

ENTRAUCHUNGSSIMULATION

BAUVORHABEN:

U-Bahnlinie 4 - U-Bahnhof Rathaus Schöneberg
10825 Berlin

BETREIBER:

Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)
Anstalt des öffentlichen Rechts
Holzmarktstraße 15-17
10179 Berlin

AUFSTELLER:

KREBS+KIEFER
Ingenieure GmbH
Rudi-Dutschke-Str. 9 | 10969 Berlin
T +49 (0)30 217342-0 | F +49 (0)30 217342-11

Aktenzeichen: 2017 6023

Berlin, 08.05.2017

Unterschrift:



Prof. Dipl.-Ing. (FH) Peter Stöwhaas

Veranlassung und Aufgabenstellung

Am 03.04.2017 wurden wir von den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) mit der Durchführung einer Entrauchungssimulation für den U-Bahnhof Rathaus Schöneberg der Linie U4 beauftragt.

Im Zuge der Überprüfung/Anpassung der Brandschutzkonzepte von U-Bahnhöfen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), muss sichergestellt sein, dass die Bahnhöfe im Brandfall entfluchtet werden können. Dafür wurde seitens der BVG berechnet, in welchem Zeitraum der U-Bahnhof Rathaus Schöneberg vollständig entfluchtet werden kann. Für diesen Zeitraum muss im Bahnhof eine entsprechend hohe raucharme Schicht gegeben sein. Dies soll im Rahmen der vorliegenden Entrauchungssimulation für den U-Bahnhof Rathaus Schöneberg untersucht werden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind einschließlich der Bewertung dem beiliegenden Gutachten von IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung zu entnehmen.

Zusammenfassung

Die Zusammenfassung ist dem beiliegenden Gutachten von IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung zu entnehmen.

Dieser Bericht zur Entrauchung ist nur in seiner Vollständigkeit gültig.

Der Bericht zur Entrauchung umfasst 26 Seiten.

Berlin, 08.05.2017



Dr. techn. Sven Huismann
Sachverständiger für vorbeugenden Brandschutz

Anlagen

Simulationsbericht, Stand 04.05.2017

erstellt von IFAB Ingenieure für angewandte Brandforschung



Ingenieure für angewandte
Brandschutzforschung

Simulationsbericht

Entrauchungssimulation für den U-Bahnhof Rathaus Schöneberg

Dokumentennummer:	2017/00064-SB
Datum:	04.05.2017
Revision:	00
QMS-Code:	MF 7-1-12 Rev. 0

Projekt: Entrauchung U-Bahnhof Rathaus Schöneberg
Projektnummer: 2017/00064
Schlüsselwörter: Entrauchungssimulation, CFD, FDS, BVG, Rathaus Schöneberg
Kunde: Krebs+Kiefer
Ingenieure GmbH
Herr Dr. Huismann
Rudi-Dutschke-Straße 9
10969 Berlin
Seitenzahl: 26 (Sechszwanzig)

Erstellt von:
Ralf Lehmann
CFD- und Versuchsingenieur
Berlin, 24.04.2017
i.A.

Geprüft von:
Max Lakkonen
Geschäftsführer
Berlin, 24.04.2017

Freigegeben von:
Rajko Rothe
Geschäftsführer
Berlin, 04.05.2017

Unterschrift



Unterschrift



Unterschrift



Kontakt: Ralf Lehmann
IFAB Ingenieure für angewandte Brandschutzforschung GmbH
Pankstraße 8-10, Haus A, EG
13127 Berlin

Email: Lehmann@ifab-fire.com
Tel: +49-(0)30-643185 903
Fax: +49-(0)30-643185 979

Urheberrecht

Diese Unterlagen sind urheberrechtlich geschützt. Sämtliche Rechte am Inhalt, insbesondere Urheberrechte, sind vorbehalten. Verletzungen unserer Rechte werden verfolgt. Diese Unterlagen sind vertraulich zu behandeln und dürfen ohne unsere Zustimmung weder vervielfältigt noch Dritten zugänglich gemacht werden und sind uns auf Verlangen zurückzugeben.

Inhaltsverzeichnis

1	EINFÜHRUNG / ZIELSTELLUNG	6
2	VERWENDETE UNTERLAGEN	7
3	SCHUTZZIELE	7
4	GRUNDLAGEN DER NACHWEISFÜHRUNG	9
4.1	ALLGEMEINE BEMERKUNGEN ZU CFD	9
4.2	FDS 6.3.2 UND SMOKEVIEW.....	9
4.2.1	<i>Allgemeines</i>	9
4.2.2	<i>Numerische Eigenschaften</i>	10
4.3	PYTHON 3.4 UND SPYDER 2.3	11
4.4	ABLEITUNG VON SCHUTZZIELRELEVANTEN AUSGABEGRÖßEN	12
5	MODELLERSTELLUNG	12
5.1	BRANDSZENARIEN.....	12
5.2	GEOMETRIE	15
5.3	VENTILATIONSBEDINGUNGEN.....	17
5.4	SONSTIGE RANDBEDINGUNGEN.....	17
6	ERGEBNISSE	18
6.1	ALLGEMEINES.....	18
6.2	PLAUSIBILITÄTSUNTERSUCHUNGEN.....	18
6.3	SZENARIO 1	19
6.4	SZENARIO 2.....	21
7	BEWERTUNG	23
	LITERATUR	24
8	ANHANG.....	26
8.1	BERECHNUNG DER ENTFLUCHTUNGSDAUER NACH NFPA	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bahnsteigebene U-Bahnhof Rathaus Schöneberg.....	6
Abbildung 2: Neubau eines zweiten Ausganges und eines Aufzuges am Südenende des Bahnhofes	6
Abbildung 3: Wärmefreisetzungsrates eines Wagens des Kleinprofils A3L [2]	13
Abbildung 4: Definition von 2 Brandszenarien bezogen auf verschiedene Brandorte	14
Abbildung 5: Kontur des gesamten 3D-Modells.....	16
Abbildung 6: Modellierung der Bahnsteigebene	16
Abbildung 7: Ansicht der Bahnsteigebene mit Treppe	17
Abbildung 8: Geschwindigkeitsvektoren im südlichen Teil des Bahnsteigs (Ansicht von oben) 30 s nach Start der Simulation	19
Abbildung 9: Geschwindigkeitsvektoren im südlichen Teil des Bahnsteiges (Ansicht von der Seite) 4 min nach Start der Simulation.....	19
Abbildung 10: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 3,5 min (Szenario 1)	20
Abbildung 11: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 10,5 min (Szenario 1)	20
Abbildung 12: Erkennungsweite auf den Ausgängen (Szenario 1)	21
Abbildung 13: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 3,5 min (Szenario 2)	21
Abbildung 14: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 8,5 min (Szenario 2)	22
Abbildung 15: Erkennungsweite auf den Ausgängen (Szenario 2)	22

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungen.....	5
Tabelle 2: Verbrennungsprodukte eines Wagens A3L [2].....	13
Tabelle 3: Eigenschaften des Rechengitters.....	15
Tabelle 4: Stoffeigenschaften der modellierten Materialien.....	18
Tabelle 5: Zeitpunkte, ab denen die jeweiligen Fluchtwege nicht mehr benutzbar sind.....	23

Abkürzungen

Tabelle 1: Abkürzungen

Abkürzungen	Beschreibung
BVG	Berliner Verkehrsbetriebe
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy Zahl
DNS	Direkte Numerische Simulation
FDS	Fire Dynamics Simulator
FDM	Finite Differenzen Methode
FVM	Finite Volumen Methode
LES	Large Eddy Simulation (Grobstruktursimulation)
RANS	Reynolds Averaged (Reynolds-gemittelte) Navier-Stokes Gleichungen

1 EINFÜHRUNG / ZIELSTELLUNG

Im Zuge der Überprüfung/Anpassung der Brandschutzkonzepte von U-Bahnhöfen der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG), muss sichergestellt sein, dass die Bahnhöfe im Brandfall entfluchtet werden können. Dafür wurde seitens der BVG berechnet, in welchem Zeitraum der U-Bahnhof Rathaus Schöneberg vollständig entfluchtet werden kann. Für diesen Zeitraum muss im Bahnhof eine entsprechend hohe raucharme Schicht gegeben sein. Dies soll im Rahmen der vorliegenden CFD-Simulation als anerkanntes ingenieurtechnisches Werkzeug für den U-Bahnhof Rathaus Schöneberg untersucht werden.

Der U-Bahnhof Rathaus Schöneberg liegt zwischen den Bahnhöfen Bayerischer Platz und Innsbrucker Platz an der Linie U4. Der Bahnhof besteht aus zwei Gleisen und einem Mittelbahnsteig. Derzeit führen eine Treppe am Nordende des Bahnsteiges und ein Notausgang am Südende direkt ins Freie. Geplant ist der Bau eines weiteren regulären Ausganges am Südende des Bahnhofes und damit einhergehend der Rückbau des Notausganges, siehe Abbildung 1 und Abbildung 2. In der vorliegenden Untersuchung soll der Ausbauzustand mit zwei regulären Ausgängen betrachtet werden.

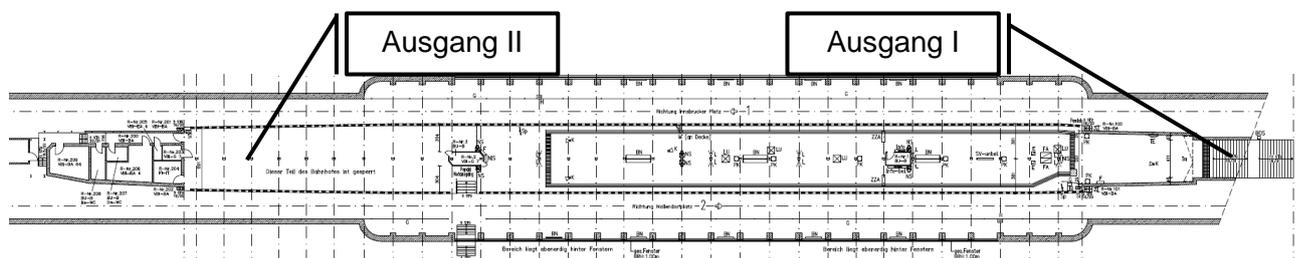


Abbildung 1: Bahnsteigebene U-Bahnhof Rathaus Schöneberg

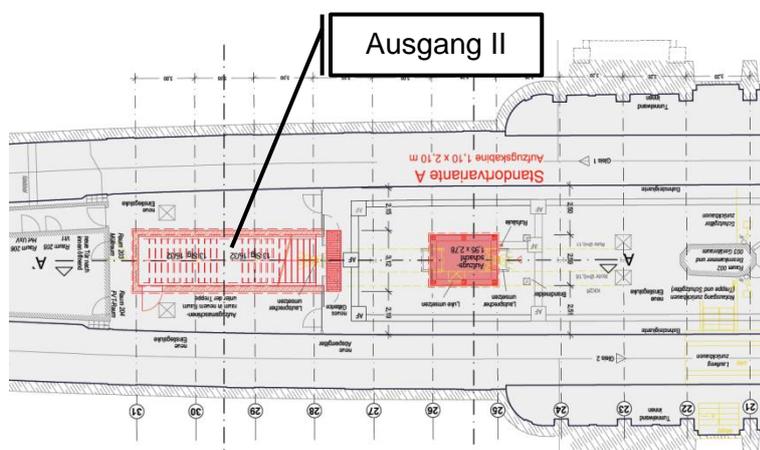


Abbildung 2: Neubau eines zweiten Ausganges und eines Aufzuges am Südende des Bahnhofes

2 VERWENDETE UNTERLAGEN

Folgende Unterlagen wurden seitens der BVG zur Verfügung gestellt:

- Brandschutzkonzept U-Bahn Anlage 1 – Risikobetrachtung der U-Bahnhöfe
- Brandschutzkonzept U-Bahn Anlage 2 – Risikobetrachtung der Tunnel
- Anlage U-Bahnhof Rathaus Schöneberg – Entfluchtungsrechnung nach NFPA
- MBE_B113_RS_UE200 – U-Bahnhof Rathaus Schöneberg – Grundriss Bahnsteig und Trompeten
- RS_PG002_170224 – U-Bahnhof Rathaus Schöneberg (RS) – Barrierefreier Ausbau und Neubau Ausgang II

3 SCHUTZZIELE

Nach [1] werden verschiedene Kriterien in Betracht gezogen, die für den Nachweis der Personensicherheit herangezogen werden können. Dies sind:

1. die Höhe der raucharmen Schicht,
2. die Qualität der raucharmen Schicht,
3. thermische Einwirkungen aus Wärmestrahlung und Konvektion.

Gemäß [2] ist eine raucharme Schicht in 2 m Höhe für den gesamten Zeitraum der Entfluchtung in den entsprechenden Bereichen des Bahnhofes nachzuweisen. Dafür stehen die Größen der Erkennungsweite S und der optischen Dichte D_L zur Verfügung. Beide Größen beschreiben den gleichen Sachverhalt, lassen sich in Bezug auf Personensicherheit aber unterschiedlich anwenden. Während mit der Erkennungsweite in der Regel die Sicherheit in Bezug auf die Sichtbarkeit von Fluchtwegzeichen beschrieben wird, wird die optische Dichte meist für die Beschreibung der Rauchdichte als physikalische Größe verwendet.

Grundsätzlich sind auch die Auswirkungen der bei der Verbrennung entstehenden Atemgifte für den Nachweis der Personensicherheit relevant. Messungen verschiedener Forschungsgruppen haben ergeben, dass die Evaluation der raucharmen Schicht auf Basis der optischen Dichte im Vergleich zur toxischen Wirkung des Rauches ein konservativerer Ansatz ist. Es ist also davon auszugehen, dass die Grenzwerte für die üblichen Atemgifte CO , CO_2 und HCN eingehalten werden, wenn auch der Grenzwert für die optische Dichte nicht überschritten wird. Das gleiche gilt auch für die Rauchgastemperatur [1] [3] [4] [5] [6]. Die raucharme Schicht wird daher ausschließlich anhand der optischen Dichte (bzw. der Erkennungsweite) bewertet.

Die Erkennungsweite S ist als die Strecke definiert, bei der der Objektkontrast eines Sicherheitszeichens C und der Schwellenkontrast \bar{C} des menschlichen Auges gleich groß ist [7].

Der Objektkontrast C ist definiert als

$$C = C_0 K e^{-kl}$$

wobei C_0 den Anfangskontrast, K den Leuchtdichtekontrast, k den Schwächungskoeffizienten des Rauches und l den Beobachterabstand beschreibt. Der Schwächungskoeffizient k ist abhängig von den Raucheigenschaften:

$$k = k_s \rho_s$$

wobei k_s der spezifische Extinktionskoeffizient des Rauches und ρ_s die Rauchdichte beschreibt. Der spezifische Extinktionskoeffizient wird konservativ mit $8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ angegeben [8]. Der Schwächungskoeffizient ist proportional zur optischen Dichte, die als

$$D_L = \frac{k}{\ln 10}$$

definiert ist. Der Schwellenkontrast \bar{C} wird mittels empirischer Gleichungen bestimmt, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll [9]. Nach Gleichsetzung von C und \bar{C} und Umformung ergibt sich für die Erkennungsweite S

$$S = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{C_0 K}{\bar{C}} \right)$$

wobei die Logarithmusfunktion ausschließlich von den Eigenschaften des Sicherheitszeichens und dessen Umgebungsbedingungen abhängig ist. Vereinfachend definiert man dafür den Erkennungsfaktor V , der für verschiedene Sicherheitszeichen tabelliert ist [7]. Damit ergibt sich

$$S = \frac{V}{k}$$

In der Praxis und für diese Simulation werden für hinterleuchtete Sicherheitszeichen Erkennungsfaktoren von 3 angesetzt [10] [11].

Die Entfluchtungsdauer für den gesamten Bahnhof Rathaus Schöneberg beträgt nach den vorgegebenen Berechnungen 3,5 min. Dies stellt damit auch die maximale Aufenthaltsdauer im brandbeeinflussten Bereich dar. Da der U-Bahnhof als übersichtlich bewertet werden kann, ergeben sich gemäß [1] folgende Bewertungskriterien, die während des Zeitraumes der Entfluchtung nachzuweisen sind:

1. Erkennungsweite $S \geq 10 \text{ m}$
2. Optische Dichte $D_L \leq 0.15 \text{ m}^{-1}$

Aus obigen Gleichungen ergibt sich eine Beziehung zwischen der optischen Dichte D_L und der Erkennungsweite S , die bei gegebenem Erkennungsfaktor direkt über die Gleichung

$$S = \frac{V}{D_L \ln 10}$$

ineinander umwandelbar ist. Setzt man eine Erkennungsweite von 10 m in die obige Gleichung ein und stellt nach D_L um, so ergibt sich eine optische Dichte von $0,13 \text{ m}^{-1}$. Der Grenzwert für die Erkennungsweite ist also restriktiver als für die optische Dichte. Der Nachweis der rauchfreien Schicht erfolgt daher ausschließlich über die Erkennungsweite, wobei die optische Dichte informellen Wert hat.

4 GRUNDLAGEN DER NACHWEISFÜHRUNG

4.1 Allgemeine Bemerkungen zu CFD

Die grundlegende Strategie numerischer Strömungssimulation (CFD) besteht darin, physikalische Eigenschaften eines kontinuierlichen Problems in Raum und Zeit mithilfe eines Gitters zu diskretisieren. Im kontinuierlichen Raum ist jede Eigenschaft der Strömung, beispielsweise die Temperatur, in jedem Punkt definiert. Im diskreten Raum sind die Variablen hingegen nur in den Gitterpunkten definiert und werden nur in diesen berechnet. Um die Werte anderer Punkte bestimmen zu können, ist eine Interpolation notwendig.

Die bestimmenden partiellen Differentialgleichungen (Impuls-, Masse-, Energiebilanz u. a.) sind im kontinuierlichen Raum definiert und müssen entsprechend ebenso diskretisiert werden, um sie numerisch lösen zu können. Im Bereich der CFD werden hauptsächlich zwei Verfahren angewendet: Finite Differenzen Methode (FDM) und Finite Volumen Methode (FVM). Bei finiten Differenzen werden die Ableitungen der Differentialgleichungen durch Differenzgleichungen approximiert. Finite Volumen approximieren die integrale Form der Differentialgleichungen mittels Bilanzierung über Kontrollvolumen um Gitterpunkte. In der Regel werden die partiellen Differentialgleichungen vereinfacht, um die bestimmenden Dynamiken effizient lösen zu können.

4.2 FDS 6.3.2 und Smokeview

4.2.1 Allgemeines

Das in der vorliegenden Simulation verwendete Programm ist der Fire Dynamics Simulator (FDS), Version 6.3.2. Das Programm ist das am häufigsten genutzte Werkzeug für Brandsimulationen.

Dabei lassen sich mit FDS schutzzielorientierte Fragestellungen im baulichen und anlagentechnischen Brandschutz bearbeiten, wie [12]:

- Rauchableitung / Entrauchung
- thermische Beaufschlagung von Bauteilen
- Reaktion von Sensoren zur Branderkennung und Steuerung des anlagen-technischen Brandschutzes
- Reaktion und Wirkung von Sprinkler-Anlagen
- Entzündung und Brandausbreitung (nur bedingt)

Für eine Vielzahl an physikalischen Phänomenen (Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion, Verdampfung, Rauchausbreitung u. a.) und technische Vorgaben (Ventilation, Brandmelde- und -bekämpfungsanlagen), die von FDS für die Simulation von Bränden und deren Auswirkungen abgebildet werden müssen, existiert eine große Sammlung an Validierungsarbeiten [13], die für die entsprechenden Anwendungen eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation nachweisen.

4.2.2 Numerische Eigenschaften

FDS löst eine Formulierung der Navier-Stokes Gleichungen, die für brandinduzierte Strömungen mit vergleichsweise kleinen Strömungsgeschwindigkeiten mit dem Fokus auf Rauch- und Wärmetransport von Bränden geeignet ist. Die partiellen Differentialgleichungen der Strömungsgrößen werden mittels finiter Differenzen (FDM) approximiert und auf einem dreidimensionalen, rechtwinkligen Rechengitter berechnet.

Turbulente Eigenschaften von Strömungen werden von FDS mit Grobstruktursimulation (Large Eddy Simulation LES) behandelt. Direkte numerische Simulation (DNS) ist optional verfügbar, erweist sich für brandschutzrelevante Raumabmessungen wegen immensem Rechenaufwand aber als unzweckmäßig. Im Gegensatz zu vielen anderen CFD-Programmen werden Zeitschritte in FDS durch ein explizites Eulerverfahren berechnet. Als Konsequenz ergeben sich verschiedene Kriterien, die für die Stabilität der Simulation erfüllt werden müssen (Courant-Friedrichs-Lewy-Bedingung (CFL), Von-Neumann-Bedingung, Divergenz-Zeitschritt-Beschränkung).

Das restriktivste dieser Kriterien ist in der Regel die CFL-Bedingung, die als

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta h}$$

definiert ist, wobei u die lokale Geschwindigkeit, Δt der Zeitschritt und Δh die charakteristische Zellgröße ist. Die CFL-Zahl wird für jede Zelle berechnet und muss als notwendige Bedingung für numerische Stabilität kleiner als 1 sein. Die CFL-Zahl wird global evaluiert, d. h. der Zeitschritt ist für alle Zellen eines Netzes gleich groß. In einem gleichmäßigen Netz bestimmt damit in der Regel die Zelle mit der höchsten Strömungsgeschwindigkeit den Zeitschritt.

Für das explizite Euler-Verfahren ist Stabilität sowohl notwendige als auch hinreichende Bedingung für Konvergenz. Die CFL-Zahl wird von FDS während der Simulation berechnet, überwacht und angepasst. Die Zeitschritte die mit diesem Verfahren erreicht werden können sind vergleichsweise klein. Ein Iterationsalgorithmus zur Minimierung von Residuen wie in vielen finite-Volumen (FVM) Programmen üblich, die eine Reynolds-gemittelte Version der Navier-Stokes Gleichungen (RANS) nutzen, ist allerdings nicht notwendig. Von einem numerischen Standpunkt können die Ergebnisse von FDS daher immer als konvergent betrachtet werden.

Thermische Strahlung wird in FDS mittels finiter Volumen auf demselben Netz wie der Strömungslöser mit ca. 100 diskreten Winkeln für die Strahlungsrichtung berechnet. Die Absorptionskoeffizienten des Rauch-Gas Gemisches werden mit dem RadCal-Schmalbandmodell berechnet. Die Simulation flüssiger Tropfen ermöglicht die Berechnung von Absorption und Streuung von Strahlung auf Basis der Mie-Theorie.

Wärmeleitung in festen Stoffen wird mit der eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung senkrecht zur Oberfläche berechnet.

Partikel werden nach dem Modell von Lagrange berechnet um die Simulation von Rauchgasausbreitung und Wassertropfen zu ermöglichen.

Weitere Details zu FDS und dessen physikalische und mathematische Grundlagen finden sich im „FDS User Guide“ und „FDS Technical Reference Guide“ [13] [14].

4.3 Python 3.4 und Spyder 2.3

Python ist eine universelle höhere Open-Source-Programmiersprache, die Programmierparadigmen wie Objektorientierung, sowie imperative und funktionale Programmierung unterstützt. Python bietet eine große Standardbibliothek und ist dadurch für viele verschiedene Anwendungen wie Datenverarbeitung, höhere mathematische Berechnungen und

Erstellung von Diagrammen geeignet. Spyder ist eine integrierte Entwicklungsumgebung, die Python für wissenschaftliche Anwendungen nutzt. Daher enthält Spyder zusätzliche Bibliotheken und Werkzeuge, die die Anwendbarkeit von Python auf spezielle, insbesondere mathematische, Einsatzzwecke erweitert.

Das Softwarepaket wurde für die Vor- und Nachbearbeitung der Simulationen benutzt, d.h. Erstellung der FDS-Eingabedatei, insbesondere der Geometrie, und Aufbereitung der von FDS erzeugten Daten.

4.4 Ableitung von schutzzielrelevanten Ausgabegrößen

Um die Verrauchung der Bahnsteige und der Zwischenebene in Bezug auf die Erkennungsweite und die optische Dichte beurteilen zu können, werden diese jeweils in horizontalen Ebenen 2 m über dem jeweiligen Fußboden der Größen `VISIBILITY` und `OPTICAL DENSITY` mit FDS aufgezeichnet.

Die Verrauchung der Treppen von der Bahnsteigebene zur Zwischenebene und von der Zwischenebene ins Freie lässt sich mit horizontalen Ebenen nicht ausreichend erfassen. Daher wird zusätzlich an allen Treppen eine punktförmige Messstelle für die Erkennungsweite und die optische Dichte definiert. Diese wird jeweils auf der Mitte der Treppe, mittig zwischen den Wänden und in 2 m über der Treppe platziert.

Um die Simulationen auf physikalische Plausibilität zu überprüfen und eventuelle Fehler in der Eingabedatei zu detektieren, werden weiterhin Messebenen für die Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit und Druck definiert.

5 MODELLERSTELLUNG

5.1 Brandszenarien

Auf Grundlage der Abstimmung mit dem Auftraggeber wurde die Wärmefreisetzungsrate eines Wagens des Kleinprofils A3L als mögliches Brandszenario definiert. Die simulierte Wärmefreisetzungsrate ist in Abbildung 3 gezeigt.

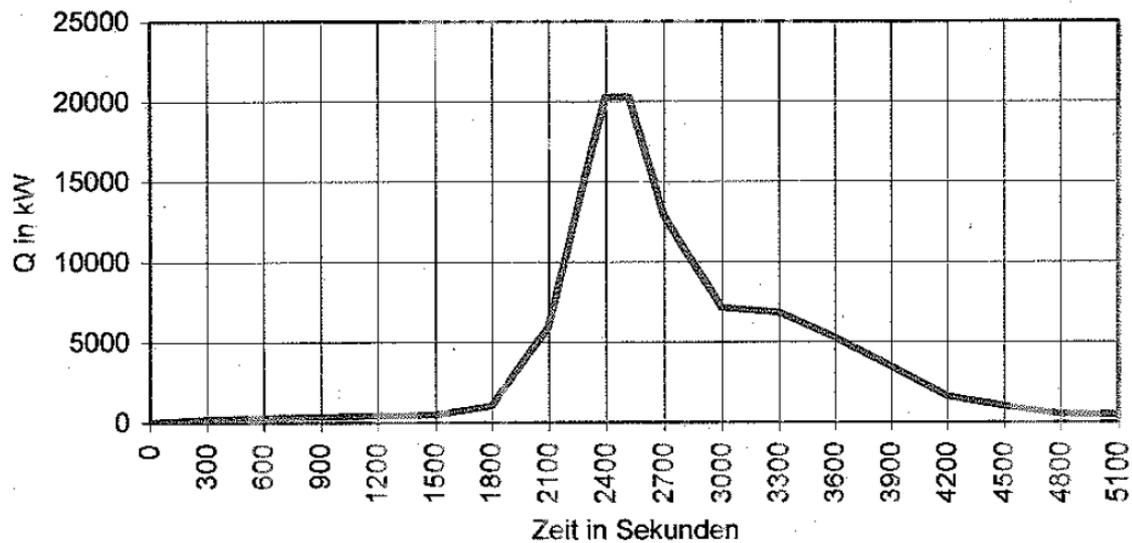


Abbildung 3: Wärmefreisetzungsrate eines Wagens des Kleinprofils A3L [2]

Eine Vor-/Schwelbrandphase wird in der Simulation nicht angesetzt. Konservativ wird angenommen, dass der Brand direkt nach Verlassen eines der angrenzenden Bahnhöfe (Bayerischer Platz / Innsbrucker Platz) ausbricht. Dieser wird während der Fahrt sicher detektiert und entsprechende Maßnahmen veranlasst. Die maximale Fahrzeit von einer benachbarten Station von 70s wird berücksichtigt, indem die Wärmefreisetzungsrate für die Simulation auf der Zeitachse in Abbildung 3 um 70s nach links verschoben wird.

Nach [2] beträgt die Rauchfreisetzungsrate während der ersten 1500s des Brandes 0,049g/g (siehe auch Tabelle 2). Dieser Wert beschreibt den Massenanteil am Brennstoff, der in Form von Rauchpartikeln (unverbrannt) freigesetzt wird. Um die Unsicherheiten des CFD-Modells zu berücksichtigen, wurde dieser Wert für die Simulation mit 0,055g/g angesetzt.

Tabelle 2: Verbrennungsprodukte eines Wagens A3L [2]

Gasanteil	Dimension	bis 1500 sec.	> 1500 sec.
y-CO ₂	g / g	0,89 g/g	1,0 g/g
y-CO	g / g	0,025 g/g	0,19 g/g
y-s	g / g	0,049 g/g	0,135 g/g
Dm	m ² / g	0,16 m ² /g	0,44 m ² /g

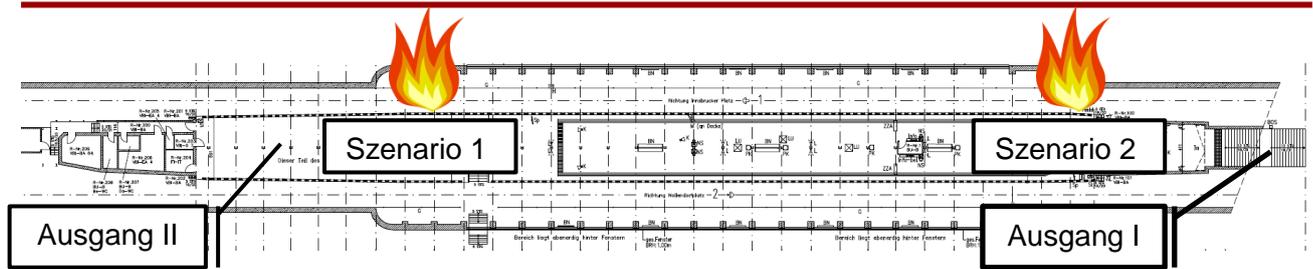


Abbildung 4: Definition von 2 Brandszenarien bezogen auf verschiedene Brandorte

Der Bahnsteig des Bahnhofes besteht aus einer Plattform, an den zwei Bahngleise anschließen. Auf der Plattform befinden sich zwei Treppen, die direkt ins Freie führen. Davon ausgehend wurden zwei verschiedene Brandorte definiert (siehe auch Abbildung 4):

- Szenario 1: Südende des Bahnsteiges
- Szenario 2: Nordende des Bahnsteiges

5.2 Geometrie

Die Geometrie des Bahnhofs wird in FDS mittels quaderförmiger Zellen realisiert. Aufgrund vorteilhafter Performance wird für den gesamten Bahnhof nur ein Netz verwendet, in dem alle Zellen gleich groß sind. Wie schon in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, hängt die Rechenzeit einer Simulation mit der vierten Potenz (drei Raumdimensionen und eine Zeitdimension) von der Zellengröße ab. Für die Zellengröße muss daher ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit der Simulation getroffen werden. Eine gängige Abschätzung für die Zellengröße ist das Verhältnis von charakteristischem Durchmesser D^* , der durch

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

definiert ist, wobei \dot{Q} die Wärmefreisetzungsrate, ρ_{∞} die Luftdichte, c_p die spezifische Wärmekapazität, T_{∞} die Umgebungstemperatur und g die Erdbeschleunigung beschreibt, und der charakteristischen Zellgröße Δh

$$\Delta h = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

Für den für die Entfluchtung relevanten Zeitraum wird eine Wärmefreisetzungsrate von 1000 kW angenommen. Damit ergibt sich ein charakteristischer Durchmesser von 0,96. Mit den in Tabelle 3 aufgeführten Netzeigenschaften ergibt sich ein Verhältnis $\frac{D^*}{\Delta h}$ von 4,8. Simulationen der US Nuclear Regulatory Commission ergaben konvergente Lösungen für Verhältnisse ab 4 [15]. Unter diesem Kriterium ist das Netz hinreichend genau.

Tabelle 3: Eigenschaften des Rechengitters

Eigenschaft	Wert
Länge x [m]	125
Breite y [m]	20
Höhe z [m]	8,2
Zellen in x	625
Zellen in y	100
Zellen in z	41
Gesamtanzahl Zellen	2.562.500
Charakteristische Zellgröße Δh [m]	0,2

Das Modell beinhaltet alle relevanten Strömungshindernisse. Zum Zeitpunkt des Starts der Simulation werden alle Türen des brennenden Wagens offen modelliert. Gemäß [16] öffnet sich die Wagendecke des brennenden Zuges 5 min nach Erreichen einer Wärmefreisetzungsrate von 1 MW. Dies ist bei etwa 30 min nach Simulationsbeginn der Fall, spielt aber für die Entfluchtung keine Rolle. Konservativ wird auf dem Nachbargleis ein weiterer Zug modelliert. Beide Züge werden durch 6 räumlich getrennte Wagen modelliert. Dadurch wird die Rauchausbreitung in die anderen Wagen verhindert, wodurch mehr Rauch auf den Bahnsteig gelangt.

Die Modellierung des Bahnhofes inklusive der Züge und Treppen ist exemplarisch in Abbildung 5 bis Abbildung 7 dargestellt.

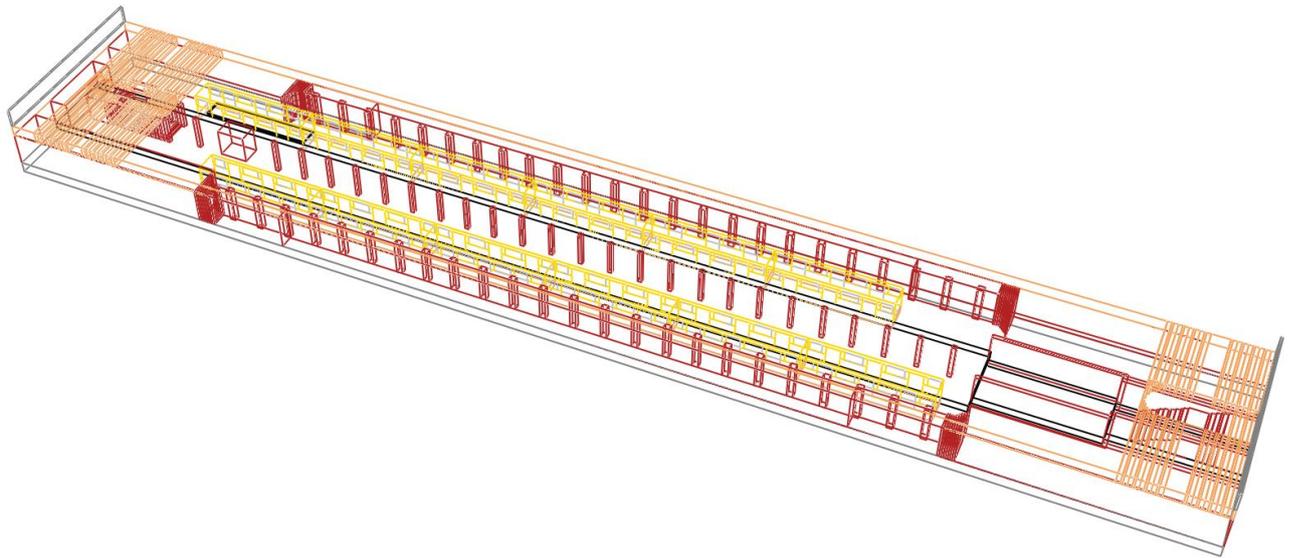


Abbildung 5: Kontur des gesamten 3D-Modells

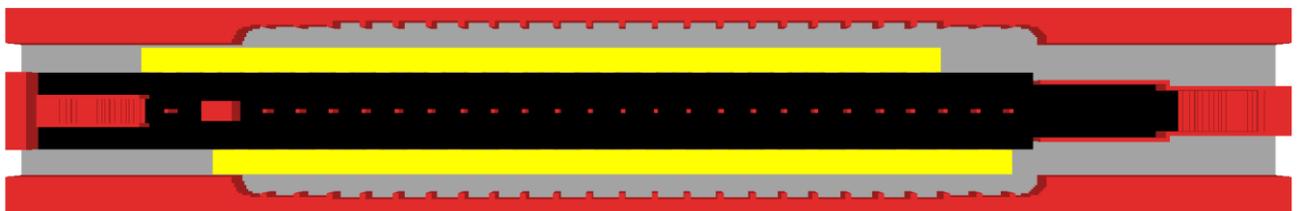


Abbildung 6: Modellierung der Bahnsteigebene

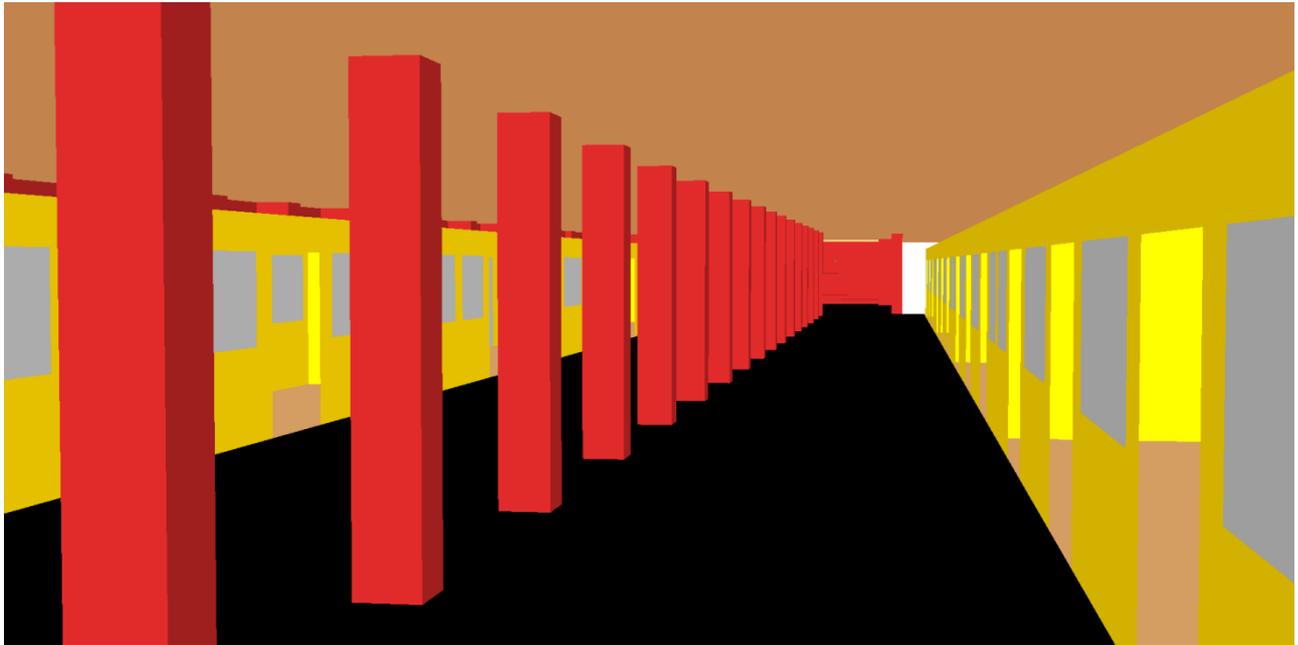


Abbildung 7: Ansicht der Bahnsteigebene mit Treppe

5.3 Ventilationsbedingungen

Auf Grundlage von Informationen der BVG herrscht im Bahnhof eine latente Hintergrundströmung von 0,5 m/s. Im Brandfall entsteht durch die dichtegradientbedingte Abströmung der warmen Luft nach oben eine Sogwirkung, durch die kältere Luft aus den Tunnelröhren angesaugt wird. Die dadurch entstehende brandinduzierte Strömung und die Hintergrundströmung überlagern sich. Um beide Strömungen simulieren zu können, wird an den Tunnelportalen an Stelle einer festen Geschwindigkeitsrandbedingung eine Druckrandbedingung definiert. Diese beträgt gemäß Bernoulli'scher Druckgleichung 0,08 Pa Überdruck am einen und 0,08 Pa Unterdruck am anderen Tunnelportal. In der Simulation ohne Brandszenario stellt sich damit eine gleichmäßige Strömungsgeschwindigkeit der Luft von 0,5 m/s ein.

Bezüglich der Richtung der Hintergrundströmung wurden keine Vorgaben gemacht. Daher wird die konservative Annahme getroffen, dass die Hintergrundströmung die Rauchgase in Richtung der Bahnsteigmitte transportiert. Für Brandszenario 1 wird die Hintergrundströmung daher von links nach rechts und für Brandszenario 2 von rechts nach links simuliert.

5.4 sonstige Randbedingungen

Die Umgebungstemperatur im Bahnhof und im Freien wird zu 20°C definiert. Windeinflüsse im Freien werden nicht modelliert.

Um die Auswirkungen der Wärmeleitung in Feststoffen auf die Ausbildung des Strömungsfeldes zu berücksichtigen, wurden für den Zug die relevanten Materialien Glas und Aluminium mit entsprechenden Stoffwerten modelliert. Vereinfachend wird der Rest des Bahnhofes mit den Stoffwerten von Beton modelliert. Die entsprechenden Stoffwerte sind in Tabelle 4 gelistet.

Tabelle 4: Stoffeigenschaften der modellierten Materialien

Material	Aluminium	Glas	Beton
Dichte [kg/m ³]	2700	2500	2500
Materialdicke [mm]	4	4	-
spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg·K)]	0,897	0,8	0,95
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] [8]	202	1,0	2,1

6 ERGEBNISSE

6.1 Allgemeines

Wie in Abschnitt 3 erläutert, wird nachfolgend lediglich die Erkennungsweite für die Bewertung der raucharmen Schicht in Betracht gezogen. Dafür wurden für alle Szenarien horizontale Ebenen der Erkennungsweiten zum relevanten Zeitpunkt 3,5 min (Abschluss Evakuierung des Bahnhofes) in einer Höhe von 2 m über dem Erdboden ausgewertet.

Für die Bewertung der Treppen zwischen Bahnsteig und der Umgebung werden gesondert Punktmessstellen ausgewertet.

Nachfolgend wird mit $t_{1=3,5}$ min der Zeitpunkt, zu dem der gesamte Bahnhof vollständig entfluchtet ist, bezeichnet.

In den Diagrammen ist zu beachten, dass die maximale Erkennungsweite innerhalb FDS nicht mit unendlich definiert ist, wie das bei komplett rauchfreier Luft theoretisch der Fall wäre. Hierfür wurde der Wert 30 m, der innerhalb der Simulationssoftware definiert ist, für rauchfreie Luft übernommen.

6.2 Plausibilitätsuntersuchungen

Simulationsdurchläufe zur Plausibilitätsuntersuchung haben gezeigt, dass das Modell plausible Ergebnisse erzeugt. Exemplarisch sind in Abbildung 8 und Abbildung 9 Felder der Geschwindigkeitsvektoren gezeigt. Insbesondere in Abbildung 8 ist gut zu erkennen, dass die Hintergrundströmung, die in diesem Szenario von links nach rechts definiert wurde, zu Beginn des Brandes die dominierende Strömung ist.

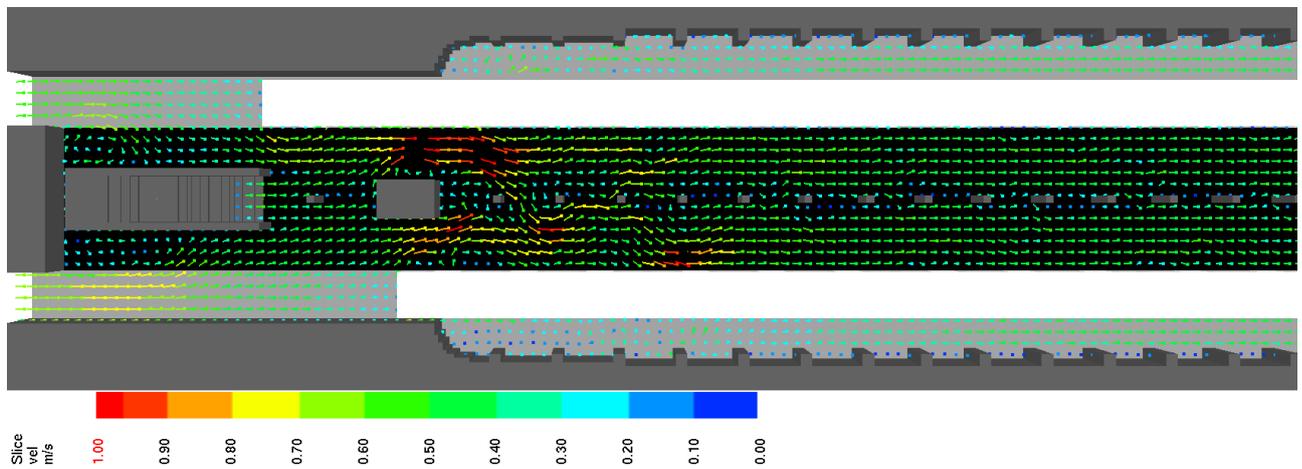


Abbildung 8: Geschwindigkeitsvektoren im südlichen Teil des Bahnsteigs (Ansicht von oben) 30 s nach Start der Simulation

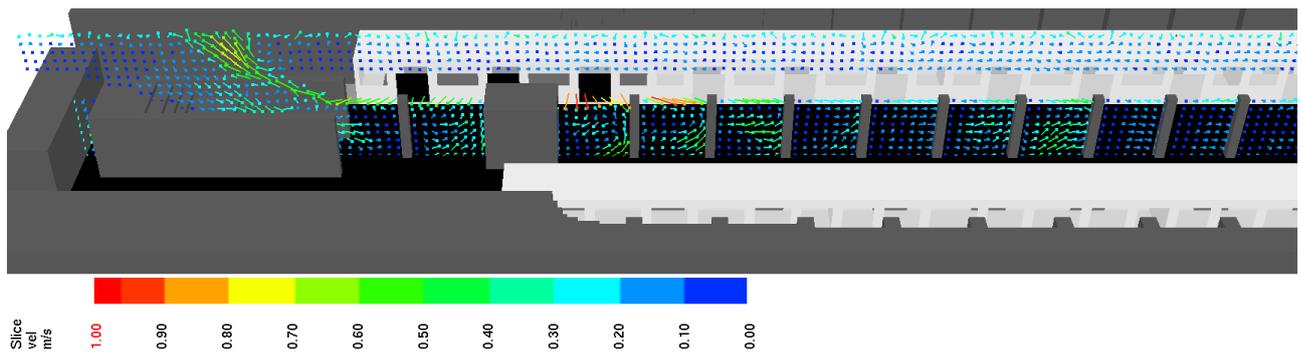


Abbildung 9: Geschwindigkeitsvektoren im südlichen Teil des Bahnsteiges (Ansicht von der Seite) 4 min nach Start der Simulation

6.3 Szenario 1

Die Erkennungsweite für Szenario 1 zum relevanten Zeitpunkt ist in Abbildung 10 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 befindet sich auf dem Bahnsteig neben dem brennenden Wagen ein kleines Areal, in dem die Erkennungsweite nicht mehr die geforderten 10 m beträgt. Da die Wege zu den Treppen eine Erkennungsweite über 10 m aufweisen, ist das Schutzziel zu diesem Zeitpunkt erfüllt. Es ist auch davon auszugehen, dass sich Personen nicht unmittelbar in Brandnähe aufhalten.

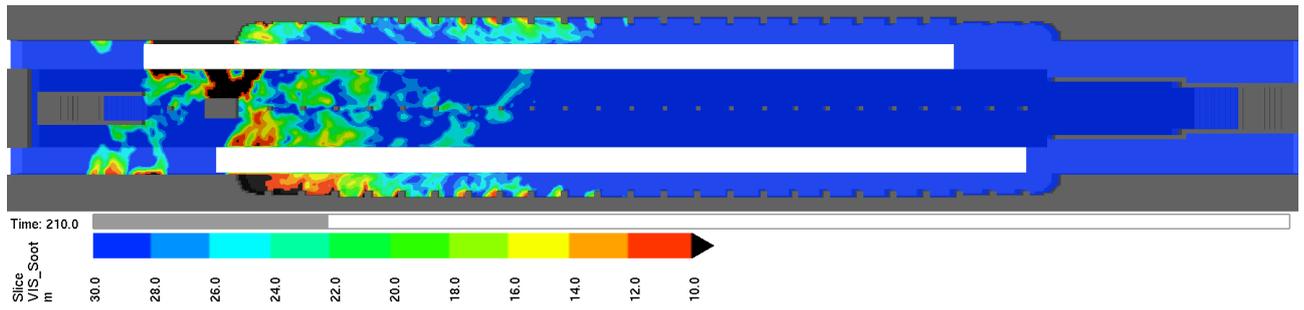


Abbildung 10: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 3,5 min (Szenario 1)

Der Bahnsteig ist nach ca. 10,5 min vollständig verraucht (Abbildung 11). Ab diesem Zeitpunkt ist der Aufenthalt auf dem Bahnsteig nicht mehr möglich.

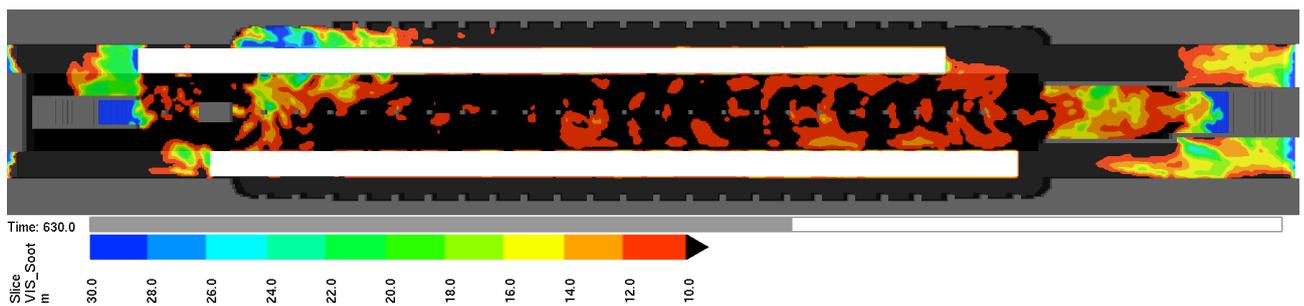


Abbildung 11: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 10,5 min (Szenario 1)

Die Ausgänge müssen bis zum Zeitpunkt t_1 das Schutzziel erfüllen. Ausgang I weist bis zum Zeitpunkt 11,7 min eine genügend raucharme Schicht auf, Ausgang II ist nach 10,6 min nicht mehr passierbar (Abbildung 12). Das Schutzziel ist damit bis zum Abschluss der Evakuierung vollständig erfüllt.

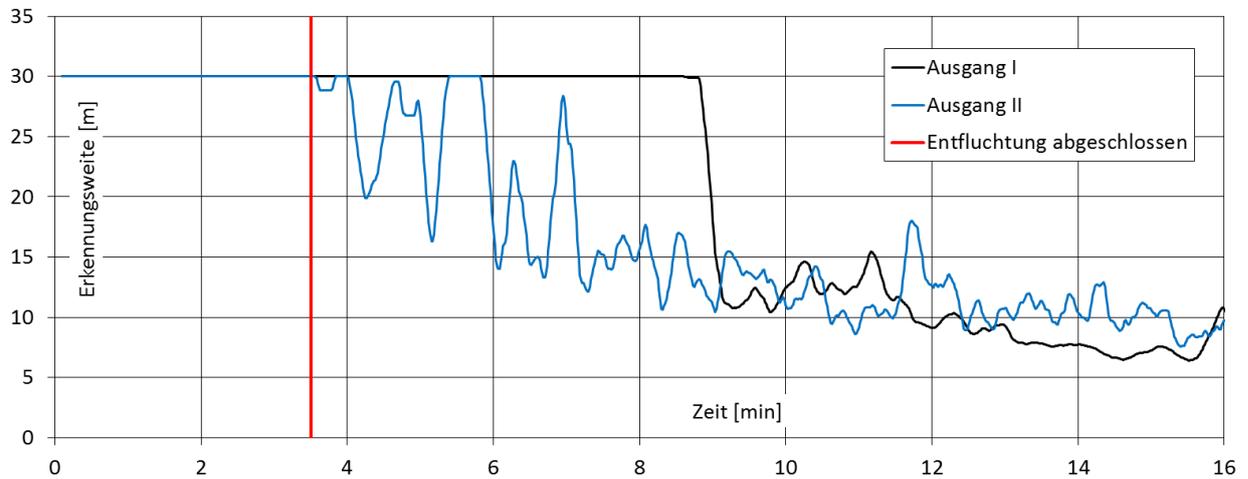


Abbildung 12: Erkennungsweite auf den Ausgängen (Szenario 1)

6.4 Szenario 2

Die Erkennungsweite für Szenario 2 zum relevanten Zeitpunkt ist in Abbildung 13 dargestellt. Zum Zeitpunkt t_1 befindet sich auf dem Bahnsteig neben dem brennenden Wagen ein kleines Areal, in dem die Erkennungsweite nicht mehr die geforderten 10 m beträgt. Da die Wege zu den Treppen eine Erkennungsweite über 10 m aufweisen, ist das Schutzziel zu diesem Zeitpunkt erfüllt. Es ist auch davon auszugehen, dass sich Personen nicht unmittelbar in Brandnähe aufhalten.

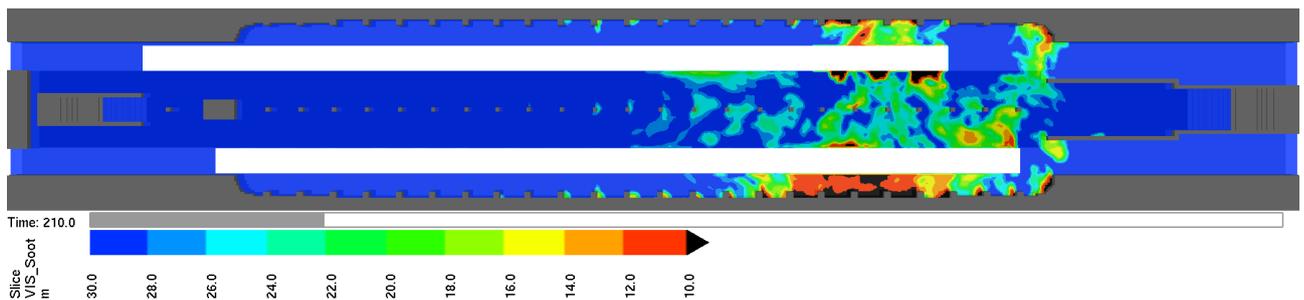


Abbildung 13: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 3,5 min (Szenario 2)

Der Bahnsteig ist nach ca. 8,5 min so stark verraucht (Abbildung 14), dass ein Aufenthalt ab diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich ist.

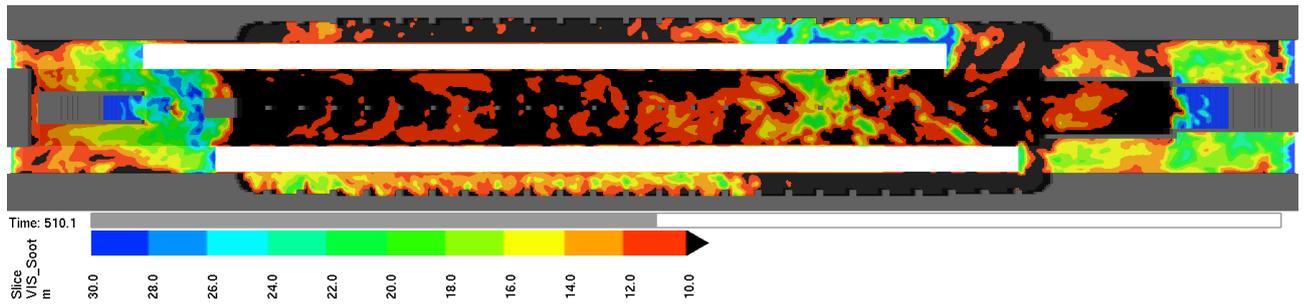


Abbildung 14: Erkennungsweite auf dem Bahnsteig nach 8,5 min (Szenario 2)

Die Ausgänge müssen bis zum Zeitpunkt t_1 das Schutzziel erfüllen. Ausgang II weist bis zum Zeitpunkt 9,6 min eine genügend raucharme Schicht auf, Ausgang I ist auch nach 16 min noch passierbar (Abbildung 15). Das Schutzziel ist damit bis zum Abschluss der Evakuierung vollständig erfüllt.

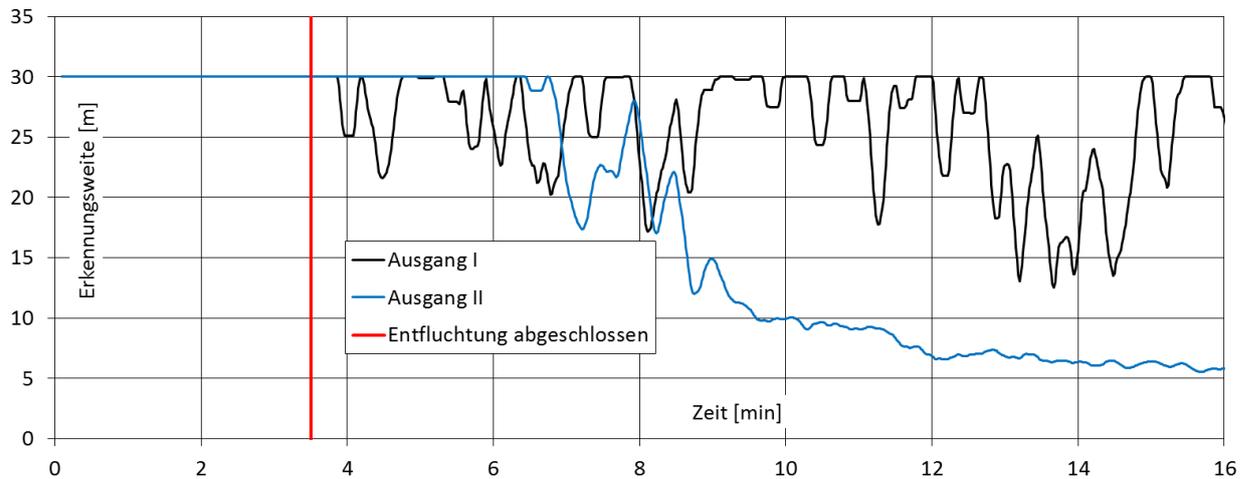


Abbildung 15: Erkennungsweite auf den Ausgängen (Szenario 2)

7 BEWERTUNG

Die Simulation eines brennenden Wagens an zwei verschiedenen Positionen auf dem Bahnsteig führt zu dem Ergebnis, dass in jedem der zwei Fälle eine raucharme Schicht für den gesamten zur Entfluchtung aller Bereiche notwendigen Zeitraum gegeben ist.

Damit ist mittels CFD-Simulation nachgewiesen, dass der Zeitraum der Verrauchung für den Bahnhof größer als die Zeit ist, die für die Entfluchtung benötigt wird. Die einzelnen Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Zeitpunkte, ab denen die jeweiligen Fluchtwege nicht mehr benutzbar sind

Szenario	Szenario 1	Szenario 2
Evakuierung Bahnhof abgeschlossen nach	3,5 min	
Bahnsteigebene	10,5 min	8,5 min
Treppe 1	11,7 min	>16 min
Treppe 2	10,6 min	9,6 min

LITERATUR

- [1] D. Hosser, vfdb-Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, 3. überarbeitete und ergänzte Auflage, 2015.
- [2] Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) - Bereich U-Bahn, Dienstanweisung zur Umsetzung des Brandschutzkonzepts der Berliner U-Bahn, 2016.
- [3] E. Wilk und R. Lessing, Untersuchungen zur Sichtweite im Rauch und zu Brandgaswirkungen auf den Menschen, vfdb-Zeitschrift 3, 168, 2004.
- [4] Fire Code Reform Centre, Fire Engineering Guidelines, New South Wales, Australia, 2000.
- [5] D. Purser, Toxicity assessment of combustion products and human behaviour in fires, 10. Int. Brandschutzseminar, vfdb, 2005.
- [6] W. Siegfried und J. Will, Die Verwendung des Verdünnungsverhältnisses zur Bewertung von Ergebnissen bei der Modellierung der Rauchableitung. vfdb-Zeitschrift 3, 101, 2002.
- [7] D. Gall, K. Bieske und S. Kokoschka, Evaluierung von Sicherheitsleitsystemen in Rauchsituationen, TU Ilmenau, 2003.
- [8] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 4. Edition, 2008.
- [9] S. Kokoschka, Zur Berechnung von Schwellenkontrasten für die Detektion einfacher Sehobjekte, Zts. LICHT 37. Jhg. Nr. 4, S. 305-308, 1988.
- [10] ISO 13571:2007, Life threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time available for escape using fire data, 2007.
- [11] G. Mulholland, Smoke Production and Properties, in: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, NFPA, Quincy, Massachusetts, 4th Edition, 2008.
- [12] Arnold et al, FDS Leitfaden, Version 1.0.0, 12. November 2015, 2015.
- [13] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt, „Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide,“ NIST Special Publication 1018, 2013.
- [14] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk und K. Overholt, „Fire Dynamics Simulator User's Guide,“ NIST Special Publication, 2013.

- [15] US Nuclear Regulatory Commission, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications - Volume 7: Fire Dynamics Simulator, NUREG-1824, 2007.
- [16] Brandschutz Consult Ingenieurgesellschaft Leipzig, Arbeitsblatt zur Brandsimulationsrechnung bezogen auf das Fahrzeug der Baureihe F74.

- Ende des Dokuments -

8 ANHANG

8.1 Berechnung der Entfluchtungsdauer nach NFPA

VBÜ-KBT1 - A. Seefeldt
07.03.2017

Anlage U-Bahnhof Rathaus Schöneberg
Seite 1 von 1

Zeitabschnitte der Räumung RS	Dauer (Sek.)	Dauer (Min.)
Gehzeiten der zuletzt fliehenden Personen:		
T1: Zeit zum Erreichen der Treppenaufgänge auf Bahnsteigebene : (ca. 40m / 1m/s)	63	1,1
T2: Zeit zum Überwinden des vertikalen Höhenunterschiedes zwischen Bahnsteigebene und Oberfläche (ca. 4,16m / 0,25 m/s):	17	0,3
T3: Gehzeit an der Oberfläche (ca. 10m / 1 m/s):	10	0,2
Schleusungszeiten an den Treppenaufgängen:		
S: Schleusungszeit an der Treppe vom Bahnsteig zur Oberfläche 2,9 Minuten (siehe Nebenrechnung)		
Reaktionszeit t2 = 2 Minuten plus längste Gehzeit auf Bahnsteigebene (1,1 Minuten) ergibt 3,1 Minuten und ist somit maßgebend.		
Wartezeiten an den Treppenaufgängen:		
Treppenaufgang Bahnsteigebene: $W = (S-T1) = (3,1 - 1,1)$ min	120	2,0
Räumungszeit: $RZ=T1+T2+T3+W$	210	3,5

Nebenrechnung zur Schleusungszahl S: (S=Personenzahl vor der Treppenanlage / Kapazität der Treppenanlage in Personen pro Minute)

Ausgang I: Kapazität feste Treppe 3,90m breit $\rightarrow 3,90m/0,6m \rightarrow 6$ Fluchtspuren $\rightarrow 6 \cdot 33 = 198$ Personen/Minute

Neuer Ausgang II: Kapazität feste Treppe 2,3 m breit $\Rightarrow 2,3 m/0,6m \Rightarrow 3$ Fluchtspuren $\Rightarrow 3 \cdot 33 = 99$ Personen/Minute

S: 570 P / 198 P/min = **2,9 Minuten**

S: 280 P / 99 P/min = **2,8 Minuten**