

Turbulente Pilgerströme

Mithilfe von Simulationen und Beobachtungen von Menschenmassen wurde die Sicherheit der Pilger in Mekka erhöht und beim vergangenen Hadsch eine Massenpanik vermieden.

1) In einem Interview erzählt Dirk Helbing mehr über die Hintergründe seines Forschungsprojekts: S. 54 in diesem Heft

2) Für Bilder und Videoaufnahmen der turbulenten Pilgerströme siehe auch www.trafficforum.org/crowdturbulence

Die große Pilgerfahrt nach Mekka, der sog. Hadsch, ist eine der heiligsten Aufgaben eines Muslims und dient der Reinwaschung von allen Sünden. Einmal im Leben sollte daher jeder Muslim, der sich diese Reise leisten kann, nach Mekka pilgern. Der Hadsch hat eine lange Tradition, doch in den letzten Jahren ist die Zahl der Pilger explosionsartig angestiegen: Über 3 Millionen Gläubige kommen jährlich nach Mina, um dort als eine Station der Pilgerfahrt drei Säulen – die Jamarats – zu steinigen, die den Teufel symbolisieren. Da das Ritual strengen Regeln folgt, können die Gläubigen die Steinigung nur an drei bestimmten Tagen im Jahr vollziehen, außerdem müssen sie nah genug an die Säulen herankommen, um diese mit ihren Steinen zu treffen und nicht etwa andere Pilger – dies wäre nämlich ein schlechtes Omen. Daher waren vor allem in der Nähe der Jamarats dichtes Gedränge und auch Massenpaniken vorprogrammiert, wie sie aufgrund der gestiegenen Pilgerzahlen speziell in den vergangenen Jahren häufig aufgetreten sind und bei denen zum Teil mehrere hundert Menschen ums Leben kamen. Wer schon einmal selbst in eine solche Menschenmenge eingekellt

Prof. Dr. Dietrich Stauffer, Institut für Theoretische Physik der Universität Köln, Zùlpicher Str. 77, 50937 Köln



Menschenmassen umringen für die symbolische Steinigung des Teufels eine der ellipsenförmigen Säulen auf der Jamarat-Brücke. In dem dichten Gedränge kam es in den letzten Jahren immer wieder zu Paniken mit teilweise hundert von Toten.

war, wird wohl nicht so schnell die Angst vor dem Umfallen vergessen.

Auf Anregung von Dirk Helbing¹⁾ von der TU Dresden ließ die saudische Regierung an den Stellen, an denen das Gedränge besonders groß ist, spezielle Überwachungskameras für wissenschaftliche Auswertungen installieren. Mithilfe dieser Videokameras wurden die Menschenströme im Januar 2006 an den kritischen Orten erfasst, um ihre Bewegung und damit die Entstehung von Massenpaniken zu analysieren. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für eine Umorganisation der Pilgerströme auf dem Platz um die Jamarat-Brücke und in den umliegenden Straßen. Die Beobachtungen der Pilgerströme bei extremer Dichte offenbarten im Zeitraffer Stop-and-Go-Wellen entgegen der Gehrichtung oder aber Schwingungen quer dazu. Aus der Betrachtung dieser longitudinalen und transversalen Wellen in einer Filmaufnahme²⁾ lassen sich Informationen über die Entstehung von (in diesem Fall menschlichen) Turbulenzen gewinnen.

Mit wachsender Dichte von mehreren Personen pro Quadratmeter kommt es zu zwei Phasenübergängen: Wie in der Hydrodynamik findet ein Übergang zu komplexer raum-zeitlicher

Dynamik statt: erst ein laminarer Fluss, dann Wellen und schließlich „turbulente“ Zufallsbewegungen in alle Richtungen (Abb. 1). Die Zufallsbewegungen erfolgen unfreiwillig, da die Individuen dem Gedränge ausgeliefert sind und von allen Seiten Kräfte auf sie einwirken. Im Gegensatz zur Hydrodynamik entstehen bei der menschlichen Turbulenz aber keine Wirbel. Die dichte Menge strukturiert sich vielmehr hierarchisch und selbständig in Gruppen verschiedener Größe und Geschwindigkeitskorrelation. An der Grenze zwischen zwei solchen Clustern tauchen Reibungseffekte auf wie bei Erdbeben.

Computeranalysen der Filmaufnahmen in Mekka [1] ergaben nach automatischer Auswertung mittels Kontrastverstärkung, Bilderkennung und speziellen Hochleistungsalgorithmen insgesamt 30 Millionen Datenpaare von Positionen r_i und Geschwindigkeiten v_i der Pilger i mit Dichten ρ von bis zu zehn Personen pro Quadratmeter. Daraus ließen sich für jeden Zeitpunkt t eine lokale Dichte $\rho(r,t) = \sum_i f_i(r_i-r,t)$ sowie eine lokale Geschwindigkeit

$$V(r,t) = \sum_i v_i f_i(r_i-r,t) / \sum_i f_i(r_i-r,t)$$

am Ort r definieren. Wie in der „smooth particle hydrodynamics“

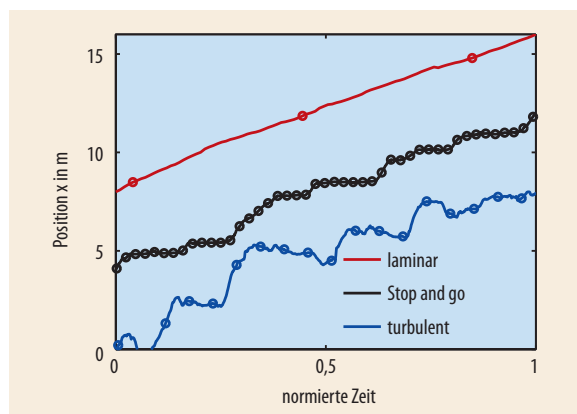


Abb. 1 Trajektorien von Pilgern in verschiedenen Bewegungszuständen: Die wenig behinderte Fortbewegung (rot) verläuft laminar, während Stufen (schwarz) Stop-Phasen markieren. Irreguläre Bewegungen (blau) sind das Charakteristikum von „turbulenter“ Bewegung. Die Zeitachse ist so skaliert, dass die Trajektorien sich jeweils über acht Meter erstrecken, wobei alle fünf Sekunden ein Symbol eingezeichnet ist.

wurden die einzelnen Fußgänger Gauß-förmig mit der abstandsabhängigen Gewichtungsfunktion $f_i(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}) \propto \exp(-|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}|^2/\sigma^2)$ geglättet, wobei als Glättungsradius $\sigma \sim 1$ m gewählt wurde und die Summe sich über alle Personen i erstreckte. Aus diesen Ergebnissen lassen sich der Fußgängerfluss ρV sowie der „Druck“ $\rho \text{Var}(V)$ ermitteln, wobei $\text{Var}(V)$ die Varianz der lokalen Geschwindigkeit repräsentiert. Die lokale Dichte variiert lokal sehr stark – ähnlich wie sich Wasser am kritischen Punkt verhält, aber nicht bei Raumtemperatur. Eine Phasentrennung in Bereiche mit hoher bzw. niedriger Dichte ist möglicherweise in den auftretenden Stop-and-Go-Wellen erkennbar.

Eine automatisierte Videoauswertung der Pilgermenge in Echtzeit kann feststellen, wann Stop-and-Go-Wellen entstehen, sodass einige Minuten vor der drohenden Turbulenz, die häufig zum Umfallen und Niedertrampeln von Menschen führt, Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Bei einem gleichmäßigeren Menschenstrom verringert sich die Wahrscheinlichkeit für Unfälle. Die Erfahrungen von Mekka können auch in anderen Situationen Menschenleben retten, da sie überall dorthin übertragbar sind, wo dichte Menschenmassen auftreten wie z. B. bei Musikfestivals oder bei großen Sportereignissen.

Nach der Massenpanik im vergangenen Jahr und der Auswertung ihrer Entstehungsursachen sorgten in diesem Jahr praktische Maßnahmen für einen sicheren Hadsch ohne Unfälle: Nun werden die Pilger nach einem optimierten Zeitschema zur Steinigung des Teufels geschickt. Zusätzlich warnt eine automatische Zählung der Pilgerströme rechtzeitig vor Überlastungssituationen. Droht dennoch der Zusammenbruch des gleichmäßigen Fußgängerflusses, stellen flexible Umleitungsmaßnahmen sicher, dass der Strom möglichst nicht ins Stocken gerät. Aus demselben Grund wurde der frühere Gegenverkehr durch Einbahnregelungen ersetzt sowie die kreisförmigen Säulen durch Ellipsen.

Derzeit bemühen sich Dirk Helbing und seine Mitarbeiter, die obigen „hydrodynamischen“ Beobachtungen, nämlich das Mitteln über viele Personen, durch mikroskopische Simulationen zu verstehen, welche die Interaktionen zwischen den einzelnen Individuen nachvollziehen. Analog bewegen Physikerinnen und Physiker bereits seit einem halben Jahrhundert einzelne Teilchen mit Monte-Carlo- und Molekular-Dynamik im Computer. Außerhalb der Physik heißt das oft agentenbasierte Simulation [2]. Da Menschen in der Regel aber nicht kugelförmig sind, reicht ein einfaches Lennard-Jones-Potential, welches die Wechselwirkung zwischen Atomen wiedergibt, zu ihrer Beschreibung nicht aus. Schon Wassermoleküle haben ein richtungsabhängiges Potential. Ähnlicher zur Menschendynamik verhält sich die Granulare Dynamik, die z. B. dabei hilft, das Verhalten von Sanddünen zu verstehen [3]. Hier tauchen explizite Reibungskräfte auf. Bei Menschen kommt noch hinzu, dass sie im Gedränge versuchen, zusätzlichen Platz zu gewinnen.

Da Menschen keine Wassermoleküle sind, wird oft behauptet, sie ließen sich nicht wie Moleküle beobachten oder simulieren. Die Wirklichkeit sieht aber anders aus: Versicherungen ignorieren viele Aspekte individuellen Verhaltens und verlassen sich stattdessen auf das Gesetz der großen Zahlen. Die Erfahrungen aus Mekka sind ein weiteres Beispiel dafür, dass Computer Menschenmassen erfolgreich modellieren und mit ihren Resultaten dazu beitragen können, Menschenleben zu retten.

Dietrich Stauffer

- [1] *D. Helbing et al.*, Phys. Rev. E 75, 046109 (2007)
- [2] *F. C. Billari et al.* (Hrsg.), Agent-based computational modelling, Physica-Verlag, Heidelberg (2006); *D. Stauffer et al.*, Biology, Sociology, Geology by Computational Physics, Elsevier, Amsterdam (2006); speziell für Verkehr von Autos und Menschen siehe *D. Helbing*, Rev. Mod. Phys. 73, 1067 (2001)
- [3] *H. J. Herrmann*, Physik Journal, August/September 2005, S. 57