

Im Vergrößerungsglas der Abstandsregeln

Social Distancing beeinflusst die Dynamik von Fußgängerströmen.

Andreas Schadschneider

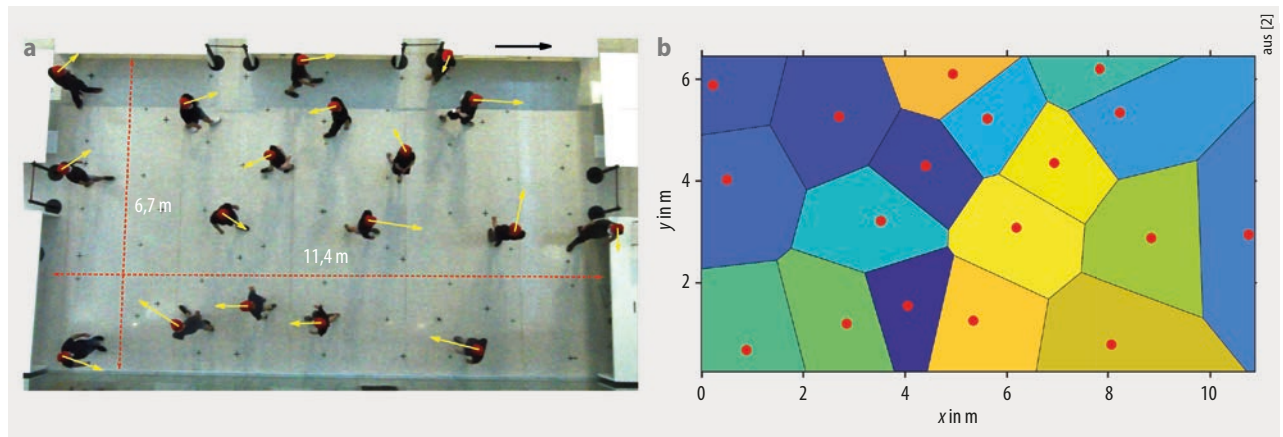


Abb. 1 Im Experiment bewegen sich 12 bis 32 Personen in einem vorgegebenen Bereich (a). Die zugehörige Zerlegung in Voronoi-Zellen (b) erlaubt es, die lokale Dichte als Kehrwert der Fläche einer Zelle zu bestimmen. Rote Punkte kennzeichnen die Positionen der Fußgänger.

Seit dem Ausbruch der Corona-Pandemie sind die AHA-Regeln Teil unseres Alltags. Dazu gehört das Einhalten eines Abstands von mindestens 1,5 Metern zu anderen Personen (Social Distancing)¹⁾. Diese Regel lässt sich in statischen Situationen wie Vorlesungen einfach realisieren, in dynamischen erweist sich das als schwieriger. Aus wissenschaftlicher Sicht stellt sich die Frage, wie Social Distancing die Dynamik von Fußgängerströmen beeinflusst. So ist interessant, inwieweit sich Fußgänger an die Richtlinien halten und ob dies immer möglich ist. Mit solchen Fragen haben sich mehrere Arbeitsgruppen befasst – theoretisch sowie experimentell. Die neuen Einsichten sind auch für die Fußgängerforschung allgemein relevant.

Die Erforschung von Fußgängerströmen hat in den letzten 20 Jahren durch ein enges Wechselspiel experimenteller und theoretischer Methoden große Fortschritte gemacht [1]. Grundlegende Eigenschaften lassen sich meist an einfachen Szenarien untersuchen, etwa in kontrollierten Experimenten mit Versuchspersonen oder auf Basis physikalisch inspirierter Modelle. Fußgängerströme sind auch als Systeme aus aktiven Teilchen interessant, die viele kollektive Phänomene zeigen. Beispiele sind

Muster und Strukturen, die mit dem Wunsch zusammenhängen, Umwege oder Zusammenstöße zu vermeiden.

Die Gruppe um Iker Zuriguel an der Universität von Navarra in Pamplona hat Experimente in einfachen Szenarien durchgeführt. Sie untersuchte unter anderem, bis zu welcher (kritischen) Dichte es möglich ist, den notwendigen Abstand einzuhalten [2]. Im statischen Fall ohne Bewegung liegt diese Dichte bei etwa 0,14 Personen pro Quadratmeter (P/m^2), da jede (punktförmige) Person bei einer Distanz von 1,5 Metern einen Platzbedarf von $\pi \cdot (1,5 \text{ m})^2 \approx 7 \text{ m}^2$ hat. Zum Vergleich: Ohne Social Distancing liegen moderate Dichten, z. B. in Fußgängerzonen, bei 1 bis 2 P/m^2 , im Gedränge können es bis zu 10 P/m^2 sein.

In den Experimenten sollten sich die Teilnehmenden in einem vorgegebenen Bereich mit möglichst konstanter Geschwindigkeit in zufällige Richtungen bewegen (Abb. 1). Damit keine stationären Flussmuster wie in Fisch- oder Vogelschwärmen entstehen, mussten die Personen regelmäßig nach einem Signal einen beliebigen Punkt am Rand ansteuern, bevor sie ihre Zufallsbewegung fortsetzten. Drei Parameter wurden variiert: die Zahl der Personen im Testbereich (d. h. die mittlere Dichte ρ), die Geh-

geschwindigkeit v_0 (gemütlich oder eilig) und der Mindestabstand d_{\min} (1,5 bzw. 2 m). Kameras in großer Höhe zeichneten die Trajektorien der Bewegungen mit hoher Genauigkeit auf.

Eines der wichtigen Ergebnisse zeigt, dass die Einhaltung des Mindestabstands schwierig ist. Bei allen betrachteten Dichten ρ wurde in mindestens 50 % der Zeit d_{\min} unterschritten. Offensichtlich fällt es schwer, den Abstand korrekt einzuschätzen, insbesondere für mehrere Personen gleichzeitig. Vermutlich erklären die damit verbundenen Unsicherheiten auch die relativ geringen „wahrscheinlichsten“ Gehgeschwindigkeiten von 4,3 km/h im Fall der „eiligen Bewegung“.

Für eine genauere Analyse definierten die Forschenden eine Expositionszeit t_{exp} , welche die Dauer einer ununterbrochenen Unterschreitung des Mindestabstands angibt. Bei größerer Gehgeschwindigkeit wird zwar der Mindestabstand häufiger verletzt, gleichzeitig verringert sich aber die Expositionszeit. Die beobachtete

1) Die genauen Regelungen unterscheiden sich abhängig von der Region. Die WHO empfiehlt einen Mindestabstand von einem Meter.

2) Für ihre Untersuchungen erhielt die Arbeitsgruppe zusammen mit einer Gruppe aus Tokio den Ig-Nobelpreis 2021 (bit.ly/32Vwsho).

Wahrscheinlichkeitsdichte von t_{exp} hängt in weiten Bereichen nur von der reskalierten Größe $t_{\text{exp}} \cdot \langle v \rangle$ ab, wobei $\langle v \rangle$ die mittlere Gehgeschwindigkeit ist. Die Verteilung der Expositionszeiten besitzt ein deutliches Maximum bei etwa $t_{\text{exp}} \cdot \langle v \rangle = 1$ m. Das könnte der Strecke entsprechen, die eine Person zurücklegt, bis sie die Verletzung des Mindestabstands beheben kann. Ab einer Dichte von $0,16 \text{ P/m}^2$ scheint es nicht mehr möglich, einen Abstand von einem Meter zuverlässig einzuhalten. Dies entspricht der halben Dichte in einer statischen Situation mit einem Meter Mindestabstand.

In einer zweiten Arbeit, die auf den gleichen Experimenten beruht, analysierten die Forschenden die Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Abstand [3]. Demnach hängt die Gehgeschwindigkeit einer Person nicht nur von der globalen Dichte ρ ab, sondern variiert von Person zu Person, d. h. bei gleichem Abstand gibt es große Unterschiede in der gewählten Geschwindigkeit. Offenbar sorgt Social Distancing für weniger Konflikte. Die größeren Abstände geben den Fußgängern mehr Zeit, die Bewegungsrichtung zu optimieren und dabei die Bewegung mehrerer Nachbarn zu berücksichtigen.

Laborexperimente erlauben es, unter kontrollierten Bedingungen viele Eigenschaften genau zu bestimmen. Aber wie aussagekräftig sind die Ergebnisse? Die Gruppe um Federico Toschi und Alessandro Corbetta aus Eindhoven²⁾ hat den Einfluss von Social Distancing durch Beobachtungen auf einem Bahnsteig des Hauptbahnhofs von Utrecht untersucht [4]. Dort trackten viele Sensoren in datenschutzkonformer Weise die Bewegungen aller Personen. Da dieses System bereits vor Corona aktiv war, lassen sich Situationen mit und ohne Social Distancing vergleichen. Die Sensoren liefern die Position aller Personen im Sichtfeld, woraus sich die Trajektorien ihrer Bewegung ergeben. Ein Algorithmus bestimmt auf Basis der Daten und daraus berechneter Korrelationsfunktionen, ob Personen zu einer sozialen Gruppe (Familie oder Freunde) gehören. Dies ermöglicht es, erlaubte und nicht erlaubte Verletzungen des Mindestabstands zu unterscheiden.

Während vor der Pandemie täglich etwa 100 000 Personen erfasst wurden und regelmäßig Dichten größer als 1 P/m^2 auftraten, waren es im Mai 2020 nur etwa 16 000 Personen pro Tag. Die größte beobachtete Dichte betrug $0,3 \text{ P/m}^2$.

Auch die Gruppe aus Eindhoven bestimmte für die Zeit der Pandemie Verteilungen der Abstände und Expositionszeiten – mit ähnlichem Ergebnis wie beim Team aus Pamplona. Mit zunehmender globaler Dichte kommt es häufiger zu Verletzungen der Abstandsregel. Dabei steigt die Expositionszeit schneller als linear mit der Dichte. Außerdem nimmt die Zahl der Verletzungen im Laufe der Zeit nach Einführung der Maßnahme zu, weil ein Gewöhnungseffekt eventuell zu größerer Nachlässigkeit führt. Eine alternative Erklärung ist die zunehmende Personendichte, da wieder mehr Personen zur Arbeit pendeln.

Die experimentellen und empirischen Untersuchungen haben das quantitative Verständnis der Auswirkungen von Social Distancing auf Fußgängerströme verbessert. Zwar sagen die Ergebnisse nicht direkt etwas über die Ansteckungsgefahr aus. Dazu müsste man sie z. B. mit Modellen für die Ausbreitung des Virus in Luft kombinieren und komplexere Szenarien untersuchen. Die Arbeiten liefern aber wichtige Hinweise für das weitere Vorgehen, insbesondere im Crowd

Management. Da es schwerfällt, Abstände korrekt einzuschätzen, gilt es, einen größeren Mindestabstand zu empfehlen. Außerdem helfen Absperungen oder Richtungsmarkierungen auf dem Boden, Personenströme gezielt zu leiten und so Kontakte zu reduzieren.

Die aktuelle Situation könnte das Verhalten von Fußgängern im öffentlichen Raum langfristig ändern und dazu führen, dass sie kleine Abstände zu unbekanntenen Personen vermeiden. Einige Ergebnisse könnten daher für die Dynamik in normalen Zeiten relevant sein. Ohne Social Distancing ist die Auswertung experimenteller Daten meist schwierig, gerade bei hohen Dichten. Das Social Distancing wirkt wie ein Vergrößerungsglas, das einige Effekte deutlicher hervortreten lässt.

- [1] A. Schadschneider et al., in: L. Gibelli und N. Bellomo (Hrsg.), *Crowd Dynamics*, Birkhäuser, Basel, Schweiz (2018)
- [2] I. Echeverria-Huerte et al., *Sci. Rep.* **11**, 1534 (2021)
- [3] I. Echeverria-Huerte et al., *JSTAT* **2021**, 043401 (2021)
- [4] C. A. S. Pouw et al., *PLoS ONE* **15**, e0240963 (2020)

Der Autor

Prof. Dr. Andreas Schadschneider, Institut für Theoretische Physik und Institut für Physikdidaktik, Universität zu Köln, Zulpicher Str. 77, 50937 Köln

Kurzgefasst

Vor der Explosion beobachtet

Die internationale Kollaboration Young Supernova Experiment hat erstmals die Strahlung beobachtet, die ein roter Riesenstern vor seinem Lebensende in einer Supernova-Explosion aussendet. Die Daten in verschiedenen Spektralbereichen reichen bis zu 130 Tage vor die Explosion zurück. Die ursprüngliche Masse des Sterns betrug zehn bis zwölf Sonnenmassen – deutlich weniger als aus Simulationen erwartet. Aus Modellierungen der Lichtkurve – der Leuchtkraft des Objekts als Funktion der Zeit – ermittelte die Kollaboration u. a. den Radius des Sterns unmittelbar vor der Explosion. Gravitationswellen könnten den beobachteten Massenverlust erklären.

W. V. Jacobson-Galán et al., *ApJ* **924**, 15 (2022)

Faszinierende Präzision

Mit dem Ladung-zu-Masse-Verhältnis von Teilchen lässt sich zeigen, ob sich Materie und Antimaterie unter Schwerkraft gleich verhalten. Die BASE-Kollaboration hat diese Größe nun für Proton und Antiproton mit einer viermal besseren Präzision bestimmt: $-(q/m)_p/(q/m)_\bar{p} = 1,000\,000\,000\,003(16)$. Die zugrundeliegenden Daten lieferte ein spezieller Versuchsaufbau aus mehreren Penning-Fallen am CERN. Dieser erlaubt es, etwa 50-mal schneller zu messen als bisher, sodass 24 000 Werte für die Analyse zur Verfügung standen. Der neue Wert bestätigt erstmals direkt und nahezu modellunabhängig das schwache Äquivalenzprinzip.

M. J. Borchert et al., *Nature* **601**, 53 (2022)

