

ANDERS FREDRIK JOHANSSON

SELBSTORGANISATION UND (UN)KOORDINATION  
 IN MENSCHENMENGEN.  
 DIE DYNAMIKEN VON MASSENPANIKEN

Übersetzung aus dem Englischen von  
 Tobias Conradi und Maik Bierwirth

Die Simulation und Analyse von bewegten Menschenmengen werden aufgrund unterschiedlichster Gründe durchgeführt; so beispielsweise, um die Evakuierung von Gebäuden einschätzen zu können, um einen Einblick in die Bewegungsmuster von Fußgängern [*interaction patterns between pedestrians*] zu erlangen, oder um Ereignisse mit großen Menschenmassen zu organisieren. Im folgenden Aufsatz werden wir sehen, wie ein Modell zur Simulation von Fußgängerbewegungen in Verbindung mit einer datengestützten Videoanalyse von Menschenmassen dabei helfen kann, Massenunfälle zu verstehen und hoffentlich zu vermeiden.

Bevor einzelne Anwendungen aufgezeigt werden, beginnen wir mit einer Vorstellung des *social force model*, einem Modell zur Simulation von Fußgängerströmen. Innerhalb des *social force model* wird jede Person quasi als ein Masseteilchen angesehen. Jeder Fußgänger wird von einer Vielzahl von Kräften beeinflusst: Zum Beispiel wirken auf ihn abstoßende Kräfte von Menschen in der Umgebung, da Fußgänger es vermeiden, einander zu nahe zu kommen – sie möchten also möglichst eine gewisse Privatsphäre um sich herum aufrechterhalten. Weitere Kräfte werden von Hindernissen wie Mauern oder ähnlichen Begrenzungen ausgeübt, denen Fußgänger eher ausweichen. Außerdem existiert eine anziehende Kraft in Richtung eines Zielpunkts, also in etwa der angestrebten Bewegungsrichtung des Fußgängers. Wenn all diese Kräfte miteinander verrechnet werden, erhalten wir eine resultierende Kraft, welche die Richtung bestimmt, in die die Menschen sich bewegen werden. Innerhalb eines Gleichungssystems ergibt sich:

$$\frac{d\vec{v}_\alpha(t)}{dt} = \vec{f}_\alpha(t) + \xi_\alpha(t) \quad \text{Noise term}$$

Where the force is composed by:

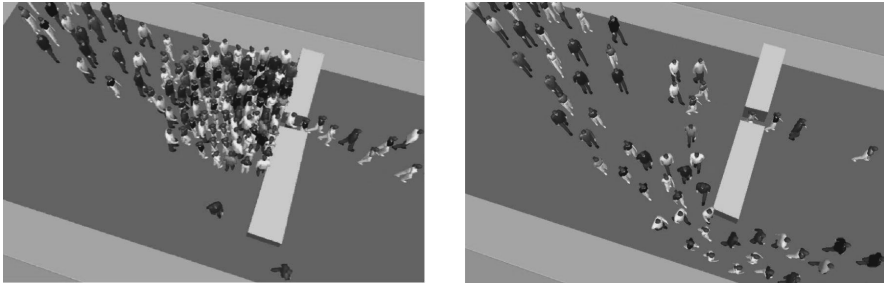
$$\vec{f}_\alpha(t) = \frac{1}{\tau_\alpha} (\underbrace{v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha}_{\text{Desired velocity}} - \underbrace{\vec{v}_\alpha}_{\text{Actual velocity}}) + \underbrace{\sum_{\beta(\neq\alpha)} \vec{f}_{\alpha\beta}(t)}_{\text{Forces from all other pedestrians, } \beta} + \underbrace{\sum_i \vec{f}_{\alpha i}(t)}_{\text{Forces from all borders, } i}$$

Acceleration time      ↑      ↑      ↑

Die Gleichungen<sup>1</sup> erinnern an Newtonsche Physik, da die Beschleunigung von Fußgänger „ $\alpha$ “ von den entsprechenden Kräften plus eines Fluktuationsterms bestimmt wird, mit welchem stochastische Schwankungen berücksichtigt werden. Die resultierende *social force* setzt sich wie gezeigt aus unterschiedlichen Komponenten zusammen. Der erste Teil der Gleichung beschreibt die gewünschte abzüglich der tatsächlichen Geschwindigkeit. Dies bedeutet, dass der Fußgänger seine Geschwindigkeit an die Wunschgeschwindigkeit im Rahmen einer gewissen Beschleunigungszeit „ $\tau$ “ anpasst. „ $\alpha$ “ bezeichnet den aktuell betrachteten Fußgänger, „ $\beta$ “ alle anderen in seiner Umgebung. Von jedem dieser anderen Fußgänger „ $\beta$ “ gehen Kräfte aus, die wir summieren. Schließlich bestimmen wir noch die Grenzen „ $i$ “, deren Kräfte wir ebenfalls summieren. Die Wunschgeschwindigkeit kann auf unterschiedliche Weise bestimmt werden, wobei die Frage, in welche Richtung und wie schnell der Fußgänger gehen möchte, keineswegs trivial ist. Die einfachste Annahme ist, dass alle Fußgänger den kürzesten Weg zu ihrem Ziel nehmen. Von allen Startpunkten aus kann die Distanz zum Ziel berechnet werden, um ein Potenzialfeld [ähnlich der Gravitation] zu erhalten. Folgt man dem Potenzialfeld abwärts, wird man schließlich das Ziel erreichen. Innerhalb des entsprechenden Vektorfeldes richten sich die Pfeile nach der kürzesten Entfernung zum Zielpunkt aus. Die Annahme des kürzesten Weges allerdings liefert eine wenig realistische Simulation, weil es an einer Stelle zu einem Stau kommen kann, während es an anderer Stelle viel freien Raum gibt. Anstatt den kürzesten Weg zu wählen, können wir die Berechnung auch mittels eines *discrete choice framework* durchführen: Wenn wir zum Beispiel zwei Wege A und B zur Auswahl haben, können wir die Zeit messen, die Fußgänger jeweils bis zum Ziel brauchen. Welcher Weg gewählt wird, kann mit einer Wahrscheinlichkeitsfunktion modelliert werden: Ist die Wegzeit auf Route A kürzer, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Fußgänger diesen Weg wählen, für den umgekehrten Fall gilt das Gleiche. Anschließend lassen wir die Simulation erneut laufen, nun allerdings auf Basis des *schnellsten* Weges statt des kürzesten. Wieder werden die Personen zunächst die kürzeste Route wählen. Sobald sie jedoch feststellen, dass es dort zu einem Stau kommt, entscheiden sie sich für die alternative Route; einige Personen werden immer noch den kürzesten Weg nehmen, die Mehrheit aber wird nun den etwas längeren wählen. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis.

---

<sup>1</sup> *Noise term* = Fluktuationsterm; wobei die Kraft sich ergibt aus: *Acceleration time* = Beschleunigungszeit, *Desired velocity* = Wunschgeschwindigkeit, *Actual velocity* = Tatsächliche Geschwindigkeit, *Forces from all other pedestrians* = Kräfte der umgebenden Fußgänger, *Forces from all borders* = Kräfte der umgebenden Hindernisse.



2 – Schnappschuss einer Simulation des *social force model*.<sup>2</sup>

Wir haben nun ein Fußgängermodell, das wir aber noch mittels empirischer Daten kalibrieren und evaluieren wollen. Zu diesem Zweck verwenden wir zahlreiche Videoaufnahmen von Fußgängermassen. Wir haben eine Software entwickelt, die die Bewegungen der Personen auf den Videobändern automatisch erfasst. Um zu identifizieren, wo die Fußgänger sich aufhalten und wie sie sich bewegen, werden unterschiedliche Algorithmen zur Bildanalyse eingesetzt. Wird das gesamte Material mittels der Software analysiert, erhalten wir die entsprechenden Routen oder Bewegungsabläufe aller Fußgänger innerhalb der Videos.

Die Kalibrierung wurde hauptsächlich anhand von drei unterschiedlichen Videos vorgenommen. Das erste zeigt Aufnahmen eines weitestgehend leeren Raums, in dem sich nur einige Personen aufhalten. Das zweite zeigt ebenfalls einen recht leeren Raum, in dem sich aber bereits mehr Personen aufhalten. Das dritte Video beruht auf einem Flaschenhals-Experiment, in dem der zur Verfügung stehende Raum entsprechend überfüllt ist.

In einem ersten Ansatz werden alle Datensätze zusammengenommen. Wir wollen das Modell evaluieren und anhand der empirischen Daten kalibrieren. Wir nehmen an, dass alle – bis auf einen Fußgänger – dem im Video vorgezeichneten Weg folgen. Ein Fußgänger wird jetzt aus dem Video entfernt und durch einen simulierten Fußgänger ersetzt. Anschließend lassen wir das Video ein oder zwei Sekunden vorwärts laufen und vergleichen nun die Position, an der sich der virtuell simulierte Fußgänger befindet, mit der Position, an der sich der Fußgänger entsprechend der empirischen Daten befinden sollte. Auf diese Weise erhalten wir eine Fehlerkorrektur. Mit ihrer Hilfe kann ein Optimierungsprozess durchlaufen werden, der die Parameterwerte findet, die am besten zu den Daten passen.

Betrachten wir nun die soziale Kraft [*social force*] zwischen zwei Fußgängern und nehmen an, dass diese aus zwei Teilen besteht: einem distanzabhängigen und einem winkelabhängigen Anteil. Bei Betrachtung der Daten zeigt sich, dass die Distanzabhängigkeit exponentiell zur Entfernung der beiden

<sup>2</sup> Links: Nehmen die Fußgänger den kürzesten Weg, stauen sie sich vor dem Flaschenhals. Rechts: Nutzen die Fußgänger stattdessen den schnellsten Weg nutzen, gleichen sich die Ströme über beide möglichen Routen aus.

Personen abnimmt. Gleichwohl ist die Standardabweichung ziemlich hoch, handelt es sich doch nicht um Physik, sondern um Menschen. Selbstverständlich ist jede Person verschieden; abhängig von unterschiedlichen Kulturen, Persönlichkeiten, Vorlieben etc. Dennoch lässt sich erkennen, dass die angesprochene exponentielle Abnahme der Distanzabhängigkeit ziemlich gut einer ‚durchschnittlichen Fußgängerpersönlichkeit‘ entspricht. Zweitens ergibt sich, dass die Winkelabhängigkeit mehr oder weniger einen Halbkreis *vor* dem Fußgänger betrifft, was bedeutet, dass Fußgänger nur auf das reagieren, was innerhalb ihres Sichtbereichs passiert.

Eine andere Möglichkeit, die Genauigkeit des Modells zu überprüfen, besteht darin, es mit den vielen Phänomenen von Selbstorganisation abzugleichen, die in Fußgängerströmen beobachtet wurden:

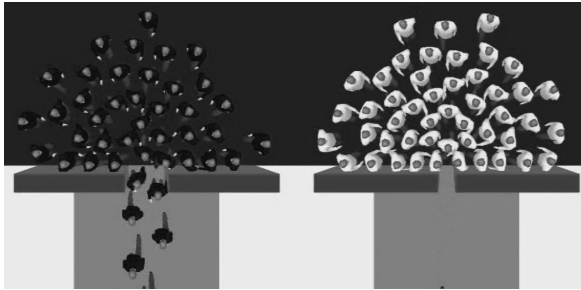
Das erste Selbstorganisations-Phänomen wird „Spurbildung“ [*lane formation*] genannt. Es ist wesentlich einfacher, einer Person zu folgen, die in dieselbe Richtung läuft, als fortlaufend Personen ausweichen zu müssen. Es ist also erheblich einfacher hinter einer Person herzulaufen, und wenn alle diese Strategie anwenden, entwickeln sich Spuren gleichgerichtet fortschreitender Bewegung. Zu beachten ist hierbei, dass die Spurbildung nicht im Modell vorausgesetzt wird, sondern ausschließlich aus den Kräften resultiert, die miteinander interagieren.

Betrachten wir, was passiert, wenn sich dieselben zwei Ströme nicht in einem 180°-Winkel begegnen, sondern in einem beliebigen Winkel. Hierdurch erhalten wir „Bewegungsstreifen“ [*stripes of movement*]. Dieses Phänomen ist mit miteinander verschmelzenden Verkehrsströmen vergleichbar, d. h., man lässt ein Auto von der ersten Straße passieren und anschließend ein Auto von der anderen Straße usw.

Das nächste Selbstorganisations-Phänomen nennen wir „Flaschenhals-Oszillation“ [*bottleneck oscillations*]. Wir betrachten nun dieselbe Straße, aber mit einem Flaschenhals – beispielsweise einer Tür – in der Mitte. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Personen nicht willkürlich den Engpass durchschreiten. Vielmehr entwickelt sich für eine begrenzte Zeit ein Strom in die eine Richtung, und nach einer Weile ein Strom in die entgegengesetzte Richtung, usw. Wir erhalten also eine pendelnde Bewegung zwischen den beiden unterschiedlichen Richtungen.

Wenn es einen Flaschenhals gibt, aber alle Menschen in die gleiche Richtung streben, erinnert dies an die Evakuierung eines Gebäudes durch *einen* Ausgang. Im Falle eines Feuers oder einer ähnlichen (Panik-)Situation kann davon ausgegangen werden, dass die flüchtenden Personen rücksichtslos drängeln und so schnell wie möglich hinaus wollen. Im Ergebnis strömen die Personen nicht mehr gleichmäßig durch den Flaschenhals, sondern behindern sich gegenseitig an der engsten Stelle und verstopfen schließlich den Ausgang. Da jede Person darauf bedacht ist, als erste das Gebäude zu verlassen, verlieren alle die Fähigkeit zur Koordination. Ein Experiment, das hinsichtlich einer solchen Evakuierung durch eine Tür durchgeführt wurde, hat ergeben, dass die

Menge an herausströmenden Personen wesentlich höher ist, wenn die Menschen den Raum ruhig verlassen. Siehe Abbildung 3 für die Ergebnisse der Simulation.



3 – Aufnahme von zwei unterschiedlichen, auf dem *social force model* beruhenden Flaschenhals-Simulationen.<sup>3</sup>

Wenden wir uns, nachdem wir Situationen mit einer mäßigen Personendichte betrachtet haben, nun Szenarien mit einer höheren Dichte zu. Bis vor Kurzem existierten keinerlei empirische Daten über Situationen mit extrem hoher Personendichte (Personendichte bezeichnet, wie viele Personen sich innerhalb eines Quadratmeters aufhalten). Forscher waren deshalb darauf angewiesen, Situationen zu analysieren, in denen eine geringe Personendichte bis zu einer mittleren Personendichte ansteigt und aus diesen Daten ein Modell zu entwickeln. Anschließend wurde das so gewonnene Modell mittels Extrapolation der Daten auf Szenarien mit höherer Personendichte angewendet.

Um zu entscheiden, ob dies eine gute Strategie darstellt, wenden wir uns nun einem außergewöhnlichen Ereignis zu: dem Hadsch, dem Ereignis mit der wohl größten Menschenmenge der Erde. Im Rahmen des Hadsch pilgern geschätzte drei Millionen Menschen aus der ganzen Welt nach Mekka in Saudi-Arabien. Beim Hadsch handelt sich nicht nur wegen der absoluten Anzahl an Personen um ein äußerst kompliziertes Großereignis, sondern auch aufgrund sehr enger zeitlicher und ortsbezogener Vorschriften. Das Gelände, auf welchem der Hadsch vollzogen wird, ist relativ klein und die Zeit, um gewisse Rituale durchzuführen, ebenfalls beschränkt. Somit handelt es sich beim Hadsch um eine in seiner Organisation äußerst komplexe Ansammlung von Menschenmassen. Wir beschränken unsere Betrachtung auf einen der Brennpunkte des Hadsch: die Jamarat-Brücke (siehe Abbildung 4), auf der ein Ritual namens „Steinigung des Teufels“ abgehalten wird. Alle Pilger sind aufgefordert, sich innerhalb von vierundzwanzig Stunden zu der Jamarat-Brücke zu begeben. Die Pilger betreten die Brücke, werfen sieben Kieselsteine auf jede der

<sup>3</sup> Links: Ist der Flaschenhals breit genug, können die Personen gleichmäßig den Raum verlassen. Rechts: Ist der Flaschenhals zu schmal, können die Personen nicht mehr gleichmäßig ausströmen. Die Bewegung wechselt nun zwischen stoßartigem Ausströmen und Stauung an der Tür.

drei Jamarahs (Säulen/Mauern) und verlassen anschließend die Brücke, um wieder zu ihren Zelten zurückzukehren, in denen sie vier Tage lang wohnen. Der Zugang zu der Brücke (hier die Jamarat-Brücke von 2006) war vierundvierzig Meter breit, und obwohl das viel Platz ist, handelt es sich im Verhältnis zu drei Millionen Menschen um einen Flaschenhals (vergleichbar den Türen aus dem vorhergehenden Beispiel).



4 – Foto der Jamarat-Brücke<sup>4</sup>

In den vergangenen Jahren ist es während des Hadsch wegen der Überfüllung im Umfeld der Jamarat-Brücke zu vielen tragischen Massenunfällen gekommen. Im Jahr 2006 starben dreihundertdreundsechzig Menschen vor dem Zugang zur Brücke. Da diese Stelle bereits aus vorhergehenden Jahren als sehr überfüllt bekannt war, wurde das Gelände mittels einer Videokamera überwacht. Aus diesem Grund existieren Videoaufnahmen der Massenpanik von 2006. Dieser Umstand macht es möglich, die große Menschenmenge zu analysieren und nach Ursachen für das Entstehen des Massenunglücks zu suchen.

Obwohl die Pilger vierundzwanzig Stunden Zeit haben, um das Steinigungsritual durchzuführen, sind gewisse Zeitpunkte beliebter als andere. Die Menge an herbeiströmenden Pilgern ist daher nicht gleichmäßig über vierundzwanzig Stunden verteilt. Vielmehr existieren einige Stoßzeiten, zu denen viele Pilger die Steinigung durchführen wollen. Die Massenpanik von 2006 ereignete sich exakt während einer dieser Stoßzeiten, um die Mittagszeit. Viele der Pilger wanderten zu der Brücke und warteten bis zwölf Uhr, um anschließend das Ritual zu vollziehen.

Um den Unfall analysieren zu können, haben wir die Bewegungen der Fußgänger aus den Videoaufnahmen vom Eingang der Jamarat-Brücke ausgelesen und die Daten in Personendichte [*crowd density*] (Pilger pro Quadratmeter)

<sup>4</sup> Auf dem Foto ist eine von drei Jamarahs (Säulen/Mauern) zu erkennen.

und Strömung [*flow*] (Pilger pro Meter pro Sekunde) aufaggregiert. Eine Darstellung der Strömung in Abhängigkeit von der Dichte wird Fundamentaldiagramm genannt. Bei geringer Dichte können sich die Personen frei und schnell bewegen (was die Strömungsgeschwindigkeit ansteigen lässt), aber bei höherer Dichte nimmt die Geschwindigkeit ab, was wiederum eine geringere Strömung zur Folge hat. Das Fundamentaldiagramm des Hadsch unterscheidet sich von vorhergehenden Studien über Situationen mit sehr großer Personendichte. Es zeigt sich, dass die Strömung nicht, wie erwartet, gegen Null geht, sondern dynamisch variiert. Zunächst handelt es sich um einen gleichmäßigen Strom – dies nennen wir laminare Strömung [*laminar flow*] – und dann gibt es eine Übergangsphase: Ist die Dichte hoch genug, stoppen die Personen, bewegen sich einige Schritte, stoppen, bewegen sich usw. Die Personen beginnen, sich wie Autos auf einer viel befahrenen Bundesstraße zu bewegen. Dieses Bewegungsmuster wird *Stop-and-go-Welle* [*stop-and-go waves*] genannt.

Während der Stop-and-go-Wellen, wenn die Dichte noch weiter angestiegen ist, findet ein zweiter Übergang statt, den wir „Massenturbulenz“ [*crowd turbulence*] nennen. Während einer solchen Massenturbulenz werden die involvierten Personen durch die Menschenmenge auf chaotische Weise in alle möglichen Richtungen geschoben. Die einzelnen Individuen in der Menge haben keinen Einfluss mehr auf ihre Bewegung, vielmehr werden sie von der Menge fortgetragen. In der Menge bauen sich so starke Kräfte auf, dass niemand Kontrolle über ihre Bewegung ausüben kann. Dieses Bewegungsmuster ist grundverschieden von unserer vorhergehenden Annahme, dass ein totaler Stillstand eintreten würde, wenn die Dichte nur stark genug ansteige. Dies ist klar ersichtlich nicht der Fall. Die *crowd turbulence* tritt erst einige Minuten vor Beginn des Unfalls ein. Wenn Personen während der Turbulenzen umher geschubst werden, ist es wahrscheinlich, dass sie die Balance verlieren. Stürzen sie, wird der zuvor von ihnen besetzte Raum schnell von nachströmenden Personen eingenommen, und sie haben keine Möglichkeit mehr wieder aufzustehen.

Ist es nun möglich, mit den gegebenen Daten die Ursache des Unfalls nachzuvollziehen? Können wir ihn erklären oder sogar vorhersagen? Und können wir einen Maßstab definieren, anhand dessen sich die Gefährdung einer Menschenmasse bestimmen lässt? Betrachten wir zunächst die Dichte, die häufig verwendet wird, um Aussagen über das Gefahrenpotenzial in Menschenmengen zu treffen. Die Dichte steigt, abhängig von der Zeit, bevor der Unfall sich ereignet. Mit Blick auf den Raum allerdings ist die Dichte kein gutes Kriterium zur Vorhersage: Eine Betrachtung der Dichte sagt nichts darüber aus, warum der Unfall gerade dort geschehen musste, wo er passierte.

Als nächstes testen wir (a) die Vortizität<sup>5</sup> und (b) die negative Divergenz des Strömungsfeldes<sup>6</sup>, aber keines von beiden erweist sich als guter Indikator zur Vorhersage; weder in Abhängigkeit von der Zeit noch vom Raum. Schließlich stellt der (gaskinetisch definierte) „Druck“ die einzige Quantität dar, anhand derer Vorhersagen als Zeit- und Raumfunktion getroffen werden können. Zu beachten ist hierbei, dass wir nicht den Newtonschen Druck, sondern vielmehr den gaskinetischen Druck verwenden, der definiert ist als: *Dichte multipliziert mit der Geschwindigkeitsvarianz*.

Was können wir daraus lernen? Es gibt verschiedene Möglichkeiten des *crowd management*, die man ergreifen kann, um das Risiko großer Massenunfälle zu vermindern. Während der letzten Jahre wurden viele Verfahrensänderungen von unterschiedlichen Gruppen vorgeschlagen. Diese wurden im Rahmen einer Reihe von Workshops – organisiert durch das Ministry of Municipal and Rural Affairs, Saudi Arabien – koordiniert.

Da der geografische Ort der Steinigung durch die Tradition exakt festgelegt ist, war es nicht möglich, für die gewachsene Zahl von Pilgern zusätzliche solcher Orte zu schaffen. Was allerdings möglich war, war die Aufteilung auf verschiedene *Ebenen*. Zusätzlich wurden weitere Zugangsrampen geschaffen.



5 – Neubau der Jamarat-Brücke (Computergrafik)

<sup>5</sup> *Vorticity* (Wirbelstärke) stellt eine zentrale Größe der Strömungsmechanik dar. Sie beschreibt die Bewegung der einzelnen Einheiten an einem Punkt der Flüssigkeit, gefasst als ein Vektor, der sich kreisförmig um die Achse der Flüssigkeitsrotation bewegt.

<sup>6</sup> In der Strömungsmechanik beschreibt die Divergenz eines Flusses die Anreicherung bzw. Abnahme der transportierten Größe. Eine negative Divergenz des Massenflusses bedeutet die Zunahme und eine positive Divergenz die Abnahme der Konzentration.



Das Straßennetz wurde als einspuriges System umgestaltet. Außerdem wurde das Straßennetz nun ausgeglichen gestaltet: Wird die Breite aller Straßen in einer Richtung miteinander verrechnet, haben sie an jedem Punkt des Systems die gleiche absolute Breite. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass es sehr gefährlich ist, wenn eine breite Straße plötzlich in einer wesentlich schmaleren Straße mündet. Der positive Effekt zeigt sich in Abbildung 6 an der Straßenzusammenführung links im Bild.

Um jederzeit Informationen über den Status der Menschenmassen während des Hadsch zu erhalten, wird ein System zur Echtzeit-Videoanalyse verwendet. Die hierdurch gewonnenen Informationen liefern Daten für die Sicherheitskräfte, um die Menschenmenge zu regulieren.

Die Pilger werden in einen Zeitplan eingeteilt: Ungefähr die Hälfte der Pilger sind offiziell registriert, sprich, sie gehören zu Gruppen. Jede dieser Gruppen bekommt ein Zeitfenster zugewiesen, das für sie bestimmt, wann welche Aktionen durchgeführt werden sollen.

Ausschilderung und Warnhinweise wurden verbessert bzw. ausgebaut.

Es gibt mittlerweile ein Shuttlebus-System, das einen Teil der Pilger transportiert.



6 – Neuorganisiertes einspuriges Straßennetz während des Hadsch

*Anmerkung der Herausgeber:* Vorgänge in großen Menschenmengen sind ein plastisches Beispiel für *Automatismen*; Paniken und Verkehrsstaus werden von keinem der Beteiligten gewollt, und dennoch geht das Gesamtphänomen nur und ausschließlich auf das Verhalten der Einzelnen zurück. Dass dieses Verhalten – analog zur Physik der Gase – in relativ einfachen Algorithmen zu modellieren ist, macht die Sache nur noch rätselhafter. Und auch, dass in diese Automatismen steuernd eingegriffen werden kann, ist interessant: Voraussetzung scheint die Möglichkeit, den Vorgang von einem externen Punkt aus zu beobachten. Unter den Maßnahmen, die das Problem lösten, bezieht nur das Stichwort „Warnhinweise/awareness“ die konkret Beteiligten ein.

## Literatur

- Al-Abideen, H. Z./Al-Bosta, S./Johansson, A./Helbing, D., „Scientific Evaluation of Videos Showing Hajjis Flow into Jamarat Area“, in: *Specialized Architectural Engineering Magazine* issued by Ministry of Municipal and Rural Affairs, Kingdom of Saudi Arabia, 10, December 2006.
- Al-Bosta, S./Serwill, D., „Design and Organization of Jamarat Plaza in Hajj 1427H“, in: *Specialized Architectural Engineering Magazine* issued by Ministry of Municipal and Rural Affairs, Kingdom of Saudi Arabia, 10, December 2006.
- Helbing, D./Buzna, L./Johansson, A./Werner, T., „Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions“, in: *Transportation Science* 39, 1 (2005), S. 1-24.
- Ders./Farkas, I./Vicsek, T., „Simulating Dynamical Features of Escape Panic“, in: *Nature* 407 (2000), S. 487-490.
- Ders./Johansson, A./Al-Abideen, H. Z., „The Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study“, in: *Physical Review E* 75 (2007), 046109.
- Ders./Molnár, P., „Social Force Model for Pedestrian Dynamics“, in: *Physical Review E* 51 (1995), 4282-4286.
- Johansson, A./Helbing, D./Al-Abideen, H. Z./Al-Bosta, S., „From Crowd Dynamics to Crowd Safety: A Video-Based Analysis“, in: *Advances in Complex Systems* 11, 4 (2008), S. 497-527.
- Ders./Helbing, D./Shukla, P. S., „Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data“, in: *Advances in Complex Systems* 10 (2007), S. 271-288.
- Johansson, A./ Yu, W., „Modeling Crowd Turbulence by Many-Particle Simulations“, in: *Physical Review E* 76 (2007), 046105.
- Moussaïd, M./Helbing, D./Garnier, S./Johansson, A./Combe, M./Theraulaz, G., „Experimental Study of the Behavioural Mechanisms Underlying Self-Organization in Human Crowds, in: *Proceedings of the Royal Society*, B 276 (2009), 2755-2762 [doi: 10.1098/rspb.2009.0405].
- <http://www.trafficforum.ethz.ch/crowdturbulence/>