten Werte für die Bewegung eines Rollstuhls durch die Engstelle

In Zusammenarbeit mit der Charles Darwin University wurden Studien zur Validierung der implementierten Tracking-Verfahren durchgeführt. Die Bewegung eines Rollstuhls wurde mit einem 3D-Kamera-System und inertialen Sensoren erfasst (siehe Abb. 7). Dies ermöglicht den Vergleich der aus den Sensor-Signalen berechneten Trajektorien mit den erfassten Positionen des Kamera-Systems, welches millimetergenau arbeitet.

Diese Studien haben ergeben, dass die Orientierung des Rollstuhls mit einer hohen Genauigkeit und einem durchschnittlichen Fehler von 4° bestimmt werden kann. Die Bestimmung der Trajektorie des Rollstuhls aus den IMU-Daten hat sich aber auch hier als schwierig herausgestellt, obwohl bei diesen Studien viele externe Fehlerquellen ausgeschlossen wurden. Die Sensoren sind sehr sensitiv, sodass auch hier Vorgänge wahrgenommen werden, die nicht mit einer Positionsänderung in Zusammenhang stehen (z.B. ist ein „Ruckeln“ in den Daten zu sehen, wenn sich die Person mit den Füßen zur Fortbewegung abstößt). Selbst durch die Fusion der Daten zweier IMUs driftet die berechnete Trajektorie nach wenigen Sekunden ab, was die Notwendigkeit der Verfügbarkeit von Bewegungsdaten umgebender Personen unterstreicht.



(a) Inertiale Sensoren versehen mit Markern des 3D-Tracking-Systems



(b) Bewegungsstudie für eine Engstelle

Abbildung 7 – Technisches Setup für die Durchführung der Validierungsexperimente

Zur Verarbeitung der Sensordaten wurde ein Software-Framework entwickelt, das folgende grundlegende Funktionen besitzt:

- Einlesen und Vorverarbeitung der Sensorsignale
- Methoden zur Fusion der Sensorsignale mit den Kameradaten
- Anwenden verschiedener Tracking-Verfahren zur Berechnung von Trajektorien aus den Sensorsignalen eines Rollstuhlfahrers (in Kombination mit Kameradaten)
- Visualisierung der Signale und Ergebnisse

- Ausgabe berechneter Größen

Das Framework wurde so entwickelt, dass es auch andere Datensätze (nicht nur speziell Daten von Rollstuhlfahrern aus den SiME-Studien) verarbeiten kann und wurde auch schon zur Auswertung anderer Studien zur Bestimmung der Oberkörperrotation aus Sensorsignalen genutzt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Kosten des Teilvorhabens im SiME-Verbundforschungsprojektes wurden mit 310.770 Euro kalkuliert und mit dem Zuwendungsbescheid vom 29.01.2016 bewilligt. Der Großteil der Kosten entfiel auf folgende Positionen:

- 269.464 Euro - Personalkosten für Mitarbeiter zur Bearbeitung des Projektes
- 6.650 Euro - Honorar für Probanden der Bewegungsstudien (50 Euro/Tag)
- 5.272 Euro - Inertiale Sensoren u.a. zur Erfassung der Beschleunigung von Probanden der Parameterstudien
- 4.486 Euro - Beförderung der körperlich und geistig eingeschränkten Probanden der Parameterstudien
- 4.484 Euro - Bau der Geometrien für die Parameterstudien

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zentrales Ziel des Vorhabens war die Erforschung von empirischen Zusammenhängen zur Charakterisierung der Bewegung heterogen zusammengesetzter Personengruppen. Für die Planung und Durchführung der Studien sowie die technische Realisierung wurde über die Projektlaufzeit eine wissenschaftliche Mitarbeiterin eingesetzt. Ein erhöhter Personalaufwand wurde durch Eigenmittel kompensiert.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die Bewertung der Bewegung von Personen in einer Gruppe ist wesentlicher Bestandteil eines jeden Sicherheitskonzeptes. Die bisher verwendeten Methoden beruhen auf der modellhaften Vorstellung, dass der Parameterraum einflussnehmender, individueller Eigenschaften kontrollierbar ist. Ein Verständnis über den Einfluss heterogen verteilter Eigenschaften auf die Aussagekraft bisher verwendeter Kenngrößen ist nur durch anwendungsorientierte Forschung zu generieren. Mit den im SiME-Verbundforschungsvorhaben durchgeführten empirischen Studien zur Pre-Movement und Movement Phase einer Evakuierung wurden erstmalig reproduzierbare Datensätze zur Verfügung gestellt, die eine Bewertung von heterogen zusammengesetzten Personengruppen ermöglichen. Sie bilden mithin die Grundlage für Validierungs- und Sensitivitätsanalysen von Berechnungsmethoden und Simulationsmodellen. Die Ergebnisse sind durch die Gewährleistung einer freien und dauerhaften Zugänglichkeit geeignet, unmittelbar und zukünftig für Forschungs-, Entwicklungs- und Validierungszwecke angewendet zu werden.

Die entwickelten Verfahren und Analysen des Teilvorhabens sind Gegenstand zahlreicher nationaler und internationaler Publikationen (vgl. Abschnitt 2.6). Sie werden zudem als Bestandteil universitärer Lehre (z.B. in Vorlesungen an der Bergischen Universität Wuppertal und der Fachhochschule Aachen) verwendet. Die bereits in früheren, vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben (z.b.

Hermes, BaSiGo, ORPHEUS) initiierte Vernetzung mit anderen Forschergruppen, Anwendern und Praxispartnern, konnte im SiME-Forschungsprojekt vertieft und verstetigt werden. Die auf die Vernetzung aufbauenden Projektanträge, die während der Projektlaufzeit gestellt wurden, können dem Erfolgskontrollbericht entnommen werden. Zentrale Ergebnisse wurden in die entsprechenden Fachgremien und Arbeitskreisen des RiMEA e.V. und die vfdb zur Weiterentwicklung und Verbesserung bestehender Richtlinien und Empfehlungen kommuniziert.

Innerhalb der internationalen Forschergemeinschaft hat sich das Forschungszentrum Jülich in den vergangenen Jahren zu einem führenden Zentrum auf dem Themengebiet der Fußgängerdynamik entwickelt. Die in Jülich vorhandene Expertise soll in den kommenden Jahren weiter ausgebaut und sowohl in die Sicherheitsforschung als auch in die Planung von Verkehrsströmen einfließen. Neben der Verwendung in eigenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und (zukünftigen) Forschungsprojekten eröffnet die im Projekt SiME erweiterte Open-Access-Datenbank auch die Option, die gewonnenen Kenngrößen und Informationen anderen Projekten im Kontext der Sicherheitsforschung und Verkehrsplanung zur Verfügung zu stellen. Die vorgenannte Entwicklung wird auch durch das im Jahr 2018 gestartete BMBF-Verbundprojekt „CroMa - Crowd Management in Verkehrsinfrastrukturen“ dokumentiert.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Bedeutung der Fußgängerdynamik und den damit einhergehenden Fragestellungen wie bspw. der Entscheidungsfindung, Routenwahl und Anforderung an Rettungswege hat in den vergangenen Jahrzehnten massiv zugenommen. Entsprechend intensiv ist das Thema auch Gegenstand aktueller Forschungen anderer Forschergruppen. Zum Verständnis der Zusammenhänge wurden und werden weltweit viele Studien durchgeführt. Eine Aufstellung einiger dieser Untersuchungen kann der Übersicht in [21] entnommen werden.

Speziell im Bereich eingeschränkter Personen wurden während der Projektlaufzeit Analysen zu Studien aus China veröffentlicht, die sich mit dem Einfluss verringerter Sehfähigkeit und des Alterns auf Kenngrößen der Fußgängerbewegung auseinander setzen ([22, 23, 24, 25, 26]). Eine Arbeitsgruppe aus den USA hat kürzlich den Einfluss von heterogen zusammengesetzten Personengruppen auf das Level-of-Service-Konzept untersucht [27] und berücksichtigt dabei eigene, empirisch gewonnenene Daten [28, 29, 30, 31].

Das gleiche Sensorsystem wurde genutzt, um im Rollstuhl sitzende Basketballspieler zu tracken [32]. Statt die Distanz über Doppelintegration zu bestimmen, wurde mit den Sensoren die Drehungen der Räder erfasst und so die Positionsänderung bestimmt. Weitere Publikationen bezüglich des Trackens von Rollstuhlfahrern sind nicht bekannt.

In den meisten Fällen wurden inertiale Sensoren zur Gang-Analyse bzw. Schritterkennung eingesetzt. Außerdem wurden inertiale Sensorsysteme in den letzten Jahren zunehmend zur Erfassung der Bewegung einzelner Gliedmaßen bis hin zur Ganzkörperbewegung entwickelt bzw. benutzt [33, 34, 35]. Dabei handelt es sich um vielversprechende Ansätze nicht sichtbare Bewegungen der Probanden in einer Menschenmenge zu erfassen und analysieren zu können.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Beiträge in Zeitschriften

1. Paul Geoerg, Robert Malte Polzin, Jette Schumann, Stefan Holl and Anja Hofmann. “Small-scale Studies on Evacuation Characteristics of Pedestrians with physical, mental or age-related

- Disabilities”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1107 (Nov. 2018), p. 072006. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/7/072006.
2. Paul Geoerg, Florian Berchtold, Steven Gwynne, Karen Boyce, Stefan Holl and Anja Hofmann. “Engineering egress data considering pedestrians with reduced mobility”. In: *Fire and Materials* 43.7 (Aug. 2019), pp. 759–781. DOI: 10.1002/fam.2736.
 3. Paul Geoerg, Jette Schumann, Stefan Holl and Anja Hofmann. “The Influence of Wheelchair Users on Movement in a Bottleneck and a Corridor”. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019 (2019). DOI: 10.1155/2019/9717208.
 4. Paul Geoerg, Jette Schumann, Maik Boltes, Stefan Holl and Anja Hofmann. “The Influence of Individual Impairment on Crowd Dynamics: (in press)”. In: *Fire and Materials* (2019).
 5. Paul Geoerg, Rainer Block, Werner Heister, Stefan Holl, Axel Pulm and Anja Hofmann. “A Score regarding the need for assistance – evacuation considering people with disabilities: (under review)”. In: *Fire Safety Journal* (2019). ISSN: 03797112.
 6. Jette Schumann, Maik Boltes and James Lee. “Hybrid Tracking System for Wheelchair Users in Dense Crowds: (under review)”. In: *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations* (2019).
 7. Milad Haghani, Nikolai W. F. Bode, Maik Boltes, Alessandro Corbetta and Emiliano Cristiani. “Empirical Research on Pedestrians’ Behavior and Crowd Dynamics”. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019 (Nov. 2019), pp. 1–2. DOI: 10.1155/2019/3457370.

Konferenzbeiträge

8. Maik Boltes, Stefan Holl, Antoine Tordeux, Armin Seyfried, Andreas Schadschneider and Ulrich Lang. “Influences of Extraction Techniques on the Quality of Measured Quantities of Pedestrian Characteristics”. In: *Proceedings of Pedestrian and Evacuation Dynamics 2016*. 2016, pp. 500–547.
9. Paul Geoerg, Rainer Block, Werner Heister, Stefan Holl, Axel Pulm and Anja Hofmann. “A score regarding the need for assistance: Considering pedestrians with disabilities in evacuation planning”. In: *Proceedings of the 5th Magdeburg Fire and Explosion Prevention Day*. Ed. by Ulrich Krause and Michael Rost. Magdeburg and Germany, 2017. ISBN: 978-3-00-056201-3.
10. Maik Boltes, Jette Schumann and Daniel Salden. “Gathering of data under laboratory conditions for the deep analysis of pedestrian dynamics in crowds”. In: *2017 14th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS)*. 2017. DOI: 10.1109/AVSS.2017.8078471. (Visited on 10/01/2018).
11. Jette Schumann and Maik Boltes. “Tracking of wheelchair users in dense crowds”. In: *2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*. 2017. URL: <http://www.ipin2017.org/ipinpapers/217/217.pdf> (visited on 10/01/2018).
12. Paul Geoerg, Robert-Malte Polzin, Stefan Holl and Anja Hofmann. “Berücksichtigung von Personen mit körperlichen, geistigen oder altersbedingten Beeinträchtigungen in der Evakuierungsforschung”. In: *Tagungsband der 65. Jahresfachtagung*. Ed. by Vereinigung zur Förderung des deutschen Brandschutzes. Köln: VdS Schadenverhütung GmbH Verlag, 2018.
13. Paul Geoerg, Jette Schumann, Maik Boltes, Stefan Holl and Anja Hofmann. “The influence of physical and mental constraints to a pedestrian stream through a bottleneck”. In: *9th Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Ed. by Anne Simone Dederichs. Lund, Sweden, 2018.

14. Paul Geoerg and Stefan Holl. "Considering pedestrians with special needs in evacuation: Predicting the unpredictable?" In: SFPE Fire Safety Engineering Europe Conference. Rotterdam (The Netherlands), 2018.
15. Jette Schumann, Maik Boltes and Armin Seyfried. "Hybrid Tracking System for Pedestrians in Dense Crowds". In: *Traffic and Granular Flow '17*. Ed. by Hamdar S. H. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-11440-4_23.
16. Lea Schliephake, Paul Geoerg, Axel Pulm, Gina Sasse, Stefan Holl and Anja Hofmann. "Die Berücksichtigung von Menschen mit Behinderungen in der Evakuierung". In: *Proceedings of the 6th Magdeburg Fire and Explosion Prevention Day*. Ed. by Ulrich Krause and Michael Rost. 2019. ISBN: 978-3-00-056201-3.
17. Maik Boltes, Juliane Adrian and Anna-Katharina Raytarowski. "Motion capturing in dense crowds by a combination of an inertial and optical system: (to be published)". In: *Traffic and Granular Flow 2019*. 2019.

Andere Publikationen

18. Maik Boltes and Stefan Holl. "SiME - Improved safety for disabled people". In: *inSiDE* 14.1 (2016), p. 75. URL: http://inside.hlrs.de/assets/pdfs/inside%5C_spring16.pdf.
19. Paul Geoerg, Laura Künzer, Robert Zinke, Stefan Holl and Anja Hofmann. "Bewegung besonderer Personengruppen - Berücksichtigung von Barrierefreiheit". In: *Technische Sicherheit* 1 (2018), pp. 38–43.
20. Forschungszentrum Jülich and Federal Institute For Materials Research and Testing. *Influence of individual characteristics*. 2019. DOI: 10.34735/PED.2017.1.
21. Jette Schumann. "Utilizing Inertial Sensors as an Extension of a Camera Tracking System for Gathering Movement Data in Dense Crowds: (expected submission in 2020)". PhD thesis. Bergische Universität Wuppertal, 2020.

A Literatur

- [1] Dirk Boenke, Helmut Grossmann and Michels Karin. “Organisatorische und bauliche Maßnahmen zur Bewältigung von Notfallsituationen körperlich und sensorisch behinderter Menschen in Hochhäusern und öffentlichen Gebäuden mit hoher Benutzerfrequenz”. In: *Abschlussbericht* (2011).
- [2] A.P.M. Adams and Edwin Galea. “An Experimental Evaluation of Movement Devices Used to Assist People with Reduced Mobility in High-Rise Building Evacuations”. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2010*. Springer, 2010, pp. 129–131.
- [3] Paul Geoerg, Robert Malte Polzin, Jette Schumann, Stefan Holl and Anja Hofmann. “Small-scale Studies on Evacuation Characteristics of Pedestrians with physical, mental or age-related Disabilities”. In: *Journal of Physics: Conference Series* 1107 (Nov. 2018), p. 072006. DOI: 10.1088/1742-6596/1107/7/072006.
- [4] Paul Geoerg, Rainer Block, Werner Heister, Stefan Holl, Axel Pulm and Anja Hofmann. “A score regarding the need for assistance: Considering pedestrians with disabilities in evacuation planning”. In: *Proceedings of the 5th Magdeburg Fire and Explosion Prevention Day*. Ed. by Ulrich Krause and Michael Rost. Magdeburg and Germany, 2017. ISBN: 978-3-00-056201-3.
- [5] Paul Geoerg, Rainer Block, Werner Heister, Stefan Holl, Axel Pulm and Anja Hofmann. “A Score regarding the need for assistance – evacuation considering people with disabilities: (under review)”. In: *Fire Safety Journal* (2019). ISSN: 03797112.
- [6] Maik Boltes, Armin Seyfried, Bernd Steffen and Andreas Schadschneider. “Automatic Extraction of Pedestrian Trajectories from Video Recordings”. In: *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. Ed. by Wolfram W. F. Klingsch, Christian Rogsch, Andreas Schadschneider and Michael Schreckenberg. Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 43–54.
- [7] Maik Boltes and Armin Seyfried. “Collecting Pedestrian Trajectories”. In: *Neurocomputing, Special Issue on Behaviours in Video* 100 (2013), pp. 127–133. ISSN: 0925-2312. DOI: 10.1016/j.neucom.2012.01.036.
- [8] Forschungszentrum Jülich and Federal Institute For Materials Research and Testing. *Influence of individual characteristics*. 2019. DOI: 10.34735/PED.2017.1.
- [9] Paul Geoerg, Jette Schumann, Stefan Holl and Anja Hofmann. “The Influence of Wheelchair Users on Movement in a Bottleneck and a Corridor”. In: *Journal of Advanced Transportation* 2019 (2019). DOI: 10.1155/2019/9717208.
- [10] Paul Geoerg, Jette Schumann, Maik Boltes, Stefan Holl and Anja Hofmann. “The Influence of Individual Impairment on Crowd Dynamics: (in press)”. In: *Fire and Materials* (2019).
- [11] Dragan Stojanović and Natalija Stojanović. “Indoor localization and tracking: Methods, technologies and research challenges”. In: *Facta Universitatis, Series: Automatic Control and Robotics* 13.1 (2014), pp. 57–72.
- [12] Alejandro Correa, Marc Barcelo, Antoni Morell and Jose Lopez Vicario. “A Review of Pedestrian Indoor Positioning Systems for Mass Market Applications”. In: *Sensors* 17.8 (2017). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s17081927.
- [13] Oliver J. Woodman. “Pedestrian localisation for indoor environments”. dissertation. University of Cambridge, 2010. URL: https://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/www/files/publications/public/abr28/ojw28_thesis.pdf.

- [14] Fabian Hofflinger, Rui Zhang and Leonard M. Reindl. “Indoor-localization system using a Micro-Inertial Measurement Unit (IMU)”. In: *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, 2012. Apr. 2012, pp. 443–447. DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502421.
- [15] Robert Harle. “A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 15.3 (2013), pp. 1281–1293. DOI: 10.1109/surv.2012.121912.00075.
- [16] SABEL Labs. *SABEL Sense*. 2017. URL: <https://sabellabs.com/sense/>.
- [17] Oliver J Woodman. “An introduction to inertial navigation”. In: *University of Cambridge, Computer Laboratory, Tech. Rep. UCAMCL-TR-696* 14 (2007), p. 15. URL: <https://www.cl.cam.ac.uk/techreports/UCAM-CL-TR-696.pdf>.
- [18] S. O. H. Madgwick, A. J. L. Harrison and R. Vaidyanathan. “Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm”. In: *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), June 2011. DOI: 10.1109/icorr.2011.5975346.
- [19] N. Yadav and C. Bleakley. “Two stage Kalman filtering for position estimation using dual Inertial Measurement Units”. In: *SENSORS, 2011 IEEE*. Oct. 2011, pp. 1433–1436. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127064.
- [20] Y. Zhang, C. Lyu, H. Xu, Y. Xia, F. Feng, G. Singh, P. Y. Chiang and X. S. Wang. “Improved position estimation by fusing multiple inaccurate inertial measurement unit sensors”. In: *2016 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. Mar. 2016, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2016.7585483.
- [21] Xiaomeng Shi, Zhirui Ye, Nirajan Shiwakoti and Offer Grembek. “A State-of-the-Art Review on Empirical Data Collection for External Governed Pedestrians Complex Movement”. In: *Journal of Advanced Transportation* 2018 (2018), p. 1063043. DOI: 10.1155/2018/1063043.
- [22] Shuchao Cao, Jun Zhang, Daniel Salden, Jian Ma, Chang’an Shi and Ruifang Zhang. “Pedestrian dynamics in single-file movement of crowd with different age compositions”. In: *Physical Review E* 94.1 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevE.94.012312.
- [23] Shuchao Cao, Jun Zhang, Daniel Salden and Jian Ma. “Fundamental Diagrams of Single-File Pedestrian Flow for Different Age Groups”. In: *Advances in Swarm Intelligence*. Ed. by Ying Tan, Yuhui Shi and Ben Niu. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 154–161. DOI: 10.1007/978-3-319-41000-5_15.
- [24] Shuchao Cao, Jun Zhang, Weiguo Song, Chang’an Shi and Ruifang Zhang. “The stepping behavior analysis of pedestrians from different age groups via a single-file experiment”. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2018.3 (2018), p. 033402. ISSN: 1742-5468. DOI: 10.1088/1742-5468/aab04f.
- [25] Shuchao Cao, Peng Wang, Ming Yao and Weiguo Song. “Dynamic analysis of pedestrian movement in single-file experiment under limited visibility”. In: *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 69 (2019), pp. 329–342. ISSN: 10075704. DOI: 10.1016/j.cnsns.2018.10.007.

- [26] Shuchao Cao, Xiaodong Liu, Mohcine Chraïbi, Peng Zhang and Weiguo Song. “Characteristics of pedestrian’s evacuation in a room under invisible conditions”. In: *International Journal of Disaster Risk Reduction* 41 (2019), p. 101295. ISSN: 22124209. DOI: 10.1016/j.ijdr.2019.101295.
- [27] Mohammad Sadra Sharifi, Keith Christensen, Anthony Chen and Ziqi Song. “Exploring effects of environment density on heterogeneous populations’ level of service perceptions”. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 124 (2019), pp. 115–127. ISSN: 09658564. DOI: 10.1016/j.tra.2019.03.007.
- [28] Mohammad Sadra Sharifi, Daniel Stuart, Keith Christensen and Anthony Chen. “Traffic Flow Characteristics of Heterogeneous Pedestrian Stream Involving Individuals with Disabilities”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2537 (2015), pp. 111–125. ISSN: 0361-1981. DOI: 10.3141/2537-13.
- [29] Mohammad Sadra Sharifi, Daniel Stuart, Keith Christensen, Anthony Chen, Yong Seog Kim and YangQuan Chen. “Analysis of Walking Speeds Involving Individuals with Disabilities in Different Indoor Walking Environments”. In: *Journal of Urban Planning and Development* 142.1 (2016), p. 04015010. ISSN: 0733-9488. DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000288.
- [30] Mohammad Sadra Sharifi, Daniel Stuart, Keith Christensen and Anthony Chen. “Time Headway Modeling and Capacity Analysis of Pedestrian Facilities Involving Individuals with Disabilities”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2553 (2016), pp. 41–51. ISSN: 0361-1981. DOI: 10.3141/2553-05.
- [31] Mohammad Sadra Sharifi, Keith Christensen, Anthony Chen, Daniel Stuart, Yong Seog Kim and YangQuan Chen. “A large-scale controlled experiment on pedestrian walking behavior involving individuals with disabilities”. In: *Travel Behaviour and Society* 8 (2017), pp. 14–25. DOI: 10.1016/j.tbs.2017.03.003.
- [32] Jonathan Shepherd, Tomohito Wada, David Rowlands and Daniel James. “A Novel AHRS Inertial Sensor-Based Algorithm for Wheelchair Propulsion Performance Analysis”. In: *Algorithms* 9.3 (Aug. 2016), p. 55. DOI: 10.3390/a9030055.
- [33] Martin Schepers, Matteo Giuberti and Giovanni Bellusci. “Xsens MVN: Consistent Tracking of Human Motion Using Inertial Sensing”. en. In: (2018). DOI: 10.13140/RG.2.2.22099.07205.
- [34] Pengzhan Chen, Ye Kuang and Jie Li. “Human Motion Capture Algorithm Based on Inertial Sensors”. In: *Journal of Sensors* 2016 (2016), pp. 1–15. DOI: 10.1155/2016/4343797.
- [35] Alessandro Filippeschi, Norbert Schmitz, Markus Miezal, Gabriele Bleser, Emanuele Ruffaldi and Didier Stricker. “Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion”. In: *Sensors* 17.6 (June 2017), p. 1257. DOI: 10.3390/s17061257.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung (SiME) Teilvorhaben: Parameterstudien für die sichere Evakuierung heterogener Personengruppen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Boltes, Maik Schumann, Jette	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.05.2019
	6. Veröffentlichungsdatum 27.11.2019
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forschungszentrum Jülich GmbH Institute für Advanced Simulation 52425 Jülich, Germany	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 13N13950
	11. Seitenzahl 25
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 35
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 7
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek Hannover, 27.11.2019	

Das Verbundprojekt SiME hat zur Verbesserung der Sicherheit für Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung beigetragen, indem in einem interdisziplinären Ansatz realitätsnahe Übungsszenarien für zivile Schadenslagen unter Berücksichtigung sich verändernder Lebensrealitäten entwickelt wurden.

Im Teilvorhaben des Forschungszentrum Jülich wurden Bewegungsmuster bei Evakuierungsprozessen, an denen Menschen mit körperlicher, geistiger oder altersbedingter Beeinträchtigung beteiligt waren, analysiert. Die Ergebnisse der Parameterstudien tragen dazu bei, den Zeit- und Ressourcenbedarf von Evakuierungen heterogener Personengruppen besser zu verstehen und beschreiben zu können. Für die Kalibrierung und Validierung bestehender Methoden und Werkzeuge stehen damit verlässliche Daten zur Verfügung.

Zur Bewegungserfassung von Rollstuhlfahrern wurde ein neues hybrides Tracking-System basierend auf Kamera- und IMU-Sensordaten entwickelt. Die Ergebnisse bieten die Möglichkeit, die baulichen, anlagentechnischen und organisatorischen Randbedingungen in Bauwerken so zu planen, dass für alle Menschen – mit und ohne Behinderung – dasselbe Sicherheitsniveau gewährleistet werden kann.

Alle Daten der durchgeführten Studie stehen dauerhaft und frei zugänglich in einem Datenarchiv unter der DOI 10.34735/PED.2017.1 zur Verfügung und können von Forschergruppen und der Industrie kostenlos genutzt werden, um beispielsweise Modelle um die Berücksichtigung von eingeschränkten Personen zu erweitern.

Die Publikation der Ergebnisse (21 wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Beteiligung des Forschungszentrum Jülich) erfolgte in Fachjournalen. Die Veröffentlichungen sind im Schlussbericht aufgeführt. Zwei zentrale Veröffentlichungen sind unter anderem

Paul Geoerg, Jette Schumann, Stefan Holl and Anja Hofmann. *The Influence of Wheelchair Users on Movement in a Bottleneck and a Corridor*. In: Journal of Advanced Transportation, pp. 1–25. ISSN: 0197-6729 (2019). [doi:10.1155/2019/9717208](https://doi.org/10.1155/2019/9717208).

Jette Schumann, Maik Boltes and Armin Seyfried. *Hybrid Tracking System for Pedestrians in Dense Crowds*. In: Traffic and Granular Flow 2017. Ed. by Hamdar S. H. (2019). [doi:10.1007/978-3-030-11440-4_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11440-4_23).

Eine umfangreiche zusammenfassende Darstellung der Arbeiten wird Anfang 2020 mit der Dissertation von Jette Schumann vorliegen. Zudem sei auf die Dissertation von Paul Geoerg (BAM) verwiesen, die die gesamtheitliche Analyse der erhobenen Daten beinhaltet.

19. Schlagwörter

Menschen mit Beeinträchtigung, heterogene Personengruppe, hybrides Tracking-System, Sicherheit, Evakuierung, Fußgängerdynamik, Parameterstudien

20. Verlag

21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Safety for people with physical, mental or age-related disabilities (SiME) Sub-project: Study the evacuation of heterogeneous group of persons		
4. author(s) (family name, first name(s)) Boltes, Maik Schumann, Jette	5. end of project 31 May 2019	
	6. publication date 27 November 2019	
	7. form of publication Report	
8. performing organization(s) (name, address) Forschungszentrum Jülich GmbH Institute für Advanced Simulation 52425 Jülich, Germany	9. originator's report no. -	
	10. reference no. 13N13950	
	11. no. of pages 25	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 35	
	14. no. of tables 0	
	15. no. of figures 7	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek Hannover, 27 November 2019		
The joint project SiME has contributed to improving safety for people with physical, mental or age-related disabilities by developing realistic exercise scenarios for civilian damage situations in an interdisciplinary approach, taking into account changing life realities. In the sub-project of Forschungszentrum Jülich, movement patterns in evacuation processes involving people with physical, mental or age-related disabilities were analysed. The results of the parameter studies contribute to a better understanding and description of the time and resource requirements of evacuations of heterogeneous groups of people. A new hybrid tracking system based on camera and IMU sensor data was developed for the motion detection of wheelchair users. The results offer the possibility to plan the structural, technical and organizational boundary conditions in buildings in such a way that the same safety level can be guaranteed for all people - with and without disabilities. All data of the conducted study are permanently and freely accessible in a data archive under DOI 10.34735/PED.2017.1 and can be used free of charge by research groups and industry, for example to extend models to include disabled persons. The results were published in journals and are listed in the final report. A comprehensive summary of the work will be available in early 2020 with Jette Schumann's dissertation. In addition, reference is made to the dissertation by Paul Geoerg (BAM), which contains a comprehensive analysis of the collected data.		
19. keywords people with disabilities, heterogeneous group of persons, safety, evacuation, pedestrian dynamics, hybrid tracking system		

0. publisher	21. price
--------------	-----------