

Kontrolle und Dynamik von Menschenansammlungen – Wie komme ich hier durch?

Menschenansammlung bei der Loveparade in Duisburg 2010, 90 Minuten vor Ausbruch der Massenpanik

- Die Handhabung von Menschenmassen ist entscheidend in Notfallsituationen. Computersimulationen sind bisher nicht vollständig durch reale Experimente verifizierbar.
- Mathematische Modelle sozialer Systeme können nicht durch grundlegende Naturgesetze begründet werden.
- Ilias Panagiotopoulos, Jens Starke und Wolfram Just von der Universität Rostock haben einen modellfreien Zugang entwickelt, um die Dynamik von Personenansammlungen zu untersuchen.
- Dieser innovative Zugang ermöglicht die quantitative Analyse der Dynamik großer Personengruppen.

Ein tieferes Verständnis der Dynamik von Menschenansammlungen ist vermutlich eine der wichtigsten wissenschaftlichen Fragestellungen, die für die Lebensqualität von zentraler Bedeutung sind. Tragische Unglücke wie der Brand im Bahnhof Kings Cross St. Pancras 1987, die Katastrophe im Hillsborough Stadion in Sheffield 1989, oder die Massenpanik bei der Duisburger Love Parade 2010 unterstreichen, wie unsere Sicherheit von einer erfolgreichen Steuerung großer Menschenmassen abhängt. Während im Bereich der Naturwissenschaften etablierte Grundgesetze die Herleitung mathematischer Modelle gestatten, befindet sich ein solcher Zugang im Bereich der quantitativen Sozialwissenschaften mangels allgemein anerkannter Grundprinzipien noch in den Kinderschuhen [1].

Das Team um Jens Starke (Universität Rostock) hat hierfür einen modellfreien

Zugang entwickelt, um die Dynamik in Experimenten mit großen Menschenansammlungen untersuchen und verstehen zu können. Dieses datenbasierende Konzept verwendet minimalinvasive Kontrollverfahren, um instabile Bewegungsmuster zu identifizieren und Personengruppen erfolgreich zu steuern. Dieser modellfreie Zugang ist nicht auf die Dynamik sozialer Systeme beschränkt [2,7], sondern wurde auch in naturwissenschaftlichen Fragestellungen erfolgreich angewandt [3,4,5 & 6].

Routenwahl von Fußgängern

Das Team hat ein beispielhaftes Experiment entwickelt, in dem Grundprinzipien der Dynamik von Fußgängern, z.B. Entscheidungsprozesse oder die Entstehung von Gedränge, quantitativ untersucht werden können. Hierzu wurde in einem Korridor, in dem sich Fußgänger in Richtung

eines Ausgangs bewegen, ein Hindernis angebracht, das die Personen entweder auf der linken oder der rechten Seite passieren konnten (siehe Abbildung 1). Der sogenannte Lemming-Effekt, die Neigung von Personen einander zu folgen, führt hierbei überwiegend zur Entscheidung für die gleiche Seite und somit zu unnötigem Gedränge.

Durch dynamische Wegweiser konnte eine Aufspaltung des Fußgängerstroms erreicht werden, sodass Personen das Hindernis beidseitig passierten, wodurch das Gedränge reduziert werden konnte. Allerdings lassen

Tragische Ereignisse, wie die Massenpanik während der Duisburger Love Parade 2010 zeigen, wie unser Wohlergehen von der erfolgreichen Steuerung von Menschenansammlungen abhängt.

sich durch den schwachen Einfluss einer Beschilderung nur solche Aufspaltungen realisieren, die einem instabilen Störungsmuster des Fußgängerstroms in der vorgegebenen Geometrie des Korridors entsprechen. In diesem Sinne hat die Steuerung von Fußgängerströmen viel mit dem Balancieren eines Stabes gemein, da die durch minimalinvasive Kontroll Eingriffe erreichbaren Zielzustände instabile Zustände der zugrundeliegenden Dynamik sind.

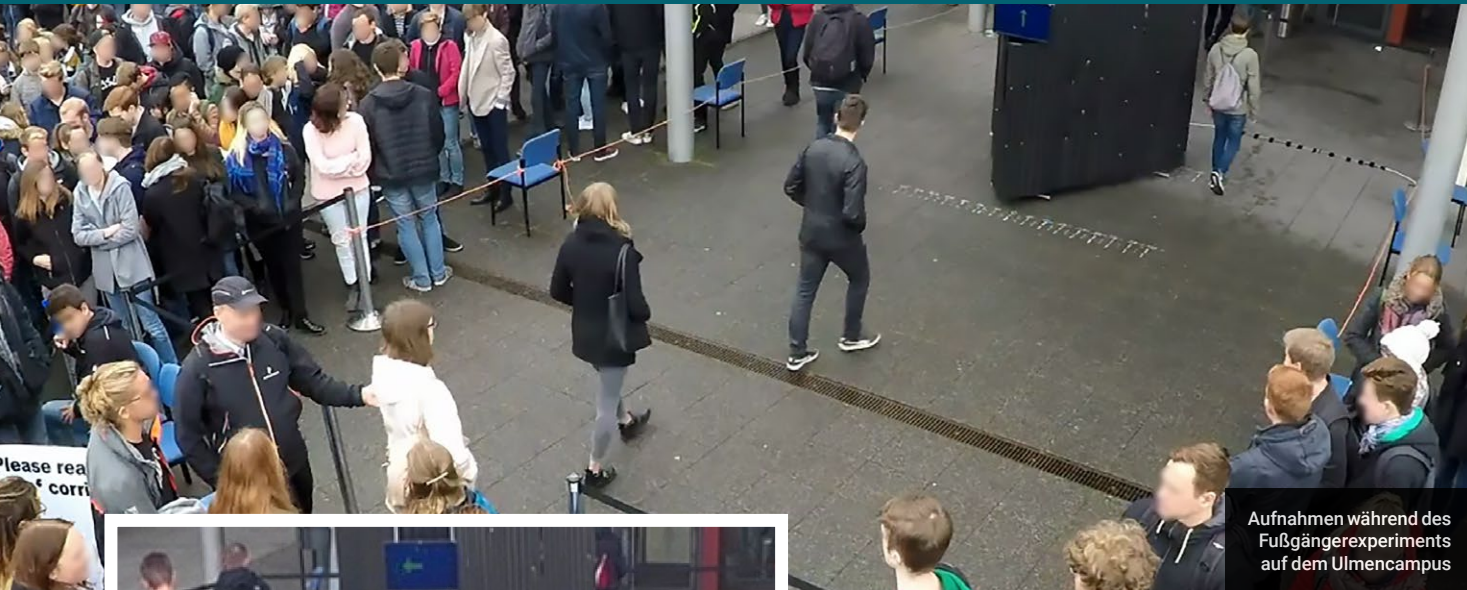
Ein modellfreier Zugang zur Fußgängerdynamik

In einem Laborexperiment wurde das Hindernis kaum wahrnehmbar von einer auf die andere Seite des Korridors bewegt, während die Fußgänger das Hindernis passierten, um den Ausgang zu erreichen. Zunächst passierten alle Fußgänger das Hindernis auf derselben Seite. Als das Hindernis eine kritische Position erreicht hatte und der Abstand zwischen Hindernis und Wand zu klein wurde und somit das Passieren auf dieser Seite unvorteilhaft erschien, wählten alle Fußgänger kollektiv die andere Seite, um am Hindernis vorbeizugehen.

Das Bewegungsmuster der Fußgänger blieb zunächst unverändert, wenn das Hindernis wieder in Richtung der Ausgangsposition zurückbewegt wurde. Erst bei einer zweiten kritischen Hindernisposition findet der Wechsel im Bewegungsmuster statt, bei der die Fußgänger wieder zurück zur anderen Seite wechseln. Dieses sogenannte "Hystereseverhalten" wird durch den oben erwähnten Lemming-Effekt der Fußgänger verursacht.

Bei einer mittleren Hindernisposition koexistieren zwei unterschiedliche stabile Bewegungsmuster, bei denen jeweils fast alle Fußgänger das Hindernis auf derselben Seite passieren. Eine solche sogenannte bistabile Situation wird von einem weiteren, instabilen Bewegungsmuster begleitet, bei dem Fußgänger auf beiden Seiten am Hindernis vorbeigehen. Ein solches instabiles Strömungsprofil ist aber nicht ohne weiteres Zutun beobachtbar.

Das Team hat einen Algorithmus entwickelt, um instabile Bewegungsmuster in Experimenten zu stabilisieren und zu analysieren. Hierzu wurde mit Hilfe eines Bildschirms und einer Richtungsanzeige eine datenbasierte und auf die Fußgänger



Aufnahmen während des Fußgängerexperiments auf dem Ulmencampus

Dieser Forschungsansatz erlaubt, die Dynamik von Menschenansammlungen zu verstehen, insbesondere wenn grundlegenden Prinzipien für die Modellierung nicht verfügbar sind.

zu Beginn einer Vorlesung durchgeführt, wobei der Durchfluss durch den Korridor mit näherungsweise 0,6 Studierenden pro Sekunde konstant gehalten wurde. Das Experiment im Hafen Warnemünde wurde am Eingang des Cruise Centers durchgeführt, mit einer mittleren Durchflussrate von 1,5 Passagieren pro Sekunde.

Bei dem Experiment an der Universität wurde das Hindernis in einem Korridor vor dem Eingang zu einem Hörsaal aufgestellt. Studenten, die den Korridor betraten, standen kurz Schlang, um eine konstante Zuflussrate von etwa 0,6 Personen pro Sekunde zu erreichen. Beim Hafenexperiment wurde das Hindernis 8 m innerhalb des Eingangs zum Terminalgebäude platziert. Es wurde beobachtet, dass die Passagiere den Kai schnell verlassen wollten, aber beim Betreten des Terminals in der Nähe ihrer Familien und Freunde blieben. Der durchschnittliche Zustrom betrug etwa 1,5 Personen pro Sekunde.

Die Ergebnisse wurden in sogenannten Bifurkationsdiagrammen zusammengefasst, die, dank geeigneter nicht-invasiver Kontrollverfahren, neben den stabilen auch die instabilen Bewegungsmuster und deren Parameterabhängigkeit enthalten. Dieser modellfreie Zugang ist nicht auf die Analyse von Fußgängerströmen beschränkt. In Vorfeldstudien wurden, zusammen mit Maschinenbauern, minimalinvasive Kontrollverfahren einerseits zur Analyse von nichtlinearen Oszillatoren [2,4,5] und andererseits für eine experimentelle Bifurkationsanalyse der Katastrophenmaschine von Zeeman [3] verwendet.

Nichtinvasive Steuerung von Personengruppen

Die Fußgängerverkehrsplanung und Steuerung von Menschenansammlungen beruht auch heutzutage noch auf mathematischen Modellen, deren Validität sich nur schwer überprüfen lässt. Die hier vorgestellten Ideen erlauben eine auf Experimenten basierende Untersuchung der Dynamik, ohne ad hoc Annahmen über das Verhalten von Individuen voraussetzen zu müssen. Dieser Zugang ermöglicht ein erstes Verständnis der Wirkungsweise schwach-invasiver Regelungseingriffe auf Fußgängerströme, z.B. von dynamischen Beschilderungen oder von Lichtzeichenanlagen. Mit diesen Ergebnissen lassen sich dann auch mathematische Modelle sozialer Systeme Experiment-basierend validieren.

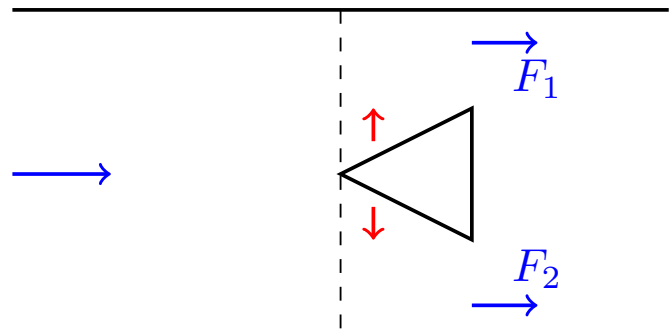
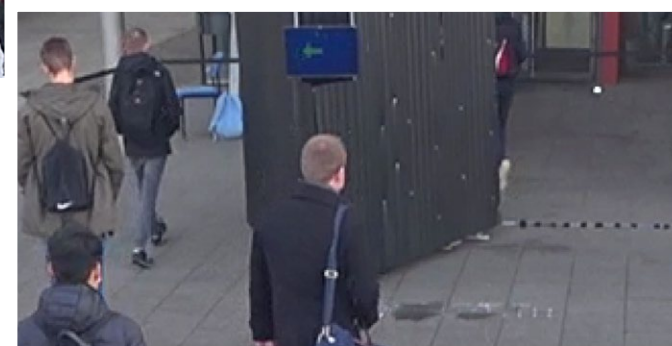


Abbildung 1. Schematischer experimenteller Aufbau mit einem Hindernis in einem Korridor, in dem sich Fußgänger in Richtung des Ausgangs bewegen.

rückgekoppelte dynamische Beschilderung realisiert, die letztendlich ein minimalinvasives Kontrollverfahren darstellt.

Kontrolle und Feldexperimente

Mit Hilfe des modellfreien Zugangs hat das Team Feldexperimente durchgeführt, um ein quantitatives Verständnis von Fußgängerströmen zu gewinnen. An den Experimenten auf dem Ulmencampus der Universität Rostock nahmen ca. 600 Studierende teil, während Feldexperimente im Hafen Warnemünde mit ca. 1.000 Passagieren eines Kreuzfahrtschiffes durchgeführt wurden. Die Experimente auf dem Ulmencampus wurden am Eingang des Auditoriums Maximum

Interview

Warum haben Sie einen modellfreien Ansatz gewählt, um Fußgängerdynamik zu untersuchen?

In den Natur- und Ingenieurwissenschaften existieren (in einem gewissen Ausmaß) etablierte Grundgesetze, mit deren Hilfe sich erfolgreich mathematische Beschreibungen formulieren lassen. In den Sozialwissenschaften sowie der Verhaltens- und Kognitionsforschung besteht kein Konsens einer quantitativen Beschreibung mittels mathematischer Gleichungen. Es ist deshalb erstrebenswert, am einfachen Beispiel der Fußgängerdynamik einen modellfreien Zugang zu testen, um Kernelemente einer mathematischen Theorie des Bewegungsverhaltens von sozialen Gruppen zu etablieren.

Was waren die größten Herausforderungen bei der experimentellen Untersuchung?

Im Gegensatz zu statistischen Erhebungen und Beobachtungsstudien erfordert die Analyse und Kontrolle der Dynamik von Bewegungsmustern Experimente mit einer besonders großen Gruppe von Individuen in einer natürlichen Umgebung und unter dem Einfluss externer Stimuli, z.B. von

Lichtzeichensignalen oder Beschilderung. Dabei sorgt das individuelle Gedächtnis der Probanden dafür, dass das Verhalten von Individuen nach einer relativ kurzen Zeit atypisch wird, sodass längere experimentelle Zeitreihen extrem große Personengruppen erfordern. Schließlich stellen die notwendigen gesetzlichen Anforderungen an Experimente mit Personen eine nicht zu unterschätzende Herausforderung an die Durchführung der Experimente dar.

Was waren die erstaunlichsten Ergebnisse?

Die Biomechanik unseres Körpers, optische und akustische Wahrnehmung sowie die Datenverarbeitung im Gehirn sind hoch komplexe Prozesse, die alle für die Bewegung von Individuen essentiell sind. Trotzdem lässt sich die Bewegung von Fußgängern, wie in unserer Studie gezeigt wurde, durch einfache grundlegende Prinzipien beschreiben.

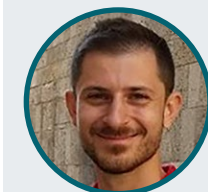
Von besonderer Bedeutung ist hierbei der Lemming-Effekt – die Neigung von Individuen, einander zu folgen. Beschilderung und Lichtzeichenanlagen können als ein schwach-invasiver Stimulus verstanden werden, der einen erheblichen Einfluss auf die

Dynamik von Menschenmengen haben kann, in dem z.B. Gedränge reduziert wird. Eine solche Vorgehensweise ist aber nur erfolgreich, wenn Bewegungsmuster angestrebt werden, die selbst instabile Zustände des zugrundeliegenden dynamischen Systems sind. In dieser Hinsicht hat die Steuerung von Menschenansammlungen viel mit dem Problem des Balancierens gemein.

Welche Aspekte des Forschungsprojekts haben Sie am meisten zufriedengestellt?

Im Gegensatz zu den Naturwissenschaften sind quantitative Zugänge in den Sozial- und Geisteswissenschaften immer noch rar, wenn man von statistischen Beobachtungsstudien absieht. Einige Experten auf dem Gebiet der Fußgängerdynamik haben bezweifelt, dass sich Experimente in diesem Gebiet durchführen lassen, die die gleiche Aussagekraft haben wie Experimente in den Naturwissenschaften. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Dynamik von Menschenansammlungen datenbasierend quantitativ untersuchen lässt, womit ein Zugang in das neue Gebiet der quantitativen Sozialwissenschaften aufgezeigt ist.

Details



Ilias Panagiotopoulos



Jens Starke



Wolfram Just

E: jens.starke@uni-rostock.de
W: www.mathematik.uni-rostock.de

Förderung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Sonderforschungsbereich 1270 / Projektnummer SFB 1270/2-299150580, und durch das Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC) - Projektnummer EP/R012008/1.

Danksagung

Unser besonderer Dank gilt Herrn Ralf Ludwig (Ulmencampus, Universität Rostock), Herrn Oliver Schubert (F.C. Hansa Rostock), dem Hafen- und Seemannsamt Rostock, insbesondere Herrn Jens Käkenmeister und seinen Kollegen, sowie den Mitgliedern des

Instituts für Mathematik der Universität Rostock für die Unterstützung der experimentellen Arbeiten.

CV

Ilias Panagiotopoulos hat Mathematik an der Universität Patras in Griechenland, der Queen Mary Universität in London im Vereinigten Königreich und der Universität Rostock in Deutschland studiert. Er ist momentan als Ingenieur bei ASML in Eindhoven, den Niederlanden beschäftigt. Seine Forschungsinteressen liegen auf dem Gebiet dynamischer Systeme und der Chaostheorie.

Jens Starke hat Mathematik und Physik an der Universität Stuttgart studiert. Er hatte verschiedene Positionen in Forschung und Lehre inne, an der Universität Heidelberg, an der Technischen Universität Dänemarks in Kopenhagen und an der Queen Mary Universität in London, bevor er eine Ruf auf die Professur für Wissenschaftliches Rechnen an die Universität Rostock annahm. Seine Forschungsinteressen decken weite Bereiche der Angewandten Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens ab, mit Schwerpunkten im Bereich Dynamischer Systeme, wie z.B. der angewandten Bifurkationstheorie und der Modell-freien Analyse.

Wolfram Just hat Theoretische Physik an der Technischen Universität Darmstadt studiert. Er hatte Forschungspositionen an der Kyushu Universität in Fukuoka, den Max Planck Instituten in Dresden und Göttingen, an der Queen Mary Universität in London und an der Technischen Universität Chemnitz inne. Vor Kurzem hat er eine Mitarbeiterstelle am Institut für Mathematik der Universität Rostock angetreten. Seine Forschungsinteressen erstrecken sich auf Gebiete der Theoretischen Physik und der Angewandten Mathematik, mit Schwerpunkten im Bereich der Statistischen Mechanik, der Theorie dynamischer Systeme und Anwendungen der Rückkopplungskontrolle.

Weiterführende Literatur

- [1] Helbing, D, Johansson, A, (2009) *Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics*. In: Meyers, R, (eds) *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. New York: Springer, 6476–6495.
- [2] Panagiotopoulos, I, Starke, J, Just, W, (2022) *Control of collective human behavior: Social dynamics beyond modelling*. *Physical Review Research*, 4(4), 043190.
- [3] Bureau, E, Schilder, F, Santos, IF, Thomsen, JJ, Starke, J, (2013) *Experimental bifurcation analysis of an impact oscillator—Tuning a non-invasive control scheme*. *Journal of Sound and Vibration*, 332(22), 5883–5897.
- [4] Dittus, A, Kruse, N, Barke, I, Speller, S, Starke, J, (2023) *Detecting stability and bifurcation points in control-based continuation for a physical experiment of the Zeeman catastrophe machine*. *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*, 22(2), 1275–1299.
- [5] Bureau, E, Schilder, F, Elmegård, M, Santos, IF, Thomsen, JJ, Starke, J, (2014) *Experimental bifurcation analysis of an impact oscillator—Determining stability*. *Journal of Sound and Vibration*, 333(21), 5464–5474.
- [6] Schilder, F, Bureau, E, Santos, I, Thomsen, JJ, Starke, J, (2015) *Experimental bifurcation analysis – continuation for noise-contaminated zero problems*. *Journal of Sound and Vibration*, 358, 251–266.
- [7] Panagiotopoulos, I, Starke, J, Sieber, J, Just, W, (2023) *Continuation with noninvasive control schemes: Revealing unstable states in a pedestrian evacuation scenario*. *SIAM Journal of Applied Dynamical Systems*, 22(1), 1–36.