

## Die Physik von Menschenströmen

# Menschen sicher leiten und evakuieren

ANDREAS SCHADSCHNEIDER | ARMIN SEYFRIED

*Überfüllte Bahnhöfe und Züge, die Organisation von Großveranstaltungen oder die Evakuierung von Stadien oder Theatern: Wenn sich viele Menschen ansammeln, kann es zu Stau und Gedränge kommen. Dann ist die Stauforschung für den Fußgängerverkehr gefragt. Hier hat die Physik in den letzten zwanzig Jahren wichtige Beiträge geliefert.*

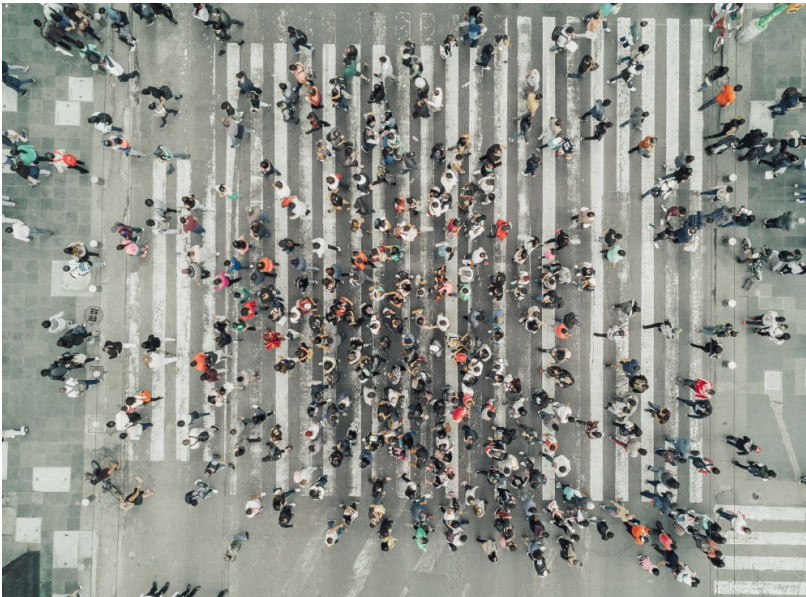


Foto: Getty Images

Vor der Zeit des Social Distancing gab es regelmäßig Großveranstaltungen, bei denen sehr viele Menschen auf engem Raum zusammentreffen. In Sportstadien oder beim Public Viewing kommt man hier sehr schnell auf 50 000 und mehr Personen. Um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, insbesondere in punkto Sicherheit und Komfort, ist eine sorgfältige Planung notwendig. Hierfür ist ein vertieftes Verständnis der Vorgänge in Fußgängerströmen entscheidend.

Aus Sicht der Physik sind Fußgängerströme komplexe Systeme, bei denen schon kleine Störungen zu unvorhergesehenem Verhalten führen können. Unglücke bei Massenveranstaltungen lassen sich daher nie vollständig ausschlie-

ßen. Ihre Wahrscheinlichkeit lässt sich aber durch geeignete Planung stark reduzieren. Dafür sind verlässliche Daten und Modelle notwendig.

Ein Ereignis, bei dem es immer wieder zu tragischen Unglücken mit vielen Hundert Toten und Schwerverletzten gekommen ist, ist der Haddsch in Mekka. Da diese Pilgerfahrt nur während bestimmter Tage im Jahr durchgeführt werden kann, kommen hier bis zu fünf Millionen Menschen auf engem Raum zusammen. Aufgrund der zahlreichen Unglücke in der Vergangenheit wurde die Pilgerstrecke mit der Expertise von Fußgängerforschern umgestaltet. Ein anderes Beispiel ist das Unglück bei der Loveparade 2010. Hier hat sich gezeigt, dass eine Aufklärung der Ursachen trotz der Vielzahl der bekannten Informationen extrem schwierig ist.

Als Ursache für Unglücke wird, gerade in den Medien, in der Regel eine „Massenpanik“ ausgemacht. Dies ist aber ein Begriff, der in der Forschung nicht gerne verwendet wird, aus verschiedenen Gründen. Zum einen gibt es keine allgemein akzeptierte Definition einer „Panik“. Dies führt oft zu Assoziationen, die auf der Darstellung in Hollywood-Filmen basieren: Einige wenige bringen andere durch ihr egoistisches und rücksichtsloses Verhalten in Gefahr. Zahlreiche Untersuchungen haben aber klar gezeigt, dass diese Assoziationen in fast allen Fällen falsch sind und das Verhalten zu sehr vereinfacht. Vielmehr gibt es viele Belege und Hinweise, dass sich Menschen in solchen lebensgefährlichen Situationen helfen und kooperieren. Ein weiterer Grund für die Ablehnung des Begriffs ist die Tatsache, dass damit oft die Opfer zu Schuldigen gemacht werden, da ein falsches Verhalten impliziert wird. Dies ist aber ebenso wenig korrekt.

### Kollektive Phänomene

Trotz der großen Bedeutung für die Planung von Gebäuden, Großveranstaltungen etc. gibt es überraschenderweise bei empirischen Ergebnissen zur Fußgängerdynamik noch immer viele Unsicherheiten. In den letzten Jahren hat es aber Fortschritte beim quantitativen Verständnis von Personenströmen gegeben, vor allem durch groß angelegte „Laborexperimente“ [4] (Abbildung 1). In diesen lassen sich grundlegende Szenarien in reproduzierbarer Weise untersuchen.

Aus Sicht der Physik sind vor allem die in Fußgängerströmen auftretenden kollektiven Phänomene interessant

*This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.*

[2, 4]. Aufgrund der zweidimensionalen Natur der Bewegungen gibt es hier eine größere Vielfalt als beim mehr oder weniger eindimensionalen Straßenverkehr [1]. Die dort bereits bekannten Phänomene – spontane Staubildung, Stop-and-Go-Wellen – findet man auch in Fußgängerströmen, beispielsweise bei der Bewegung in schmalen Korridoren. Darüber hinaus gibt es weitere Phänomene, die keine Entsprechung im Straßenverkehr haben.

Staus an Engstellen kennt man zwar bereits aus dem Straßenverkehr, allerdings bietet der zweidimensionale Raum ein breiteres Spektrum an Engstellentypen. Im Prinzip kann man hier sogar eine dreidimensionale Bewegung, insbesondere auf Treppen, betrachten. Diese können eine neue Art von Engstellen darstellen, bei dem der Fluss nicht durch geometrische Randbedingungen beschränkt ist, sondern durch die Fußgänger selbst – etwa durch Ermüdung.

### Fundamentaldiagramm

Wie in [1-3] für den Autoverkehr beschrieben, ist das sogenannte Fundamentaldiagramm die wichtigste Größe zur quantitativen Beschreibung von Verkehrssystemen aller Art. Es gibt den Zusammenhang zwischen Personendichte  $\rho$  und dem Fluss oder Strom  $J$  im System an.

Das Fundamentaldiagramm von Fußgängerströmen entspricht in seiner Struktur dem des Autobahnverkehrs. Man kann zwei Bereiche unterscheiden: den *Freifluss*, bei dem der Fluss nahezu linear mit der Dichte ansteigt, und den *gestauten Bereich*, in dem der Fluss mit zunehmender Dichte abnimmt, weil Staus entstehen. Überraschenderweise besteht aber noch kein Konsens über die quantitativen Aspekte des Fundamentaldiagramms (Abbildung 2). Hier bestehen zum Teil erhebliche Unterschiede. So unterscheiden sich die Dichten, bei denen die Bewegung zum Erliegen kommt, um einen Faktor von fast drei. Die Ursache dieser Unterschiede ist noch nicht vollständig verstanden und Gegenstand aktueller Untersuchungen.

Ein möglicher Grund sind Unterschiede in der Datenerhebung: Versuchsdurchführung, verwendete Dichtedefinition etc. Es gibt aber durchaus kulturelle Unterschiede, die in identischen Experimenten in Deutschland, Indien, Palästina, China und Japan nachgewiesen wurden. Diese sind allerdings zu klein, um die beobachteten Diskrepanzen zu erklären.

Die empirische Bestimmung des Fundamentaldiagramms ist jedenfalls deutlich schwieriger als beim Autobahnverkehr. Dort gibt es sehr viele Daten von Zählschleifen, die sich mit guter Statistik auswerten lassen. Dies ist bei Fußgängerströmen leider nicht möglich. Daher wurden in den letzten fünfzehn Jahren zahlreiche kontrollierte Laborexperimente mit zum Teil bis zu 1000 Personen durchgeführt. Die Auswertung geschieht in der Regel semiautomatisch. Die Experimente werden mit Hilfe von Videokameras gefilmt, um dann aus den Videos mit Hilfe einer speziell entwickelten Software die Trajektorien aller Personen mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern zu bestimmen. Abbildung 3 zeigt Schnappschüsse solcher Experimente. Die roten Li-

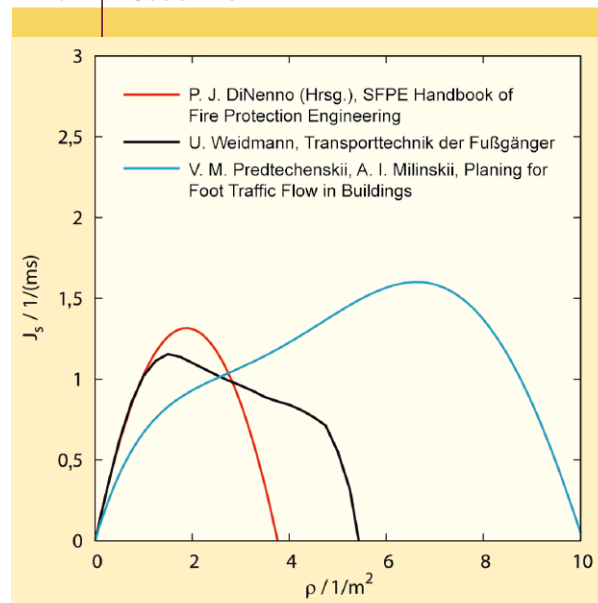


**Abb. 1** Spurbildung in gegenläufigen Fußgängerströmen. Rot gekleidete Personen laufen von rechts nach links, schwarz gekleidete in die entgegengesetzte Richtung. Man erkennt deutlich eine Separation in 3 (links) und 4 Spuren (rechts).

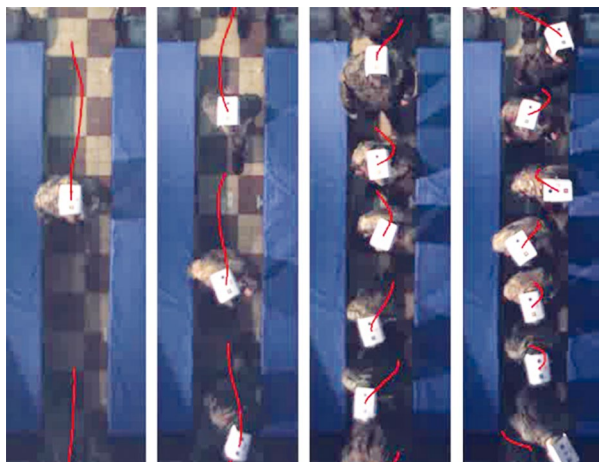
nien zeigen die Positionen der Versuchspersonen, die anhand eines Markers auf dem Kopf getrackt wurden.

Interessant ist auch die Abhängigkeit des Flusses in einem Korridor von der Korridorbreite. Das ist unter anderem relevant für die Bemessung von Fluchtwegen im Evakuierungsfall, die über gesetzliche Richtlinien festgelegt sind. Diese unterscheiden sich aber in Deutschland von Bundesland zu Bundesland. Ein Grund hierfür ist die lange unklare Datenlage bei empirischen Untersuchungen. Grundsätzlich werden zwei Szenarien unterschieden, wenn man die Korridorbreite vergrößert. In Szenario 1 wächst

### ABB. 2 | FUSSGÄNGERDYNAMIK



**Fundamentaldiagramme nach den drei wesentlichen Handbüchern, die weltweit zum Einsatz kommen. Man erkennt in allen drei Beispielen den Freifluss- (Fluss wächst monoton mit der Dichte) und gestauten Bereich (Fluss nimmt mit wachsender Dichte monoton ab). Quantitativ unterscheiden sich die Fundamentaldiagramme allerdings sehr stark.**

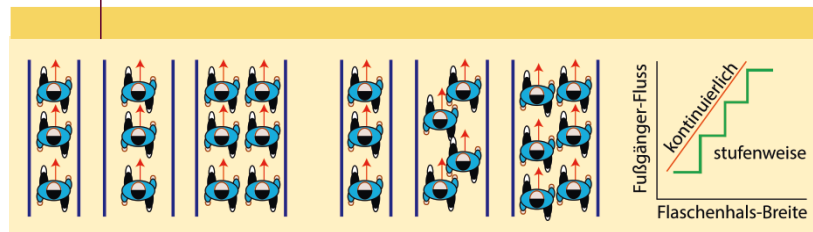


**Abb. 3** Trajektorien in Experimenten zur Bestimmung des Fundamentaldiagramms. Gezeigt sind vier Experimente bei verschiedenen Dichten. Die roten Linien sind die automatisch getrackten Positionen. Man erkennt ein starkes Schwanken des Kopfes bei hohen Dichten (rechts), das sogenannte Swaying. Bei niedrigen Dichten, und damit größeren Gehgeschwindigkeiten, ist die Kopposition deutlich stabiler.

der Fluss linear an, während in Szenario 2 der Fluss eine stufenförmige Abhängigkeit von der Korridorbreite zeigt (Abbildung 4). Szenario 2 basiert auf der Vorstellung, dass sich im Korridor Spuren bilden. Wenn der Korridor breit genug ist, kann sich eine zusätzliche Spur ausbilden, und der Strom steigt sprunghaft an. Tatsächlich hat sich aber in Experimenten gezeigt, dass Szenario 1 richtig ist. Bei Verbreiterung des Korridors vergrößert sich der seitliche Abstand nebeneinander laufender Personen, während der Abstand zum Vordermann kleiner wird. Dieses Verhalten ähnelt einem Reißverschluss und führt zur Ausbildung von leicht versetzten Spuren. Damit steigt der Fluss linear mit der Korridorbreite an.

Von großer praktischer Bedeutung, vor allem für Evakuierungen, ist das Verhalten an Engstellen (Bottleneck, Flaschenhals). Unter einem Flaschenhals versteht man allgemein eine lokale Begrenzung des Durchflusses. Neben geometrischen Engstellen, wie bei Türen, können sie auch

**ABB. 4 | FLUSS DURCH ENGSTELLE**



Die Bewegung durch eine Engstelle wird in verschiedenen Handbüchern, die die Grundlage für gesetzliche Richtlinien bilden, als stufenförmig oder kontinuierlich abhängig von der Breite der Engstelle angenommen (links). Experimente zeigen, dass die Abhängigkeit nahezu linear ist, da sich die Fußgänger reißverschlussartig anordnen (rechts).

durch andere Effekte auftreten, etwa an Treppen oder durch Änderung der Beleuchtungsstärke.

### Spurbildung

Ein Phänomen, das vermutlich Viele aus dem Alltag kennen, ist die spontane Spurbildung in gegenläufigen Fußgängerströmen. Hier bilden sich, ohne Beeinflussung von außen, spontan Spuren von Personen, die hintereinander in die gleiche Richtung laufen (Abbildung 1).

Experimente zeigen, dass die Dynamik dieser Spuren sehr komplex ist. So sind die Spuren nicht stabil. Auch die Anzahl der ausgebildeten Spuren ändert sich im Verlauf der Zeit. In Abbildung 1 sieht man, dass unter gleichen Bedingungen eine unterschiedliche Anzahl an Spuren – zum Teil gleichzeitig – entstehen kann. Für die Entstehung solcher Spuren ist es nicht notwendig, dass alle Personen bei einer bevorstehenden Kollision mit einem entgegen kommenden Fußgänger in die gleiche Richtung, etwa nach rechts, ausweichen. Ein wesentlicher Grund für deren Entstehung ist daher ein erhöhter Komfort: Der Einzelne muss weniger oft ausweichen und kommt im „Windschatten“ anderer schneller voran.

### Überraschende Effekte bei Evakuierungen

Im Zusammenhang mit Evakuierungen tritt der sogenannte „Faster-Is-Slower“-Effekt auf. Hierbei handelt es sich um die Beobachtung, dass die Evakuierungszeit anwachsen kann, wenn sich die evakuierenden Personen schneller in Richtung des Ausgangs bewegen. Der Grund hierfür ist, dass der Ausgang als Flaschenhals wirkt und es dort zu vermehrten Konflikten und Stauungen kommen kann. Dabei können sich „Gewölbe“ bilden, also Strukturen, die man aus der Bewegung von granularen Materialien kennt. Gewölbe sind Strukturen, die sich selbst durch Reibung stabilisieren und eine weitere Bewegung verhindern. In granularen Materialien lassen sie sich etwa durch Schütteln auflösen, was so in Menschenmengen leider nicht funktioniert.

In Experimenten hat man bereits vor mehr als dreißig Jahren den Einfluss von unterschiedlichen Faktoren auf die Evakuierungszeiten von Flugzeugen untersucht. Dies ist wichtig, da Flugzeugbauer vor der Zulassung eines neuen Flugzeugs für den kommerziellen Betrieb nachweisen müssen, dass es sich in maximal neunzig Sekunden evakuieren lässt. In den angesprochenen Experimenten wurde der kombinierte Einfluss der Motivation, also kooperatives gegen egoistisches Verhalten, der Passagiere und der Türbreite untersucht. In der kooperativen Situation nehmen die Personen Rücksicht aufeinander, während sie in der egoistischen Variante nur an ihrem eigenen Vorteil interessiert sind, was etwa zu einer höheren Gehgeschwindigkeit sowie Drängeln und Schubsen führt. Man fand in den Experimenten, dass bei breiteren Türen egoistisches Verhalten zu kürzeren Evakuierungszeiten führt. Bei schmalen Türen ist es dagegen *genau anders* herum. Hier beobachtet man für kooperatives Verhalten kürzere Evakuierungszeiten. Dieses auf den ersten Blick über-

raschende Ergebnis zeigt, wie komplex Evakuierungsprozesse tatsächlich sind.

### Modelle für Fußgängerdynamik

Die Modellierung der Dynamik von Fußgängern ist deutlich schwieriger als die von Fahrzeugen auf der Autobahn. Das erfordert etwa das Ausweichen bei „Gegenverkehr“. Außerdem gibt es ganz unterschiedliche Typen von Verkehrswegen, wie Treppen, Gehsteige oder öffentliche Plätze, auf denen sich Personen ganz unterschiedlich verhalten. Die Bewegung von Fußgängern ist auch nicht so stark durch Verkehrsregeln eingeschränkt, wie dies im Straßenverkehr der Fall ist. Schließlich ist beim Fußgängerverkehr die Wechselwirkung zwischen den Agenten komplizierter.

Im Autobahnverkehr besteht die wesentliche Wechselwirkung mit dem Fahrzeug unmittelbar davor. Das gilt für Personenströme nicht mehr. Der wichtigste Beitrag zur Wechselwirkung, und damit zur Wahl der Gehrichtung und -geschwindigkeit, kommt nicht notwendigerweise von der räumlich nächsten Person. Stattdessen spielt auch die Gehrichtung eine wichtige Rolle. So ist die Wechselwirkung mit einer Person, die fünf Meter entfernt ist, aber unmittelbar auf mich zuläuft, in der Regel wichtiger als die mit einer Person, die direkt neben mir läuft. Um solche Effekte zu berücksichtigen, genügt es nicht, die bekannten Verkehrsmodelle einfach auf den zweidimensionalen Fall zu verallgemeinern.

Modelle zur Beschreibung von Fußgängerdynamik lassen sich auf ähnliche Weise klassifizieren wie Modelle für Straßenverkehr [5]. Man unterscheidet unter anderem zwischen makroskopischen und mikroskopischen Modellen. In letzteren wird die Bewegung einzelner Fußgänger modelliert, während erstere auf einer zur Hydrodynamik analogen Beschreibung über Dichte basieren. Raum, Zeit und Zustandsvariable können jeweils diskret oder kontinuierlich sein. Dabei sind im Prinzip alle Kombinationen möglich. Schließlich unterscheidet man Modelle mit deterministischer Dynamik von solchen mit einer stochastischen Dynamik. Wir beschränken uns hier auf die Beschreibung der wesentlichen mikroskopischen Modelle, da diese insbesondere für Anwendungen eine größere Bedeutung haben.

### Zellularautomaten

Mit Zellularautomaten lassen sich große Menschenmengen sehr effizient, das heißt schneller als in Echtzeit, simulieren, da bei ihnen Raum, Zeit und die Zustandsvariablen – wie die Geschwindigkeiten der Fußgänger – diskret sind. Sie gehören zur Klasse der entscheidungsbasierten Modelle, deren Dynamik nicht durch ein System von Differentialgleichungen definiert wird, sondern durch eine Abfolge von diskreten Entscheidungen über die weitere Bewegung. Daher lassen sich auch psychologische Effekte relativ leicht berücksichtigen.

Die meisten Zellularautomaten-Modelle haben eine stochastische Dynamik. Die Übergänge zu benachbarten Zellen im diskretisierten Raum werden durch Übergangswahr-

### BESTIMMUNG DER FUSSGÄNGERDICHTEN

Wie beim Straßenverkehr ist die Bestimmung der Dichte aus lokalen Messungen schwierig. In der Fußgängerdynamik werden verschiedene Dichtedefinitionen verwendet.

Eine besonders intuitive Definition basiert auf der Zahl der Personen in einem vorgegebenen Bereich, typischerweise der Größe ein auf ein Meter. Hierbei kann es aber passieren, dass sich eine Person nur teilweise im Messbereich befindet. Dies führt zu starken zeitlichen Schwankungen, wenn eine Person in den Messbereich tritt oder ihn verlässt.

Ein anderes Dichtemaß ist die Bedeckung. Sie wird aus der Projektion des Körperquerschnitts auf die Bodenfläche bestimmt. Diese Definition hat den Vorteil, dass sie den Körperbau berücksichtigt und ebenso Personen, die sich nicht vollständig im Messbereich befinden. Daher zeigt sie

auch deutlich geringere Schwankungen als die intuitive Dichtedefinition. Der wesentliche Nachteil ist, dass die Bedeckung in der Praxis sehr schwer bestimmbar ist.

Ein elegantes Verfahren, das sowohl in der Praxis anwendbar ist als auch die Nachteile der intuitiven Dichtedefinition vermeidet, basiert auf einer Voronoi-Zerlegung. Dabei wird die Fläche, auf der sich die Fußgänger bewegen, in Zellen unterteilt, in deren Zentrum sich der Fußgänger befindet. Zu einer Voronoi-Zelle gehören dann alle Punkte des Raumes, für die der jeweilige Fußgänger der am nächsten gelegene ist. Dies entspricht den bekannten Wigner-Seitz-Zellen in der Festkörperphysik. Auf diese Art und Weise kann man jedem Fußgänger eine lokale Dichte zuordnen, die durch den Kehrwert der Fläche der entsprechenden Voronoi-Zelle gegeben ist.

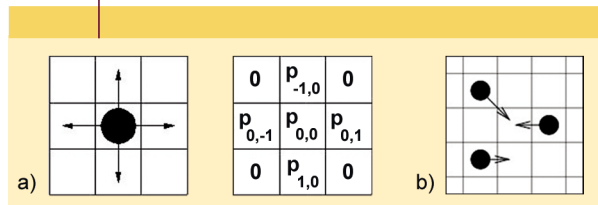
scheinlichkeiten charakterisiert (Abbildung 5). Dies spiegelt, neben Schwankungen im Verhalten, Unsicherheiten bei der Beschreibung des individuellen Verhaltens wider.

Das Standardmodell in dieser Klasse ist das Bodenfeld-Modell (Floor Field Model) [2,5]. Neben der Wunschbewegungsrichtung, die durch den Zielpunkt bestimmt ist, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten auch durch die Bewegung der anderen Fußgänger bestimmt.

Dies ist durch den Prozess der Chemotaxis inspiriert, mit dem zum Beispiel Ameisen miteinander kommunizieren. Diese markieren den Weg zu einer Futterquelle mit Hilfe eines Duftstoffes (Pheromon) so, dass andere Individuen dieser Spur folgen können. Die Wechselwirkung zwischen den Fußgängern funktioniert auf analoge Weise. Sich bewegend Fußgänger erzeugen virtuelle Pheromone, die dazu führen, dass andere Fußgänger bevorzugt ihrer Spur folgen. Die Pheromonspur wird auch als dynamisches Bodenfeld bezeichnet, da es zu einer Zeitabhängigkeit der Übergangswahrscheinlichkeiten führt. Die Spur ist dabei natürlich nicht real. Man kann sie aber als eine Art Vorstellung eines optimalen Weges unter Berücksichtigung des Zieles und der Bewegung der anderen Fußgänger im Kopf des Fußgängers interpretieren.

Ein zweites Bodenfeld, das statistische Bodenfeld, enthält Informationen über die Geometrie des Bereichs, in dem sich die Fußgänger bewegen. Seine Stärke ist daher zeitlich nicht veränderlich. Es kann etwa mit zunehmendem Abstand zu einem Ausgang kleiner werden. Ein Teilchen, das sich bevorzugt in Richtung größerer Bodenfelder bewegt, wird so relativ schnell den Ausgang finden – im Gegensatz zu einem völlig zufällig diffundierenden Teilchen.

**ABB. 5 | MODELLIERUNG MIT ZELLULARAUTOMATEN**



**In Zellularautomaten wird die Dynamik durch Übergangswahrscheinlichkeiten der Teilchen/Fußgänger spezifiziert. a) Meist werden Von-Neumann- (mit vier Nachbarzellen) oder Moore-Nachbarschaften (mit acht Nachbarzellen) verwendet. b) Bei Verwendung einer parallelen Dynamik, bei der alle Positionen gleichzeitig aktualisiert werden, kann es zu Konflikten um die Belegung von Zellen kommen. Diese Konflikte müssen erst aufgelöst werden.**

Die beiden Bodenfelder werden überlagert, wobei der Einfluss jeweils durch eine Kopplungskonstante kontrolliert wird. Die relativen Stärken der Kopplungen hängen dabei von der jeweils betrachteten Situation ab. Bei Evakuierungen wird oft eine Art „Herdentrieb“ beobachtet. In diesem Fall dominiert die Kopplung an das dynamische Feld.

### Beschleunigungsbasierte Modelle

In beschleunigungsbasierten Modellen wird die Bewegung jedes Fußgängers durch eine Differentialgleichung zweiter Ordnung, analog der Newton-Gleichung, bestimmt. Oft wird angenommen, dass die Fußgänger „soziale“ Kräfte aufeinander ausüben. Diese beruhen unter anderem auf dem Territorialverhalten und dem Wunsch der Wahrung einer gewissen Privatsphäre in Form eines Mindestabstands. Neben diesen sozialen Kräften wirken auch reale physikalische Kräfte, vor allem beim Kontakt von Personen.

Aus physikalischer Sicht sind auch soziale Kräfte nicht unplausibel, da die Anwesenheit von anderen Personen zu einer Abweichung von der geradlinig gleichförmigen Bewegung führen kann, was als Wirkung einer Kraft interpretierbar ist. Die gekoppelten Bewegungsgleichungen für die Fußgänger ähneln denen von Molekulardynamik-Simulationen und müssen mit relativ großem Aufwand numerisch gelöst werden.

Im Gegensatz zu physikalischen Kräften erfüllen soziale Kräfte nicht unbedingt das 3. Newtonsche Gesetz. Ein Extremfall ist hier beispielsweise ein Stalker. Hier stimmt nicht einmal das Vorzeichen im 3. Gesetz, denn während der Stalker eine attraktive Kraft „verspürt“, ist die Kraft auf die gestalkte Person eindeutig abstoßend.

Obwohl solche kraftbasierten Modelle auf den ersten Blick recht attraktiv erscheinen, so leiden sie doch unter einigen intrinsischen Problemen. In der Regel basieren die verwendeten Kräfte auf Ad-hoc-Annahmen, da sie keinen direkten physikalischen Ursprung haben. Im Prinzip ließen sich die Kräfte experimentell durch Messung der Beschleunigung bestimmen. Dies ist allerdings für den Fall mehrerer wechselwirkender Personen zum einen technisch schwie-

rig und zum anderen hat man in den letzten Jahren realisiert, dass für soziale Kräfte das Superpositionsprinzip nicht gültig ist. Man kann daher die Gesamtkraft auf eine Person nicht durch die Vektorsumme von Einzelkräften bestimmen.

Außerdem beobachtet man in Simulationen unrealistisches Verhalten, wie das „Durchtunneln“ von anderen Fußgängern oder oszillierendes Verhalten bei Annäherung an Hindernisse. Dies beruht aber nicht auf numerischen Artefakten durch die Diskretisierung der Differentialgleichungen, sondern stellt ein intrinsisches Problem dar. Hierbei spielt die Trägheit eine entscheidende Rolle. Sie ist in den Modellen zu groß und sollte kleiner sein, um ein Verhalten ähnlich wie bei einem überdämpften Oszillator zu erzeugen. Dies ist auch anschaulich klar, da Trägheit bei der Bewegung von Fußgängern eine wesentliche kleinere Rolle spielt als beim Autoverkehr.

### Geschwindigkeitsbasierte Modelle

In den letzten Jahren sind verstärkt geschwindigkeitsbasierte Modelle untersucht worden. Sie nutzen Differentialgleichungen erster Ordnung, welche die Geschwindigkeit des Fußgängers bestimmen. Dieser Ansatz leidet nicht unter den gleichen intrinsischen Problemen wie beschleunigungsbasierte Modelle. In vielen Fällen können sie als überdämpfter Grenzfall von solchen angesehen werden. In gewisser Weise berücksichtigen geschwindigkeitsbasierte Modelle, dass die Trägheit bei Fußgängern nur eine kleine Rolle spielt: Sie können praktisch instantan auf maximale Gehgeschwindigkeit beschleunigen oder stehen bleiben. Ebenso sind abrupte Richtungsänderungen viel leichter möglich als bei Autos.

Aus physikalischer Sicht interessant ist ein neuartiger Übergang zu einer gestauten Phase mit Stop-and-Go bei einer einspurigen Bewegung – schmaler Korridor, Überholen nicht möglich (Abbildung 3). In den meisten Modellen beobachtet man bei einer kritischen Dichte einen Phasenübergang, bei dem die homogene Lösung – alle Fußgänger haben gleichen Abstand und Geschwindigkeit – instabil wird. Der neuartige Übergang wird dagegen durch ein korreliertes Rauschen in der Geschwindigkeit getrieben. Dieses Geschwindigkeitsrauschen wurde auch in einigen Experimenten beobachtet. Der entsprechende Mechanismus ähnelt daher dem von Zellularautomaten-Modellen für den Straßenverkehr [1], denn es können im Prinzip bei beliebigen Dichten Staus auftreten, wobei die Wahrscheinlichkeit dafür mit zunehmender Dichte ansteigt.

### Anwendungen

Evakuierungsassistenten sollen die Entscheidungsträger bei Großveranstaltungen unterstützen. Bei der Evakuierung eines Sportstadions sind sehr viele Szenarien denkbar, die nicht alle im Vorhinein durchgeplant werden können. Der Evakuierungsassistent nutzt daher Informationen des Gefahrenmanagement-Systems des Stadions, insbesondere über die verfügbaren Notausgänge, geschlossene Brand-

schutztüren und die aktuelle Verteilung der Zuschauer im Stadion, die durch Personenzählanlagen automatisch bestimmt wird, um auf der Basis von Computersimulationen eine Vorhersage über den Verlauf einer Evakuierung unter den tatsächlichen Randbedingungen zu machen. Diese Vorhersage wird den Entscheidungsträgern – Feuerwehr, Polizei, Sicherheitsdienste – zur Verfügung gestellt, um sie bei ihren Entscheidungen zu unterstützen. Dies erfordert Simulationen, die schneller als in Echtzeit durchführbar sein müssen.

Evakuierungsassistenten wie HERMES helfen bei der Analyse potenziell gefährlicher Situationen. Dieses vom BMBF geförderte Projekt wurde in den Jahren 2009 bis 2011 in der Arena in Düsseldorf aufgebaut und getestet.

Eine Optimierung der Simulation, etwa eine Bestimmung der bestmöglichen Verteilung der Personen auf die zur Verfügung stehenden Notausgänge, ist nicht sinnvoll. Es ist praktisch unmöglich, in einer solchen Situation 17% der Personen nach Ausgang 42, weitere 53% nach Ausgang 24 und 30% nach Ausgang 13 zu leiten, insbesondere wenn manche Personengruppen, wie Familien oder Freunde, zusammenbleiben wollen.

### Zusammenfassung

Um in der Zukunft Unglücke wie bei der Loveparade zu vermeiden, müssen solche Großveranstaltungen sorgfältig geplant werden. Dabei können physikbasierte Modelle der Fußgängerdynamik helfen. In den letzten Jahren sind hier große Fortschritte erzielt worden, die solche Anwendungen in naher Zukunft routinemäßig möglich machen werden. Diese Maßnahmen helfen allerdings nur, wenn sich die Leute an die Regeln halten. Dies ist leider nicht immer der Fall, wie Unglücke in den letzten Jahren zeigen. Beim Haddsch kam es trotz vieler Verbesserungen zu weiteren Unglücken, vermutlich weil Pilger in die falsche Richtung gelaufen sind. Da es sich in dem System um Menschen handelt, deren Verhalten auf einem komplexen Reiz-Reaktionsmechanismus aufbaut, die in sozialen Gruppen agieren und die sich in vielfältigen physischen und psychischen Faktoren unterscheiden, erfordert dieses Thema eine große Offenheit für interdisziplinäre Kooperationen. Trotzdem ist es erstaunlich, dass sich viele der beobachteten Phänomene in Menschenmengen ohne tiefere Berücksichtigung von psychologischen Aspekten gut beschreiben lassen. Dies entspricht den Erfahrungen, die man in der statistischen Physik mit Vielteilchensystemen gemacht hat, bei denen oftmals Details keine Rolle spielen. Dies trifft natürlich nicht mehr zu, wenn man das Verhalten von wenigen Personen beschreiben möchte. Dies ist viel mehr durch Psychologie als durch die Physik bestimmt.

### Stichwörter

Evakuierung, Fußgänger, Fußgängerdynamik, Großveranstaltungen, Verkehrsforschung.

### Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

### Literatur

- [1] A. Bresges, A. Schadschneider, *Physik in unserer Zeit* **2017**, 48(3), 142.
- [2] A. Schadschneider, D. Chowdhury, K. Nishinari, *Stochastic Transport in Complex Systems – From Molecules to Vehicles*, Elsevier, 2010.
- [3] M. Treiber, A. Kesting, *Verkehrsdynamik und -simulation*, Springer, Berlin 2010.
- [4] M. Boltes et al., *Empirical results of pedestrian and evacuation dynamics*, *Encyclopedia of Complexity and System Science*. R. A. Meyers (Hrsg.), Springer, New York 2018.
- [5] M. Chraïbi et al., *Modelling of pedestrian and evacuation dynamics*, *Encyclopedia of Complexity and System Science*. R. A. Meyers (Hrsg.), Springer, New York 2018.
- [6] J. Adrian, A. Seyfried, A. Sieben, *J. R. Soc. Interface* **2020**, 17, 20190871.

### Die Autoren



**Andreas Schadschneider** habilitierte an der Universität zu Köln über die physikalischen Grundlagen von Straßenverkehr. Er ist seit 2006 apl. Professor für theoretische Physik an der Universität zu Köln und arbeitet seit 2007 außerdem am Institut für Physikdidaktik.



**Armin Seyfried** ist als Physiker seit 15 Jahren im Forschungsfeld der Fußgängerdynamik aktiv. Er leitet am Forschungszentrum Jülich das Institute for Advanced Simulation: Civil Safety Research (IAS-7) und ist Professor an der Bergischen Universität Wuppertal.

#### Anschrift

Prof. Dr. Andreas Schadschneider, Institut für Theoretische Physik, Institut für Physikdidaktik, Universität zu Köln, 50937 Köln  
 as@thp.uni-koeln.de

Prof. Dr. Armin Seyfried, Institute for Advanced Simulation – 7, Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich  
 a.seyfried@fz-juelich.de