

Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D - Sicherheitstechnik



Lehr- und Forschungsgebiet Computersimulation für
Brandschutz und Fußgängerverkehr

Bachelor Thesis

Parameterstudie zu Rauchschutz-Druck-Anlagen in
Sicherheitstreppe

Name:	Sven Schmidt
Studienrichtung:	Sicherheitstechnik, Bachelor of Science
Hochschullehrer:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Armin Seyfried
Betreuer:	Andreas Meunders, M.Sc.
Ausgabe:	01.01.2012
Abgabe:	12.04.2012

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind.

Sven Schmidt

Wuppertal, den 12.04.2012

Abstract

In dieser Arbeit geht es um die Betrachtung von Rauchschutz-Druck-Anlagen in innenliegenden Sicherheitstreppenräumen. Dabei sollen die baurechtlichen Vorgaben überprüft und herausgefunden werden, ob Abweichungen möglich sind. Die Studie wurde mit dem CFD-Modell Fire Dynamics Simulator durchgeführt. Es wurde ein realitätsnahes Szenario definiert, ein Brandszenario erstellt und dieses im CFD-Modell umgesetzt. Innerhalb der festgelegten Parameter in diesem Szenario findet eine Betrachtung der veränderlichen Parameter Strömungsgeschwindigkeit an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum und der Deckenhöhe hinsichtlich der Rauchfreihaltung des Vorraumes des Treppenraumes statt.

Es zeigt sich, dass sich größere Deckenhöhen begünstigend auf die Rauchfreihaltung des Vorraumes auswirken. Abweichungen von den baurechtlichen Vorgaben hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeit sind in diesem Fall in geringem Maße möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Brandschutztechnische und baurechtliche Vorgaben.....	2
	2.1 Brandschutz	2
	2.2 Sicherheitstreppe nräume	5
	2.3 Funktionsprinzip einer Rauchschutz-Druck-Anlage (RDA)	6
	2.4 Praktische Umsetzung und Probleme im Bestand.....	8
3	Brandschutzingenieurmethoden.....	10
	3.1 Das CFD-Modell Fire Dynamics Simulator.....	11
	3.2 Bemessungsbrandverläufe nach VDI 6019-1	15
4	Berechnungen mit FDS	21
	4.1 Einfluss der Zellengröße auf die Berechnungen	21
	4.2 Grundsätzliche Anforderungen an die Eingabedatei.....	24
	4.3 Festgelegte Parameter	26
	4.4 Geometrische Randbedingungen	30
	4.5 Veränderliche Parameter.....	34
	4.6 Brandszenario.....	35
5	Darstellung der Ergebnisse	40
	5.1 Simulationsrechnungen mit 0,50 m/s Strömungsgeschwindigkeit.....	41
	5.2 Simulationsrechnungen mit 1,00 m/s Strömungsgeschwindigkeit.....	45
	5.3 Simulationsrechnungen mit 1,50 m/s Strömungsgeschwindigkeit.....	47
	5.4 Simulationsrechnungen mit 2,00 m/s Strömungsgeschwindigkeit.....	54
	5.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	55
6	Fazit	59
	Tabellenverzeichnis	60
	Abbildungsverzeichnis.....	61
	Literatur	63
	Anhang	65

1 Einleitung

Das Themengebiet des Brandschutzes ist im Bauwesen ein unverzichtbarer Bestandteil. Es besteht aus mehreren Teilgebieten, welche in ihrer Kombination dem Schutz und der Erhaltung von Menschenleben und Sachwerten dient. In den meisten Fällen kann ein Brandereignis nicht ausgeschlossen werden, daher gibt es in Deutschland diverse baurechtliche Vorgaben für bauliche Anlagen. In diesen Vorgaben werden z.B. Mindestanforderungen an Baustoffe und Bauteile, aber auch an Art und Umfang der Rettungswege gestellt.

In der heutigen Zeit werden Bauwerke in ihrer Bauart und Nutzung immer komplexer. Eine pauschale Bewertung der brandschutztechnischen Einrichtungen ist nicht immer möglich. Durch die fortlaufende Entwicklung geeigneter rechnergestützter Nachweisverfahren kann trotz Abweichungen von den baurechtlichen Vorgaben der erforderliche Nachweis geführt werden.

Diese Arbeit beschreibt eine Studie, in der die gesetzlichen Vorgaben für einen innenliegenden Sicherheitstreppenraum und die darin befindliche Rauchschutz-Druck-Anlage (RDA) betrachtet und bewertet werden soll. Es soll mit Hilfe von Brandschutzingenieurmethoden eine Abweichung der baurechtlichen Vorgaben untersucht werden. Weiterhin sollen die Parameter für eine Untersuchung eingegrenzt und ein geeignetes Szenario definiert werden. Dazu gehören die Definitionen von geometrischen Randbedingungen, geeigneten Brandszenarien sowie die Festlegung der Auswertungskriterien anhand der baurechtlichen Vorgaben und diverser Regelwerke.

Ziel ist es, eine Aussage zu treffen, ob und wenn ja, unter welchen Umständen eine Abweichung von den baurechtlichen Vorgaben möglich ist.

2 Brandschutztechnische und baurechtliche Vorgaben

2.1 Brandschutz

Das Themengebiet des Brandschutzes ist ein wichtiger Aspekt, um Menschen, Tiere und Sachwerte vor einer Schädigung durch einen Brand zu schützen. Der Begriff des Brandschutzes lässt sich zunächst in die Bereiche vorbeugender Brandschutz und organisatorischer Brandschutz unterteilen. Dabei fallen in den Bereich vorbeugender Brandschutz der bauliche Brandschutz und der anlagentechnische Brandschutz, in den Bereich des organisatorischen Brandschutzes der betriebliche Brandschutz und der abwehrende Brandschutz. In Abbildung 2.1 sind die wesentlichen Aspekte des Brandschutzes sowie beispielhafte Maßnahmen der Themengebiete dargestellt.

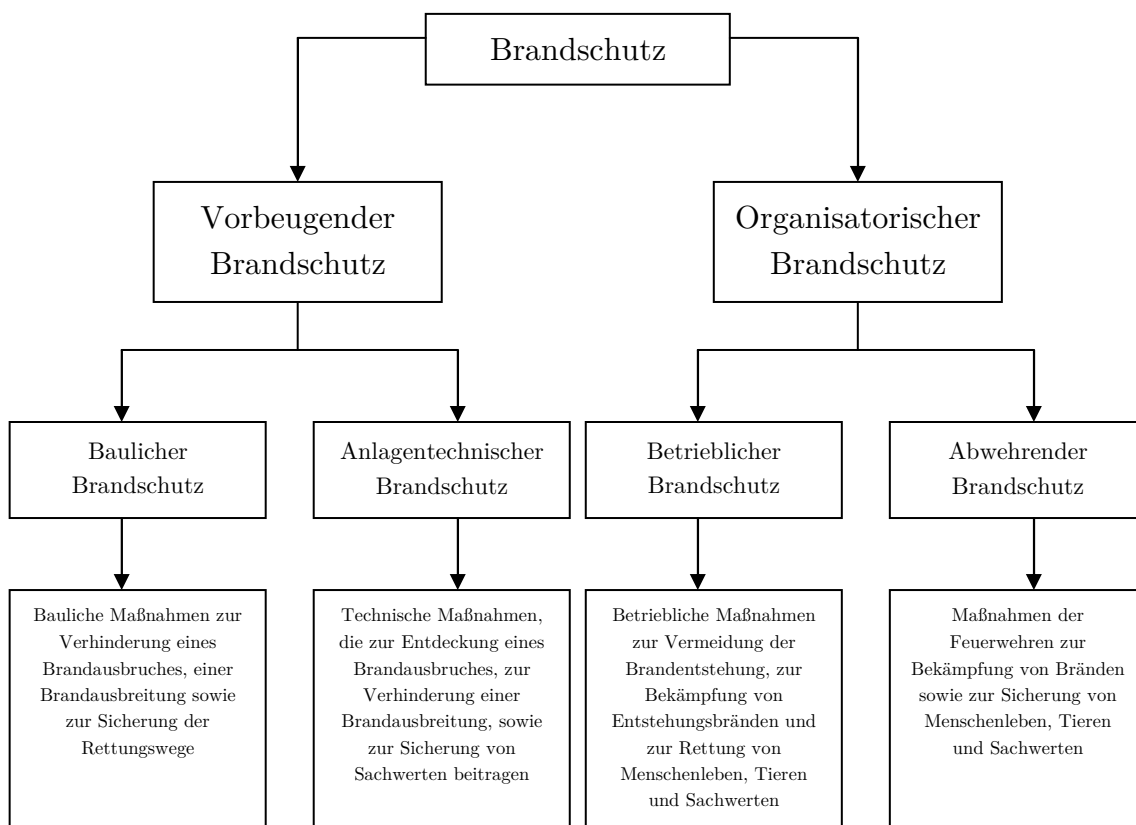


Abbildung 2.1: Kategorisierung des Brandschutzes [9]

Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, ist der bauliche Brandschutz ein Teil des Gesamtsystems, welches das Ziel hat, die Entstehung eines Brandes zu verhindern aber auch die Folgen eines Brandereignisses zu minimieren.

Es existieren diverse bauordnungsrechtliche Vorschriften und Regelwerke, durch die diese Schutzziele sichergestellt werden sollen. Diese Vorschriften und Regelwerke sind das Ergebnis eines historischen Prozesses, bei der durch Weiterentwicklung und Harmonisierung die aktuellen Gesetzesgrundlagen entstanden sind. Das Baurecht wird in Deutschland durch die Bundesländer geregelt. Von der Bauministerkonferenz wurde daher in der Arbeitsgemeinschaft „ARGEBAU“ die Musterbauverordnung (MBO) [7] erstellt. Die MBO dient als Vorlage für die Umsetzung des Baurechts auf Landesebene und ermöglicht einen gewissen Grad der Harmonisierung.

Für das Bundesland NRW wird das Baurecht durch die Bauordnung NRW (BauO NRW) [2] umgesetzt.

In der BauO NRW finden sich zunächst allgemeine Anforderungen an die Beschaffenheit von Bauwerken. In § 3 heißt es allgemein:

„(1) Bauliche Anlagen sowie andere Anlagen und Einrichtungen [...] sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit oder Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit oder die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet wird [2].“

Weiterhin werden innerhalb der Bauordnung vier grundlegende Schutzziele des Brandschutzes festgelegt. Gemäß § 17 Absatz 1 BauO NRW [2] müssen bauliche Anlagen so beschaffen sein, dass:

- der Entstehung eines Brandes vorgebeugt wird,
- der Ausbreitung von Rauch und Feuer entgegengewirkt wird,
- die Rettung von Menschen und Tieren im Brandfall und
- wirksame Löscharbeiten möglich sind.

In Absatz 2 wird allgemein auf die Anforderungen an Baustoffe hinsichtlich ihrer Brennbarkeit und in Absatz 3 auf die Anforderungen an Flucht- und Rettungswege eingegangen [2].

Zusätzlich zur BauO NRW existieren Verordnungen für besondere bauliche Anlagen, wie z.B. die Verordnung über Bau und Betrieb von Sonderbauten (SBauVO) [3]. Diese gilt beispielsweise für Versammlungsstätten oder Hochhäuser. In der SBauVO werden für spezielle Gebäude wie z.B. Hochhäuser oder Versammlungsstätten aufgrund eines erhöhten Gefährdungspotenzials hinsichtlich eines Brandereignisses besondere Anforderungen an den Brandschutz definiert. Durch die baulichen Voraussetzungen von Hochhäusern ist eine detailliertere Betrachtung und Bewertung hinsichtlich des Brandschutzes erforderlich. Darunter fallen unter anderem sowohl die Anforderungen an bestimmte Bauteile und Baustoffe als auch Anforderungen an die Flucht- und Rettungswege. In der BauO NRW wird in § 17 Absatz 3 gefordert, dass für jede Nutzungseinheit zwei Rettungswege vorhanden sein müssen [2]. Davon muss für den Fall, dass die Nutzungseinheit nicht ebenerdig ist ein Rettungsweg über eine notwendige Treppe führen. Der zweite Rettungsweg kann entweder über die Rettungsgeräte der Feuerwehr sichergestellt werden oder über eine zweite notwendige Treppe führen. Jede notwendige Treppe muss dabei innerhalb eines notwendigen Treppenraumes liegen [2]. Eine Ausnahme bietet dabei die Einrichtung eines Treppenraumes, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können (Sicherheitstreppenraum). In diesem Fall reicht ein Rettungsweg über diesen Treppenraum aus.

Diese Anforderungen sind für Hochhäuser nicht ausreichend. Für die Flucht und Rettungswege von Hochhäusern müssen aufgrund des erhöhten Risikopotenzials im Brandfall und der Höhe > 22 m gemäß § 94 SBauVO zwei voneinander unabhängige bauliche Rettungswege vorhanden sein [3]. Befinden sich diese Treppenräume dabei im Inneren des Gebäudes, so müssen sie nach § 95 Absatz 1 als

Sicherheitstreppe nräume ausgebildet sein (innenliegende Sicherheitstreppe nräume) [3]. Sollte das Gebäude eine Höhe von 60 m überschreiten, so muss nach § 95 Absatz 2 jeder notwendige Treppenraum als Sicherheitstreppe nraum ausgebildet sein [3].

Vor den Türen von innenliegenden Sicherheitstreppe nräumen muss zudem gemäß §95 SBauVO [3] ein Vorraum angeordnet sein, in den Feuer und Rauch nicht eindringen können. Weiterhin muss der Abstand der Türen von Treppenraum und Vorraum mindestens 3 m betragen.

2.2 Sicherheitstreppe nräume

Ein Sicherheitstreppe nraum bezeichnet einen notwendigen Treppenraum im Gebäude, der im Brandfall eine sichere Entfluchtung der in den Nutzungseinheiten befindlichen Personen gewährleistet. Ein Sicherheitstreppe nraum kann dabei außerhalb des Gebäudes liegen, über einen Balkon zugänglich sein oder im Inneren des Gebäudes liegen.

Zur Erreichung des Schutzzieles muss in einem innenliegenden Sicherheitstreppe nraum eine Rauchschutz-Druck-Anlage (RDA) installiert werden, welche im Brandfall über eine automatische Brandmeldeanlage in Kraft gesetzt wird. Die grundsätzliche Anforderung an die RDA in innenliegenden Sicherheitstreppe nräumen besteht gemäß § 101 SBauVO [3] darin, dass Feuer und Rauch nicht in den Treppenraum oder in den Vorraum eindringen können. Zu diesem Zweck muss die mittlere Strömungsgeschwindigkeit an den geöffneten Türen zwischen Treppenraum und Vorraum, sowie zwischen Vorraum und notwendigem Flur oder der Nutzungseinheit 2,0 m/s betragen. Die RDA muss im Brandfall unmittelbar nach ihrer Aktivierung den erforderlichen Luftstrom fördern.

Die Anlage muss gemäß SBauVO so bemessen sein, dass die Türöffnungskraft, gemessen an der Türklinke, 100 N nicht überschreitet [3].

Für die Bemessung einer Rauchschutz-Druck-Anlage können weitere Regelwerke verwendet werden, wie z.B. der RDA-Anwenderleitfaden oder die DIN EN 12101-6. Diese Regelwerke beinhalten diverse Berechnungsgrundlagen und Vorgaben für die Einrichtung solcher Anlagen.

2.3 Funktionsprinzip einer Rauchschutz-Druck-Anlage (RDA)

Das Funktionsprinzip einer RDA beruht auf der Einbringung eines Luft-Volumenstromes in den innenliegenden Sicherheitstreppenraum. Zu diesem Zweck wird an der Außenwand des Gebäudes eine Ansaugereinrichtung installiert, über die bei Aktivierung Frischluft aus der Umgebung angesaugt und über ein Lüftungs-Kanalsystem zur Einströmöffnung in den Sicherheitstreppenraum geleitet wird. Ein wesentlicher Bestandteil der Planung besteht darin, einen geeigneten Standort für die Ansaugöffnung zu bestimmen. Er muss so gewählt werden, dass eine Ansaugung von Rauch in das System nicht erfolgen kann. Weiterhin ist gefordert, dass die Einblasöffnung im Treppenraum so angeordnet ist, dass der Luftstrom immer entgegen der Fluchtrichtung strömt. Durch den eingebrachten Volumenstrom entsteht im Sicherheitstreppenraum ein Überdruck. Dieser Überdruck erzeugt bei der Öffnung einer Tür im Treppenraum einen Luftstrom, der aus dem Treppenraum und dem Vorraum ins Brandgeschoss abströmt. Hierfür muss zusätzlich vor dem Vorraum im Bereich des Flures oder der Nutzungseinheit eine Abströmöffnung geschaffen werden, die in der Lage ist, den eingebrachten Luftstrom über einen Schacht oder ins Freie abzuführen. Durch diesen Luftstrom soll verhindert werden, dass Rauch durch die geöffnete Tür in den Treppenraum eindringt. Um die Funktionalität zu gewährleisten, muss die Anlage so bemessen sein, dass bei geöffneten Türen zwischen Treppenraum, Vorraum und Flur ein ausreichender Luftstrom vorhanden ist, um den Raucheintritt zu verhindern.

Um die maximale Türöffnungskraft von 100 N gemäß § 101 SBauVO [3] nicht zu überschreiten, muss die Möglichkeit einer Druckentlastung im Treppenraum gegeben sein. Die Umsetzung kann beispielsweise durch eine druckgeregelte Klappe im oberen Bereich des Treppenraumes erfolgen.

Im Bereich der Türstürze der Türen zwischen Treppenraum und Vorraum sowie zwischen Vorraum und angrenzendem Raum sind zusätzliche Sicherheitseinrichtungen eingebaut. Durch eine im Brandfall öffnende Brandschutzklappe zwischen Treppenraum und Vorraum sowie eine Kaltrauchsperr zwischen Vorraum und angrenzendem Raum wird dafür gesorgt, dass auch bei geschlossenen Türen eine Abführung von eingetragem Rauch möglich ist.

Abbildung 2.2 zeigt eine schematische Darstellung eines Sicherheitstreppenraumes aus dem RDA-Anwenderleitfaden [8]. Im rechten Teil der Abbildung ist der Treppenraum abgebildet. Die blauen Pfeile stellen den von der RDA erzeugten Luftstrom dar. Die Druckentlastung erfolgt durch einen Schacht im linken Teil.

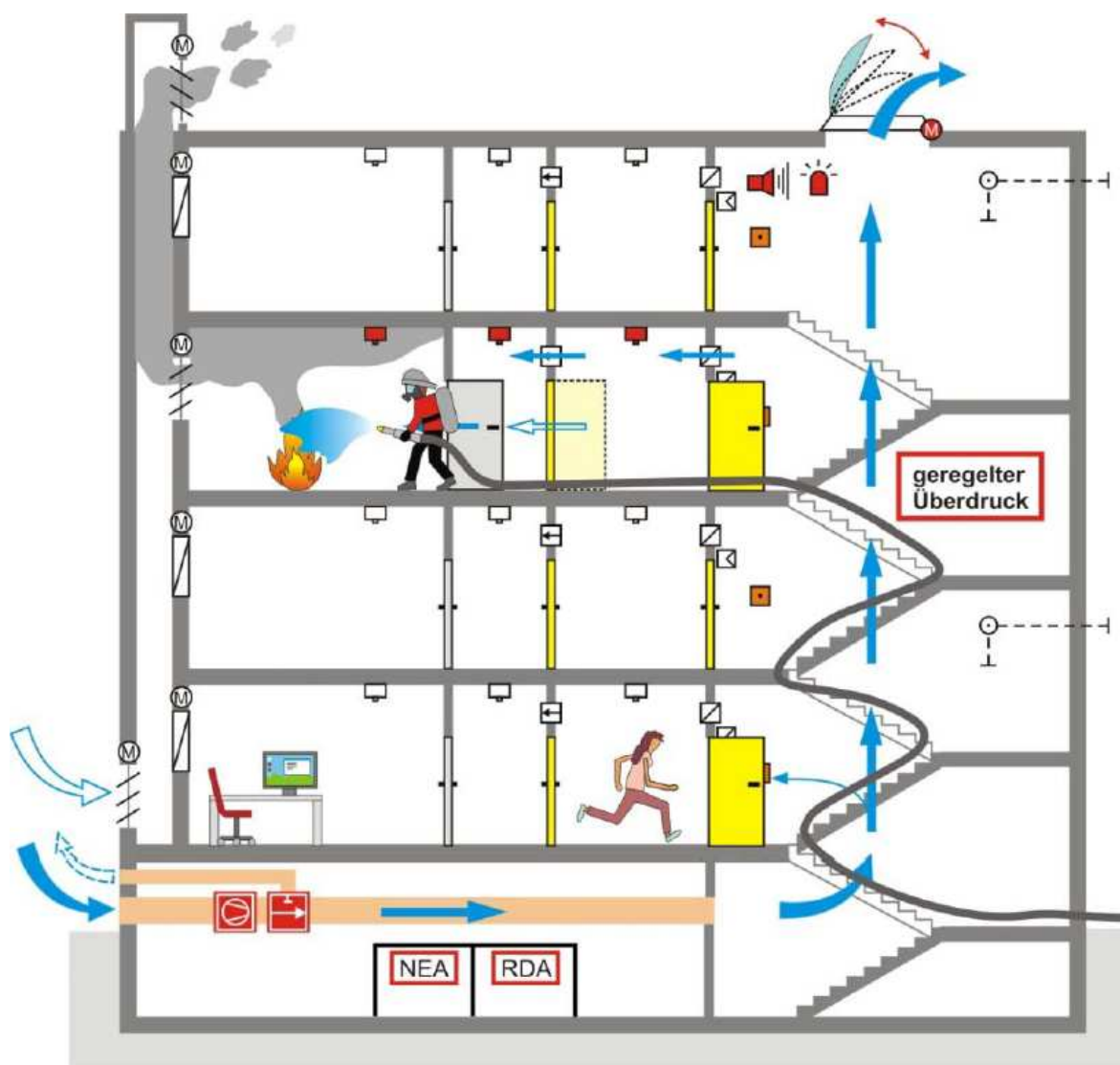


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Einrichtungen einer RDA [8]

2.4 Praktische Umsetzung und Probleme im Bestand

Die beschriebenen Anforderungen an einen innenliegenden Sicherheitstrepfenraum sind in der Praxis nicht immer umsetzbar. Die Schwierigkeiten bei Umsetzung der baurechtlichen Mindestvorgaben liegen vor allem in Bestandsgebäuden. Im Rahmen von Umbaumaßnahmen oder Nutzungsänderungen ist es oft notwendig, eine brandschutztechnische Neubewertung des Gebäudes vorzunehmen. Dabei müssen die geänderten Anforderungen an Flucht- und Rettungswege berücksichtigt werden, was in manchen Fällen eine Rauchschutz-Druck-Anlage betrifft. Es gestaltet sich in der Regel schwierig, eine solche Anlage in einem bestehenden Gebäude einzurichten, da

die für die Anlage erforderlichen Zuluft-Volumenströme, sowie die Abströmöffnung sichergestellt werden müssen. Die Neueinrichtung einer solchen Anlage macht unter Umständen enorme Umbaumaßnahmen erforderlich. Um den erforderlichen Nachweis der Rauchfreihaltung zu führen, können ingenieurmäßige Berechnungsverfahren und Nachweise angewendet werden.

3 Brandschutzingenieurmethoden

Durch die in Kapitel 2 beschriebenen Probleme in bestehenden Hochhäusern ist es oft nicht möglich, die brandschutztechnischen Vorgaben für einen innenliegenden Sicherheitstreppenraum einzuhalten. Die BauO NRW ermöglicht für diesen Fall gemäß § 54 Absatz 1 eine Erleichterung für den Einzelfall:

„Erleichterungen können im Einzelfall gestattet werden, soweit es der Einhaltung von Vorschriften

a) wegen der besonderen Art oder Nutzung baulicher Anlagen und Räume oder

b) wegen der besonderen Anforderungen nach Satz 1

nicht bedarf [2].“

Das durch die Bauordnung geforderte Schutzniveau muss jedoch in jedem Fall erhalten bleiben. Um den Nachweis über die Erreichung dieses Schutzniveaus trotz einer Erleichterung nach § 54 BauO [2] zu führen, können Brandschutzingenieurmethoden zum Einsatz kommen. Ingenieurmethoden des Brandschutzes sind „ein Ansatz zur Anwendung ingenieurmäßiger Grundsätze zur Bewertung des erforderlichen Brandsicherheitsniveaus und zur Bemessung und Berechnung der notwendigen Schutzmaßnahmen [2].“ Die Brandschutzingenieurmethoden sind demnach ein modernes Werkzeug, mit dessen Hilfe man vielseitig besondere Problemstellungen lösen kann, um das geforderte Schutzniveau trotz Abweichungen zu garantieren. Ein Beispiel für die Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden ist die Verwendung von rechnergestützten CFD-Modellen (Computational Fluid Dynamics) oder eines Zonenmodelles zur Nachweisführung.

Bei rechnergestützten CFD-Modellen gibt es verschiedene Softwarelösungen. Es gibt sowohl kostenpflichtige Programme wie Ansys Fluent oder CFX, aber auch frei verfügbare Programme wie FDS oder CFAST. Die verschiedenen Programme

verfügen über unterschiedliche Rechenansätze. Bei CFD-Modellen wird der zu betrachtende Bereich in ein dreidimensionales Modell übertragen, welches sich in viele kleine und miteinander vernetzte Gitterzellen aufteilt. Dabei werden für jede dieser Zellen die strömungstechnischen Aspekte mit Hilfe numerischer Differentialgleichungen in kleinen Zeitschritten berechnet. Diese Rechenmethode ist sehr viel aufwändiger als die Berechnung in einem Zonenmodell und erfordert eine hohe Rechnerkapazität.

Je nach Komplexität des jeweiligen Programms werden vom Anwender dafür fundierte Kenntnisse über das jeweilige Berechnungsmodell, die Art der Berechnungen und die daraus resultierenden Mindesteingaben gefordert.

3.1 Das CFD-Modell Fire Dynamics Simulator

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem CFD-Modell Fire Dynamics Simulator (FDS) gearbeitet. Dieses Simulationsmodell wurde am National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg, USA entwickelt. Die Software wurde in der Version 5.5.3 verwendet. Zusätzlich zum CFD-Modell beinhaltet die Software das Visualisierungstool Smokeview, welches dem Anwender ermöglicht, die Berechnungen im 3D-Modell zu visualisieren und auszuwerten.

Das CFD-Modell FDS berechnet numerisch eine Form der Navier-Stokes-Gleichung. Grundsätzlich wird ein hydrodynamisches Modell verwendet, welches hauptsächlich auf die Lösung dieser Gleichung für aufwärtsgetriebene turbulente Strömungen mit geringen Geschwindigkeiten ausgelegt ist. Zudem verfügt das Programm über weitere Modelle und Berechnungsalgorithmen, mit denen sich unter anderem die Ausbreitung von Rauchpartikeln und Feuer inkl. Wärmetransport numerisch berechnen lassen. Bei der Berechnung werden die jeweiligen Gleichungen näherungsweise in einem dreidimensionalen, rechteckigen Gitter gelöst. Die Zeitschritte betragen 0,1 s und kleiner.

Bei der Berechnung von z.B. der Verbrennung entstehen Luftströmungen. Die durch die thermischen Bedingungen aufwärts getrieben werden. Dadurch entstehen Verwirbelungen im Luftstrom, die in jeder Größe auftreten können und sich räumlich und zeitlich nach dem Zufallsprinzip ausbreiten. Diese Verwirbelungen werden als Turbulenzen bezeichnet.

Für die meisten Anwendungsbereiche wird für die Berechnung von Turbulenzen die so genannte Large-Eddy-Simulation (LES) verwendet. Bei der Berechnung mittels LES geht man davon aus, dass die großen Wirbel der turbulenten Strömungen das maßgebliche Kriterium für die Berechnungen der weiteren Prozesse sind. Für diese Art der Berechnung werden die großen Turbulenzen in jeder Zelle des Rechengitters direkt berechnet, die kleineren Turbulenzen werden modelliert.

Bei einer Verkleinerung des Rechengitters ist es möglich, eine Direkte Numerische Simulation (DNS) durchzuführen. Bei dieser Methode werden die Berechnungen auf sämtlichen Längenskalen direkt durchgeführt. Für die meisten Simulationen ist es jedoch nicht möglich, eine solche Verkleinerung des Rechengitters vorzunehmen, da diese Verkleinerung aufgrund der erhöhten Zellenanzahl einen enormen Bedarf an Rechnerkapazität erfordern würde. Daher ist eine Berechnung über LES die gebräuchlichere Methode in FDS.

Das Programm FDS beinhaltet ein Verbrennungsmodell, welches aus drei miteinander verknüpften Prozessen besteht. Der erste Prozess ist das Pyrolysemodell, welches die Entstehung von Gaskomponenten an der Oberfläche von flüssigen oder festen Stoffen nachbildet. Der zweite Prozess berechnet die Verbrennungsreaktionen in der Gasphase, wo der brennbare gasförmige Stoff mit dem vorhandenen Luftsauerstoff chemisch reagiert. Der dritte Prozess beschreibt die aus der Verbrennungsreaktion entstandene Wärmestrahlung auf die umliegenden Objekte. Die Simulation eines Brandes beruht somit auf den miteinander

interagierenden Prozessen des Pyrolysemodells, der Verbrennungsreaktion in der Gasphase (Mixture-Fraction-Modell) und der resultierenden Wärmestrahlung. Die bei der Verbrennungsreaktion in der Gasphase freigesetzte Wärme resultiert direkt aus der Massenverlustrate des Brennstoffes, die durch das Pyrolysemodell berechnet wird. Die Massenverlustrate ist dabei abhängig vom konvektiven und radiativen Wärmestrom auf der Brennstoffoberfläche. Daraus ergibt sich der in Abbildung 3.1 dargestellte Regelkreis.

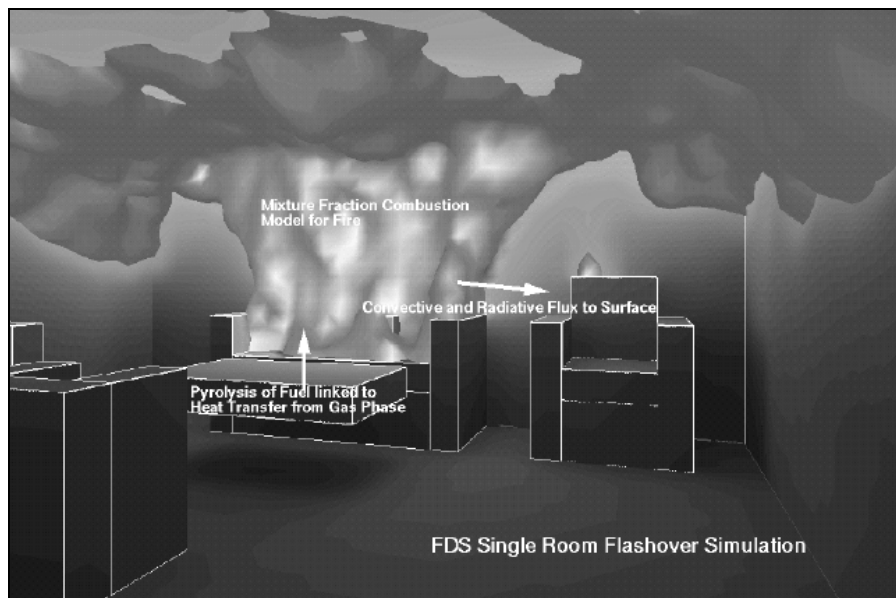


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der FDS-Simulation eines Raumbrandes [6]

Für die Abbildung eines Brandereignisses ist es möglich, für jedes Material die brandtechnologischen relevanten Kennwerte zu definieren, sodass das Verbrennungsmodell dieses näherungsweise berechnen kann. Die Werte der Materialien lassen sich jedoch nicht eindeutig bestimmen, sodass immer eine gewisse Ungenauigkeit bei der Berechnung besteht.

Es ist wichtig zu beachten, dass FDS jeweils nur eine einzige Verbrennungsreaktion in der Gasphase berechnet, da eine Berechnung von mehreren gleichzeitig stattfindenden Verbrennungsreaktionen sehr aufwändig ist. Gibt man verschiedene brandtechnologisch relevante Materialkennwerte vor, so wird deren Abbrandrate von

FDS automatisch so angepasst, dass die resultierende Wärmefreisetzungsrates trotz dem korrekt abgebildet wird. Für die meisten Simulationen ist es einfacher eine feste Wärmefreisetzungsrates vorzugeben.

Bei einer LES-Simulation ist es in der Regel nicht möglich die diffusionsgesteuerten Mischungsprozesse zwischen Brennstoff und Sauerstoff korrekt abzubilden. Daher wird sie mit dem Mixture-Fraction-Modell nachgebildet. Das Modell beruht auf der Grundlage, dass der Mischungsprozess zwischen dem brennbaren Stoff und dem Luftsauerstoff das zeitbestimmende Kriterium ist, da der Mischungsprozess der beiden Stoffe in der Regel langsamer abläuft als die eigentliche Verbrennungsreaktion (schnelle chemische Reaktion). Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Verbrennungsreaktion unmittelbar nach der Vermischung des brennbaren Stoffes mit dem Luftsauerstoff vollständig stattfindet.

Es besteht die Möglichkeit, für das Pyrolysemodell entweder eine feste Wärmefreisetzungsrates zu definieren oder diese über die definierten Materialeigenschaften zu berechnen. Für die meisten Szenarien ist es einfacher, die Wärmefreisetzungsrates fest vorzugeben. Bei dieser Variante wird eine flächenbezogene Wärmefreisetzungsrates (HRRPUA – heat release rate per unit area) in kW/m^2 vorgegeben, mit deren Hilfe es möglich ist, den Brandverlauf unmittelbar zu steuern. Es erfolgt eine spontane Zündung an der Oberfläche und der Abbrand erfolgt nach den vorgegebenen Parametern. Wird über die Materialeigenschaften eine Zündtemperatur definiert, so erfolgt dieser Ablauf erst, wenn die definierte Oberflächentemperatur erreicht ist. Um den Brandverlauf möglichst realistisch definieren zu können ist es nötig, im Vorfeld ein geeignetes Brandszenario zu definieren.

3.2 Bemessungsbrandverläufe nach VDI 6019-1

Eine Möglichkeit ein solches Brandszenario zu definieren besteht auf Grundlage der VDI-Richtlinie 6019 Blatt 1 – Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden VDI 6019-1 [11] oder der DIN EN 1991-1-2/Nationales Anwendungsdokument [4]. Diese Dokumente beinhalten Richtwerte und Vorgaben zu verschiedenen Eingabeparametern für die Erstellung von Brandverlaufskurven, welche anschließend für die Berechnungen verwendet werden können.

Die VDI 6019-1 beinhaltet in Kapitel 3 ein Rechenverfahren zur Erstellung von Brandverlaufskurven für die Bemessung von Anlagen zur Rauchfreihaltung. Diese Brandverlaufskurven können jedoch gemäß Kapitel 1 Punkt 1 auch für andere brandschutztechnische Nachweise verwendet werden [11].

Für die Erstellung eines Brandszenarios nach VDI 6019-1 wird ein Verfahren vorgestellt, anhand dessen man mit verschiedenen Eingabeparametern eine Brandverlaufskurve erstellen kann. Diese visualisiert und charakterisiert die verschiedenen Brandphasen durch den zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Brandverlaufskurven eine theoretische Überlegung als Basis für die Simulationsberechnungen darstellen und der tatsächliche Brandverlauf von den Vorgaben abweichen wird.

Zur Berechnung des zeitlichen Verlaufes der Wärmefreisetzungsrate ist es notwendig, dass man über ausreichende Informationen von folgenden Parametern verfügt:

- die Brandlastdichte,
- die horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit,
- die Ventilationsbedingungen und

- ggf. den Einfluss einer Löschanlage oder der Feuerwehr.

Auf dieser Grundlage wird das Brandszenario in folgende Brandphasen unterteilt:

- Phase 1: Brandentstehung mit niedriger Wärmefreisetzungsrates,
- Phase 2: Fortentwickelter Brand mit quadratischer Zunahme der Wärmefreisetzungsrates und Brandfläche,
- Phase 3: Stetiger Brand mit konstanter Wärmefreisetzungsrates und Brandfläche,
- Phase 4: Kontrollierter Brand bei aktiver selbsttätiger Löschanlage und
- Phase 5: Brandbekämpfung durch die Feuerwehr [11].

Für hochenergetische Brände wird auf die Berücksichtigung der ersten Brandphase verzichtet und es wird für die Berechnung erst die fortentwickelte Brandphase berücksichtigt. Der weitere Verlauf der Wärmefreisetzungsrates ist abhängig von den Einrichtungen des baulichen Brandschutzes (z.B. automatische Löschanlagen), sowie der Feuerwehr als Element des abwehrenden Brandschutzes.

Wird für das Brandszenario weder die Auslösung einer automatischen Löschanlage, noch der Beginn der Löscharbeiten durch die Feuerwehr berücksichtigt, besteht die Möglichkeit, den weiteren Brandverlauf über die Brandlastdichte zu bestimmen. Die Brandlastdichte beschreibt das Energiepotential der vorhandenen Brandlasten in MJ/m². Für den Brandverlauf ist dies von Bedeutung, da anhand der Brandlastdichte errechnet werden kann, wie lange die vorhandenen Brandlasten Energie freisetzen. Da die VDI 6019-1 kein Verfahren zur Bestimmung der Brandlastdichte beinhaltet, kann diese beispielsweise durch Angaben der DIN 991-1-2/NA [4] bestimmt werden.

Die Berechnung der Brandlastdichte kann gemäß DIN EN 991-1-2/NA über zwei verschiedene Verfahren erfolgen. Zum einen besteht die Möglichkeit, die

Brandlastdichte über die Art der Nutzung des zu betrachtenden Bereiches nach Tabelle BB.1. [4] zu ermitteln. Zusätzlich werden Sicherheitsfaktoren, wie z.B. die Entstehungswahrscheinlichkeit eines Brandes, das Vorhandensein einer automatischen Brandmeldeanlage und die Möglichkeit der sicheren Brandbekämpfung durch die Feuerwehr berücksichtigt. Tabelle 3.1 zeigt die Tabelle BB.1 aus der DIN EN 1991-1-2/NA[4].

Tabelle 3.1: Brandlastdichte nach Nutzung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [4]

Zeile	Nutzung	Brandlastdichte in MJ/m ²		
		Mittelwert	Standardabweichung	90 % - Quantil
		1	2	3
1	Wohngebäude	780	234	1085
2	Bürogebäude	420	126	584
3	Krankenhaus (Zimmer)	230	69	320
4	Hotel (Zimmer)	310	93	431
5	Bibliothek, Bücherei	1500	450	2087
6	Schule (Klassenzimmer)	285	85,5	397
7	Verkaufsstätte, Einkaufszentrum	600	180	835
8	Versammlungsstätte (Theater, Kino)	300	90	417
9	Transport (öffentlicher Bereich)	100	30	139

Weiterhin kann die Brandlastdichte über eine Einzelfallberechnung erfolgen. Die Einzelfallberechnung beinhaltet ein Rechenverfahren, das unter anderem Parameter wie die Menge des brennbaren Stoffes, die Verbrennungseffektivität und die Netto-Verbrennungswärme berücksichtigt. Dieses Verfahren ist geeignet für spezielle Brandszenarien, bei denen Menge und Art des brennbaren Stoffes bekannt sind.

Die Berechnung des zeitlichen Verlaufes der Wärmefreisetzungsrate muss dabei für jede Brandphase einzeln bestimmt werden. Dabei sind zunächst generelle Eingabeparameter zu definieren. Diese sind:

- die maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate \dot{q}_f in kW/m² und
- der Brandintensitätskoeffizient α in kW/s².

Die horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit v in m/s kann über \dot{q}_f und α berechnet werden.

Charakteristische Werte für den Brandintensitätskoeffizienten α können aus der Tabelle 1 der VDI 6019-1, die Werte für die maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate \dot{q}_f können aus der Tabelle 2 der VDI 6019-1 entnommen werden [11]. Diese sind in den Tabellen 3.2 und 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.2: Brandintensitätskoeffizient α nach VDI 6019-1 [11]

Geschwindigkeit der Brandentwicklung	Brandintensitätskoeffizient α in kW/s ²
Langsam	0,0029
Mittel	0,012
Schnell	0,047
Sehr schnell	0,188

Tabelle 3.3: Tabelle 2 der VDI 6019-1 [11]

Brandlast/Nutzung	Maximale spezifische Wärmefreisetzungsrate in kW/m ²	Geschwindigkeit der Brandentwicklung
Büros	300	mittel
Hotelzimmer	250	mittel
Verkaufsfläche	500	schnell
Ausstellung, Theater, Kinosaal, Bühne	500	schnell
Wohnung	500	mittel
Museum	300	langsam
Brennender Sattelschlepper	400	schnell
Holzpaletten (1,2 m x 1,2 m x 0,14 m); Feuchte: 6 % bis 12 %, gestapelt/Blocklagerung, Höhe: 0,5 m	1250	mittel bis schnell
Gefüllte Postsäcke, Lagerhöhe 1,5 m	400	schnell

Diese Werte berücksichtigen eine brandlastgesteuerte Verbrennung. Ein unterventilierter Brand durch Sauerstoffmangel im Brandraum wird nicht berücksichtigt.

Die erste Brandphase für hochenergetische Brände ist definiert durch einen quadratischen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate \dot{Q} und der Brandfläche A . Die

Berechnung der Gesamt-Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} erfolgt für die erste Brandphase über die Formel:

$$\dot{Q}(t) = \dot{q}_f \cdot A(t). \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Berechnung der Brandfläche A erfolgt für jeden Zeitpunkt der ersten Brandphase über die Formel:

$$A(t) = (v \cdot t)^2. \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Berechnung der Brandausbreitungsgeschwindigkeit v erfolgt über die Formel:

$$v = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}_f}}. \quad (\text{Gl. 3})$$

Der Brandverlauf steigt solange quadratisch an, bis zum Zeitpunkt t_1 die maximale Wärmefreisetzungsrates erreicht ist. Von diesem Punkt an bleiben die Brandfläche A sowie die Gesamt-Wärmefreisetzungsrates \dot{Q} konstant:

$$\dot{Q}(t_1) = \dot{Q}(t_2) = \text{const.} \quad (\text{Gl. 4})$$

$$A(t_1) = A(t_2) = \text{const.} \quad (\text{Gl. 5})$$

Das Ende der zweiten Brandphase ist entweder erreicht, wenn eine automatische Löschanlage auslöst bzw. die Feuerwehr mit der Brandbekämpfung beginnt oder wenn 70 % der Brandlast verbraucht sind (Zeitpunkt t_2). Ab diesem Zeitpunkt wird der Brandverlauf für einen brandlastgesteuerten Brandverlauf vereinfachend als linear abklingend angenommen, bis zum Zeitpunkt t_3 die Gesamt-Wärmefreisetzungsrates ebenso wie die Brandfläche den Wert 0 erreicht.

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft einen zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche

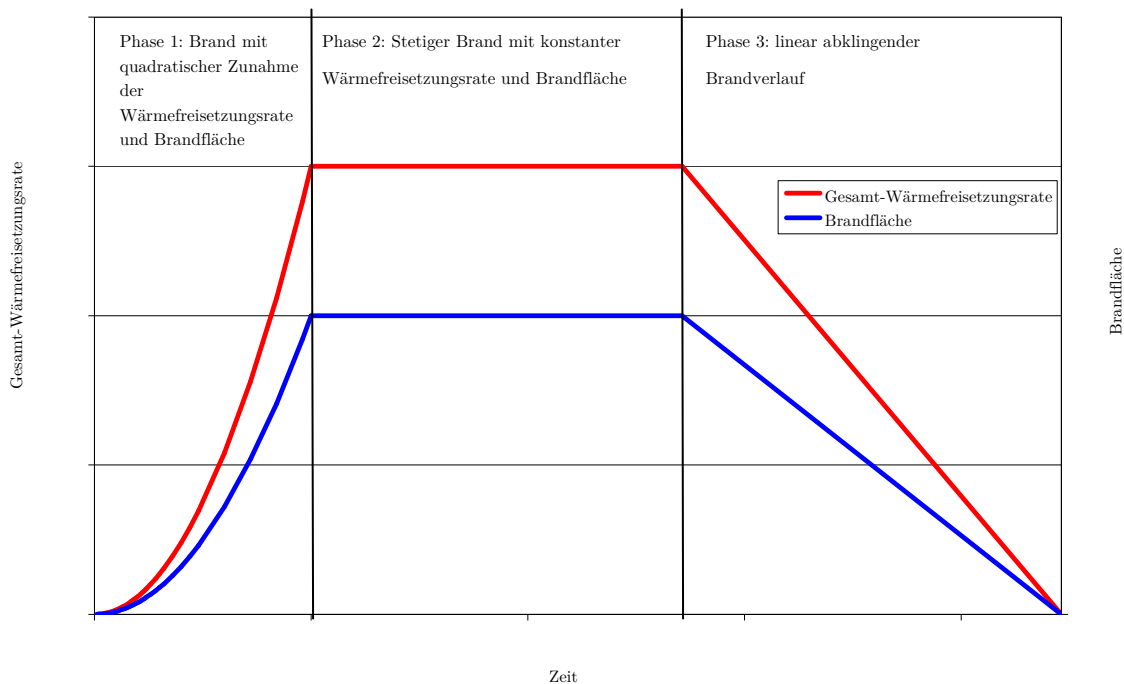


Abbildung 3.2: Beispiel für eine Brandverlaufskurve nach VDI 6019-1

Anhand des oben beschriebenen Verfahrens lassen sich Brandverläufe für verschiedene Szenarien definieren. Durch die Brandverlaufskurven und die dazugehörigen Kennwerte aus der VDI 6019-1 sowie verschiedener Rechenverfahren, z.B. aus VDI 6019-1 und der DIN EN 1991-1-2/NA lassen sich somit realitätsnahe Brandverläufe und Ausbreitungen berechnen. Dabei muss der Anwender jedoch ein fundiertes Wissen über das zu betrachtende Objekt und die Randbedingungen, wie z.B. Lüftung, Einfluss von Löschanlagen, Brandlastdichten, etc. besitzen. Weiterhin müssen die hier festgelegten Werte richtig in das spätere Berechnungsverfahren übertragen werden. Dabei spielen sowohl die Übertragung der Brandflächen als auch die Wahl der einzelnen Zeitschritte für die Modellierung des Brandes eine entscheidende Rolle.

4 Berechnungen mit FDS

Für die durchzuführenden Berechnungen mit FDS gilt es zunächst die verschiedenen zu betrachtenden Kriterien festzulegen und Randbedingungen zu definieren.

Das Ziel dieser Arbeit soll es sein, eine Parameterstudie mit dem CFD-Modell FDS durchzuführen. Es soll nachgewiesen werden, dass unter bestimmten Randbedingungen auch bei einer Abweichung von den baurechtlichen Vorgaben eine Rauchfreihaltung des Sicherheitstreppenraums und des Vorraumes möglich ist. Die Strömungsgeschwindigkeit geht dabei als ein veränderliches Kriterium in die Simulationsrechnungen ein. Mit Hilfe von Brandschutzingenieurmethoden soll mit Hilfe eines CFD-Modells in dieser Studie eine Aussage über den Einfluss verschiedener Strömungsgeschwindigkeiten an den Türen zwischen Treppenraum und Vorraum, sowie zwischen Vorraum und angrenzendem Raum getroffen werden. Das zweite veränderliche Kriterium ist die Deckenhöhe von Nutzungseinheit, Flur und Vorraum. Diese hat einen signifikanten Einfluss auf die Rauchausbreitung in den Flur und den Vorraum sowie die Strömungsverhältnisse an den Türstürzen. In dieser Studie soll der Einfluss dieser beiden Parameter auf die Rauchfreihaltung des Vorraumes untersucht werden. Ziel ist es, eine Aussage über die Mindestanforderungen an die Kombination aus Strömungsgeschwindigkeit und Deckenhöhe zu definieren.

In diesem Kapitel werden die Umsetzung der Raungeometrie, des Brandszenarios und der Randbedingungen erläutert.

4.1 Einfluss der Zellengröße auf die Berechnungen

Für die Diskretisierung der Zellen in FDS muss der Anwender im Vorfeld die Kantenlänge der einzelnen Gitterzellen definieren. Diese spielt für das Ergebnis eine entscheidende Rolle. Prinzipiell sollte sich der Anwender auf Grundlage des vorher definierten Szenarios Gedanken über eine sinnvolle Aufteilung machen.

Da die Anzahl der Zellen maßgeblichen Einfluss auf die Berechnungszeit und die erforderliche Rechenkapazität hat, ist es in der Praxis meist nicht möglich, die Zellen auf eine Größe < 10 cm zu verkleinern.

Anhand von verschiedenen Simulationen wurde der Einfluss der Zellengröße auf das Simulationsergebnis untersucht. Es wurden Zellweiten von 40 cm, 20 cm, 10 cm und 5 cm untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Verkleinerung der Zellweite eine genauere Darstellung des Strömungsbildes erfolgt. Weiterhin zeigt sich, dass die Zellengröße Einfluss auf die Berechnung der Rauchausbreitung hat, da bei größeren Zellweiten die Rauchsicht tiefer liegt. Hinzu kommt, dass durch größere Zellen die geometrischen Verhältnisse nicht mehr korrekt dargestellt werden können. Die geometrischen Verhältnisse innerhalb einer Zelle werden nicht weiter berücksichtigt. Daher kann eine signifikante Beeinflussung des Strömungsbildes erfolgen. Abbildung 4.1 zeigt die Übersicht über die Simulationsergebnisse im Vergleich. Ausgewertet wurde beispielhaft die Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t = 200$ s. Die Farbskala stellt den Bereich von 0 m/s (blau) bis 4 m/s (rot) dar.

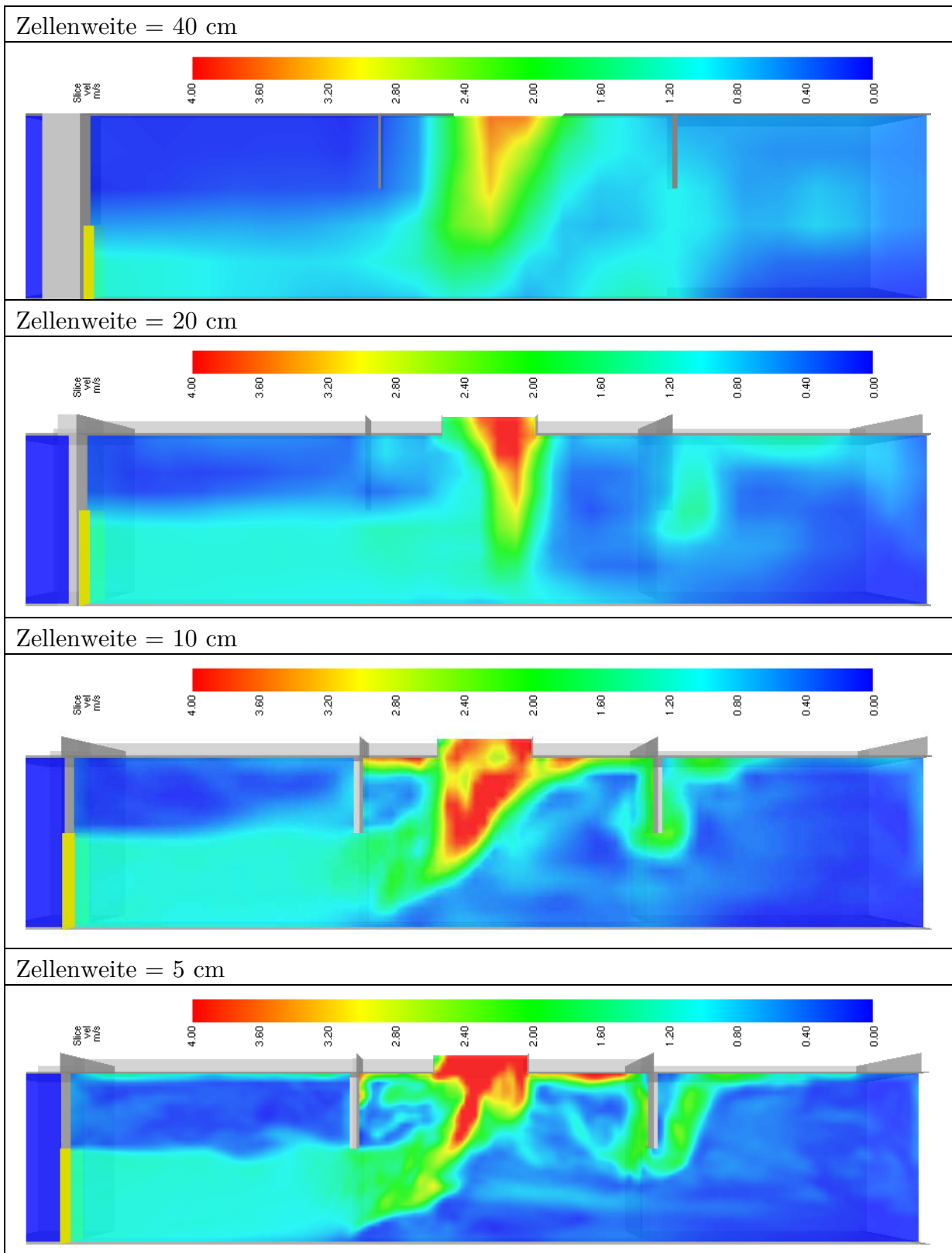


Abbildung 4.1: Einfluss der Zellengröße auf die Simulationsergebnisse

Es zeigt sich, dass die Strömungsbilder sich zwar ähneln, jedoch erst mit zunehmender Verkleinerung der Zellenweite eine detaillierte Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt. Für die Studie wurde eine Zellenweite von 10 cm verwendet, da mit dieser Zellenweite die Berechnungsgenauigkeit ausreichend und der Aufwand der Rechenzeiten vertretbar ist. Im Vergleich der Simulationsrechnungen mit einer Zellweite von 10 cm und 5 cm zeigen sich keine signifikanten Unterschiede im Strömungsbild.

4.2 Grundsätzliche Anforderungen an die Eingabedatei

Der Berechnungsalgorithmus benötigt für die Durchführung von Simulationsrechnungen spezifische Eingaben, welche vom Anwender in einer Eingabedatei zusammengefasst werden. Darin werden alle Informationen zusammengefasst, die für die Berechnung relevant sind, wie z.B. das Rechengitter oder die Materialeigenschaften sowie andere Randbedingungen.

Als erstes müssen die für die Rechnung relevanten geometrischen Randbedingungen definiert werden. Dafür wird der zu betrachtende Bereich zunächst in ein feines Rechengitter aufgeteilt. Für das Computermodell der Parameterstudie wurden ein Rechengitter verwendet, das Zellen von 10 cm Kantenlänge in x-, y- und z-Richtung beinhaltet. Für die verschiedenen Berechnungen umfasst das Rechengitter insgesamt zwischen 1,5 und 2 Mio. Zellen. Durch die verschiedenen Deckenhöhen unterscheidet sich die Zellenanzahl in z-Richtung, da immer mit der kleinstmöglichen Zellenanzahl gerechnet wurde.

Durch die große Anzahl der Zellen ist es notwendig, das Rechengitter in verschiedene Abschnitte zu unterteilen, so genannte „MESHES“. Dabei verfügt FDS über die Möglichkeit, für jedes MESH die Berechnungen einzeln durchzuführen. Es ergeben sich hierbei für die Berechnung des Druckes an den Übergängen der MESHES im ungünstigsten Fall Rechenungenauigkeiten. Daher sollte das

Rechengitter so gewählt werden, dass sich diese Übergänge nicht an kritischen Stellen befinden. Dies wäre zum Beispiel die Mitte des Treppenraumes, in dem ein Überdruck vorhanden ist. Durch die große Übergangsfläche können sich in diesem Fall die oben beschriebenen Ungenauigkeiten bei der Berechnung des Drucks ergeben. Daher wurden die MESHES für die Studie so angeordnet, dass sich die Grenzen im Bereich des Brandes in der Nutzungseinheit befinden und somit das Problem minimiert wird.

Die Gebäudegeometrie wird in dieses Rechengitter eingepasst. Die Materialeigenschaften werden über die jeweiligen Bauteile und Oberflächen der Gebäudegeometrie zugeordnet. Es besteht hier die Möglichkeit, die verschiedenen thermo-physikalischen Eigenschaften wie z.B. Dichte, Wärmeleitfähigkeit oder Brandverhalten zu definieren. Diese Eingaben erfordern vom Anwender ausreichend Kenntnisse über die im jeweiligen Fall verwendeten Materialien, da die Materialeigenschaften signifikanten Einfluss auf z.B. die Berechnungen der Oberflächentemperaturen oder der Bauteiltemperaturen haben können.

Für die Auswertung der durchgeführten Berechnungen kann das Visualisierungstool Smokeview verwendet werden. Dies ist in der aktuellen Version von FDS bereits mit enthalten. Hier bestehen verschiedene Möglichkeiten der Auswertung, zum Beispiel:

- eine zweidimensionale Auswertung über farbliche Darstellung in einer zuvor festgelegten Ebene,
- eine farbliche Darstellung der Oberflächenparameter,
- die Auswertung über berechnete Werte an festgelegten Referenzstellen und
- die Auswertung über die Darstellung von Partikeln (bspw. Gase oder Wasserpartikel von Sprinklern).

Für die Modellierung der Raumgeometrie des zu betrachtenden Gebäudes, Gebäudeabschnittes oder Raumes empfiehlt sich die Benutzung einer grafischen Benutzeroberfläche. Mit Hilfe einer solchen Benutzeroberfläche ist es möglich die Geometrie direkt zu visualisieren und im 3D-Modell anzupassen. Diese Methode bietet einen Vorteil gegenüber der manuellen Eingabe über einen Text-Editor, speziell bei der Modellierung großer oder komplexer Geometrien. Beispiele für diese grafischen Interfaces sind das Programm „Pyrosim“ von der Firma Thunderhead Eng. oder das open-source-tool „Blender FDS“ von Emanuelle Gissi. Für diese Studie wurde für die Geometrieerstellung Pyrosim 2011 verwendet.

4.3 Festgelegte Parameter

Für die Parameterstudie ist es wichtig, das zu betrachtende Szenario im Vorfeld einzugrenzen, da es durch die Komplexität des Systems eine Vielzahl an Parametern gibt, wie z.B. Deckenhöhe, Anordnung der Geometrie oder Fensterflächen. Daher wird in dieser Studie lediglich auf zwei mögliche veränderliche Parameter eingegangen:

- I. die Sturzhöhe zwischen Tür und Decke und
- II. die Strömungsgeschwindigkeit an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum.

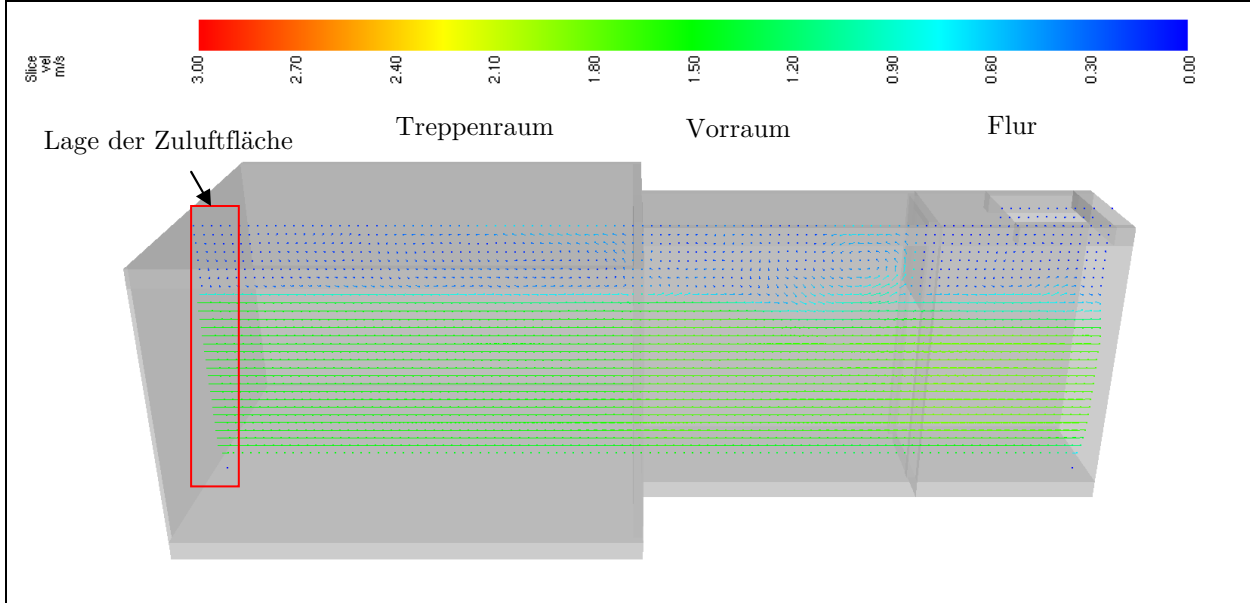
Für die Studie wurden folgende Parameter fest definiert:

Treppenraum: Der Treppenraum wurde zu Vereinfachung nicht als Treppenraum nachgebildet. Es wurde lediglich ein Raum angrenzend an den Vorraum angenommen, da nur die Strömungsgeschwindigkeit an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum betrachtet werden soll. In einer Vorüberlegung wurden anhand von vereinfachten CFD-Simulationen verschiedene Auswirkungen durch die Lage der Zuluftfläche auf das Strömungsbild an der Tür zwischen Treppenraum und

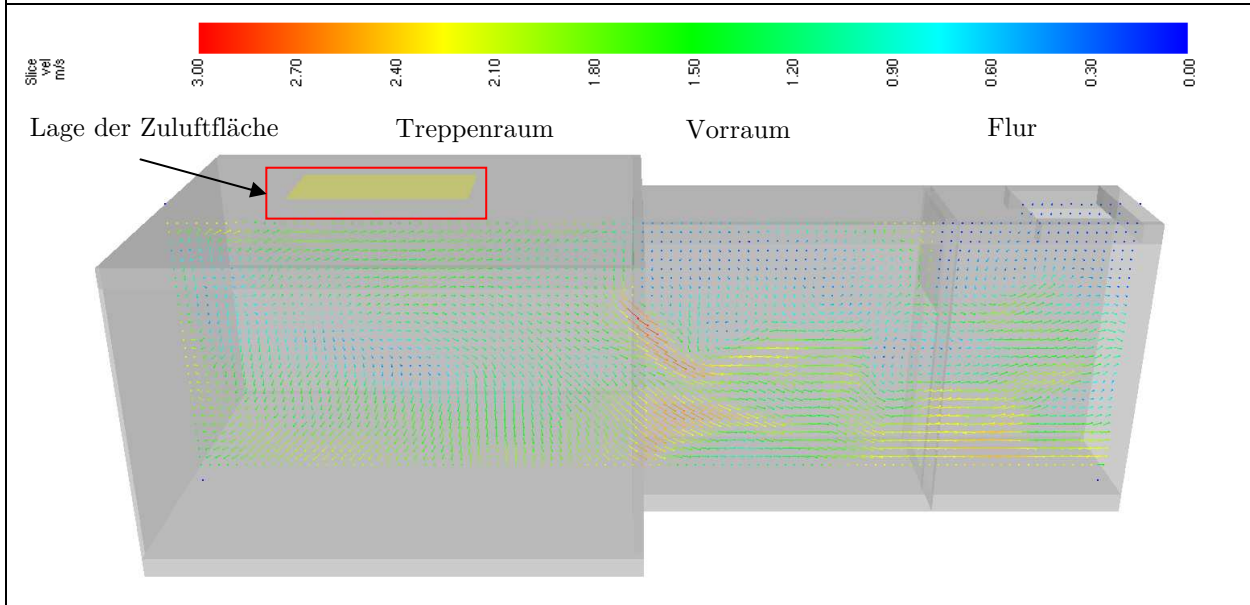
Vorraum durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Treppenraum nicht zwingend abgebildet werden muss und durch die gewählte Lage der Zuluftfläche ein geeignetes Strömungsbild an der Tür entsteht.

Abbildung 4.2 zeigt die Auswirkung verschiedener Anordnungen auf das Strömungsbild bei $t = 60$ s, geschnitten in der Tür. Es wurde die Strömungsgeschwindigkeit in m/s betrachtet. Zur genaueren Darstellung wurde die Strömungsgeschwindigkeit durch farbige Vektorpfeile visualisiert. Es ist zu erkennen, dass nur bei der Variante mit der Zuluftfläche an der Rückseite des Treppenraums ein gleichmäßiges Strömungsbild an der Tür zum Vorraum entsteht. Bei den anderen Varianten ist die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit im Decken- und Bodenbereich erhöht, auf mittlerer Höhe jedoch deutlich niedriger. Für die Studie wurde für die idealisierte Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit an der Tür also die Variante gewählt, bei der sich die Zuluftfläche auf der Rückseite des Raumes gegenüber der Tür befindet.

Strömungsbild Zuluftfläche Rückseite



Strömungsbild Zuluftfläche im Deckenbereich



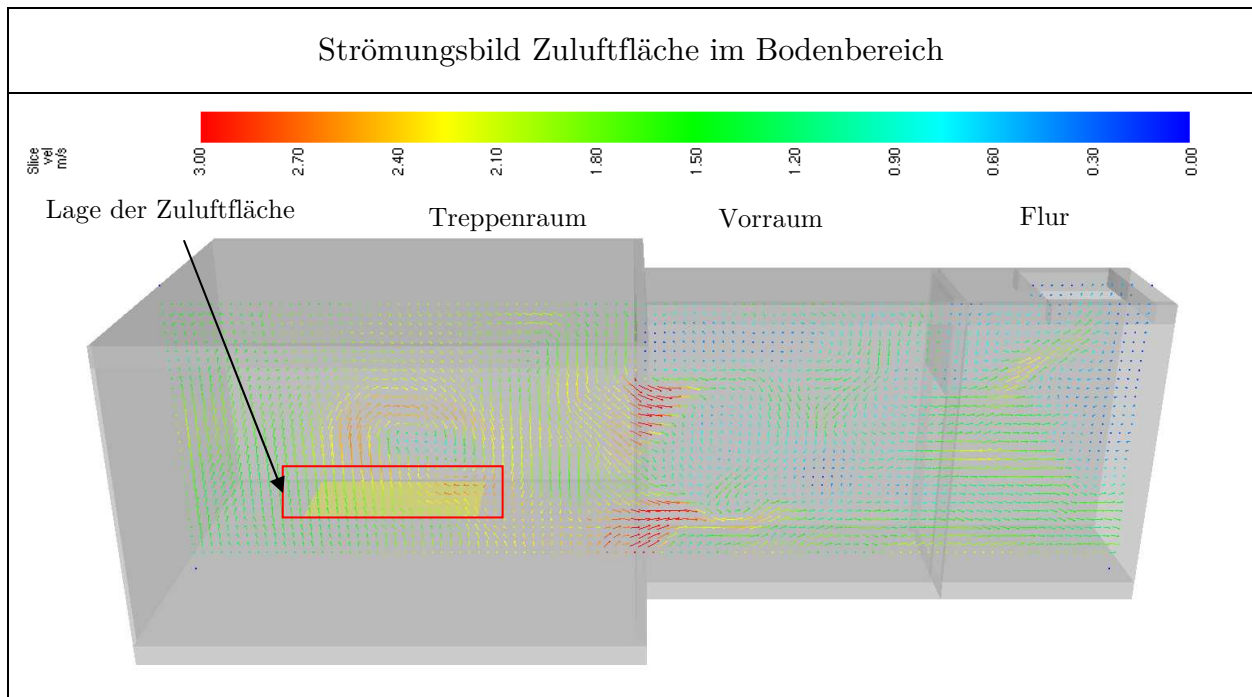


Abbildung 4.2. Darstellung der Varianten für die Zuluftfläche

Vorraum: Der Vorraum wurde auf die Mindestbreite von 1,20 m (Fluchtwegbreite nach BauO NRW und ASR A.2.3. [1]) und eine Länge von 3,00 m (BauO NRW) festgelegt [2]. Der Vorraum befindet sich mittig vor dem Treppenraum.

Flur: Der Flur wurde ebenfalls auf die Mindestbreite von 1,20 m und 3,00 m Länge festgelegt. Der Flur wurde vor dem Vorraum angeordnet. Die Deckenhöhe variiert zwischen 2,40 m und 4,00 m.

Nutzungseinheit: Angesetzt wurde eine 400,00 m²-Nutzungseinheit mit einer Fensterfläche von ca. 50 m². Die Größe der Nutzungseinheit ergibt sich aus der maximal zulässigen Fläche von Aufenthaltsräumen ohne Brandabschnittstrennung gemäß § 111 SBauVO [3]. Die Größe der Fensterflächen ergibt sich aus § 48 BauO NRW [2]. Dort sind Fensterflächen von mindestens einem Achtel der Grundfläche des Raumes vorgeschrieben.

Türen: Die Türen wurden auf eine Größe von 1,00 m Breite und 2,00 m Höhe festgelegt. In dem betrachteten Szenario sind alle Türen dauerhaft geöffnet. Dies ergibt sich aus der Anforderung nach § 101, Absatz1 der SBauVO [3].

Abströmöffnung: Die Lage der Abströmöffnung wurde vor der Tür zum Vorraum im Flur angeordnet. Ihre Fläche wurde auf 1,00 m² festgelegt (1,00 m x 1,00 m), um den eingebrachten Zuluftvolumenstrom auf jeden Fall abführen zu können.

Mindest-Sturzhöhe: Die kleinste Sturzhöhe wurde mit 0,40 m festgelegt. Diese Höhe ergibt sich aus den Vorgaben der BauO NRW, welche eine Mindest-Raumhöhe von 2,40 m fordert, aufgrund der Türhöhe von 2,00 m [2].

Brandschutzklappe und Kaltrauchsperr: Diese Einrichtungen wurden nicht betrachtet, da die Türen während der gesamten Dauer als geöffnet angesetzt werden. Demnach sind diese Einrichtungen zu vernachlässigen.

4.4 Geometrische Randbedingungen

Anhand der in Kapitel 4.3 genannten Randbedingungen wurde die Geometrie des Szenarios nachgebildet und in das Rechengitter eingepasst. Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen das Computermodell in verschiedenen Ansichten. Für eine bessere Visualisierung wurden alle Bauteile transparent dargestellt.

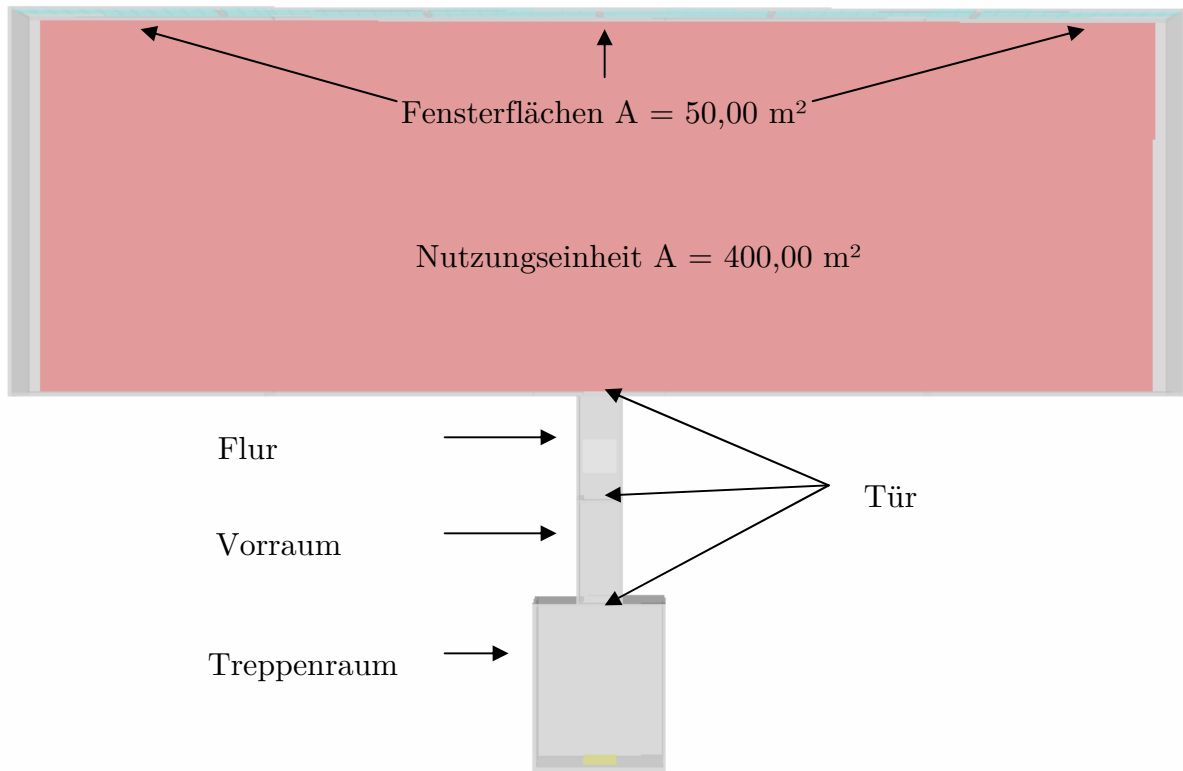


Abbildung 4.3: Computermodell des Treppenraums in der Aufsicht

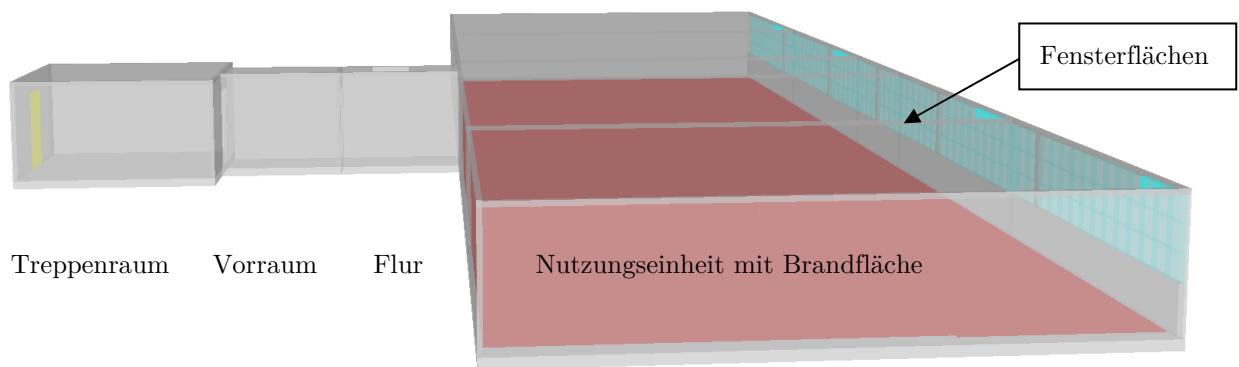


Abbildung 4.4: Computermodell des Treppenraums in der Seitenansicht

Die Anordnung ergibt sich aus dem definierten Szenario mit Treppenraum, Vorraum, Flur und Nutzungseinheit. Eine andere Anordnung wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt. Es ist möglich, dass sich durch die Änderung der geometrischen Anordnung andere Ergebnisse der Simulationsrechnungen ergeben.

Für die korrekte Umsetzung der Strömungsverhältnisse im Bereich des Treppenraums und des Vorraums wurde im Treppenraum eine Zuluftfläche von 1,00 m x 2,00 m erstellt. Dies stellt idealisiert die Zuluftöffnung im Treppenraum dar. Im Bereich des Flurs vor dem Vorraum wurde eine Abströmöffnung von 1,00 m x 1,00 m im Deckenbereich erstellt. Mit dieser Öffnung wird die Druckentlastung im Vorraum idealisiert umgesetzt. In der Praxis befindet sich an dieser Stelle eine Öffnung, über die der Rauch in einen Schacht oder ins freie abgeführt wird. Die Lage dieser Flächen ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

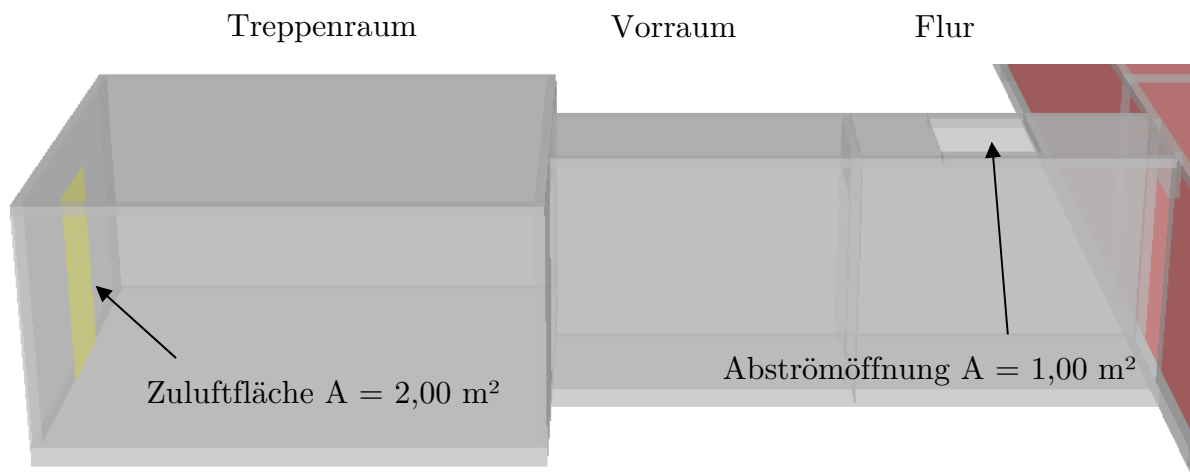


Abbildung 4.5: Lage der Zuluftfläche- und Abströmöffnungen

Für Boden, Decken und Wände wurde die Materialeigenschaft „INERT“ zugewiesen. Durch diese Definition ist die Bauteiltemperatur zu jedem Zeitpunkt der Simulationsrechnungen gleich der Umgebungstemperatur. Somit wurde keine Bauteilerwärmung berücksichtigt. Ein Wärmestrom findet zwar statt, jedoch wird die Bauteiltemperatur konstant auf den Wert der Umgebungstemperatur gesetzt.

Für die Fensterscheiben wurden folgende thermische Materialkennwerte aus dem VDI-Wärmeatlas [12] berücksichtigt:

- Dichte: $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$,
- Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$,
- spezifische Wärmekapazität: $c_p = 0,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Weiterhin wurden eine Versagenstemperatur und die Dicke des Glases definiert:

- Dicke des Glases: $d = 6,00 \text{ mm}$,
- Versagenstemperatur: $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Den Fensterflächen wurden für die Simulationsrechnungen die oben genannten Materialeigenschaften zugewiesen. Die Verglasung versagt im Brandfall bei einer Temperatur von $T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$. Somit entstehen zusätzliche Öffnungsflächen, die Einfluss auf die Strömungsbedingungen innerhalb der Nutzungseinheit haben. Im Falle eines Versagens der Fensterflächen wird dem System durch die Außenluft neuer Sauerstoff für eine Verbrennungsreaktion zugeführt. Weiterhin können die Rauchgase über diese Flächen entweichen.

Für das Modell wurden für eine möglichst genaue Darstellung die Fensterflächen in kleine Teilflächen aufgeteilt. Das Programm FDS bietet dem Anwender die Möglichkeit, für die jeweiligen Flächen die Temperaturen einzeln berechnen zu lassen. Sobald an einer Stelle dieser Fläche die vorher definierte Temperatur von $85 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht ist, wird von einem Fensterversagen ausgegangen und das Teilstück aus der Geometrie entfernt. Abbildung 4.6 zeigt die Fensterflächen im Computermodell in der Ansicht von außen. Abbildung 4.7 zeigt einen Ausschnitt der Fensterfläche mit den einzelnen Teilflächen.



Abbildung 4.6: Übersicht über die vorhandenen Fensterflächen

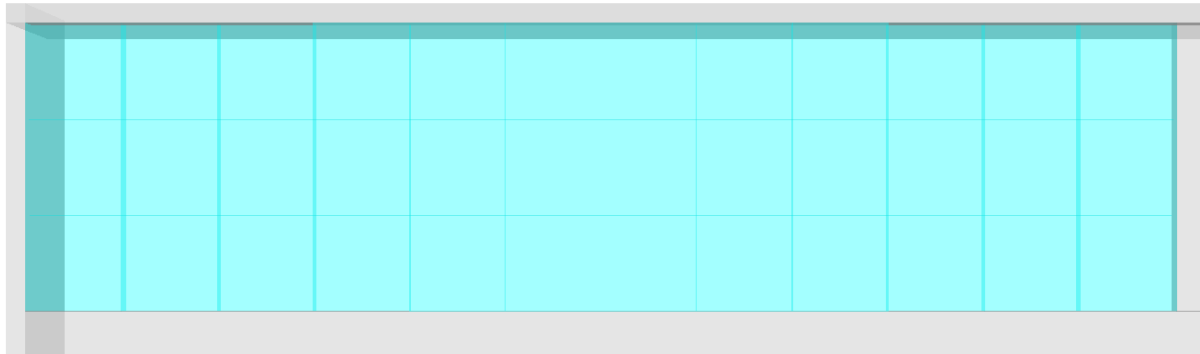


Abbildung 4.7: Detaillierte Darstellung der Fenster-Teilflächen

4.5 Veränderliche Parameter

Die veränderlichen Parameter Strömungsgeschwindigkeit und Sturzhöhe wurden für die Berechnungen in verschiedene Eingabedateien eingefügt. In einer Vorüberlegung wurden die verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten auf Werte zwischen 0,50 m/s und 2,00 m/s in Schritten von 0,50 m/s festgelegt. Die Sturzhöhe wurde auf den Bereich zwischen 2,40 m und 4,00 m in verschiedenen Teilschritten festgelegt. Die verschiedenen Eingabedateien sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Übersicht über die durchgeführten Simulationsrechnungen

Strömungsgeschwindigkeit in m/s	0,50	1,00	1,50	2,00
Deckenhöhe in m				
2,40	Sim011	Sim021	Sim031	Sim041
3,20	Sim015	Sim025	Sim035	Sim045
3,60	-	-	Sim037	-
4,00	Sim019	Sim029	Sim039	Sim049

4.6 Brandszenario

Im Vorfeld der Simulationen wurde ein Brandszenario gemäß VDI 6019-1 definiert. Die in Kapitel 3.2 beschriebenen Vorgaben wurden für das gewählte Szenario umgesetzt.

Bei den durchgeführten Simulationsberechnungen wurde eine zeitliche Begrenzung von $t_{\text{end}} = 1800$ s festgelegt, da zu diesem Zeitpunkt davon ausgegangen werden kann, dass die Evakuierung des Gebäudes abgeschlossen ist. Weiterhin ist es durch diese Begrenzung möglich die Rechenzeit zu minimieren.

Innerhalb der Nutzungseinheit sind bis zu einer Gesamtgrundfläche von 400 m^2 keine Anforderungen an die Baustoffe oder die Feuerbeständigkeit der Bauteile vorgeschrieben. Daher wurde ein Vollbrandszenario für die gesamte Fläche gewählt. Es wurden folgende Randbedingungen zur Erstellung der Brandverlaufskurve gewählt:

- Nutzung: Es wurden Büroflächen als charakteristische Nutzungsart für ein Hochhaus gewählt, daraus ergibt sich der Wert für $\dot{q}_f = 300 \text{ kW/m}^2$.
- Geschwindigkeit der Brandentwicklung: Mittel gemäß Büronutzung $\alpha = 0,012 \text{ kW/s}^2$
- Horizontale Brandausbreitungsgeschwindigkeit: $v = \sqrt{\frac{\alpha}{\dot{q}_f}} = 0,0063246 \text{ m/s}$
- Maximale Brandfläche: $A = 400 \text{ m}^2$

Abbildung 4.8 zeigt den berechneten zeitlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche. Es ist zu erkennen, dass vor dem Erreichen der maximalen Wärmefreisetzungsrate der Betrachtungszeitraum von 1800 s endet. Somit wird lediglich die erste Phase des Brandszenarios erreicht, der quadratische Anstieg von Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche bis zum Zeitpunkt $t = 1800$ s.

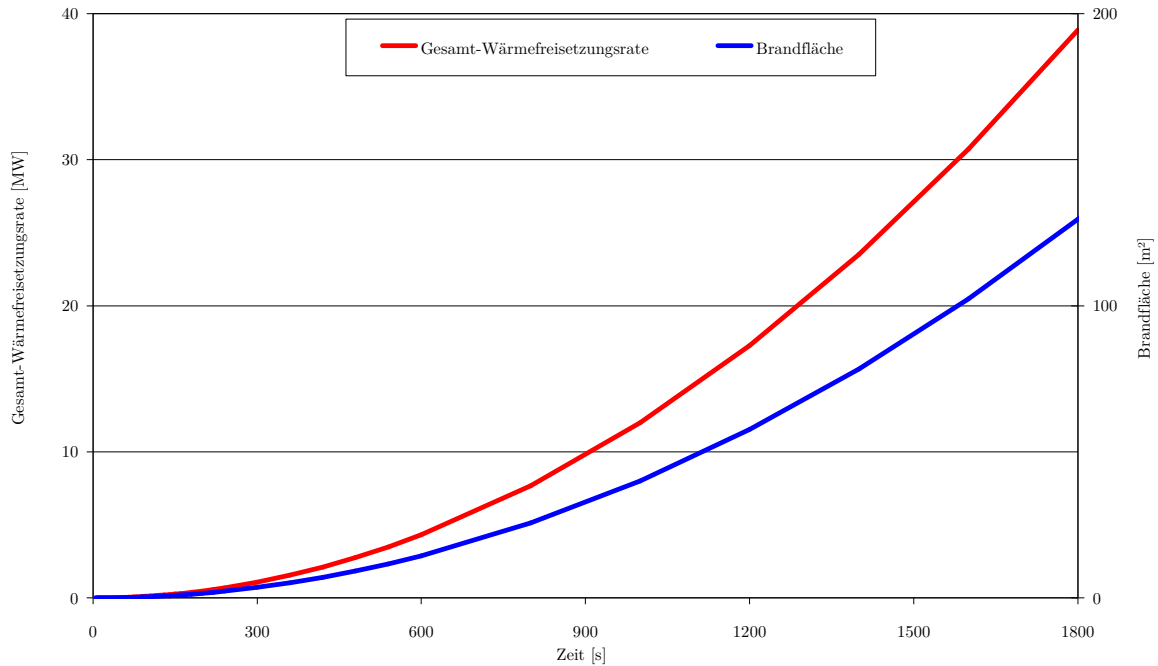


Abbildung 4.8: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche

Für die Verbrennungsreaktion wurden für ein mittleres Rauchpotenzial folgende Kennwerte gemäß VDI 6019-2 [10] berücksichtigt:

- Charakteristischer Stoff: Polystyrol,
- effektiver Heizwert $H_{\text{eff}} = 26 \text{ kJ/kg}$,
- Rauchausbeutefaktor $y_{\text{Rauch}} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ g/g}$,
- spezifischer Extinktionskoeffizient $\sigma_s = 10 \text{ m}^2/\text{g}$.

Die ermittelten Werte können anschließend in die Eingabedatei übertragen werden. Der Benutzer gibt für jeden Zeitschritt die Brandfläche und somit auch die Wärmefreisetzungsrate vor. So lässt sich eine im Szenario definierte Brandausbreitung realitätsnah darstellen. Abbildung 4.9 zeigt die Aufteilung der Brandflächen im Computermodell. Die verschiedenen Farben zeigen die jeweilige Brandfläche für ein Zeitintervall. Für den Beginn der Simulation wurden die ersten beiden Zeitschritte im Abstand von 30 s und 60 s gewählt. Danach erfolgt eine

Aufteilung in 120 s Schritte und ab dem Zeitpunkt $t = 600$ s eine Aufteilung in 200 s Schritte. Die unterschiedlichen Farben stellen dabei die unterschiedlichen Zeitschritte dar.

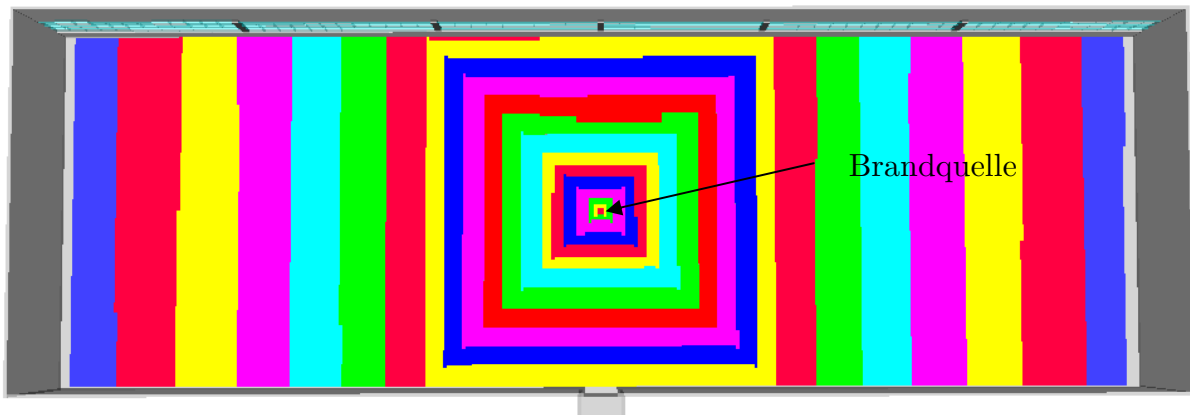


Abbildung 4.9: Aufteilung der Brandflächen in der Nutzungseinheit

Für ein eindeutiges Auswertungskriterium für den Raucheintritt in den Vorraum wurde festgelegt, dass ein Raucheintritt erst als kritisch bewertet wird, sobald eine definierte Grenzkonzentration der Rauchgase überschritten wird. Diese Konzentration wurde anhand der Formel zur Berechnung der Sichtweite bestimmt. Diese lautet gemäß VDI 6019 - 2 allgemein:

$$S = \frac{E}{K}. \quad (\text{Gl. 6})$$

Dabei ist:

- S Sichtweite,
- E Erkennungsfaktor,
- K Extinktionskoeffizient.

Ausschlaggebend für die Sichtweite ist das Erkennen des hinterleuchteten Sicherheitszeichens am nächstgelegenen Ausgang. Im betrachteten Szenario wurde diese Entfernung mit 3,00 m berücksichtigt. Diese Entfernung entspricht dem Abstand zwischen der Tür zum Vorraum und der Tür zum Treppenraum. Der Extinktionskoeffizient K lässt sich durch folgende Formel berechnen:

$$K = \sigma_s \cdot m_s . \quad (\text{Gl.7})$$

Dabei ist:

σ_s spezifischer Extinktionskoeffizient in m^2/g ,

m_s Rauchgaskonzentration in g/m^3 .

Stellt man diese Gleichung nach m_s um, so erhält man die Gleichung:

$$m_s = \frac{E}{S \cdot \sigma_s} . \quad (\text{Gl.8})$$

Anhand dieser Formel lässt sich die Grenzkonzentration für die Sichtweite $S = 3,00 \text{ m}$, den Erkennungsfaktor $E = 5$ für hinterleuchtete Fluchtwegzeichen gemäß DIN 4844 [5] und $\sigma_s = 10,00 \text{ m}^2/\text{g}$ gemäß VDI 6019-2 [10] bestimmen. Es ergibt sich die Grenzwertkonzentration $m_s = 0,17 \text{ g}/\text{m}^3$. Für die Auswertung wurde definiert, dass ein Raucheintritt erfolgt, sobald für den Zeitraum von $\Delta t > 60 \text{ s}$ im oberen linken Bereich des Vorraumes (vgl. Abbildung 4.10) diese Grenzwertkonzentration überschritten wird. Der Zeitraum von $\Delta t > 60 \text{ s}$ wurde gewählt, um zu berücksichtigen, dass sich ein stationärer Zustand im Bereich des Vorraumes einstellt, bei dem der Rauch im Deckenbereich des Vorraumes verteilt ist. Weiterhin wird berücksichtigt, dass der Rauch über den vorhandenen Luftstrom wieder aus dem Vorraum herausgetragen wird. Durch die Wahl des in Abbildung 4.10. dargestellten Betrachtungsbereiches soll ebenfalls nur der stationäre Zustand im Deckenbereich des Vorraumes berücksichtigt werden. Durch die Eingrenzung werden Überschreitungen an der Stelle des Raucheintrittes in den Treppenraum nicht berücksichtigt.

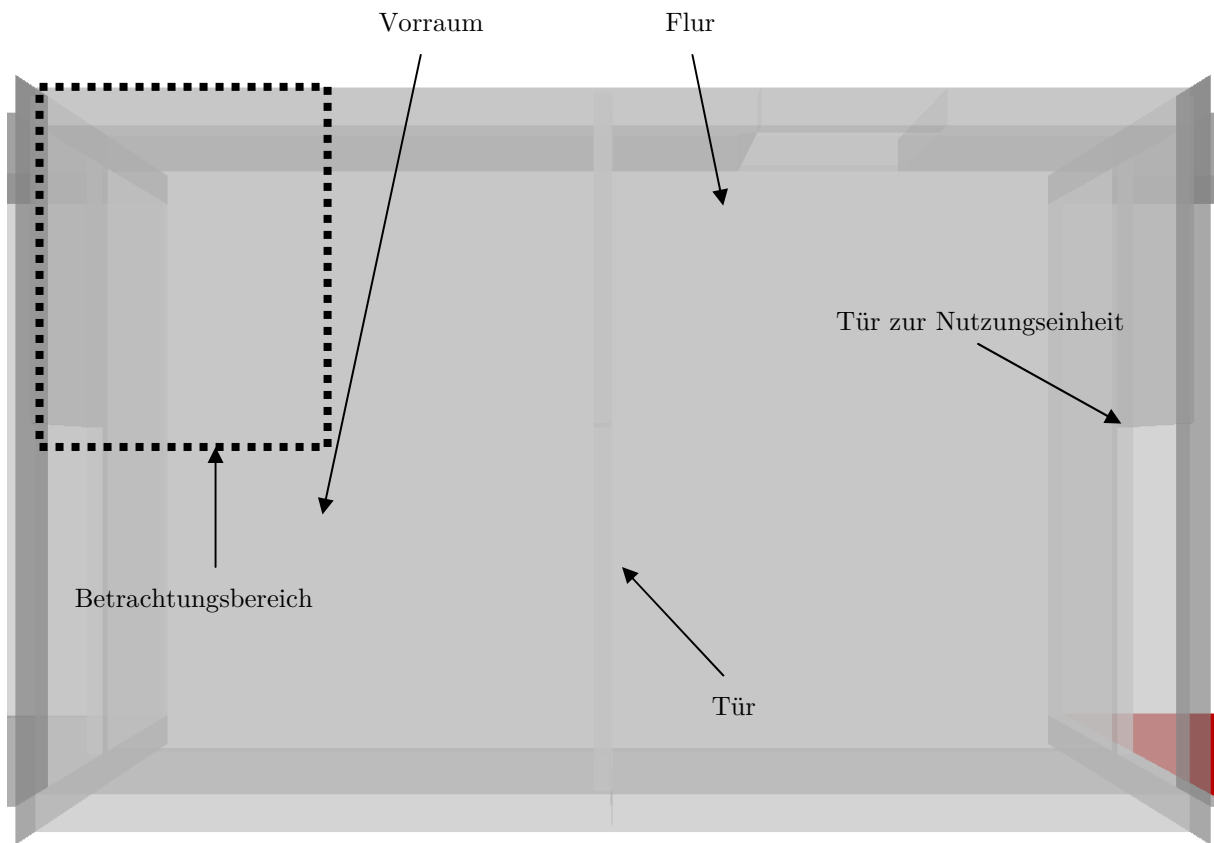


Abbildung 4.10: Betrachtungsbereich für die Grenzkonzentration im Vorraum

5 Darstellung der Ergebnisse

Für die Bewertung der Simulationsergebnisse wurde die Rauchausbreitung mit Hilfe des Programms Smokeview visualisiert und bewertet. Sobald ein Raucheintritt in den Vorraum des Treppenraums erfolgt und die Grenzkonzentration für die Dauer von 60 s überschritten wird, ist das System in der Konfiguration nicht funktionsfähig. Ab diesem Zeitpunkt erfolgt keine weitere Betrachtung der Ergebnisse. Sofern kein Raucheintritt bis zum Zeitpunkt $t = 1800$ s nach Initialbrandzündung erfolgt, wird das System als funktionstüchtig angesehen. Auf Grundlage dieser Auswertung kann anschließend eine Beurteilung erfolgen, welche Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Deckenhöhe mindestens erforderlich ist, um die Rauchfreihaltung für 1800 s zu gewährleisten.

Mit steigender Brandintensität steigen die Temperaturen im Brandraum an und erwärmen die Fensterscheiben. Ist der kritische Punkt von 85 °C erreicht, versagen die Fensterscheiben. Dies hat zur Folge, dass Luft aus der Umgebung in den Brandraum gelangen kann und somit neuer Sauerstoff für die Verbrennungsreaktion vorhanden ist. Weiterhin kann eine Druckentlastung über die Öffnungen erfolgen. Abbildung 5.1 zeigt das Versagen der Fensterscheiben im Brandraum in der Ansicht von außen. Es ist zu erkennen, dass die einzelnen Fensterflächen durch die thermische Beanspruchung versagen und somit im Modell nicht mehr berücksichtigt werden. Der Rauch kann ab diesem Zeitpunkt über die Öffnungen entweichen, zusätzlich kann neuer Sauerstoff für die Verbrennungsreaktion in die Nutzungseinheit gelangen. Im Verlauf der Simulation versagen über den Zeitraum von 1800 s sämtliche Fensterscheiben im Brandraum.



Abbildung 5.1: Versagen der Fensterscheiben im Brandraum im zeitlichen Verlauf

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Simulationsrechnungen nacheinander ausgewertet. Die einzelnen Unterkapitel sind dabei nach dem Kriterium „Strömungsgeschwindigkeit“ sortiert.

5.1 Simulationsrechnungen mit 0,50 m/s Strömungsgeschwindigkeit

Als erste Auswertungen der Parameterstudie wurden die Simulationsrechnungen Sim011 bis Sim019 ausgewertet. Um Rechenkapazität zu sparen, wurden zunächst nur die Simulationen mit den Deckenhöhen von 2,40 m, 3,20 m und 4,00 m gerechnet. Für diese Simulationen wurde eine Strömungsgeschwindigkeit an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum von 0,50 m/s angenommen. Für den Fall, dass

bei allen drei Simulationen ein Raucheintritt in den Vorraum erfolgt, lassen sich diese Ergebnisse auf die restlichen Simulationen mit dieser Strömungsgeschwindigkeit übertragen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei allen drei Simulationen ein Raucheintritt in den Vorraum erfolgt. Lediglich der Zeitpunkt des Raucheintritts ist dabei unterschiedlich. Bei einer Deckenhöhe von 2,40 m erfolgt der Raucheintritt zum Zeitpunkt $t = 559$ s, bei einer Deckenhöhe von 3,20 m zum Zeitpunkt $t = 596$ s und bei einer Deckenhöhe von 4,00 m zum Zeitpunkt $t = 646$ s. Abbildungen 5.2 zeigt beispielhaft für die Simulationsrechnung mit einer Deckenhöhe von 2,40 m die Rauchausbreitung bis zum Zeitpunkt $t = 600$ s im zeitlichen Verlauf. Es ist zu erkennen, dass sich der Rauch zunächst in den Flur ausbreitet bis zum Zeitpunkt $t = 559$ s der Raucheintritt in den Vorraum erfolgt.

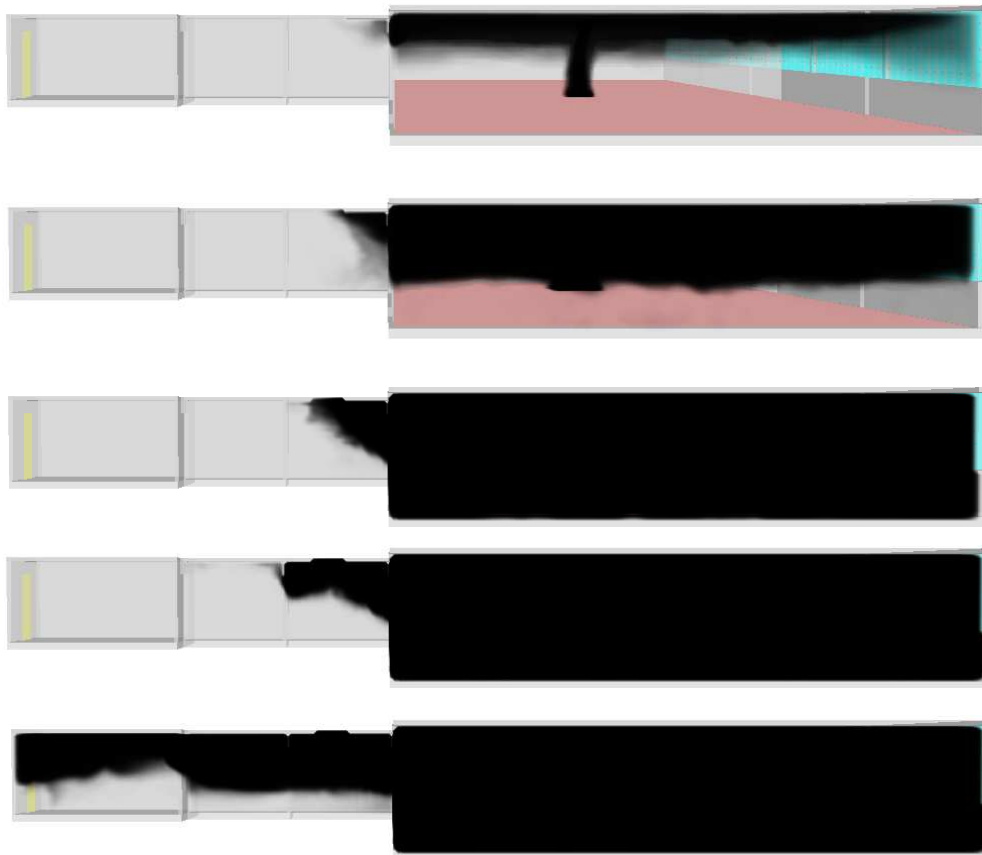


Abbildung 5.2: Rauchausbreitung bis zum Zeitpunkt $t = 600$ s

Die Abbildungen 5.3 bis 5.5 zeigt eine Übersicht über die Strömungsverhältnisse an der Tür zwischen Vorraum und Flur zum Zeitpunkt des Raucheintritts für die drei Simulationsrechnungen. Zur besseren Darstellung wurde die Strömungsgeschwindigkeit mit farbigen Vektorpfeilen visualisiert. Die Farbskala wurde auf den Bereich 0,00 m/s (blau) bis 2,00 m/s (rot) eingestellt. Es ist zu erkennen, dass der Luftstrom an der Tür zwischen Vorraum und Flur von den im Deckenbereich befindlichen Turbulenzen nach unten abgelenkt wird. Durch diese Turbulenzen strömt der Rauch in den Vorraum.

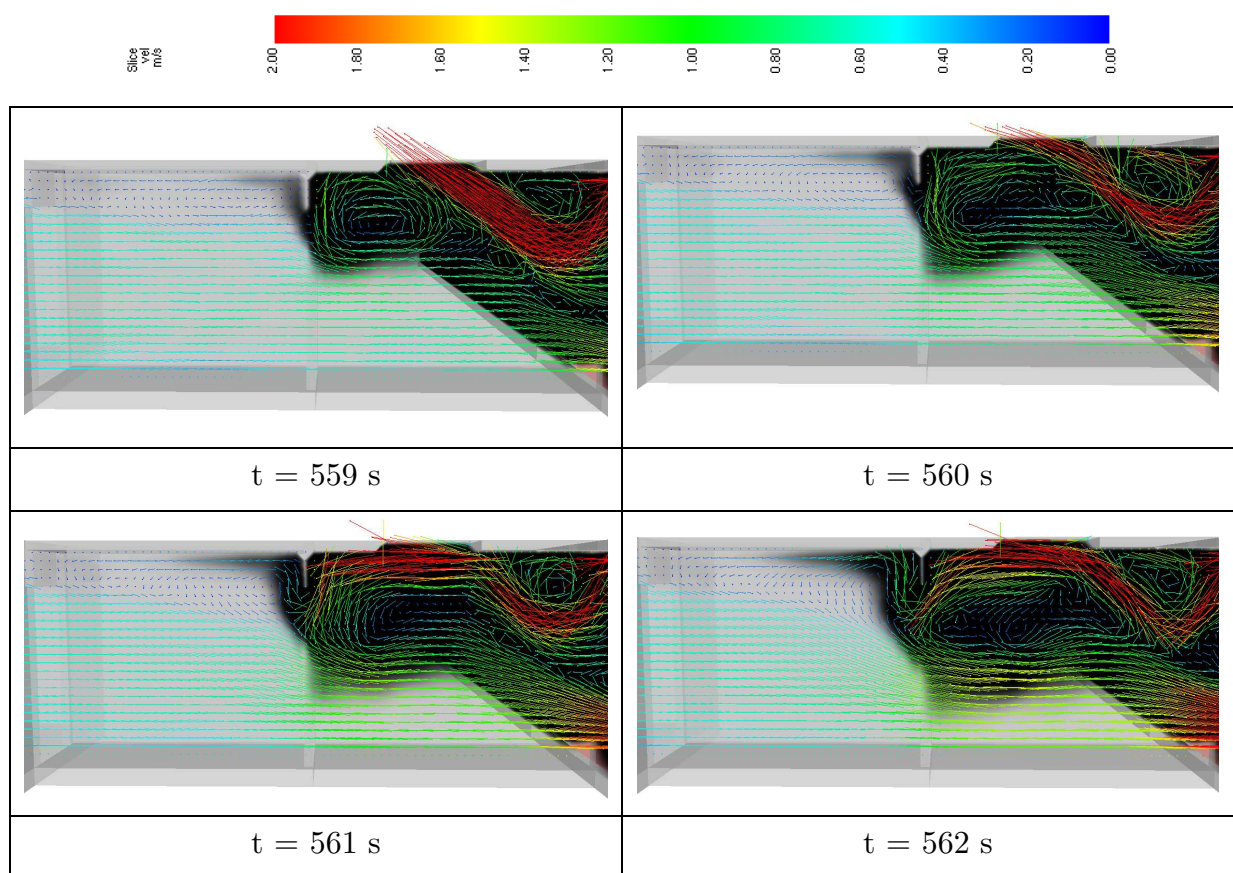


Abbildung 5.3: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 2,40 m

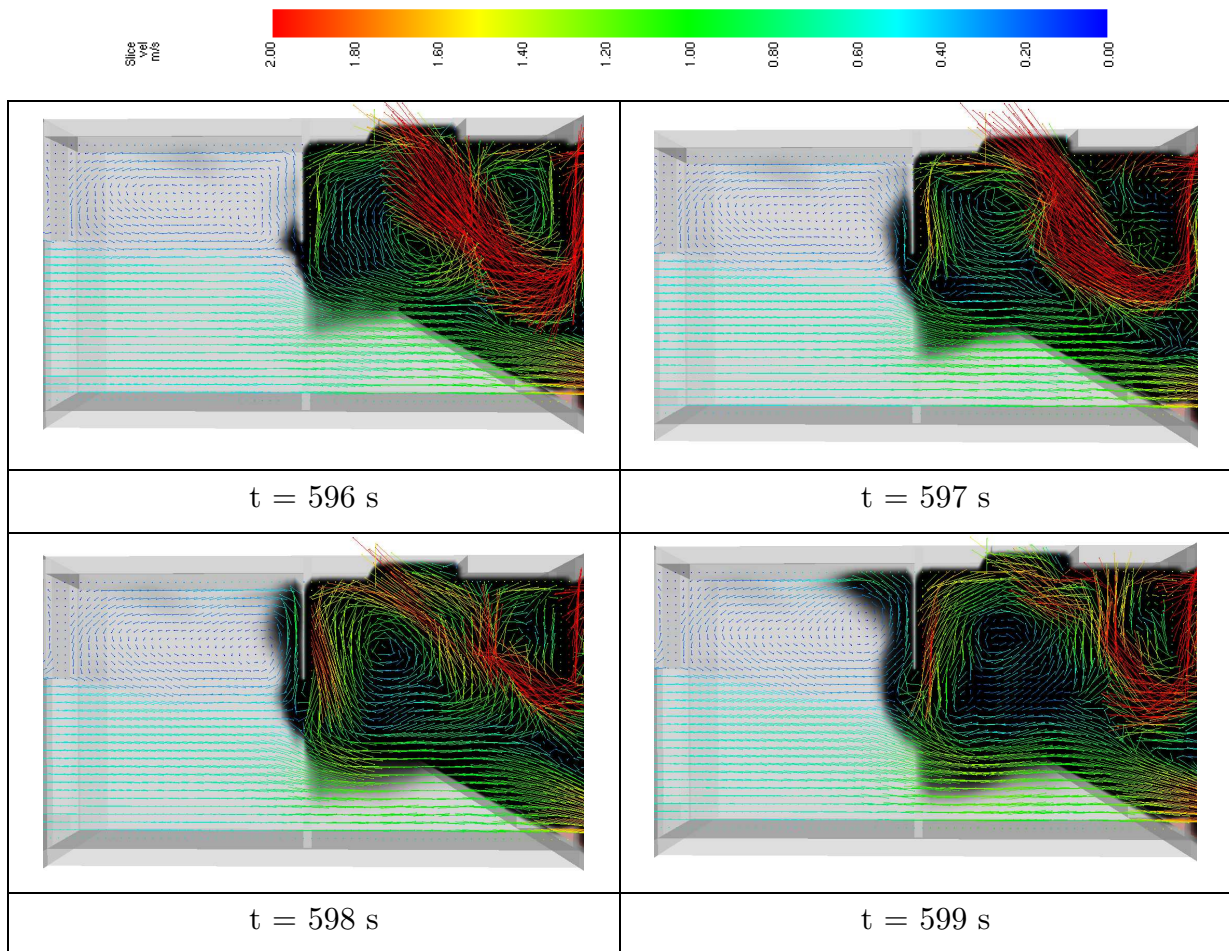


Abbildung 5.4: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 3,20 m

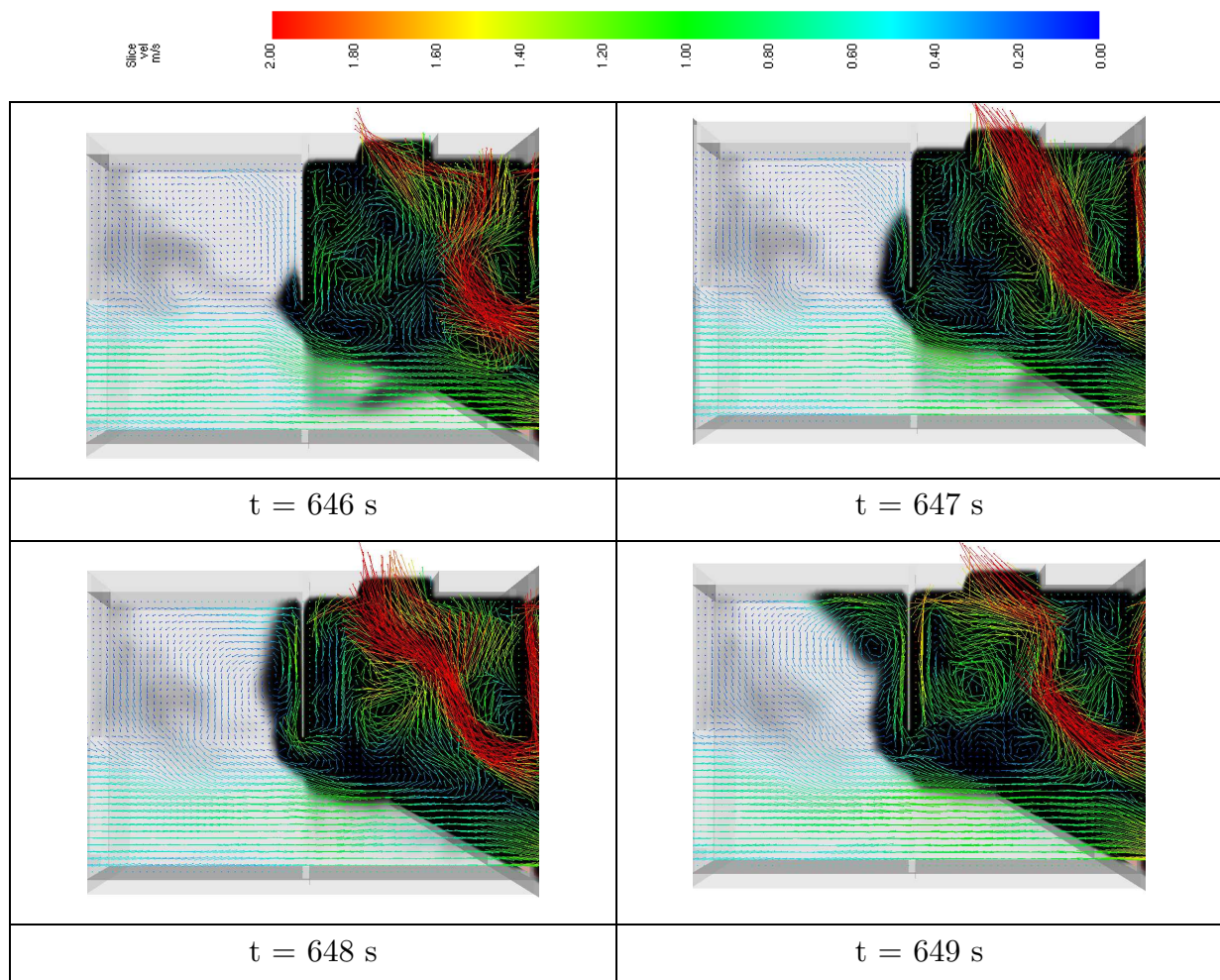


Abbildung 5.5: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 4,00 m

Anhand der durchgeführten Auswertungen konnte festgestellt werden, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,50 m/s für sämtliche betrachteten Deckenhöhen unter den gegebenen Randbedingungen nicht ausreicht, um eine Rauchfreihaltung des Vorraumes zu gewährleisten. In allen Fällen erfolgt sowohl ein Raucheintritt in den Vorraum als auch im weiteren Verlauf der Simulation ein Raucheintritt in den Treppenraum. Es lässt sich allerdings feststellen, dass eine größere Deckenhöhe begünstigend auf den Zeitpunkt des Raucheintrittes wirkt.

5.2 Simulationsrechnungen mit 1,00 m/s Strömungsgeschwindigkeit

Als nächstes wurden die Simulationsrechnungen Sim021 bis Sim029 ausgewertet. Auch hier erfolgt eine Begrenzung der Betrachtung auf die Simulationsrechnungen

mit einer Deckenhöhe von 2,40 m, 3,20 m und 4,00 m, um eine erste Aussage zu treffen. Für diese Rechnungen wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,00 m/s an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum definiert. Analog zur Auswertung in Kapitel 5.1 kann so zunächst die Rauchfreihaltung des Vorräumes überprüft und anschließend auf die anderen Simulationsrechnungen übertragen werden.

Es zeigt sich der gleiche Verlauf der Rauchausbreitung wie in Abbildung 5.2. Auch hier zeigen die Simulationsergebnisse, dass bei allen durchgeführten Simulationsrechnungen ein Raucheintritt zu verschiedenen Zeitpunkten in den Vorraum erfolgt. Bei einer Deckenhöhe von 2,40 m erfolgt der Raucheintritt zum Zeitpunkt $t = 561$ s, bei einer Deckenhöhe von 3,20 m zum Zeitpunkt $t = 597$ s und bei einer Deckenhöhe von 4,00 m zum Zeitpunkt $t = 657$ s. Dies zeigt erneut die begünstigende Wirkung einer großen Deckenhöhe. Weiterhin kann man erkennen, dass sich die Strömungsverhältnisse beim Raucheintritt analog zu den in den Abbildungen 5.3 bis 5.5 dargestellten verhalten. Eine Visualisierung der Strömungsverhältnisse und der Rauchausbreitung dieser Simulationen befindet sich auf der DVD im Anhang.

Anhand der Auswertungen konnte festgestellt werden, dass auch eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,00 m/s an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum nicht ausreichend ist, um eine Rauchfreihaltung zu gewährleisten. Wieder wurde deutlich, dass sich größere Deckenhöhen begünstigend auf die Rauchfreihaltung auswirken.

Bei einer Deckenhöhe von 4,00 m zeigte sich, dass nur ein geringerer Raucheintritt in den Vorraum des Treppenraumes erfolgt. Der Raucheintritt erfolgt in kleinen Mengen schubweise und wird danach teilweise durch die Luftströmung zurück in den Flur getragen. Es sammeln sich lediglich kleinere Mengen im Deckenbereich des Vorräumes. Abbildung 5.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rauchgaskonzentration im

Vorraum. Es zeigt sich, dass die Rauchgaskonzentration zunächst steigt, dann aber durch die Ausspülung in den Flur wieder abnimmt. Diese Konzentration ist jedoch mit ca. $0,4 \text{ g/m}^3$ im Durchschnitt über 60 s noch weit über der in Kapitel 4.6 festgelegten Grenzwertkonzentration von $0,17 \text{ g/m}^3$. Die Farbskala zeigt den Wertebereich von $0,00 \text{ g/m}^3$ (blau) bis $1,00 \text{ g/m}^3$ (rot).

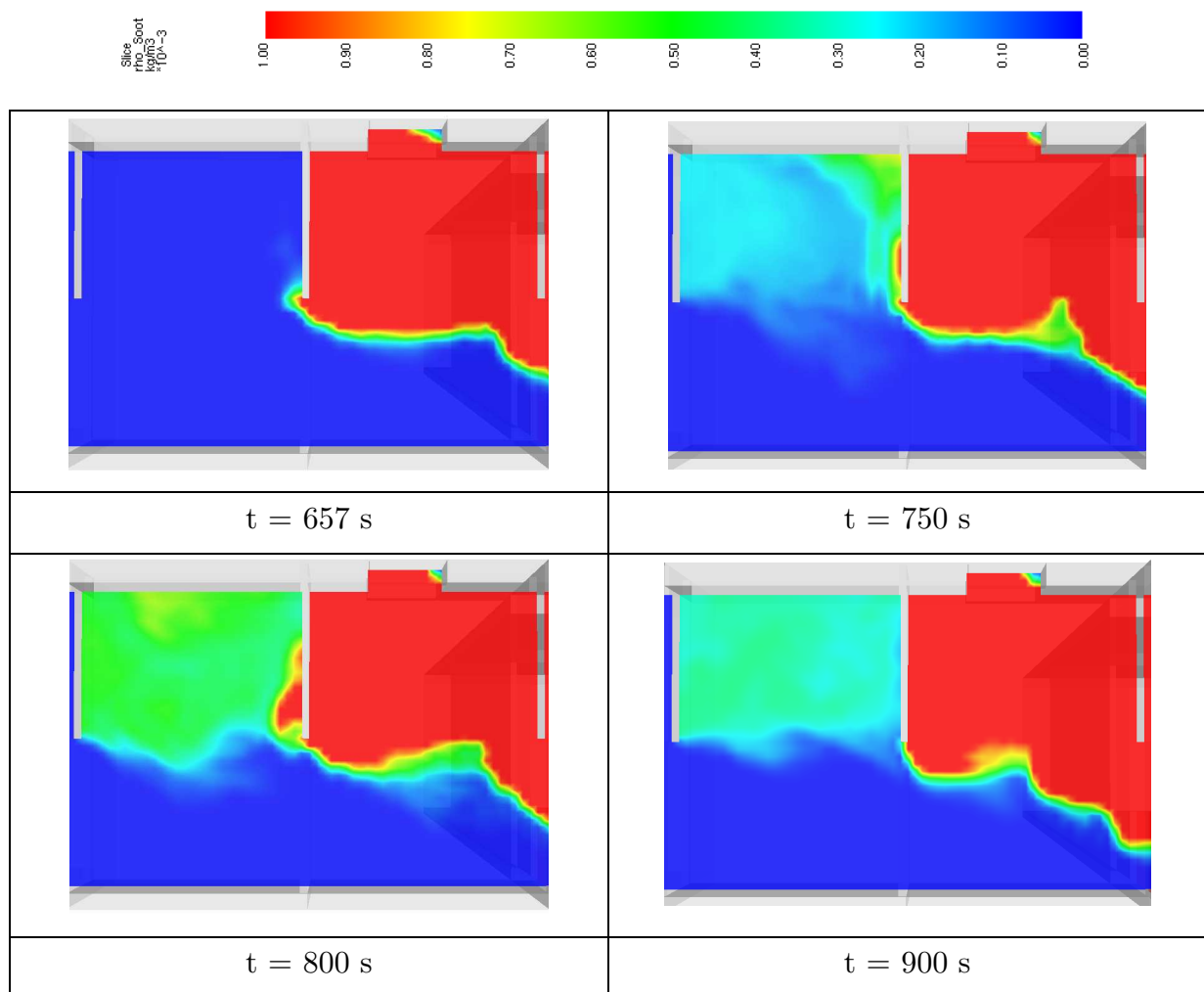


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Rauchgaskonzentration im Vorraum

5.3 Simulationsrechnungen mit $1,50 \text{ m/s}$ Strömungsgeschwindigkeit

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der Simulationsrechnungen Sim031 bis Sim039. Zunächst wurde die Betrachtung auf die Simulationsrechnungen mit einer Deckenhöhe von $2,40 \text{ m}$ und $3,20 \text{ m}$ begrenzt, um eine erste Aussage zu treffen. Für

diese Rechnungen wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,50 m/s an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum definiert.

Wieder erfolgt der gleiche Verlauf der Rauchausbreitung wie in Abbildung 5.2. Es zeigt sich, dass sowohl bei einer Deckenhöhe von 2,40 als auch bei 3,20 m ein Raucheintritt in den Vorraum erfolgt. Bei einer Deckenhöhe von 2,40 m erfolgt der Raucheintritt in den Vorraum zum Zeitpunkt $t = 891$ s. Bei der Deckenhöhe von 3,20 m erfolgt zunächst nur ein leichter Raucheintritt zum Zeitpunkt $t = 1319$ s, welcher sich im weiteren Verlauf ab dem Zeitpunkt $t = 1525$ s verstärkt. Die Strömungsverhältnisse beim Raucheintritt verhalten sich auch hier Analog zu den in den Abbildungen 5.3 bis 5.5 dargestellten Strömungsverhältnissen. Eine Visualisierung der Strömungsverhältnisse und der Rauchausbreitung dieser Simulationen befindet sich auf der DVD im Anhang.

Es zeigt sich bereits bei dieser Deckenhöhe, dass nur noch ein sehr geringer Raucheintritt in den Vorraum erfolgt. Anhand der in Kapitel 4.6 beschriebenen Berechnungen kann nun über die Auswertung der Rauchgaskonzentration eine Aussage getroffen werden, ob die definierte Grenzwertkonzentration im Vorraum überschritten wird. Abbildung 5.8 zeigt die Rauchgaskonzentration im Flur und im Vorraum. Die farbliche Skala wurde dabei so angepasst, dass die Grenzkonzentration von $m_s = 0,17$ g/m³ eindeutig erkannt werden kann. Die Farbskala wurde also auf Werte zwischen 0,16 g/m³ (blau) und 0,18 g/m³ (rot) angepasst. Die Grenzkonzentration von 0,17 g/m³ wird kurz vor dem Ende des Betrachtungszeitraumes ab dem Zeitpunkt $t = 1680$ s durchgehend überschritten. Der Raucheintritt erfolgt nur schubweise und die Rauchgase werden durch die Luftzirkulation wieder aus dem Treppenraum herausgetragen. Jedoch reicht dies bei dieser Simulation nicht aus, um die Konzentration auf einen Wert unter dem definierten Grenzwert zu reduzieren. Abbildung 5.8 zeigt die Rauchgaskonzentration exemplarisch zu verschiedenen Zeitpunkten der Überschreitung. Zur besseren

Darstellung wurde der Bodenbereich ausgeblendet und nur der relevante Deckenbereich dargestellt.

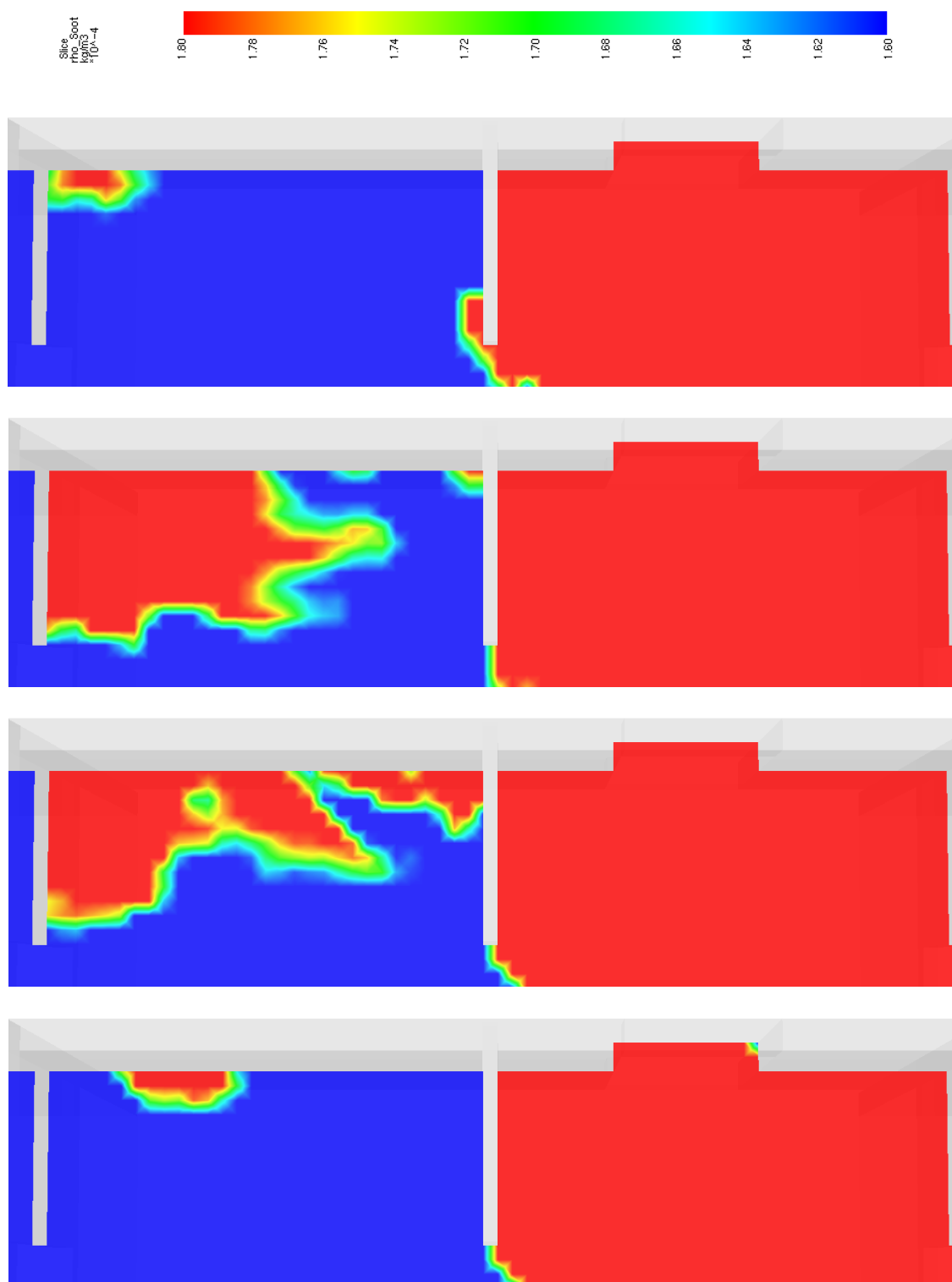


Abbildung 5.8: Rauchgaskonzentration zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation

Es folgt die Auswertung für die Deckenhöhe von 3,60 m. Bei dieser Simulationsrechnung zeigt sich, dass über die gesamte Simulationsdauer nur ein sehr geringer Raucheintritt in den Vorraum erfolgt. Abbildung 5.9 zeigt den Raucheintritt exemplarisch zum Zeitpunkt $t = 1800$ s. Eine detaillierte Darstellung befindet sich auf der DVD im Anhang.



Abbildung 5.9: Rauchausbreitung zum Zeitpunkt $t = 1800$ s

Bei dieser Simulationsrechnung zeigt sich erneut die begünstigende Wirkung der größeren Deckenhöhe. Jedoch erfolgt zu verschiedenen Zeitpunkten ein minimaler Raucheintritt in den Vorraum.

Auch hier zeigen sich die in den Abbildungen 5.3 bis 5.5 dargestellten Strömungsverhältnisse, die zu einem Raucheintritt in den Vorraum führen. Eine Visualisierung der Strömungsverhältnisse dieser Simulationen befindet sich auf der DVD im Anhang.

Auch bei dieser Simulation wurde die Rauchgaskonzentration im Deckenbereich des Vorraums für den Fall des Raucheintritts ausgewertet und in Abbildung 5.10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass vom Zeitpunkt $t = 1681$ bis zum Zeitpunkt $t = 1690$ s eine Grenzwertüberschreitung im betrachteten Bereich vorliegt. Da diese Überschreitung in einem Zeitraum < 60 s stattfindet ist das vorher definierte Kriterium nicht erfüllt.

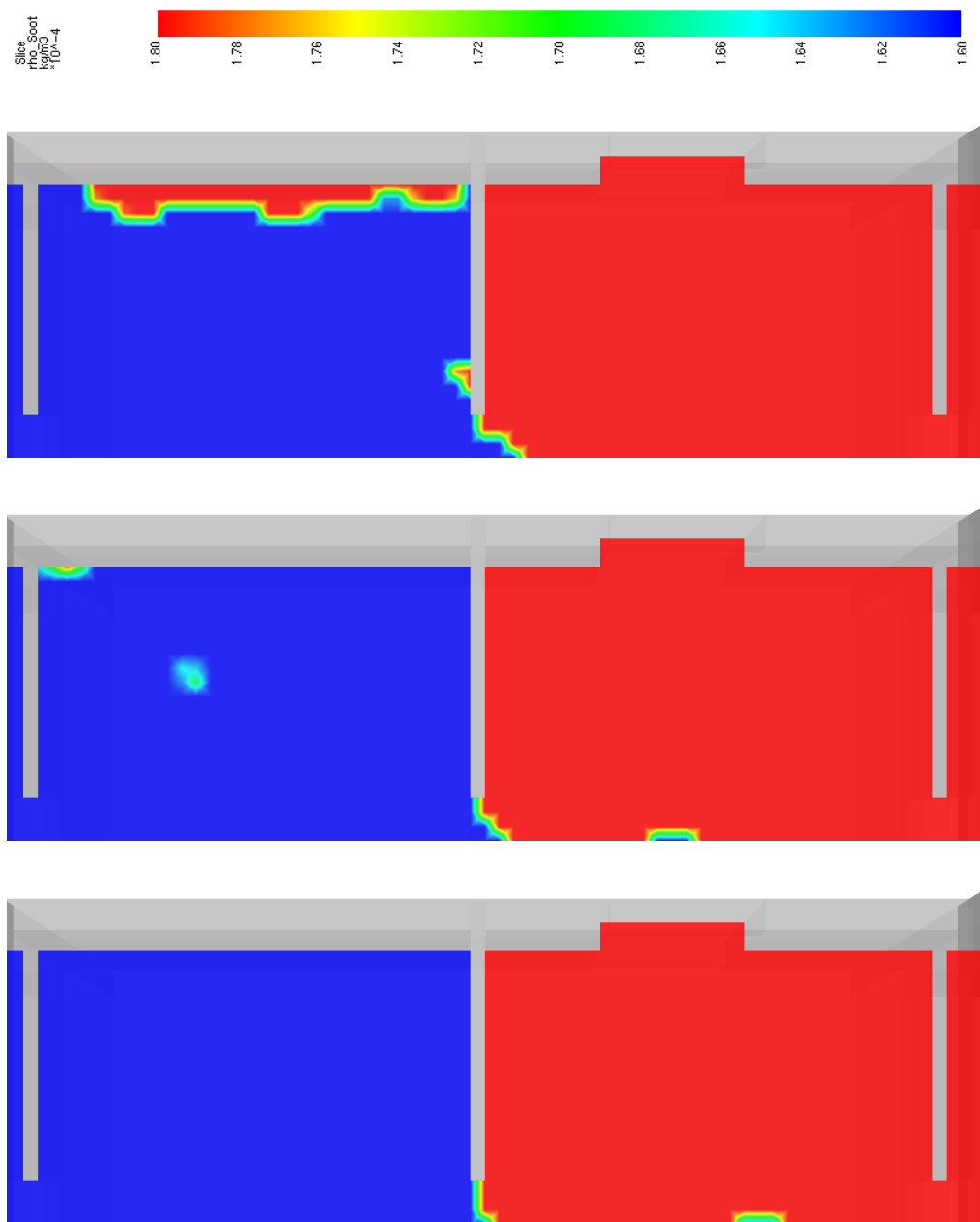


Abbildung 5.10: Rauchgaskonzentration im betrachteten Zeitraum $t = 1681$ s bis
 $t = 1690$ s

Somit ist mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 m/s und einer Deckenhöhe von 3,60 m das in Kapitel 4.6 beschriebene Schutzziel erfüllt.

Im nächsten Schritt wurde die Simulationsrechnung mit 4,00 m Deckenhöhe ausgewertet. Bei dieser Simulation erfolgt ebenfalls nur ein sehr geringer

Raucheintritt in den Vorraum. Die Rauchausbreitung findet wieder analog zu der in Abbildung 5.1 dargestellten statt. Eine genaue Visualisierung der Rauchausbreitung für diese Simulation befindet sich auf der DVD im Anhang.

Die Strömungsverhältnisse lassen sich aus Abbildung 5.3 bis 5.5 übertragen. Eine Visualisierung der Strömungsverhältnisse dieser Simulationen befindet sich auf der DVD im Anhang.

Die Grenzwertkonzentration von $0,17 \text{ g/m}^3$ wird zum Zeitpunkt $t = 1542 \text{ s}$ zum ersten Mal kurzzeitig überschritten. Eine weitere Überschreitung erfolgt zum Zeitpunkt $t = 1660 \text{ s}$. Die Grenzwertüberschreitungen im betrachteten Deckenabschnitt erstreckten sich jedoch in keinem Fall über den kritischen Zeitraum von 60 s . Abbildung 5.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rauchgaskonzentration für die Grenzwertüberschreitung bei $t = 1660 \text{ s}$.

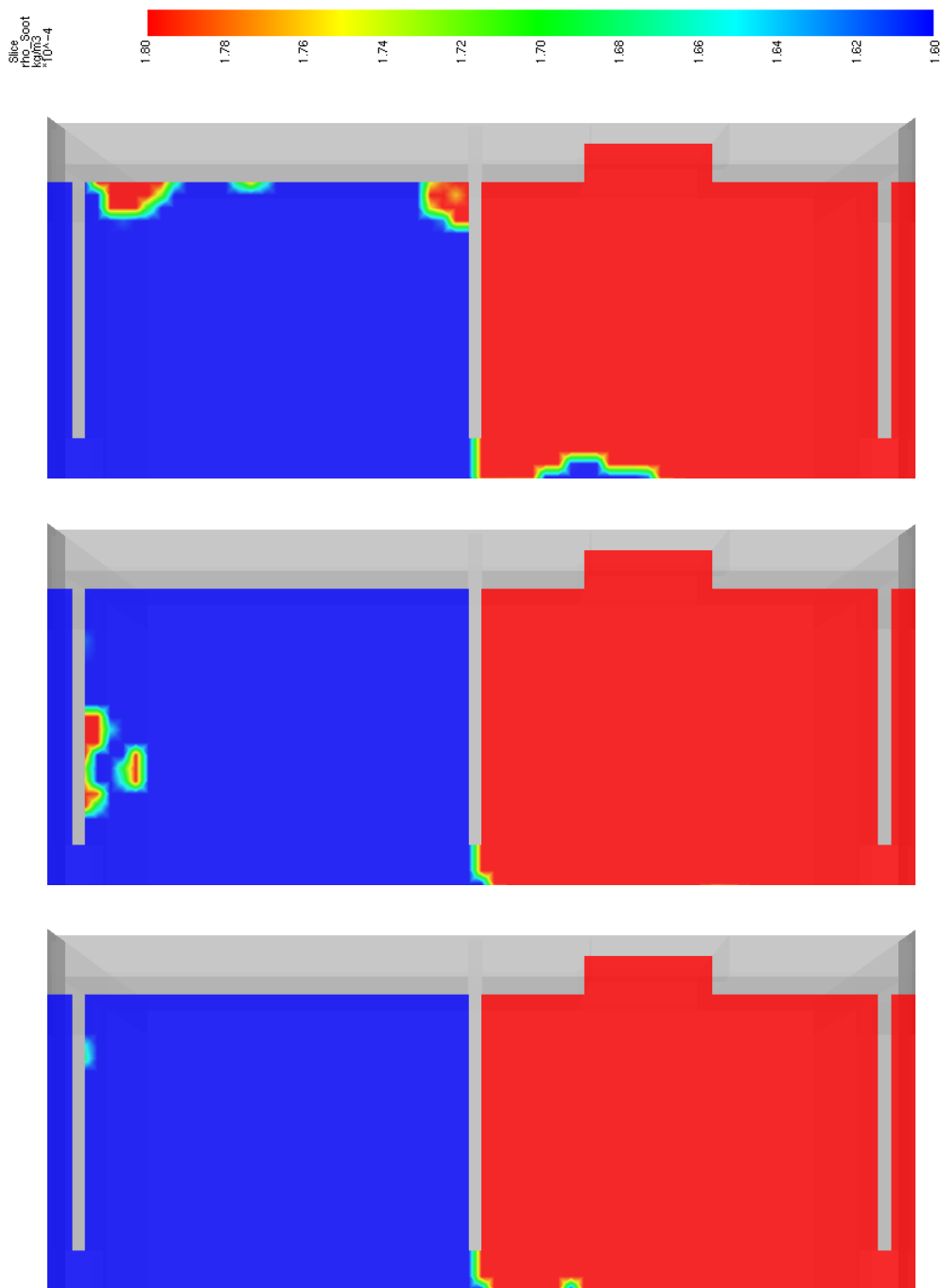


Abbildung 5.11: Rauchgaskonzentration zu den Zeitpunkten $t = 1660$ s bis

$t = 1663$ s

Auch bei einer Deckenhöhe von 4,00 m kann das in Kapitel 4.6 beschriebene Schutzziel als erfüllt angesehen werden.

5.4 Simulationsrechnungen mit 2,00 m/s Strömungsgeschwindigkeit

Als letztes wurden die Simulationen mit 2,00 m/s Strömungsgeschwindigkeit an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum ausgewertet. Es wurden zunächst die Simulationsrechnungen mit 2,40 m Deckenhöhe und 4,00 m Deckenhöhe ausgewertet. Bei beiden Simulationen zeigt sich, dass kaum Rauch in den Vorraum eintritt. Die Rauchausbreitung erfolgt analog zu der in Abbildung 5.2 dargestellten Rauchausbreitung. Ebenso stellen sich die gleichen Strömungsverhältnisse, wie in den Abbildungen 5.3 bis 5.5 dargestellt, dar. Die Visualisierung der Rauchausbreitung und der Strömungsverhältnisse befindet sich auf der DVD im Anhang.

Die Grenzwertkonzentration von $0,17 \text{ g/m}^3$ wird im Vorraum zu keinem Zeitpunkt der Simulation überschritten.

Abbildung 5.12 zeigt exemplarisch die Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800 \text{ s}$. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Grenzwertkonzentration im Vorraum nicht überschritten wird.

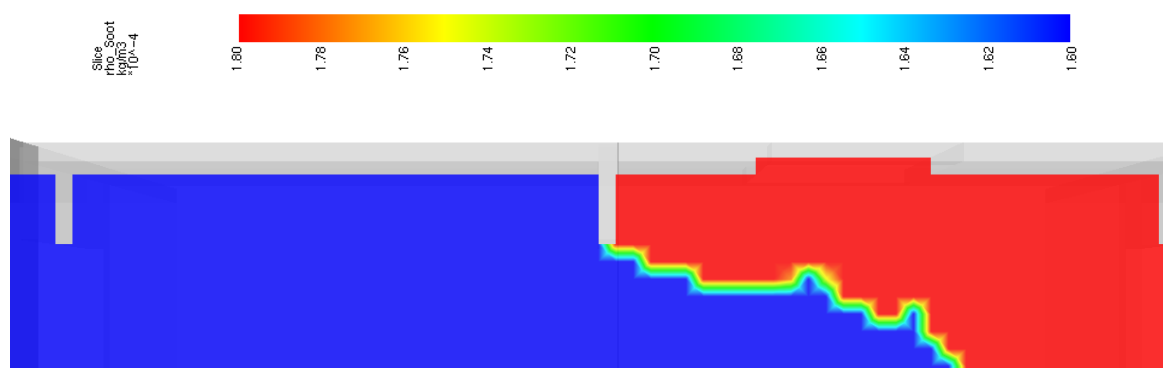


Abbildung 5.12: Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800 \text{ s}$

Analog erfolgte die Auswertung für die Simulation mit 4,00 m Deckenhöhe. Es zeigt sich auch hier, dass nur ein minimaler Raucheintritt in den Treppenraum erfolgt.

Es wird zu keinem Zeitpunkt der Simulation die Grenzwertkonzentration von $0,17 \text{ g/m}^3$ überschritten. Abbildung 5.13 zeigt exemplarisch die

Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800$ s. Auch hier ist zu erkennen, dass keine Überschreitung der Grenzwertkonzentration vorliegt.

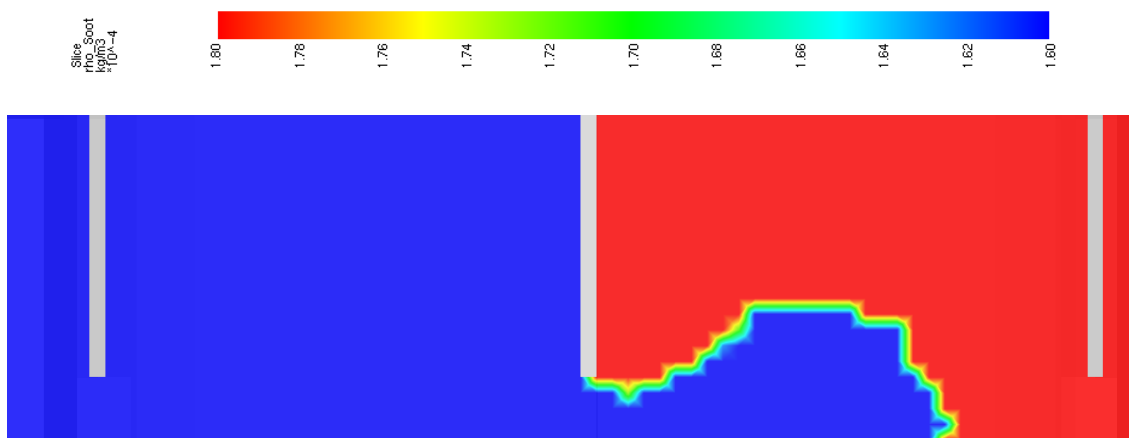


Abbildung 5.13: Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800$ s

5.5 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Auswertung der durchgeführten Simulationsrechnungen hat gezeigt, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von $0,50$ m/s und $1,00$ m/s an der Tür zwischen Treppenraum und Vorraum unter den gegebenen Voraussetzungen in keinem der betrachteten Fälle ausreichend ist. Erst bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $1,50$ m/s und einer Deckenhöhe von $3,60$ m erfolgte kein kritischer Raucheintritt in den Vorraum. Die definierte Grenzwertkonzentration von $0,17$ g/m³ wurde bei dieser Deckenhöhe nicht überschritten. Für eine weitere Eingrenzung bezüglich Deckenhöhe und Strömungsgeschwindigkeit sind weitere Simulationsrechnungen notwendig. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $2,00$ m/s fand bei keiner der untersuchten Deckenhöhen ein Raucheintritt in den Vorraum statt. Eine Auswertung aller Simulationen befindet sich auf der DVD im Anhang. Tabelle 5.1 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Bezeichnung	Raucheintritt in den Vorraum	
	Ja	Nein
Sim011	X	
Sim015	X	
Sim019	X	
Sim021	X	
Sim025	X	
Sim029	X	
Sim031	X	
Sim035	X	
Sim037		X
Sim039		X
Sim041		X
Sim049		X

Um die Rechenzeit zu minimieren und eine Eingrenzung vorzunehmen wurden zunächst nur bestimmte Simulationen durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Falle eines Raucheintritts bei einer Deckenhöhe von 2,40 m und 4,00 m auch bei den dazwischen liegenden Deckenhöhen ein Raucheintritt in den Treppenraum erfolgt. Analog lassen sich die Ergebnisse für eine Rauchfreihaltung bei Deckenhöhen von 2,40 m und 4,00 m die Ergebnisse auf die dazwischen liegenden Deckenhöhen übertragen.

Abbildung 5.14 zeigt die Auswertung in einem Diagramm. Dabei stellt die rot schraffierte Fläche inkl. der roten Linie den Bereich dar, in dem ein Raucheintritt in den Treppenraum stattfindet. Der gelb schraffierte Bereich wurde in dieser Studie nicht genauer untersucht, er stellt den Bereich zwischen der Strömungsgeschwindigkeit von 1,5 und 2,0 m/s dar. Der grün schraffierte Bereich inkl. der grünen Linie stellt den Bereich dar, in dem kein Raucheintritt in den Treppenraum erfolgt.

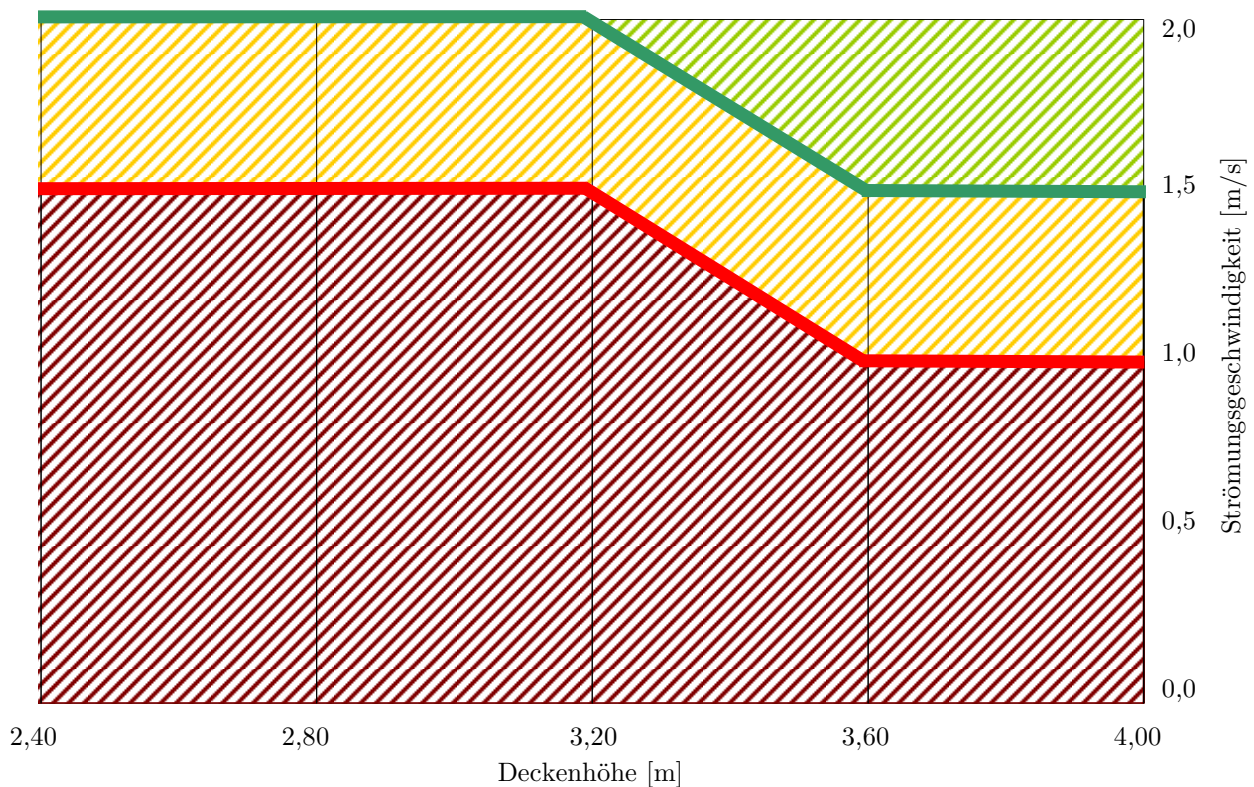


Abbildung 5.14: Darstellung der Simulationsergebnisse in einem Diagramm

Es gilt zu beachten, dass aus diesem Diagramm keine Zwischenwerte ermittelt werden können, da nur bestimmte Parameter in der Studie untersucht wurden. Für eine genauere Darstellung der Grenzbereiche müssten weitere Untersuchungen erfolgen.

Weiterhin wurde das Kriterium Raucheintritt nach den in Kapitel 4.6 beschriebenen Vorgaben bewertet. Dies stellt formell eine Abweichung der baurechtlichen

Anforderungen dar. Diese fordern, dass kein Raucheintritt in den Vorraum eindringen darf. Es wird allerdings vermutet, dass die geringen Raucheinträge unterhalb der definierten Grenzkonzentration nur dadurch erfolgen, dass die Abströmöffnung zu nah am Türsturz der Tür zwischen Vorraum und Flur angeordnet ist. Um trotzdem eine Aussage treffen zu können wurde das Kriterium in Kapitel 4.6 definiert.

6 Fazit

Mit Hilfe der Parameterstudie konnte gezeigt werden, welchen Einfluss die beiden Parameter Deckenhöhe und Strömungsgeschwindigkeit bei einer RDA in einem innenliegenden Sicherheitstreppenraum haben. Die Parameterstudie hat grundsätzlich die baurechtlichen Vorgaben für RDA in innen liegenden Sicherheitstreppenträumen bestätigt. Jedoch zeigt sich, dass eine RDA bei Abweichung von diesen Vorgaben ebenfalls funktionsfähig sein kann, wenn z.B. eine große Deckenhöhe vorliegt, die sich begünstigend auf die Rauchfreihaltung auswirkt. Es konnte allerdings keine Aussage über den exakten Grenzwert der beiden Parameter getätigt werden, bei dem das System funktioniert oder nicht funktioniert. Für eine genauere Definition sind weitere Simulationsrechnungen nötig.

Es wurde deutlich, welchen Einfluss die verschiedenen Eingabeparameter bei der Anwendung von Brandschutzingenieurmethoden haben können. Eine genaue Definition der geometrischen Randbedingungen und des Brandszenarios können das Ergebnis maßgeblich beeinflussen. Die durchgeführten Untersuchungen können als Richtwert dienen, jedoch macht die Fülle an Randbedingungen eine pauschale Aussage nicht möglich. Bei der Einzelfallbetrachtung kann diese Studie jedoch genutzt werden, um eine Abschätzung über die notwendige Strömungsgeschwindigkeit bei einem Sondernachweis zu treffen.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Brandlastdichte nach Nutzung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA [4].....	17
Tabelle 3.2: Brandintensitätskoeffizient α nach VDI 6019-1 [11]	18
Tabelle 3.3: Tabelle 2 der VDI 6019-1 [11].....	18
Tabelle 4.1: Übersicht über die durchgeführten Simulationsrechnungen.....	34
Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Kategorisierung des Brandschutzes [9].....	2
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Einrichtungen einer RDA [8].....	8
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der FDS-Simulation eines Raumbrandes [6]	13
Abbildung 3.2: Beispiel für eine Brandverlaufskurve nach VDI 6019-1.....	20
Abbildung 4.1: Einfluss der Zellengröße auf die Simulationsergebnisse.....	23
Abbildung 4.2: Darstellung der Varianten für die Zuluftfläche.....	29
Abbildung 4.3: Computermodell des Treppenraums in der Aufsicht.....	31
Abbildung 4.4: Computermodell des Treppenraums in der Seitenansicht.....	31
Abbildung 4.5: Lage der Zuluftfläche- und Abströmöffnungen.....	32
Abbildung 4.6: Übersicht über die vorhandenen Fensterflächen.....	34
Abbildung 4.7: Detaillierte Darstellung der Fenster-Teilflächen.....	34
Abbildung 4.8: Zeitlicher Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und der Brandfläche	36
Abbildung 4.9: Aufteilung der Brandflächen in der Nutzungseinheit.....	37
Abbildung 4.10: Betrachtungsbereich für die Grenzkonzentration im Vorraum.....	39
Abbildung 5.1: Versagen der Fensterscheiben im Brandraum im zeitlichen Verlauf	41
Abbildung 5.2: Rauchausbreitung bis zum Zeitpunkt $t = 600$ s.....	42
Abbildung 5.3: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 2,40 m.....	43
Abbildung 5.4: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 3,20 m.....	44
Abbildung 5.5: Übersicht über die Strömungsverhältnisse im Bereich der Tür zwischen Vorraum und Flur bei einer Deckenhöhe von 4,00 m.....	45
Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Rauchgaskonzentration im Vorraum.....	47
Abbildung 5.8: Rauchgaskonzentration zu verschiedenen Zeitpunkten der Simulation	49
Abbildung 5.9: Rauchausbreitung zum Zeitpunkt $t = 1800$ s.....	50
Abbildung 5.10: Rauchgaskonzentration im betrachteten Zeitraum $t = 1681$ s bis $t = 1690$ s.....	51
Abbildung 5.11: Rauchgaskonzentration zu den Zeitpunkten $t = 1660$ s bis $t = 1663$ s.....	53

Abbildung 5.12: Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800$ s	54
Abbildung 5.13: Rauchgaskonzentration zum Zeitpunkt $t = 1800$ s	55
Abbildung 5.14: Darstellung der Simulationsergebnisse in einem Diagramm	57

Literatur

- [1] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Technische Regeln für Arbeitsstätten: Fluchtwege, Notausgänge, Flucht- und Rettungspläne: ASR A2.3* 2007.
- [2] Der Minister für Bauen und Wohnen des Landes Nordrhein-Westfalen, *Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen: BauO NRW* 2000.
- [3] Der Minister für Bauen und Wohnen des Landes Nordrhein-Westfalen, *Verordnung über den Bau und Betrieb von Sonderbauten: SBauVO* 2009.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkung auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkung - Brandeinwirkung auf Tragwerke* 2010 (DIN EN 1991-1-2/NA).
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., *Graphische Symbole - Sicherheitsfarben und Sicherheitszeichen*, Beuth Verlag 2005 (DIN 4844).
- [6] K. McGrattan, J. Floyd, S. Hostikka, *A Mixture Fraction Combustion Model for Large Scale Fire Modelling*, In: Proceedings of IMECE'01, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York 2001.
- [7] *Musterbauordnung: MBO* 2002.
- [8] RDA-Arbeitskreis, *Rauchschutz-Druck-Anlagen Anwenderleitfaden*, <http://www.rda-arbeitskreis.de/download/Anwenderleitfaden.pdf> 2011.
- [9] U. Schneider, C. Lebeda, *Baulicher Brandschutz*, Kohlhammer, Stuttgart [u.a.] 2000.
- [10] VDI, *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden*, Beuth Verlag 2009 (6019-2).
- [11] VDI, *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden*, Beuth Verlag 2006 (6019-1).

[12] *VDI-Wärmeatlas*, 10th ed., Springer, Berlin; Heidelberg, New York 2006.

Anhang:

DVD mit folgendem Inhalt:

- Videodateien mit den Simulationsauswertungen (Rauchausbreitung, Strömungsgeschwindigkeit, Rauchgaskonzentration, Temperatur)
- Digitale Version der Bachelor-Thesis im PDF-Format