



# OPTIMIERUNG – neue Möglichkeiten in der Brand- und Evakuierungssimulation

**Die Entstehung eines Brandes bedeutet noch immer eine erhebliche Gefährdung für Leib und Leben – an Bord von Schiffen noch stärker als an Land. Aufgrund der großen Entfernungen zum Land ist die Schiffsbesatzung bei einem Brandausbruch zunächst auf sich selbst gestellt und muss den Erstangriff und die Evakuierung der Passagiere ohne externe Hilfe durchführen. Neben den erheblichen Mengen der an Bord mitgeführten Treibstoffe gehen die Gefahren eines Brandes vor allem von den unterschiedlichsten transportierten Gütern aus. Vor der umfassenden Brandbekämpfung ist das primäre Ziel, die Flucht- und Rettungswege über einen möglichst großen Zeitraum rauchfrei zu halten und eine Evakuierung durchzuführen, um so Menschenleben zu retten.**

Um die Gefährdungen und Schäden durch ein Feuer so gering wie möglich zu halten, wird sowohl vorbeugender als auch abwehrender Brandschutz betrieben. Die Innenraumgestaltung beeinflusst maßgeblich den vorbeugenden Brandschutz und die Fluchtwege, welche für Evakuierungsabläufe und damit die Sicherheit der Passagiere entscheidend sind. Vor allem auf Passagierschiffen ist die innere Raumgestaltung daher eine besondere Herausforderung, da sie den Betrachter aus architektonischer Sicht ansprechen soll, jedoch auch, in größerem Umfang als im Landbau, funktionelle Zwecke erfüllen muss. So vereinen speziell Passagierschiffe oder Fähren komplexe, technische Anlagen mit öffentlichen Bereichen und großen Mengen unterschiedlicher, teils gefährlicher Güter. Des Weiteren sind auf Schiffen als schwimmende Strukturen einige Besonderheiten zu beachten, beispielsweise die Stabilität der aufrechten Schwimmelage. Große Mengen von Löschwasser können diese Stabilität negativ beeinflussen und ein Kentern des Schiffes begünstigen und beschleunigen.

Die vorhandenen Richtlinien und Vorschriften stellen, wie im Landbau, den vorbeugenden Brandschutz zwar sicher, als Investitionsgüter müssen Schiffe jedoch auch wirtschaftlichen Anforderungen gerecht werden. Ganz zu schweigen von Komfortanforderungen der Passagiere wie beispielsweise ein großes offenes Atrium, ein Theater oder mehrstöckige Ladenpassagen. Wird nun von der klassischen Auslegung des Brandschutzkonzeptes abgewichen, sind Ingenieurmethoden des Brandschutzes anzuwenden. Diese eröffnen völlig neue Möglichkeiten. Doch auch hier bewahrheitet sich die alte Weisheit „Wer die Wahl hat, hat die Qual“. Werden nun Gütekriterien definiert, die es zu verbessern gilt, ist eine klassische Optimierungsaufgabe durchzuführen.

Um das Potenzial von Optimierungsansätzen für Brandsimulationen zu ermitteln, wurden am Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme der Technischen Universität Berlin zwei Studien durchgeführt.

## Untersuchungsgegenstand MS Norröna

Zur praxisnahen Durchführung der Studien wurde der öffentliche Bereich auf Deck 5 der kombinierten Passagier- und Frachtfähre MS Norröna (Bild 1) betrachtet.

Die MS Norröna wird von der Reederei Smyril Line betrieben und verkehrt ganzjährig im Liniendienst auf dem

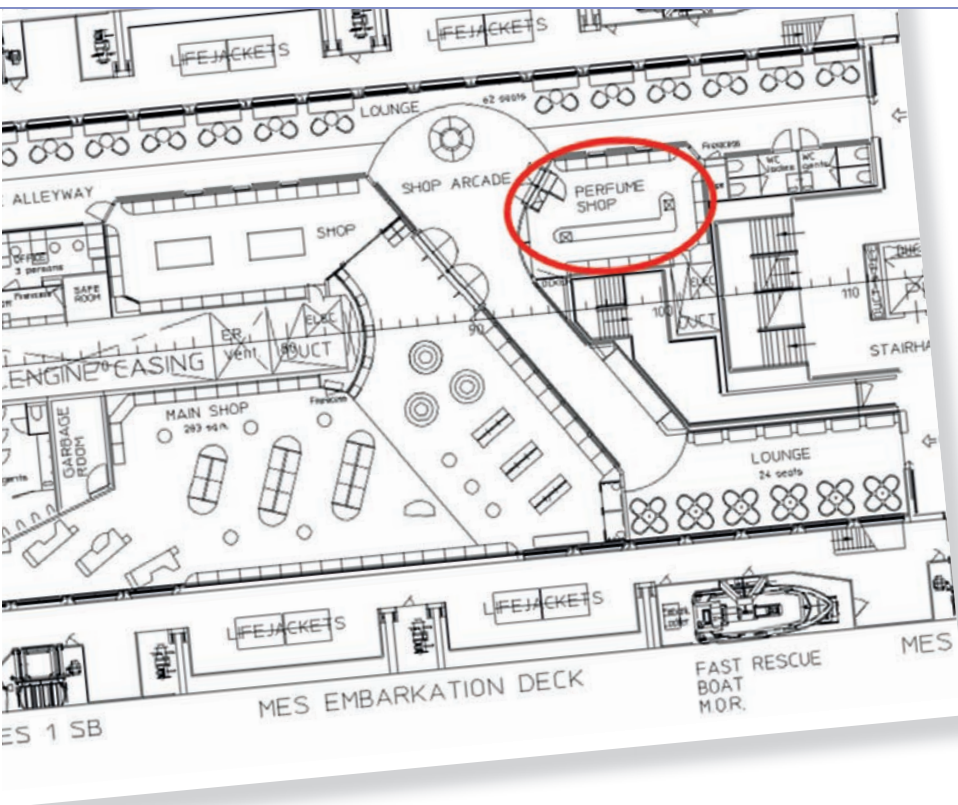


Nordatlantik zwischen Dänemark, den Färöer-Inseln und Island. An Bord des durch die Flensburger Schiffbau-Gesellschaft mbH und die Flender-Werft AG gebauten und 2003 in Dienst gestellten Schiffes bieten insgesamt acht Decks Platz für bis zu 1.428 Passagiere und 800 Pkw. Auf Deck 5 befindet sich neben dem Kabinenbereich ein öffentlicher Bereich mit Restaurant, Bar und Shops. Dieser öffentliche Bereich, welcher in Bild 2 dargestellt ist, wurde in den Studien in Hinblick auf den anlagentechnischen Brandschutz<sup>1</sup> und die Evakuierung<sup>2</sup> untersucht und optimiert.

## Was ist Optimierung und was bringt sie?

Grundlage einer effektiven Optimierung ist ein parametrisches bzw. zumindest teilparametrisches Modell des zu untersuchenden Objektes. In den durchgeführten Studien wurden teilparametrische Modelle genutzt, d. h., der Großteil des Generalplans (schiffbaulicher Grundriss) wurde beibehalten und nur einzelne geometrische Abmaße, wie Gangbreiten, Türbreiten, oder anlagentechnische Größen, wie Durchflussmengen der Sprinkler, wurden als Parameter definiert. Diese Parameter können innerhalb einer Optimierung automatisch verändert werden. Mit einer Gütefunktion, wie der mittleren Evakuierungsdauer, kann nun jedes Modell mit einem festen Parametersatz objektiv bewertet werden. Nun stellt sich die Frage, warum mit aufwendigen mathematischen Verfahren optimieren und nicht einfach versuchen? Bei der Definition von nur zehn Parametern, welche jeweils fünf Werte annehmen können, was für komplexe Geometrien nicht viel ist, werden über 9,7 Mio. Parametersätze ermittelt. Bei einer angenommenen Berechnungsdauer von zehn Minuten würden nach 185 Jahren alle Er-

Bild 1 | MS Norröna



**Bild 2** | Öffentlicher Bereich auf Deck 5 der MS Norröna, mit der Parfumerie als Brandursprung (roter Kreis)

ausgewählt. FDS+Evac bot mit dem Evakuierungs-Modul die Möglichkeit, sowohl einen weiteren Aspekt des Brandschutzes zu betrachten als auch, durch die deutlich kürzeren Rechenzeiten, auf übermäßige Rechneranforderungen zu verzichten.

### Brandsimulation mit einem Zonenmodell

Die Variation der Brandschutzmaßnahmen wurde anhand eines Zonenmodells durchgeführt. Mit Zonenmodellen lässt sich die Mindesthöhe der raucharmen Schicht mit relativ geringem Zeitaufwand für die Implementierung und geringe Simulationsdauer von wenigen Minuten pro Variante einfach berechnen. Daher eignete sich dieses Modell gut, um eine erste Parameterstudie durchzuführen. Der betrachtete Raum wird durch das Modell virtuell in zwei horizontale Zonen unterteilt. Dabei stellt die untere Zone, auch kalte Zone, die raucharme Schicht dar. In der oberen Zone, auch heiße Zone, sammeln sich bei einem Brand und dessen zeitlichem Fortschreiten die Rauchgase und bilden dort die Rauchsicht, welche sich von der Decke zum Boden hin ausbreitet und somit die raucharme Schicht reduziert. In den beiden Zonen sind die physikalischen Größen wie Temperatur, Sauerstoffgehalt, Sichtweite etc. konstant und entsprechen dem Mittelwert der jeweiligen Zone. Somit sind differenzierte Aussagen über die verschiedenen physikalischen Größen innerhalb einer Zone nicht möglich, wodurch auch keine lokalen Effekte dargestellt werden können. Die Höhe der raucharmen Schicht wird über die sich oberhalb des Brandherdes bildende Plume mithilfe empirischer Formeln berechnet. Durch Masse- und Energiebilanzen sowie die entstehenden Druckdifferenzen lassen sich die Rauchgase und die nachströmende Frischluft berechnen.

In der vorliegenden Studie ist die Zonen- ▶

gebnisse vorliegen. Sicherlich kann ein erfahrener Ingenieur zahlreiche Möglichkeiten bereits im Vorfeld ausschließen, dennoch wird deutlich, dass die Anzahl der Möglichkeiten groß und die Berechnungsdauer noch größer ist.

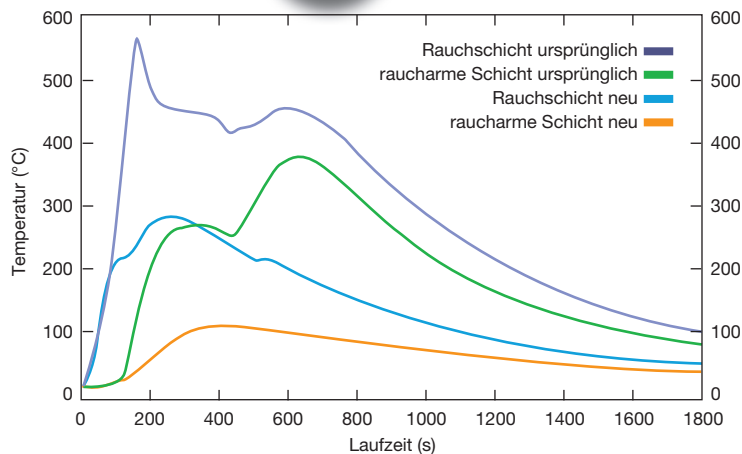
Die Optimierung gliedert sich in zwei Phasen, die Exploration und die eigentliche Optimierung. In der Explorationsphase werden bspw. 200 zufällige Parametersätze ausgewählt, berechnet und ausgewertet. Diese Ergebnisse sind die Basis der Optimierung. Da die Zusammenhänge meist nicht direkt mathematisch, sprich analytisch, beschrieben werden können, kommen mathematische Verfahren zum Einsatz, die durch den Vergleich der Güte bereits bekannter Parametersätze die nächste zu berechnende Variante ermitteln. Auf diese Weise werden nicht alle Möglichkeiten berechnet, sondern nur ein Bruchteil, die augenscheinlich Besten. Zwar hat auch die Optimierung ihre Grenzen, so ist nicht gesagt, dass auf diese Weise immer das bestmögliche Ergebnis erreicht wird, aber zumindest ein relativ gutes.

Doch warum soll nun ein Brandschutzkonzept weiter optimiert werden, wenn bereits eines gefunden wurde, welches die Vorschriften erfüllt? Hier kommt die Wirtschaftlichkeit ins Spiel. Ist es beispielsweise in ei-

nem Theater möglich, durch eine veränderte Gangführung oder einen angepassten anlagentechnischen Brandschutz eine Sitzreihe mit 100 Plätzen hinzuzufügen, kann dies einen deutlichen Wettbewerbsvorteil bringen. Entstehen hierdurch höhere Kosten sowohl in der Anschaffung als auch im Unterhalt, können diese in einer Lebenszykluskostenrechnung den zu erwartenden Einnahmen gegenüber gestellt werden<sup>3</sup> und so das ökonomischste Konzept angeboten werden.

Zur Durchführung des Optimierungsprozesses kam in beiden hier vorgestellten Studien das Programm CASES der Firma FRIENDSHIP-SYSTEMS AG zum Einsatz. Das Programm bietet neben zahlreichen Möglichkeiten zur Geometrierstellung und Parametrisierung vor allem eine Vielzahl von Explorations- und Optimierungsalgorithmen und kann auf einfache Weise mit fast beliebigen externen Simulationsprogrammen verknüpft werden.

Innerhalb der Studien sollte gezeigt werden, dass sowohl Zonen- als auch Feldmodelle für eine Optimierung geeignet sind. Hierzu wurde das Programm CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke Transport) als Vertreter der Zonenmodell-Simulation und FDS für eine Berechnung mittels Feldmodellen



**Grafik 1** | Ergebnis der Optimierung – Temperaturverläufe der zwei Zonen <sup>1</sup>

modell-Simulation CFAST, welche vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt wurde, zur Anwendung gekommen.

Bei dem untersuchten Bereich handelt es sich um eine Feuerzone, der Ladenpassage auf Deck 5, innerhalb derer ein Feuer ausbricht, welches seinen Ursprung im Parfüm-Shop (**Bild 2**) hat. Seitlich der Feuerzone schließen sich im Außenbereich die Evakuierungssammelpunkte an, wodurch der Flurbereich der Feuerzone als Hauptfluchtweg besonders schützenswert ist. Mithilfe der durch die Wertunterlagen vorhandenen Daten wurde die entsprechende Brandlast angenommen und der Brandverlauf unter Berücksichtigung der mobilen Brandlast im Parfüm-Shop ermittelt.

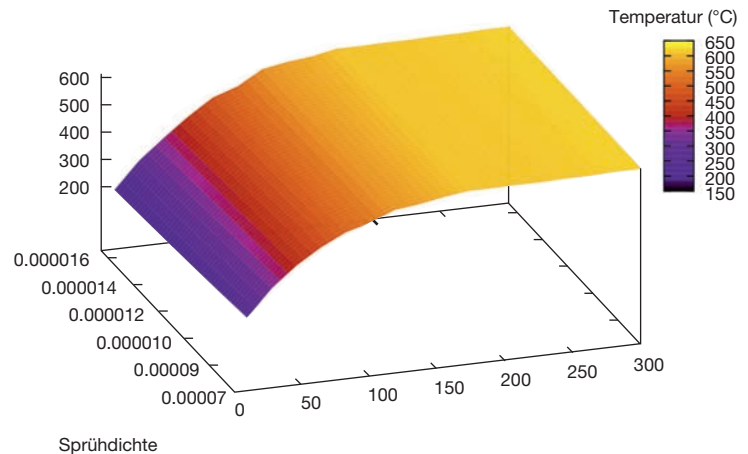
Ziel war es, eine Passierbarkeit des Fluchtweges in der Brandzone so lange wie möglich sicherstellen zu können. Dafür wurde festgelegt, dass die raucharme Schicht eine Mindesthöhe von zwei Metern nicht unterschreiten darf, um eine sichere Evakuierung der Passagiere zu gewährleisten. Da die Versagensbeständigkeit der gläsernen Trennwand zwischen Parfümerie und Flur, sprich dem Fluchtweg, eine entscheidende Rolle für die Evakuierung spielt, wurde auch hier eine Temperatur von maximal 300 °C festgelegt, die in der Rauchgasschicht in der Parfümerie, dem Brandraum, nicht überschritten werden soll.

Als freie Parameter der Optimierung wurden neben geometrischen Größen, wie Öff-

nungsgrade der Trennwand, vor allem anlagentechnische Kenngrößen variiert. Zu diesen Kenngrößen gehören beispielsweise die dynamische Ansprechempfindlichkeit, die Sprühdichte der Sprinkleranlage, die Verschlusszeiten der Rauchschürze oder die Absaugleistung des Rauch-Wärme-Abzuges. Ein Ergebnis der Optimierung ist in **Grafik 1** zu sehen, die Temperaturen in beiden Zonen konnten durch die Optimierung deutlich reduziert und so die maximale Temperatur eingehalten werden.

Die gewählten Parameter hätten in diesem relativ einfachen Beispiel, auch in ähnlicher Qualität, durch einen erfahrenen Brandschutzingenieur festgelegt werden können. Doch wurde durch die automatische Optimierung die Einsatzmöglichkeit der Optimierung für deutlich komplexere Szenarien gezeigt.

Des Weiteren wurden in dieser Studie auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierbei wird untersucht, wie groß der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Güte der Ergebnisse ist. Beispielhaft sind in **Grafik 2** der Einfluss der dynamischen Ansprechempfindlichkeit (RTI – Response Time Index) sowie der Sprühdichte der Sprinkleranlage auf den Temperaturverlauf der Rauchgasschicht gegenübergestellt worden. Zu erkennen ist, dass die Sprühdichte im Gegensatz zur Ansprechempfindlichkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf die Temperatur der Rauchgasschicht hat. Eine größtmögliche Reduzierung der Sprühdichte ist gerade im Schiffbau eine sehr interessante Erkenntnis, da die Menge des einge-



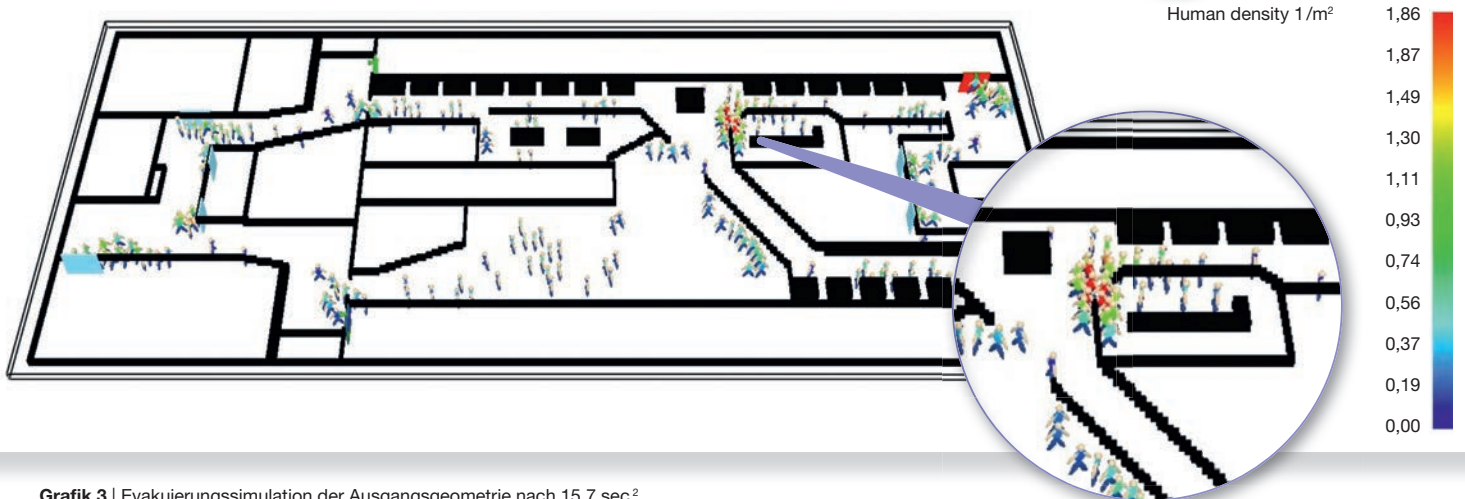
**Grafik 2** | Ergebnis der Sensitivitätsanalyse dynamischer Ansprechempfindlichkeit gegenüber der Sprühdichte der Sprinkleranlage <sup>1</sup>

brachten Löschwassers eine freie Flüssigkeitsoberfläche bildet. Diese beeinflusst, ähnlich einem halb gefüllten Tank-Fahrzeug, die Stabilität der aufrechten Schwimmage negativ und kann bis zum Kentern des Schiffes führen.

### Evakuierungssimulation mit einem Feldmodell

Zur Simulation von Evakuierungszeiten kam das agentenbasierte Simulationsmodell FDS+Evac zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um ein kontinuierliches Simulationsmodell, in welchem verschiedene Personengruppen definiert werden können. Jedem Agenten werden dabei eigene Eigenschaften wie Gehgeschwindigkeit, Alter und Geschlecht zugeteilt. Die Verteilung der Agenten in den zu untersuchenden Räumen geschieht, unter Berücksichtigung einiger Annahmen, zufällig. Da diese zufällige Verteilung, wie in der Realität auch, großen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation haben, müssen gemäß IMO (International Maritime Organization) 50 Simulationen durchgeführt und statistisch ausgewertet werden. Der Mittelwert und die Standardabweichung sind hierbei die aussagekräftigsten Größen als Maß für die Qualität und die Robustheit des Szenarios.

Die Evakuierung eines Schiffes besteht grundlegend aus zwei Phasen, der Sammlungs- und Einbootungsphase. Die Sammlungsphase, welche mit dem Ablauf der Evakuierung von Gebäuden vergleichbar ist, wird weiterhin in die Reaktionszeit und



**Grafik 3** | Evakuierungssimulation der Ausgangsgeometrie nach 15,7 sec<sup>2</sup>

die Wegezeit unterteilt. Die eigentliche Evakuierung der Personen in die Rettungsmittel, die Einbootungsphase, beginnt erst, wenn die Sammlungsphase an einer Sammelstation abgeschlossen ist. Die Einbootungsphase besteht aus dem Bereitmachen der Rettungsmittel und dem Zuwasserlassen.

Für den öffentlichen Bereich auf Deck 5 wurden zunächst die Evakuierungszeit der Ausgangsgeometrie und die bestehenden Engpässe während der Evakuierung ermittelt. Die ermittelte Evakuierungszeit wurde anschließend anhand einer Variation von sechs Parametern, welche innerhalb einer Sensitivitätsstudie ermittelt wurden, optimiert. Die Parameter beeinflussten hauptsächlich die Breiten von Durchgängen, Türen und Fluchtwegen an den ermittelten Engpässen (**Grafik 3**).

Es konnte gezeigt werden, dass sich die Evakuierungszeit um 9,1 %, bezogen auf den Ausgangspunkt der Optimierung, verkürzen lässt. Durch die Optimierung wurden die Notausgänge gleichmäßiger belastet, was zu einer Verkürzung der gesamten Evakuierungsdauer führte.

Weiterführende Untersuchungen zeigten, dass sich die mittleren Evakuierungszeiten

des optimalen Layouts bei steigender Passagierzahl weiter verbessern. So kann die mittlere Evakuierungszeit bei doppelter Passagierzahl im Vergleich zum Ausgangslayout sogar um 12 % verringert werden.

Die erfolgreiche Kopplung des Optimierungsprogrammes CASES mit FDS+Evac zeigt, dass auch die Optimierung von Brandsimulationen, basierend auf einem Feldmodell, möglich ist.

### Potenziale von Optimierungen in der Brand- und Evakuierungssimulation

Die Optimierung hält in nahezu allen technischen Bereichen und Branchen Einzug. Das Ziel ist, bis auf einige akademische Zielstellungen, fast immer die Reduktion von Kosten oder die Maximierung von Gewinnen, sprich wirtschaftliches Interesse. Durch die vorliegenden Studien konnte der effiziente Einsatz von Optimierung in der Brand- und Evakuierungssimulation nachgewiesen werden. Moderne Software-Werkzeuge machen eine einfache, schnelle und effektive Optimierung möglich, ohne selber komplexe mathematische Algorithmen programmieren zu müssen. So ist die Einarbeitung für interessierte Fachleute in kurzer Zeit möglich. Die Schlüsselrolle bei der Erstellung einer solchen Optimierung spielt die Definition sinnvoller Parameter sowie deren Grenzen und der Gütefunktion bzw. -funktionen. Gegebenenfalls müssen Strafbedingungen gefunden und formuliert werden. Strafbedingungen könnten zum Beispiel die Verkleinerung einer Kabine bei der Optimierung der Fluchtbreite für geringere Evakuierungszeiten so begrenzen, dass eine Balance zwischen höchsten Sicherheitsstandards und der Wirtschaftlichkeit hergestellt werden kann. Die Definitionen dieser Randbedingungen können jedoch nicht allgemein formuliert, sondern müssen von Fall zu Fall individuell aufgestellt werden. Der Nutzen für diese Mehrarbeit ist jedoch in den meisten Fällen sehr groß, da die Optimierung im vorbeugenden Brandschutz den ausführenden Planern, Sachverständigen, Behörden, Errichtern und vor allem den Betreibern sowie Investoren einen großen Wettbewerbsvorteil bringen kann.

Das Potenzial der Optimierung in der Brand- und Evakuierungssimulation ist sehr groß und wird in Zukunft, nicht nur im maritimen Bereich, moderne, ökonomische Raumarchitekturen in Kombination mit höheren Sicherheitsstandards sowie effektiver Evakuierung und Brandbekämpfung ermöglichen. ■

#### LITERATURVERWEISE

- <sup>1</sup> T. Kriesel, „Brandsimulation in öffentlichen Bereichen auf Fährschiffen – Analyse und Variation von brandbeeinflussenden Größen“, Berlin, 2015.
- <sup>2</sup> T. Tjhin, „Optimierung der Evakuierungszeiten von Passagierschiffen durch automatische Parametervariation“, Berlin, 2015.
- <sup>3</sup> G. Holbach und M. Reith, „Life Cycle Costing in Schiffbau und Schifffahrt“, Ingenieur Spiegel, Mai 2013.

Dipl.-Ing. Anna Loewe, Dipl.-Ing. Sebastian Ritz  
Fachgebiet Entwurf und Betrieb Maritimer Systeme,  
Technische Universität Berlin