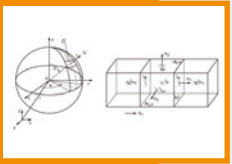
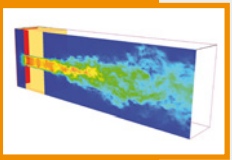
Nr. 5

IFBP
INSTITUT FÜR BAUPHYSIK

Leibniz Universität Hannover

Berichte des Instituts für Bauphysik





Hendrik C. Belaschk

Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe

CFD-Studien unter Verwendung von GPU-Technologie

Fraunhofer IRB Verlag

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Näherungsformeln für Spill Plumes in Atrien variabler Größe

CFD-Studien unter Verwendung von GPU-Technologie

von Hendrik C. Belaschk

FRAUNHOFER IRB VERLAG

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte
Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte
Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte
Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte
Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Für Pamela

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung....4
Abstract....5
Nomenklatur....10
Lateinische Formelzeichen....10
Griechische Formelzeichen....11

1 Zweck und Ziel der Arbeit....12
1.1 Einführung in die Problemstellung....12
1.2 Verwendung von Brand- und Rauchsimulationsrechnungen....15
1.3 Abgrenzung zu alternativen Fragestellungen....17
1.4 Zusammenfassung der Forschungsziele....19
1.5 Vorgehensweise....20

2 Stand des Wissens und der Technik....21
2.1 Einführung in die Modellbildung....21
2.2 Lufteinmischung 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

Teil A / Numerische Brand- und Rauchsimulation unter Verwendung von GPU-Prozessortechnologie....34

3 Einführung in die GPU-Technologie....35
3.1 Grundlagen der GPU-Technik....36
3.2 Hardware im GPGPU-Bereich....38
3.3 Überblick über das CUDA-Programmiermodell....40

4 Entwicklung einer GPU-Version für den Fire Dynamics Simulator (FDS)....42
4.1 Die Software „Fire Dynamics Simulator (FDS)“....42
4.2 Paralleles Rechnen mit FDS (Version 5.4)....43

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

5 Verifikation und Performance....75
5.1 Verifikation im Diagnosemodus (diagnostic mode)....76
5.2 Beispiel 1: Isothermer Freistrahl....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

https://doi.org/10.51202/9783816785993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Teil B / Simulation von Spill Plumes in Atrien.....88

6 Numerische Simulation von Spill Plumes in Atrien.....89

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 Überlaufrand.....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

7 Zusammenfassung und Ausblick.....116

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

Anlagenteil A / Grundlagen paralleler Rechentechnik.....127

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

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

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

https://doi.org/10.51202/9783816786993-i - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

Nomenklatur

Lateinische Formelzeichen

A_a	Grundfläche des Atriums [m²]
A_p	Oberfläche eines Kontrollvolumens [m²]
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]
d_b, D_b	Höhe der rauchgasführenden Schicht im Brandraum, vgl. Abb. 6, S. 21 [m]
g	Erdbeschleunigung, $g \approx 9{,}81$ m/s²
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_λ	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 Überlaufrand [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]
R_e	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 [m³]
W	Breite der Öffnung im Brandraum [m]
W_e	Effektive Breite des Plumes am Überlaufrand (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]

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.

z_0	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

α	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [–]
α, β, γ	Experimentelle Konstanten nach Thomas, vgl. Abs. 2.4.5 [–]
θ_a	Temperatur der Rauchgase im Atrium [°C]
θ_b	Temperatur der Rauchgase am Überlaufrand [°C]
κ	Absorptionsgrad [–]
λ	Einmischungskonstante nach Lee und Emmons, vgl. Abs. 2.2 [–]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
Ω^{l}	Kontrollwinkel [–]
ρ	Dichte des Rauchgases [kg/m³]
ρ_0	Dichte der Umgebungsluft, $\rho_0 \approx 1{,}22$ kg/m³
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante, $\sigma \approx 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴)
σ_s	Streuungskoeffizient [–]
Φ	Strahlungsaustauschfaktor (configuration factor) [–]
χ_r	Anteil der Strahlungsleistung an der Gesamtenergiefreisetzung [–]

https://doi.org/10.51202/9783816785993-I - Generiert durch IP 216.73.216.57, am 07.03.2026, 10:07:33. © Urheberrechtlich geschützter Inhalt. Ohne gesonderte Erlaubnis ist jede urheberrechtliche Nutzung untersagt, insbesondere die Nutzung des Inhalts im Zusammenhang mit, für oder in KI-Systemen, KI-Modellen oder Generativen Sprachmodellen.