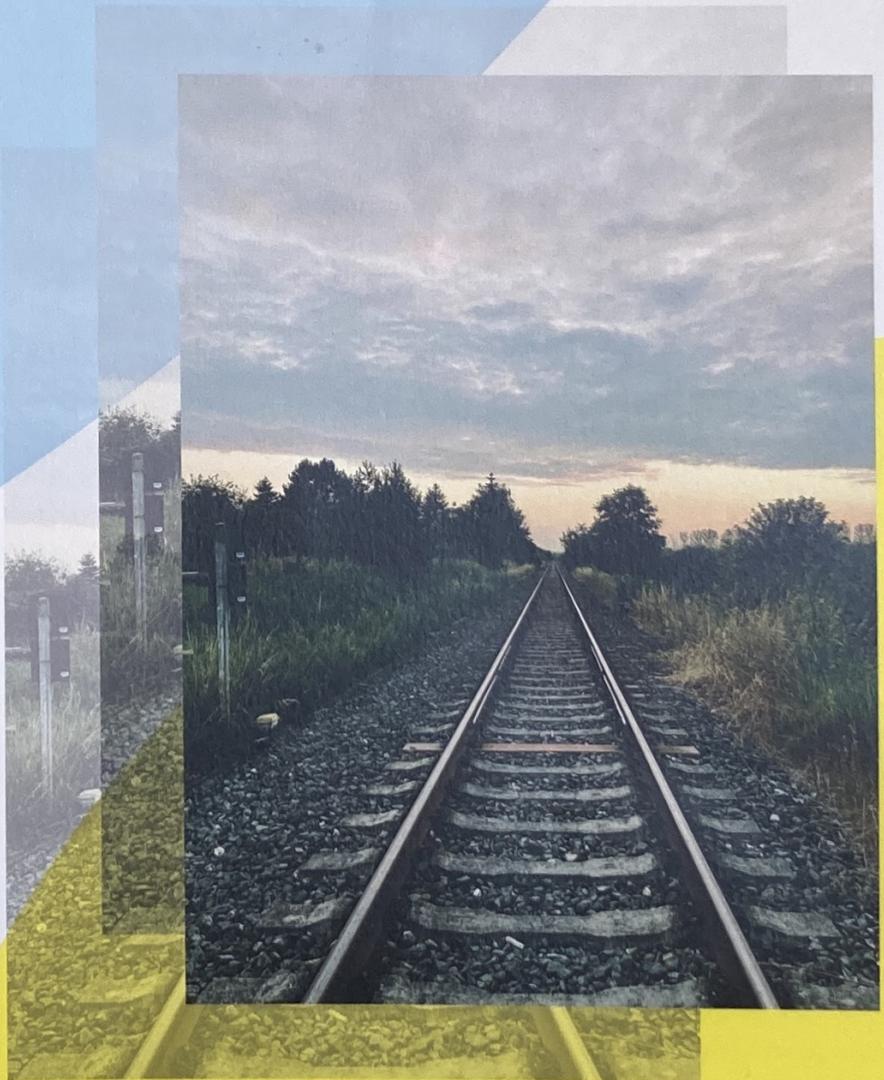


MITTEILUNGEN DER DEUTSCHEN MATHEMATIKER- VEREINIGUNG



WAS DER h-INDEX WIRKLICH AUSSAGT
SICHERHEIT IN GROSSVERANSTALTUNGEN
WAHR ODER FALSCH? EIN ALGORITHMUS ENTSCHIEDET
TILING BOT



Mit mathematischer Planung zu mehr Sicherheit in Großveranstaltungen

Matthes Koch, Sven Müller und Knut Haase

Während der großen islamischen Pilgerfahrt nach Mekka kommen Gläubige aus der ganzen Welt zusammen, um auf einer mehrtägigen Reise eine Vielzahl traditioneller Rituale zu begehen. Die Sicherheit der mehr als zwei Millionen Pilger während der Massenbewegungen zu gewährleisten, ist Jahr für Jahr eine enorme logistische Herausforderung und Verantwortung. Planungsfehler führten in der Vergangenheit wiederholt zu tödlichen Massenunfällen auf den engen Straßen der heiligen Stätten. Ein Forscherteam der TU Dresden, der Universität Hamburg und der ETH Zürich transferierte nun erstmals mathematische Planungsmethodik des Operations Research auf die Sicherheitsplanung des gesellschaftlich hoch relevanten Mega-Events. Mit der Implementierung der Ansätze durch saudi-arabische Behörden konnten damit bislang Massenunfälle vermieden werden.

Crowd Management

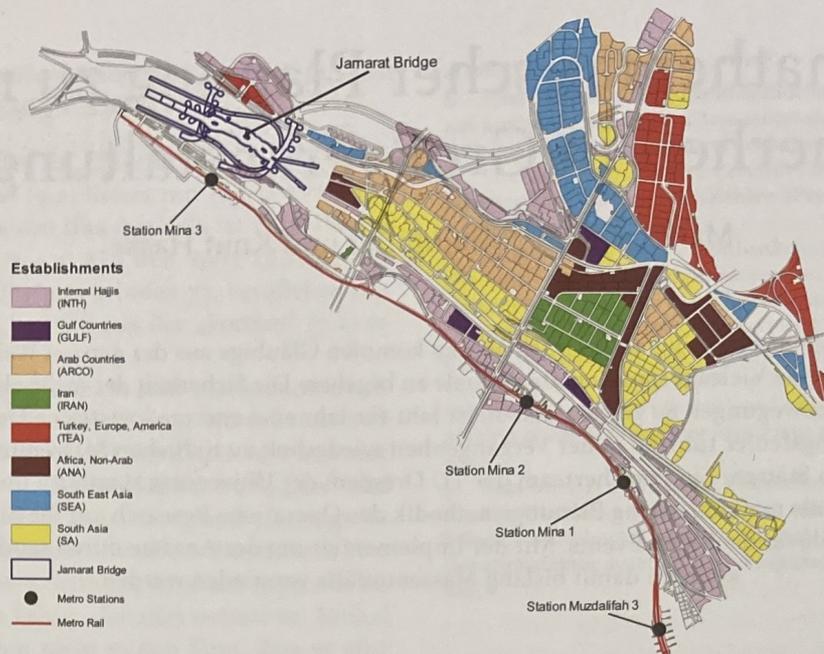
Die Organisation von Menschenmassen, das sog. *Crowd-Management*, stellt bereits seit der Antike die Kreativität

von Architekten, Logistikern und Ingenieuren vor große Herausforderungen. Schon im römischen Colloseum konnten nach Schätzungen 80 000 Zuschauer Platz finden, deren Zu- und Abstrom zur Veranstaltung geplant werden muss-



Foto: S. Al-Borai, Ministry of Municipal and Rural Affairs, Kingdom of Saudi Arabia

Pilgerströme aus der Zeltstadt im Mina-Tal



Aufteilung der Zeltstadt in Mina

te. In modernen Gesellschaften hat jedoch die Anzahl und Größe von Massenveranstaltungen noch einmal deutlich zugelegt. Eine der größten Massenveranstaltungen der Welt ist die jährlich stattfindende große Pilgerfahrt nach Mekka in Saudi-Arabien. Die Reise zählt zu den fünf Grundpfeilern der islamischen Religion. Jeder und jede Gläubige sollte sie einmal im Leben durchführen. Ein Großteil der 1,7 Milliarden Gläubigen wird diese Reise jedoch nie antreten können. Die heiligen Stätten liegen in einem schmalen Wüstental, so dass die örtliche Infrastruktur bei den aktuell zwischen zwei und vier Millionen Pilgern jährlich über mehrere Tage an der Belastungsgrenze betrieben wird.

Ein besonders gefährlicher Teil der Pilgerreise ist das *Rhamy-Al-Jamarat* Ritual – die symbolische Steinigung des Teufels. Dabei pilgern die Gläubigen zu drei massiven Monumenten, welche die Versuchungen des Teufels repräsentieren. Dieses Ritual wird an vier Tagen wiederholt. Während dieser Zeit sind die Pilger in einer Zeltstadt untergebracht, die mit zwei Millionen Schlafplätzen etwa den Dimensionen einer modernen Großstadt entspricht.

Das Problem der Massenunfälle

Da sich viele Pilger an den traditionellen Zeitvorgaben des Rituals orientieren, kommt es im Bereich der Monumente immer wieder zu kritischen Personendichten. Insbesondere kreuzende und entgegenkommende Personenströme können sich gegenseitig behindern und schließlich sogar zu einem Stillstand des Flusses führen. Aufgrund schnell nachrückender Personenmassen entstehen so höchst gefährliche Situationen. Zwischen 1990 und 2006 verloren mehr als 2400 Pilger bei Massenunfällen ihr Leben. Der letzte große Unfall im Mina-Tal allein kostete mindestens 769 Menschen das Leben. Doch inoffizielle Schätzungen gehen sogar von weit mehr als 2000 Toten aus. Auch in Deutschland führte

2010 ein Massenunfall während der Duisburger Loveparade mit ähnlichen Ursachen zu 21 Todesopfern.

Zur Vermeidung derartiger Unfälle in Mekka, hat die Regierung Saudi-Arabiens seit 2006 zahlreiche Innovationen im Bereich der Infrastruktur und der Organisation der Menschenmassen vorangetrieben. Grundlegend dabei war zunächst die mathematische Analyse der Personenflüsse mit Hilfe von Kameradaten. Ein 2005 an der TU Dresden entwickeltes System ermittelt automatisch und in Echtzeit die Personendichten an allen überwachten Engstellen. Die Erkennung von Pilgern und deren Bewegungsrichtung leisten dabei Algorithmen aus dem Bereich der neuronalen Netzwerke. Dieses System dient seitdem als Frühwarnsystem für die Sicherheitsbehörden. Mit den gewonnenen Bewegungsdaten hat ein Team der TU Dresden ein makroskopisches Simulationsmodell für die Personenströme im Mina-Tal entwickelt und kalibriert. Mit diesem konnte erstmals die Bewegung der mehr als zwei Millionen Pilger am Computer nachgestellt werden. Mit der Simulation analysierten die Forscher beispielsweise die Auswirkungen von Baumaßnahmen, wie etwa den Bau großer Tunnelanlagen im Mina-Tal. Gleichzeitig konnten auch die Auswirkungen unterschiedlicher Beschilderung und Leitung der Personenflüsse evaluiert werden. Die Simulationsstudien machten jedoch klar: Ohne eine zeitliche und räumliche Koordination der Menschenmassen können hohe Personendichten an den Engstellen der Infrastruktur nicht verhindert werden.

Um dieses Problem zu lösen, haben Experten aus dem Bereich der angewandten Mathematik in der Betriebswirtschaft, dem *Operations Research*, ein lineares, ganzzahliges Optimierungsmodell entwickelt. Das Modell weist jeder Pilgergruppe à 250 Pilgern einen Zeitslot für das Ritual und einen sicheren Weg durch die Zeltstadt zu. Dabei werden Flusskapazitäten von Infrastrukturengstellen, die in der Simulation als kritisch identifiziert wurden, durch ein Sys-

tem aus Ungleichungen abgebildet. Ziel der Optimierung ist es, die gewünschten Abgangszeiten von Pilgergruppen möglichst gut zu approximieren, dabei aber die sicheren Flusskapazitäten der Infrastruktur nicht zu überschreiten.

Die Pilgerstromplanung gilt als eines der größten Fußgängerkoordinationsprobleme der Welt. Zur Lösung von Planungsinstanzen kombinieren die Planer bekannte Algorithmen der linearen ganzzahligen Optimierung wie *Branch-And-Cut* mit eigenen heuristischen Lösungsschritten. Durch diese Vorgehensweise werden Instanzen mit mehr als zwei Millionen Entscheidungsvariablen in weniger als 10 Minuten gelöst. Die Planungsmethodik hat sich somit auch unter großem Zeitdruck als praxistauglich erwiesen.

Warum haben sich nun ausgerechnet Betriebswirtschaftler dieser Fragestellung angenommen? Die Optimierung von Zielkriterien unter Kapazitätsbeschränkungen spielt in Fragestellungen der Logistik, wie etwa der Lagerhaltung oder der Standortplanung in der Betriebswirtschaft eine große Rolle. Das Teilgebiet des Operations Research untersucht derartige Fragestellungen zwar oft im Unternehmenskontext mit mathematischer Planungsmethodik. Doch in diesem Fall gelang das Übertragen der Methodik auf die „Logistik“ der Pilgerfahrt mit großem Erfolg.

Das saudi-arabische Ministerium für Haddsch-Angelegenheiten verteilt die Zeit- und Routenpläne der Wissenschaftler an die Sicherheitsbehörden und Pilgerorganisationen. Die Pilgergruppen werden dann von sog. Field-Guides mit Hilfe der Pläne durch die Zeltstadt zum Ritual geführt.

Die an der TU Dresden und der Universität Hamburg entwickelte Pilgerstromplanung und die damit verbundene Simulation der Menschenmassen ist seit 2006 ein zentraler Bestandteil der staatlichen Vorbereitungen der großen Pilgerfahrt nach Mekka gewesen. Die mathematische Planung hat dazu beigetragen, die Pilgerfahrt sicher zu machen. Während der zwei Projektlaufzeiten von 2006–2014 und 2016–2018 ist kein Massenunfall mehr eingetreten.

Prof. Dr. Sven Müller, Lehrstuhl BWL, insb. Operations Management,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg
sven.mueller@ovgu.de

Prof. Dr. Knut Haase, Institut für Verkehrswirtschaft,
Universität Hamburg, Moorweidenstraße 18, 20148 Hamburg
knut.haase@uni-hamburg.de

Dr. Matthes Koch, Institut für Verkehrswirtschaft,
Universität Hamburg, Moorweidenstraße 18, 20148 Hamburg
matthes.koch@uni-hamburg.de

Sven Müller leitet den Lehrstuhl für Operations Management an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Promoviert hat er 2007 an der Verkehrswissenschaftlichen Fakultät der Technischen Universität Dresden und wurde 2014 an der Universität Hamburg im Fach Betriebswirtschaftslehre habilitiert. Es folgten Rufe an die Hochschule Karlsruhe, Europa-Universität Frankfurt (Oder) und die Universität Hohenheim. Zur Zeit forscht er an der Integration von diskreten Auswahlmodellen und diskreter Optimierung.

Knut Haase ist seit 2010 Professor für Betriebswirtschaftslehre, insbesondere Verkehrswirtschaft an der Fakultät für Betriebswirtschaft der Universität Hamburg. An der Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel hat er im Diplomstudiengang Betriebswirtschaft (quantitative Richtung) studiert, im Bereich Produktion und Logistik promoviert und seine Venia Legendi für Betriebswirtschaft erworben. Im Anschluss lehrte er zwei Jahre an der Universität Hohenheim, Fachgebiet Unternehmensforschung, und sieben Jahre an der Technischen Universität Dresden, Fachgebiet Verkehrswirtschaft. Im Rahmen seiner Forschung beschäftigt er sich mit Dekompositionsverfahren zur Lösung von sogenannten Large Scale Optimierungsproblemen, der Planung von Fußgängerströmen bei Massenveranstaltungen und der Integration mikroökonomischer Nachfragemodelle in Optimierungsprobleme.

Matthes Koch promovierte an der Universität Hamburg zum Thema Crowd Management. Aktuell arbeitet er an der Fakultät für Betriebswirtschaft und forscht an innovativen Planungsmethoden in den Bereichen Crowd Management und Logistik.

Dept. Time	Office Code	Camp Location	Route to Jamarat	Return Route
وقت الصادرة	مجموعة الخدمة	الموقع	مسار الذهاب	مسار العودة
02:30	E7-102	28a	Majjar Kabsh	Majjar Kabsh
02:30	E7-107	35c	K. Fahad	K. Fahad
03:00	E5-33	116	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-41	114a	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-44	116	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-56	96	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-57	92	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-58	92	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-61	119	Moaisim	Moaisim
03:00	E5-63	93	Moaisim	Moaisim
شارح	Souk Arab	سوق العرب إلى الدور الأرضي	Jawara	

Zeitpläne für die Pilgercamps

Seit dem Jahr 2019 obliegt die Planung nun einem Wissenschaftsteam der Umm-Al-Qura Universität in Mekka. Allerdings wurden die Pilgerkontingente der letzten beiden Haddsch-Jahre aufgrund der Coronapandemie massiv reduziert.

Literatur

- [1] Knut Haase, Mathias Kasper, Matthes Koch, Sven Müller. *A Pilgrim Scheduling Approach to Increase Safety During the Hajj*. Operations Research 67 (2) 367–406. DOI 10.1287/opre.2018.1798
- [2] Knut Haase, Habib Zain Al Abideen, Salim Al-Bosta, Mathias Kasper, Matthes Koch, Sven Müller, Dirk Helbing. *Improving Pilgrim Safety During the Hajj: An Analytical and Operational Research Approach*. INFORMS Journal on Applied Analytics 46 (1) 74–90. DOI 10.1287/inte.2015.0833
- [3] Dirk Helbing, Anders Johansson, Habib Zain Al Abideen. *Dynamics of crowd disasters: An empirical study*. Phys. Rev. E 75, 046109. DOI 10.1103/PhysRevE.75.046109