Nr. 5



Hendrik C. Belaschk



# Berichte des Instituts für Bauphysik





# 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

FRAUNHOFER IRB VERLAG

## 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 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

# Fraunhofer IRB Verlag

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

K	Kurzfassung4			
A	\bstract5			
Nomenklatur				
	Lateinische Formelzeichen10			
	Griechische Formelzeichen11			
1	Zweck und Ziel der Arbeit12			
	1.1 Einführung in die Problemstellung12			
	1.2 Verwendung von Brand- und Rauchsimulationsrechnungen15			
	1.3 Abgrenzung zu alternativen Fragestellungen17			
	1.4 Zusammenfassung der Forschungsziele19			
	1.5 Vorgehensweise20			
2	Stand des Wissens und der Technik21			
	2.1 Einführung in die Modellbildung21			
	2.2 Lufteinmischung in einen freien linienförmigen Brandherd22			
	2.3 Die "BRE Spill-Plume-Methode" für den Überlaufplume23			
	2.4 Alternative Berechnungsansätze25			
	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)			
	2.4.8 NFPA 92B [36] (2009)32			
	2.4.9 Harrison und Spearpoint [37] (2010)32			
T( G	eil A / Numerische Brand- und Rauchsimulation unter Verwendung von PU-Prozessortechnologie			
2	Finführung in die GPII-Technologie			
5	3.1 Grundlagen der GPU-Technik			
	2.2 Hardware im GPGPII-Rereich			
	3.3 Überblick über das CUDA-Programmiermodell			
	Entwicklung einer CDIL-Version für den Eire Dynamics Simulator (EDC)			
4	4.1 Dia Softwara Fire Dynamics Simulator (EDS)*			
	4.2 Paralleles Rechnen mit FDS (Version 5 A)			
	4.2 I druttetes reconten intri DS (Version 7.4/			

#### Inhaltsverzeichnis

4.3 Überblick über die neue GPU-Version
4.3.1 Beschreibung des Programm-Modells47
4.3.2 Arithmetic Intensity Problem
4.3.3 Rechengenauigkeit50
4.3.4 Ein- und Mehrnetzrechnungen51
4.4 Programmtechnische Umsetzung52
4.4.1 Parallelisierungsschema52
4.4.2 Neuordnung von Speicherbereichen53
4.4.3 Parallele Reduktion (parallel reduction)55
4.4.4 Dokumentation neuer Eingabeparameter56
4.4.5 Versionsänderungen56
4.5 Parallelisierung der Algorithmen zum Strahlungswärmetransport57
4.5.1 Grundlagen des Wärmetransports über Strahlung57
4.5.2 Numerische Lösung der Transportgleichung mit der Finite-Volumen-
Methode (FV-Methode)59
4.5.3 Modellierung des Strahlungswärmetransports in FDS61
4.5.4 Möglichkeiten zur Parallelisierung der Finite-Volumen-Methode64
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
4.5.5 Anpassung des KBA-Verfahrens an GPU-Systeme
4.5.6 Implementierung des KBA-Verfahrens in FDS72
4.5.7 Zusammenfassung74
4.6 Entwicklung eines Profilers74
Verifikation und Performance75
5.1 Verifikation im Diagnosemodus (diagnostic mode)
5.2 Beispiel 1: Isothermer Freistrahl
5.2.1 Theoretische und experimentelle Grundlagen78
5.2.2 Zusammenfassung bisheriger Untersuchungen79
5.2.3 Verifizierung der GPU-Version80
5.2.4 Rechenleistung / Performance83
5.2.5 Zusammenfassung84
5.3 Beispiel 2: Strahlung in einer Box84
5.3.1 Theoretische Grundlagen85
5.3.2 Verifizierung der GPU-Version85
5.3.3 Rechenleistung / Performance87

Те	il B / Simulation von Spill Plumes in Atrien88			
6	۶ Numerische Simulation von Spill Plumes in Atrien،،۰۰۰،۸۰۰٬۰۰۰،۶۹			
	6.1 Zusammenfassung der Versuche nach Harrison [10] und [4]89			
	6.1.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung			
	6.1.2 Ergebnisse aus den Versuchsreihen92			
	6.1.3 Diskussion der Ergebnisse92			
	6.2 Beschreibung des Computermodells93			
	6.2.1 Anordnung von virtuellen Messfühlern95			
	6.2.2 Vorlaufzeiten für die stationäre Problemstellung96			
	6.3 Modellvalidierung: Strömung am Überlaufrand98			
	6.3.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse			
	6.3.2 Diskussion der Ergebnisse100			
	6.4 Modellvalidierung: Massenstrom im aufsteigenden Plume (ohne Atrium)100			
	6.4.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse101			
	6.4.2 Diskussion der Ergebnisse102			
	6.5 Modellvalidierung: Massenstrom im aufsteigenden Plume (mit Atrium)104			
	6.5.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse105			
	6.5.2 Diskussion der Ergebnisse105			
	6.6 Parameterstudie: Massenstrom im aufsteigenden Plume (ohne Atrium)107			
	6.6.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse108			
	6.6.2 Entwicklung einer Näherungsformel für den freien Plume108			
	6.7 Parameterstudie: Massenstrom im aufsteigenden Plume (mit Atrium)110			
	6.7.1 Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse111			
	6.7.2 Entwicklung einer Näherungsformel für die Masseneinmischung113			
	6.7.3 Bewertung der bestehenden Näherungsformeln115			
7	Zusammenfassung und Ausblick116			
	7.1 Einsatz der GPU-Prozessortechnologie in der Brand- und Rauchsimulation116			
	7.2 Entwicklung von Näherungsformeln für den Massenstrom im Überlaufplume			
	innerhalb von Atrien118			
Δr	nlagenteil & / Grundlagen naralleler Rechentechnik			
	A 1 Elvnnsche Klassifizierung für Parallelrechner 128			
	A 2 Parallelrechner mit gemeinsamen oder verteiltem Speicher.			
	A.3 ECC-Fehlerschutz für den Hauptspeicher			
	A.4 Explizite und implizite Parallelisierung			
	A.5 Parallele Effizienz und Leistungssteigerung (SpeedUp)			
	A.6 Die Programmiermodelle MPI und OpenMP			

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

### Nomenklatur

#### Lateinische Formelzeichen

Aa	Grundfläche des Atriums [m²]
Ap	Oberfläche eines Kontrollvolumens [m²]
b	Balkonbreite [m]
Cm	Einmischungskonstante nach Gl. (3) [–]
с	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]
Cp	Spezifische Wärmekapazität der Umgebungsluft, cp ≈ 1,01 kJ/(kg·K)
D	Durchmesser an der Austrittsöffnung [m]
db, Db	Höhe der rauchgasführenden Schicht im Brandraum, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
g	Erdbeschleunigung, g $\approx$ 9,81 m/s <sup>2</sup>
Н	Höhe des Brandraumes [m]
Ha	Höhe des Atriums [m]
Hw	Höhe der Brandraumöffnung (Höhe bis zum Unterzug) [m]
lь	Strahlungsintensität des schwarzen Körpers [W]
Ip	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 <sub>1,2,3,4</sub>	Massenströme im Brandraum [kg/s]
M <sub>5</sub>	Massenstrom im Rotationsbereich [kg/s]
Ma, Ma'	Massenstrom im Plume innerhalb des Atriums [kg/s], [kg/(s·m)]
M <sub>b</sub> , M <sub>b</sub> '	Massenstrom am Überlaufrand [kg/s], [kg/(s·m)]
Mends	Massenstrom im Bereich der freien Enden des Plumes [kg/s]
Mp, Mp'	Massenstrom im Plume über einer freien Brandquelle [kg/s], [kg/(s·m)]
Q, Q'	Konvektiver Wärmestrom [W], [W/m]
Qtot	Wärmefreisetzungsrate des Brandherdes [W]
Re	Reynolds-Zahl [–]
t <sub>v</sub> , T <sub>v</sub>	Vorlaufzeiten zum Erreichen des stationären Zustandes [s]
To	Temperatur der Umgebungsluft, T₀ ≈ 293 K
u	Geschwindigkeit in der Gasströmung [m/s]
Vp	Kontrollvolumen [m³]
W	Breite der Öffnung im Brandraum [m]
We	Effektive Breite des Plumes am Überlaufrand (unchannelled flow) [m]
Xo	Kernlänge des Freistrahls [m]
Z	Höhe des aufsteigenden Plumes im Atrium, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
Zint	Grenzschichthöhe zwischen Rauchgas und Umgebungsluft im Atrium [m]
Zedy	Wirbelgrenze nach Abb. 50, S. 104 [m]

Zo	Abstand zum Ursprung der virtuellen Feuerquelle, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
z <sub>k</sub>	Höhe des aufsteigenden Plumes über einem freien Brandherd [m]

#### **Griechische Formelzeichen**

α	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [–]
α, β, γ	Experimentelle Konstanten nach Thomas, vgl. Abs. 2.4.5 [–]
$\theta_a$	Temperatur der Rauchgase im Atrium [°C]
$\theta_{\text{b}}$	Temperatur der Rauchgase am Überlaufrand [°C]
κ	Absorptionsgrad [-]
λ	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [–]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
$\Omega^{l}$	Kontrollwinkel [-]
ρ	Dichte des Rauchgases [kg/m³]
$\rho_{o}$	Dichte der Umgebungsluft, $\rho_0 \approx$ 1,22 kg/m <sup>3</sup>
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante, $\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$
σs	Streuungskoeffizient [-]
Φ	Strahlungsaustauschfaktor (configuration factor) [–]
χr	Anteil der Strahlungsleistung an der Gesamtenergiefreisetzung [-]