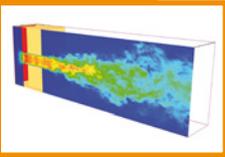
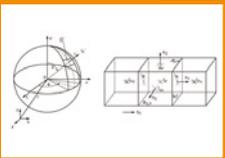


Nr. 5

Berichte des Instituts für Bauphysik

Hendrik C. Belaschk



# Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe

CFD-Studien unter Verwendung  
von GPU-Technologie

# **Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe**

**CFD-Studien unter Verwendung von  
GPU-Technologie**

von Hendrik C. Belaschk

## **Herausgeber**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Bauphysik  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover

## **Verfasser**

Hendrik C. Belaschk

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2012 by Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Bauphysik  
ISBN 978-3-8167-8679-5

## **Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 60, D-70504 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Telefax 0711 970-2508  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
[www.bauinformation.de](http://www.bauinformation.de)

## **Berichte**

des Instituts für Bauphysik der Leibniz Universität Hannover  
Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nabil A. Fouad;  
Leibniz Universität Hannover – Institut für Bauphysik  
Heft 5, April 2012





# Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe

## CFD-Studien unter Verwendung von GPU-Technologie

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation von

---

Dipl.-Ing. Hendrik C. Belaschk

---

geboren am 30. Juli 1975 in Berlin

---

Hannover, 2012

Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. N. A. Fouad

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Nackenhorst

Tag der Promotion: 21.02.2012

**Für Pamela**

## Kurzfassung

Horizontal verlaufende Rauchgasströme, die in ein Atrium eindringen und in diesem bis zur Decke aufsteigen, stellen ein bekanntes Phänomen bei Gebäudebränden dar (spill plumes). In der Planungsphase eines Gebäudes besteht deshalb häufig der Bedarf, die in diesem Fall erforderliche Entrauchung des Atriums auch ohne aufwendige CFD-Simulationen und Modellversuche beurteilen zu können. Dazu stehen dem Ingenieur eine Reihe von Methoden und Näherungsformeln zur Verfügung, mit denen die erforderliche Anzahl und Größe von natürlichen Rauchabzugsöffnungen bestimmt bzw. maschinelle Rauchabzüge dimensioniert werden können. Alle vereinfachten Methoden beschränken sich derzeit auf Atrien, die ein ausreichend großes Rauchgasreservoir aufweisen. Für kleine Atrien steht dem Ingenieur derzeit ausschließlich die BRE Spill-Plume-Methode zur Verfügung, die aufgrund ihrer Komplexität für den baupraktischen Einsatz nur bedingt geeignet ist. Im Rahmen dieser Arbeit werden Näherungsformeln entwickelt, die unabhängig von der Größe des Rauchgasreservoirs eine ausreichend genaue Abschätzung des Massenstroms im aufsteigenden Plume liefern.

Die neuen Näherungsformeln basieren im Wesentlichen auf einer detaillierten CFD-Studie. Infolge des hohen Bedarfs an Rechenleistung wird im Vorfeld untersucht, inwieweit die verwendete Simulationssoftware durch Einsatz von GPU-Prozessortechnologie beschleunigt werden kann. Dazu wird ein Großteil des Rechenkerns der Software FDS in das Programmiermodell C/CUDA portiert und parallelisiert. Darüber hinaus wird ein Multi-Wellenfrontalgorithmus für den Strahlungswärmetransport in gasförmigen Medien an die Erfordernisse der GPU-Technik angepasst und in die Software FDS integriert. Nach Abschluss der Parallelisierungsarbeit wird die modifizierte Software verifiziert und die erreichte Geschwindigkeitssteigerung ermittelt. Durch die vorgenommenen Änderungen an der Software wird eine Steigerung der Rechenleistung zwischen dem 10fachen (Algorithmen zum Strahlungswärmetransport) und dem 30fachen (Algorithmen zur Strömungsmechanik) erreicht.

Unter Verwendung der neuen Software wird anschließend eine CFD-Studie erstellt, deren FE-Modelle vorab über bereits bekannte Versuche validiert werden. Im Rahmen dieser Studie werden die Modelle im Hinblick auf die Atriengeometrie, die Öffnungsbreite des Brandraumes sowie die Wärmefreisetzungsrate variiert. Die entwickelten Näherungsformeln können unabhängig von der Atriengröße für einen Großteil der baupraktisch relevanten Anwendungsfälle verwendet werden und vereinfachen damit die bisherigen Rechenverfahren.

Schlagworte: Brandschutz, Ingenieurmethoden, Überlaufplumes

## Abstract

A frequently encountered scenario in a building fire consists of a smoke layer underneath the ceiling within one fire compartment. If the compartment is open to an atrium, then the gases flow out immediately they reach the opening and rise as a thermal spill plume into a buoyant layer of gases formed beneath the atrium ceiling. During the planning phase of a building it is often required to estimate the amount of smoke which enters the smoke layer in order to calculate the required vent area for a smoke exhaust ventilation system. At the moment there are several simplified calculation methods available which are restricted only to large area reservoirs where the visible smoke layer depth is less than a certain height. In all other cases only the BRE spill plume method is applicable, a method which is rather complex and complicated to use. This work aims to provide a simplified formula to estimate the entrainment of air into a spill plume regardless of the size of the smoke gas reservoir.

The new formula is based essentially on an extensive CFD study. Due to the high computing performance required by the CFD program, research is carried out beforehand to determine the possibility of using GPU processor technology to speed up the computation. Therefore a large part of the source code of the Software used in the CFD study (Fire Dynamics Simulator) is ported to C/CUDA and parallelized as best as possible. Moreover, a multidimensional wavefront algorithm for radiation transport in gaseous media is integrated in the software. After the parallelization has been completed the new algorithms are verified and tested with regard to the performance increase. Based on sample calculations the new algorithms reduce the computing time by a factor of approximately 10 (radiation transport) resp. 30 (fluid mechanics) compared to the original software.

The CFD study carried out using the modified software is based on known test results performed on a physical scale model. After validation the CFD model is varied regarding the geometry of the atrium, the width of the opening in the fire compartment and the rate of heat release. Afterwards a new formula is developed to predict the mass flow rate of gases produced by a spill plume, which can be applied independently of the size of the smoke gas reservoir.

Keywords: fire protection engineering, spill plumes, GPU acceleration

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	4
Abstract.....	5
Nomenklatur.....	10
Lateinische Formelzeichen.....	10
Griechische Formelzeichen.....	11
<b>1 Zweck und Ziel der Arbeit.....</b>	<b>12</b>
1.1 Einführung in die Problemstellung.....	12
1.2 Verwendung von Brand- und Rauchs simulationsrechnungen.....	15
1.3 Abgrenzung zu alternativen Fragestellungen.....	17
1.4 Zusammenfassung der Forschungsziele.....	19
1.5 Vorgehensweise.....	20
<b>2 Stand des Wissens und der Technik.....</b>	<b>21</b>
2.1 Einführung in die Modellbildung.....	21
2.2 Luftp einmischung in einen freien linienförmigen Brandherd.....	22
2.3 Die „BRE Spill-Plume-Methode“ für den Überlaufplume.....	23
2.4 Alternative Berechnungsansätze.....	25
2.4.1 Law [30] (1986).....	25
2.4.2 Thomas [12] (1987).....	26
2.4.3 Law [33] (1995).....	27
2.4.4 Poreh [11] (1998).....	28
2.4.5 Thomas et. al. [35] (1998).....	29
2.4.6 Harrison und Spearpoint [5] (2008).....	30
2.4.7 Ko et. al. [9] (2008).....	31
2.4.8 NFPA 92B [36] (2009).....	32
2.4.9 Harrison und Spearpoint [37] (2010).....	32
<b>Teil A / Numerische Brand- und Rauchs imulation unter Verwendung von GPU-Prozessortechnologie.....</b>	<b>34</b>
<b>3 Einführung in die GPU-Technologie.....</b>	<b>35</b>
3.1 Grundlagen der GPU-Technik.....	36
3.2 Hardware im GPGPU-Bereich.....	38
3.3 Überblick über das CUDA-Programmiermodell.....	40
<b>4 Entwicklung einer GPU-Version für den Fire Dynamics Simulator (FDS).....</b>	<b>42</b>
4.1 Die Software „Fire Dynamics Simulator (FDS)“.....	42
4.2 Paralleles Rechnen mit FDS (Version 5.4).....	43

4.3	Überblick über die neue GPU-Version.....	46
4.3.1	Beschreibung des Programm-Modells.....	47
4.3.2	Arithmetic Intensity Problem.....	49
4.3.3	Rechengenauigkeit .....	50
4.3.4	Ein- und Mehrnetzrechnungen.....	51
4.4	Programmtechnische Umsetzung.....	52
4.4.1	Parallelisierungsschema .....	52
4.4.2	Neuordnung von Speicherbereichen.....	53
4.4.3	Parallele Reduktion (parallel reduction).....	55
4.4.4	Dokumentation neuer Eingabeparameter.....	56
4.4.5	Versionsänderungen.....	56
4.5	Parallelisierung der Algorithmen zum Strahlungswärmetransport.....	57
4.5.1	Grundlagen des Wärmetransports über Strahlung.....	57
4.5.2	Numerische Lösung der Transportgleichung mit der Finite-Volumen- Methode (FV-Methode).....	59
4.5.3	Modellierung des Strahlungswärmetransports in FDS.....	61
4.5.4	Möglichkeiten zur Parallelisierung der Finite-Volumen-Methode.....	64
4.5.4.1	Angular Decomposition Parallelization (ADP-Verfahren).....	64
4.5.4.2	Spatial Domain Decomposition Parallelization (DDP-Verfahren).....	65
4.5.4.3	Der KBA-Algorithmus für orthogonale Netze.....	66
4.5.5	Anpassung des KBA-Verfahrens an GPU-Systeme.....	69
4.5.6	Implementierung des KBA-Verfahrens in FDS.....	72
4.5.7	Zusammenfassung.....	74
4.6	Entwicklung eines Profilers.....	74
<b>5</b>	<b>Verifikation und Performance.....</b>	<b>75</b>
5.1	Verifikation im Diagnosemodus (diagnostic mode).....	76
5.2	Beispiel 1: Isothermer Freistrahler.....	78
5.2.1	Theoretische und experimentelle Grundlagen.....	78
5.2.2	Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen.....	79
5.2.3	Verifizierung der GPU-Version.....	80
5.2.4	Rechenleistung / Performance.....	83
5.2.5	Zusammenfassung.....	84
5.3	Beispiel 2: Strahlung in einer Box.....	84
5.3.1	Theoretische Grundlagen.....	85
5.3.2	Verifizierung der GPU-Version.....	85
5.3.3	Rechenleistung / Performance.....	87

<b>Teil B / Simulation von Spill Plumes in Atrien.....</b>	<b>88</b>
<b>6 Numerische Simulation von Spill Plumes in Atrien.....</b>	<b>89</b>
6.1 Zusammenfassung der Versuche nach Harrison [10] und [4].....	89
6.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	89
6.1.2 Ergebnisse aus den Versuchsreihen.....	92
6.1.3 Diskussion der Ergebnisse.....	92
6.2 Beschreibung des Computermodells.....	93
6.2.1 Anordnung von virtuellen Messfühlern.....	95
6.2.2 Vorlaufzeiten für die stationäre Problemstellung.....	96
6.3 Modellvalidierung: Strömung am Überlauftrand.....	98
6.3.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	99
6.3.2 Diskussion der Ergebnisse .....	100
6.4 Modellvalidierung: Massenstrom im aufsteigenden Plume (ohne Atrium).....	100
6.4.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	101
6.4.2 Diskussion der Ergebnisse.....	102
6.5 Modellvalidierung: Massenstrom im aufsteigenden Plume (mit Atrium).....	104
6.5.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	105
6.5.2 Diskussion der Ergebnisse.....	105
6.6 Parameterstudie: Massenstrom im aufsteigenden Plume (ohne Atrium).....	107
6.6.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	108
6.6.2 Entwicklung einer Näherungsformel für den freien Plume.....	108
6.7 Parameterstudie: Massenstrom im aufsteigenden Plume (mit Atrium).....	110
6.7.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.....	111
6.7.2 Entwicklung einer Näherungsformel für die Masseneinmischung.....	113
6.7.3 Bewertung der bestehenden Näherungsformeln.....	115
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>116</b>
7.1 Einsatz der GPU-Prozessortechnologie in der Brand- und Rauchsimulation.....	116
7.2 Entwicklung von Näherungsformeln für den Massenstrom im Überlaufplume innerhalb von Atrien.....	118
<b>Anlagenteil A / Grundlagen paralleler Rechentechnik.....</b>	<b>127</b>
A.1 Flynnsche Klassifizierung für Parallelrechner.....	128
A.2 Parallelrechner mit gemeinsamen oder verteiltem Speicher.....	129
A.3 ECC-Fehlerschutz für den Hauptspeicher.....	131
A.4 Explizite und implizite Parallelisierung.....	132
A.5 Parallele Effizienz und Leistungssteigerung (SpeedUp).....	133
A.6 Die Programmiermodelle MPI und OpenMP.....	134

<b>Anlagenteil B / Beispielrechnung zur BRE Spill-Plume-Methode.....</b>	<b>137</b>
<b>Anlagenteil C / Auszug aus dem Quelltext zum Multi-Wellenfrontalgorithmus.....</b>	<b>141</b>
<b>Anlagenteil D / Beispiele zur Verifizierung der GPU-Version.....</b>	<b>145</b>
<b>Anlagenteil E / Parameterstudie zu Spill Plumes in Atrien.....</b>	<b>152</b>

## Nomenklatur

### Lateinische Formelzeichen

$A_a$	Grundfläche des Atriums [m <sup>2</sup> ]
$A_p$	Oberfläche eines Kontrollvolumens [m <sup>2</sup> ]
$b$	Balkonbreite [m]
$C_m$	Einmischungskonstante nach Gl. (3) [-]
$c$	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
$c_p$	Spezifische Wärmekapazität der Umgebungsluft, $c_p \approx 1,01$ kJ/(kg·K)
$D$	Durchmesser an der Austrittsöffnung [m]
$db, D_b$	Höhe der rauchgasführenden Schicht im Brandraum, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
$g$	Erdbeschleunigung, $g \approx 9,81$ m/s <sup>2</sup>
$H$	Höhe des Brandraumes [m]
$H_a$	Höhe des Atriums [m]
$H_w$	Höhe der Brandraumöffnung (Höhe bis zum Unterzug) [m]
$I_b$	Strahlungsintensität des schwarzen Körpers [W]
$I_p$	Strahlungsintensität eines Kontrollvolumens [W]
$I_\lambda$	Spektrale Strahlungsintensität [W]
$m$	Mischzahl, vgl. Abs. 5.2.1 [-]
$M, M'$	Massenstrom im Plume über einem freien Brandherd [kg/s], [kg/(s·m)]
$M_{1,2,3,4}$	Massenströme im Brandraum [kg/s]
$M_5$	Massenstrom im Rotationsbereich [kg/s]
$M_a, M_a'$	Massenstrom im Plume innerhalb des Atriums [kg/s], [kg/(s·m)]
$M_b, M_b'$	Massenstrom am Überlauftrand [kg/s], [kg/(s·m)]
$M_{ends}$	Massenstrom im Bereich der freien Enden des Plumes [kg/s]
$M_p, M_p'$	Massenstrom im Plume über einer freien Brandquelle [kg/s], [kg/(s·m)]
$Q, Q'$	Konvektiver Wärmestrom [W], [W/m]
$Q_{tot}$	Wärmefreisetzungsrate des Brandherdes [W]
$Re$	Reynolds-Zahl [-]
$t_v, T_v$	Vorlaufzeiten zum Erreichen des stationären Zustandes [s]
$T_o$	Temperatur der Umgebungsluft, $T_o \approx 293$ K
$u$	Geschwindigkeit in der Gasströmung [m/s]
$V_p$	Kontrollvolumen [m <sup>3</sup> ]
$W$	Breite der Öffnung im Brandraum [m]
$W_e$	Effektive Breite des Plumes am Überlauftrand (unchannelled flow) [m]
$x_o$	Kernlänge des Freistrahls [m]
$z$	Höhe des aufsteigenden Plumes im Atrium, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
$z_{int}$	Grenzschichthöhe zwischen Rauchgas und Umgebungsluft im Atrium [m]
$z_{edy}$	Wirbelgrenze nach Abb. 50, S. 104 [m]

$z_o$	Abstand zum Ursprung der virtuellen Feuerquelle, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
$z_k$	Höhe des aufsteigenden Plumes über einem freien Brandherd [m]

### Griechische Formelzeichen

$\alpha$	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [-]
$\alpha, \beta, \gamma$	Experimentelle Konstanten nach Thomas, vgl. Abs. 2.4,5 [-]
$\theta_a$	Temperatur der Rauchgase im Atrium [°C]
$\theta_b$	Temperatur der Rauchgase am Überlauftrand [°C]
$\kappa$	Absorptionsgrad [-]
$\lambda$	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [-]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
$\Omega^l$	Kontrollwinkel [-]
$\rho$	Dichte des Rauchgases [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_o$	Dichte der Umgebungsluft, $\rho_o \approx 1,22 \text{ kg/m}^3$
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante, $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$
$\sigma_s$	Streuungskoeffizient [-]
$\Phi$	Strahlungsaustauschfaktor (configuration factor) [-]
$\chi_r$	Anteil der Strahlungsleistung an der Gesamtenergiefreisetzung [-]

## 1 Zweck und Ziel der Arbeit

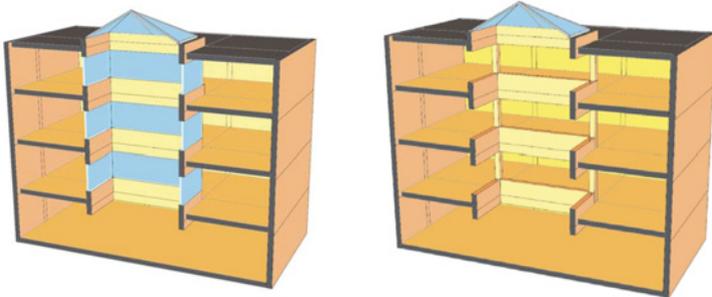
### 1.1 Einführung in die Problemstellung

Die Häufigkeit von Brandkatastrophen zeigt die Notwendigkeit auf, bereits bei der Errichtung eines Gebäudes Maßnahmen vorzusehen, die die Gefahr der Brandentstehung reduzieren bzw. die die Folgeschäden im Brandfall begrenzen. Das allgemeine Ziel derartiger Maßnahmen ist neben dem Schutz von Eigentum (Sachwertschutz) vor allem der Schutz von Leben und Gesundheit (Personenschutz). Aus der Komplexität und Vielfalt möglicher Brandgeschehen resultieren dabei eine ganze Reihe von Anforderungen, die an die Bausubstanz und technische Ausrüstung eines Bauwerks zu stellen sind. So muss die Tragfähigkeit der Gebäudestruktur im Brandfall über einen definierten Zeitraum erhalten bleiben, um Evakuierungsmaßnahmen durchführen und Maßnahmen zur Brandbekämpfung einleiten zu können. Darüber hinaus muss sichergestellt sein, dass die Ausbreitung des Brandes im Gebäudeinneren begrenzt wird, Fluchtwege rauchgasfrei bleiben und der Brand nicht auf die Nachbarbebauung übergreifen kann. Um die Risiken im Brandfall zu reduzieren, besteht in der Ingenieurpraxis der Bedarf, bereits in der Planungsphase mögliche Brandverläufe vorherzusagen und deren Auswirkung auf Personen und Sachgüter zu beurteilen.

Diese Dissertation beschäftigt sich mit einem in der Praxis häufig auftretenden Spezialfall, dem Rauchgasmanagement in Atrien. Bei einem „Atrium“ im Sinne dieser Arbeit handelt es sich um einen großen Raum im Gebäudeinneren, der geschossübergreifend angeordnet und mit den angrenzenden Räumlichkeiten durch Umgänge oder Fenster verbunden ist. In der Praxis sind dabei sowohl offene als auch geschlossene Atrien vorzufinden (s. Abb. 1). Die Tatsache, dass derartige Räumlichkeiten als architektonisches Element in der Gegenwart häufig eingesetzt werden (z. B. in Form von Einkaufszentren, Empfangshallen, Flughäfen, Sportstätten etc.), darf nicht darüber hinweg täuschen, dass ein Atrium den fundamentalen Prinzipien des baulichen Brandschutzes widerspricht. So läuft die Anordnung eines geschossübergreifenden Raumes der angestrebten Trennung horizontaler Ebenen durch feuerbeständige Geschossdecken zuwider. Auch birgt ein Atrium durch seine Anbindung an angrenzende Räumlichkeiten die Gefahr, dass sich Rauchgase im Brandfall unkontrolliert im gesamten Gebäude ausbreiten. Eine detaillierte Kenntnis über die Brand- und Rauchentwicklung in Atrien ist für den Ingenieur daher von besonderer Bedeutung.

Da in den Verbrennungsprodukten chemische Verbindungen enthalten sind, die auf den menschlichen Organismus stark toxisch wirken (Kohlenmonoxid, Chlorwasserstoff, Cyanid etc.), kann die Inhalation von Rauchgas innerhalb weniger Minuten zum Tode führen. Tatsächlich ist die Rauchgasvergiftung mit über 70 % die häufigste Verletzungs- bzw. Todesursache bei Bränden [1], so dass ein Kontakt zwischen Rauchgas und Personen im

Brandfall zwingend vermieden werden muss. Mit dem Rauchgasmanagement in Atrien soll daher vor allem eine „kontrollierte Entrauchung“ des Atriums erreicht werden, bei der Personenschäden auszuschließen sind.

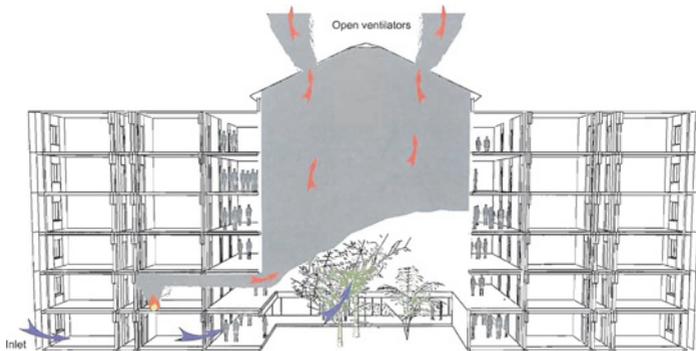


**Abb. 1:** Ausbildung eines Atriums in geschlossener (links) und offener Form (rechts), Auszug aus [2]

Ganz allgemein kann eine derartige „kontrollierte Entrauchung“ von Atrien auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Während es bei größeren Atrien häufig ausreichend ist, die Anzahl der Entrauchungsöffnungen klein zu halten (Evakuierung des Gebäudes in der Zeit bis zum Befüllen des Atriums), ist vor allem bei kleineren Atrien die natürliche Entrauchung infolge thermischen Auftriebs nicht immer ausreichend. In diesem Fall können maschinelle Rauch- und Wärmeabzüge zum Einsatz kommen, die das Rauchgas im oberen Bereich des Atriums absaugen bzw. in die freie Umgebung ableiten. Soll das Befüllen des Atriums mit Rauchgas planmäßig zulässig sein, so ist zusätzlich sicherzustellen, dass keine Rauchgase in angrenzende Räume entweichen können (z. B. über ein geschlossenes Atrium, vgl. Abb. 1, links). Ebenso muss die Standsicherheit von trennenden Bauteilen auch bei hohen Temperaturen gewährleistet sein (z. B. Einsatz von Brandschutzverglasung). Letztendlich kann es vorkommen, dass eine ausreichende Entrauchung des Atriums prinzipiell nicht zu erreichen ist, so dass das Einströmen von Rauchgas in das Atrium im Vorfeld unterbunden werden muss (z. B. durch Absaugen der Rauchgase vor dem Eintritt in das Atrium).

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit der Entrauchung von Atrien über Rauch- und Wärmeabzüge, die im Bereich der Atriumdecke angeordnet sind und bei denen sich das Rauchgas aus angrenzenden Räumen in das Atrium „ergießt“. Dabei strömt Rauchgas aus dem Brandraum über einen Überlauftrand (spill edge) in das Atrium ein und steigt dort infolge thermischen Auftriebs auf (s. Abb. 2). Aufgrund der meist geringeren Brandlasten innerhalb des Atriums ist dieses Szenario gegenüber einem direkten Brand im Atrium für die Dimensionierung der Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen häufig maßgebend. Durch den hohen Turbulenzgrad der Brandgase im Atrium mischt sich kontinuier-

lich Luft in das aufsteigende Rauchgas ein, was zur Abnahme der Rauchgastemperatur und Zunahme der Rauchgasmenge über die Höhe führt. Da die ausströmende Rauchgasmenge durch die Größe der Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen begrenzt ist, bildet sich im oberen Teil des Atriums ein Rauchgasreservoir aus, das durch eine Grenzschicht von der rauchgasfreien Zone abgetrennt ist. Die Höhe dieser Grenzschicht ergibt sich aus dem Gleichgewicht zwischen aus- und nachströmendem Rauchgas und ist von der Wärmefreisetzungsrate des Brandherdes, den geometrischen Randbedingungen (Atrium, Brandraum etc.) sowie der Anzahl und Größe der Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen abhängig.



**Abb. 2:** Prinzipskizze zur Entrauchung eines Atrium über Rauch- und Wärmeabzüge, Auszug aus [2]

Bei dem oben beschriebenen Szenario besteht das Ziel vor allem darin, die Rauch- und Wärmeabzugsöffnungen derart auszubilden, dass unterhalb des Rauchgasreservoirs ein ausreichend großer rauchgasfreier Bereich vorhanden ist. Diese Forderung kann als erfüllt angesehen werden, wenn über den Evakuierungszeitraum hinweg das Eindringen von Rauchgas in die angrenzenden Räumlichkeiten ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus muss – sofern das Atrium zur Entfluchtung genutzt wird – zusätzlich eine ausreichend hohe rauchgasfreie Schicht im Bereich der Fluchtwege vorhanden sein. Ausgehend vom Fußboden des zu entfluchtenden Geschosses werden dabei in der Literatur bzw. den einschlägigen Normen rauchgasfreie Schichthöhen zwischen von 2,5 bis 3 m verlangt [3].

Um die maximal zulässige Höhe des Rauchgasreservoirs einzuhalten, muss durch den Ingenieur der zu erwartende Rauchgas-Massenstrom im aufsteigenden Plume quantifiziert werden. Darüber hinaus sind die Rauchgastemperaturen abzuschätzen, da sich bei zu geringer Rauchgastemperatur keine klare Trennung zwischen verrauchtem und rauchgasfreiem Bereich einstellt. In diesem Fall sind keine gesicherten Aussagen über die Höhe der rauchgasfreien Zone möglich und es besteht die Gefahr der vollständigen Ver-