

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

**Kritische Betrachtung der maschinellen Entrauchung von Krankenhausfluren**

**Simulation der Rauchausbreitung mit numerischen Ingenieurmethoden**

Bachelorarbeit

Studiengang  
Gefahrenabwehr / Hazard Control

vorgelegt von

**Heins, Bastian**

**Hamburg**

**am 07. Februar 2020**

<b>1. Gutachter:</b>	Prof. Dr.-Ing.	Tolg, Boris	(HAW Hamburg)
<b>2. Gutachter:</b>	Dr.-Ing.	Kawohl, Anne	(Endreß Ingenieurgesellschaft)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt  
in Zusammenarbeit mit der Firma: Endreß Ingenieurgesellschaft mbH

## Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit untersucht die maschinelle Entrauchung von Krankenhausfluren mit numerischen Ingenieurmethoden. Dazu wird zunächst die Form von zwei typischen Pflegebereichen von Krankenhäusern erstellt. Anschließend wird auf Grundlage der Normenreihe DIN 18232 und dem Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes ein Bemessungsbrand für ein typisches Zwei-Personen Krankenzimmer und die Entrauchung für den kompletten Rauchabschnitt entwickelt.

Mit den so ermittelten Daten werden mit dem Programm Fire Dynamics Simulator verschiedene Feldmodelle erstellt, und so die Ausbreitung des Rauchs und die Entrauchung dargestellt. Außerdem wird ein realer Brandversuch ebenfalls modelliert und die Ergebnisse des Modells mit dem realen Versuch verglichen

Die gewonnenen Ergebnisse werden bewertet um eine Aussage über die Wirksamkeit maschineller Entrauchung in Krankenhausfluren treffen zu können.

## Vorwort

Hiermit möchte ich mich bei denen bedanken, die diese Arbeit möglich gemacht haben. Namentlich hervorzuheben sind hierbei Herr Professor Tolg, der die Arbeit von Seiten der HAW aus betreut hat und Frau Doktor Kawohl von der Endreß Ingenieurgesellschaft, die mir mit fachlichem Rat und ihrer guten Betreuung mehr als einmal zur Seite gestanden hat.

Auch der Endreß-Ingenieurgesellschaft als Ganzen und den anderen Mitarbeitern möchte ich danken: Für das spannende Praxissemester und dafür, dass sie mir die Idee für diese Arbeit und die Möglichkeit sie umzusetzen gegeben haben.

Abschließend gilt mein Dank natürlich nicht zuletzt meiner Familie und insbesondere meiner Frau, die mich immer unterstützt haben und ohne die dieses Studium für mich nicht möglich gewesen wäre.

<p>Aus Gründen der Lesbarkeit wird bei der Verwendung von Sprachformen auf verschiedene Geschlechtsformen verzichtet. Personenbezeichnungen gelten immer für alle Geschlechter.</p>
---

## Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung .....	1
Vorwort.....	1
Abkürzungsverzeichnis .....	4
1. Ziel der Arbeit .....	5
2. Stand von Technik und Wissenschaft.....	6
2.1. Wichtige Normen für Entrauchungsanlagen .....	6
2.2. Planung der Entrauchung in Krankenhäusern .....	9
2.2.1. Räumung in Krankenhäusern .....	10
2.2.2. Rauchableitung .....	11
2.3. Forschungsergebnisse zur Entrauchung von Krankenhausfluren.....	12
3. Methoden zum Nachweis der Wirksamkeit der Entrauchung.....	15
3.1. Numerische Methoden.....	15
3.1.1. Zonenmodelle .....	15
3.1.2. CFD Modelle .....	16
3.2. Entwicklung der in der Simulation verwendeten Modelle .....	16
3.2.1. Die Flurvarianten.....	17
3.2.3. Brandszenario .....	19
3.2.4. Bemessung der Entrauchung nach DIN 18232-5 .....	22
3.2.5. Beurteilungskriterien .....	26
3.3. Realbrandversuch .....	28
3.4. Die Modelle .....	31
3.4.1. Modell des Realbrandversuchs.....	31
3.4.2. Modelle der numerischen Untersuchung.....	33
4. Ergebnisse.....	36
4.1. Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit dem Realbrandversuch.....	37
4.2. Rauchausbreitung in einem geraden Flur .....	44
4.2.1. Rauchausbreitung ohne Entrauchungsanlage .....	44
4.2.2. Rauchausbreitung mit geschlossener Tür .....	47
4.2.3. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3.....	51
4.2.4. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 4.....	54
4.3. Rauchausbreitung in einem karreeförmigen Flur .....	57
4.3.1. Rauchausbreitung ohne Entrauchungsanlage .....	57
4.3.2. Rauchausbreitung mit geschlossener Tür .....	59

4.3.3. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3.....	61
4.3.4. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 4.....	64
4.3.5. Rauchausbreitung mit geschl. Tür und Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3 .....	67
5. Diskussion .....	70
Literatur .....	73
Anhang .....	I
FDS-Eingaben Realbrandversuch.....	I
Brand .....	I
Geometrie Realbrandversuch .....	I
FDS-Eingaben Modellflure .....	IV
Brand .....	IV
Geometrie Flurvariante1 .....	IV
Geometrie Flurvariante 2.....	VI
Lüftung Flurvariante 1 BMK 3.....	VIII
Lüftung Flurvariante 2 BMK 4.....	X
Dokumentation .....	XII
Temperaturentwicklung Realbrandversuch.....	XIII
Eidesstattliche Erklärung .....	XIV

## Abkürzungsverzeichnis

AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren
BMA	Brandmeldeanlage
bvfa	Bundesverband technischer Brandschutz e.V.
FDS	Fire Dynamics Simulator
FVLR	Fachverband Tageslicht und Rauchschtz
MRA	Maschinelle Rauchabzugsanlage
NIST	National Institute of Standards and Technology
NRA	Natürliche Rauchabzugsanlage
RDA	Rauchschtzdruckanlagen
RWA	Rauch- und Wärmabzug
VDMA	Verband deutscher Maschinen und Anlagenbau
vfdb	Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes
WA	Wärmeabzug

## 1. Ziel der Arbeit

Das Thema der folgenden Arbeit entstand in Zusammenarbeit mit der Endreß Ingenieurgesellschaft mbH in Folge meines Praxissemesters und der *Feuer und Rauch 2019 – Das Original*, einer Veranstaltung der Endreß Ingenieurgesellschaft, die in zweijährigem Rhythmus stattfindet. Bei der Veranstaltung wurde unter anderem ein Versuch durchgeführt, für den ein knapp 13 Meter langes Modell eines Krankenhausflurs bei einem Brand in einem nebenliegenden Zimmer durch einen Entrauchungsventilator entrauchet werden sollte.

Ziel des Versuchs war es zu zeigen, dass Entrauchung so wie sie traditionell geplant wird nicht unbedingt positiv zur Rauchfreihaltung beiträgt, und dass eine Überdimensionierung nach dem Motto „*viel hilft viel*“ bei Entrauchung auch nicht zu besseren Ergebnissen führt. Die Ergebnisse des Versuchs haben diese Annahmen eindrucksvoll bestätigt, als der Modellflur auf der niedrigen Stufe des Entrauchungsventilators trotzdem vollständig verrauchte und es bei den höheren Entrauchungsvolumina zu einer Durchzündung der Rauchgase im Flur kam und dieser komplett ausbrannte.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe von numerischen Brandsimulationen die Erkenntnisse aus dem Versuch auf vergrößerte Maßstäbe zu übertragen, um damit Aussagen zur Wirksamkeit von maschinellen Entrauchungsanlagen in Gebäuden wie Krankenhäusern oder auch Pflegeheimen treffen zu können. Dazu werden mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) verschiedene Szenarien modelliert, und analysiert ob traditionelle maschinelle Entrauchung tatsächlich zur Sicherstellung der Rettungswege in Krankenhausfluren geeignet ist.

## 2. Stand von Technik und Wissenschaft

Krankenhäuser sind aufgrund der Zusammenstellung der Personengruppen welche sich in ihnen aufhalten Gebäude mit einem hohen Gefährdungspotential. Viele der im Krankenhaus versorgten Patienten sind nicht oder nur eingeschränkt mobil, was zu einem erhöhten Aufwand führt wenn das Krankenhaus oder Teilbereiche davon geräumt werden müssen [1]. Im Jahr 2019 kam es in Deutschland zu über 50 Bränden in Krankenhäusern mit insgesamt 111 Verletzten und sieben Toten [2].

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen dienen der Abführung von Rauch und sollen eine rauchfreie<sup>1</sup> Schicht schaffen und somit die Bedingungen für eine sichere Flucht und Rettung von Menschen schaffen. Sie sollen außerdem dazu beitragen, die Brandbekämpfung zu erleichtern, einen Überschlag und damit einen Vollbrand zu verzögern oder zu verhindern und die Wärmebeanspruchung der Bauteile während eines Brandes zu vermindern [4].

Im folgenden Abschnitt soll zunächst der aktuelle Stand von Technik und Wissenschaft beleuchtet werden, zunächst an den heute gültigen Normen für Entrauchungsanlagen.

Anschließend werden die gesetzlichen Vorgaben für die Planung der Entrauchung von Krankenhäusern in Deutschland kurz zusammengefasst, und das Vorgehen bei der Räumung von Pflegebereichen beschrieben.

Simulationen der maschinellen Entrauchung von Krankenhausfluren und der Vergleich mit der Wirkung einer natürlichen Entrauchung wurden bereits 2005 von Wallasch et al [5] durchgeführt. Die Ergebnisse ihrer Untersuchungen sollen hier ebenfalls aufgegriffen werden.

### 2.1. Wichtige Normen für Entrauchungsanlagen

Die Normen der Normenreihe DIN 18232 sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik für die Rauch und Wärmefreihaltung von Gebäuden [6]. In den Normen wird zwischen natürlichen Rauchabzugsanlagen (NRA), maschinellen Rauchabzugsanlagen (MRA), Rauchschutz-Druckanlagen (RDA) und Wärmeabzügen (WA) unterschieden.

Der kombinierte Begriff Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) wird erst in der neueren Normenreihe DIN EN 12101 genannt [7, 8]. Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) nennt den Begriff RWA als Oberbegriff für die verschiedenen Anlagentechniken die in der DIN 18232-1 aufgeführt werden [9].

Weitere Normen, die bei der realen Planung von RWA berücksichtigt werden müssen, sind etwa die DIN EN 12101-3 in der vor allem die Prüfanforderungen und Bewertungsverfahren für die Ventilatoren geregelt [4] werden, oder die DIN EN 13501-4, in der die Klassifizierung der vollständige Anlage festgelegt wird.

---

<sup>1</sup> Im Folgenden wird stattdessen der Begriff „raucharme Schicht“ verwendet. In der Literatur werden beide Begriffe verwendet, wobei raucharme Schicht die neuere Bezeichnung ist und den Begriff rauchfreie Schicht ersetzen soll [3].

In dieser Arbeit soll vor allem auf maschinelle Rauchabzugsanlagen bzw. maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsanlagen eingegangen werden. Natürliche Rauchabzugsanlagen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Die Festlegungen für die Anforderungen, die Bemessung und den Einbau von MRA sind in der DIN 18232-5 geregelt [3].

Die Bemessung von maschinellen Rauchabzugsanlagen ist abhängig von der Brandleistung, der angestrebten Dicke der raucharmen Schicht und der Raumhöhe. Die raucharme Schicht sollte eine Mindesthöhe von 2,50 m haben. Zu beachten ist, dass hier eine durchschnittliche Mindesthöhe gemeint ist. Die Unterseite einer Rauchschiicht ist nicht eben, sondern kann lokal schwanken.

Die DIN setzt voraus, dass Rauchabschnittsflächen von maximal 1.600 m<sup>2</sup> vorhanden sind und der Abstand zwischen zwei raumtrennenden Umfassungsbauteilen von Rauchabschnitten maximal 60 m beträgt. Für die Bemessung ist erforderlich, dass die MRA frühzeitig durch eine Brandmeldeanlage (BMA) oder ständig anwesendes, eingewiesenes Personal eingeschaltet wird. Bei modernen Anlagen ist aber eigentlich immer eine automatische Auslösung vorgesehen [10].

Nach der Auslösung der MRA muss zudem eine ausreichende bodennahe Zuluftnachströmung sichergestellt werden. Diese Nachströmöffnungen sollten einen Abstand von wenigstens 1 m zu Unterseite der Rauchgasschicht haben und die Nachströmgeschwindigkeit sollte 1 m/s nicht überschreiten. Als natürliche Nachströmöffnungen können entweder eigene Zuluftvorrichtungen dienen oder Türen, Tore oder Fenster, die entsprechend gekennzeichnet sind. Bei einer maschinellen Zuluftnachströmung kann der Zuluftvolumenstrom dem abzuführenden Rauchgasvolumenstrom gleichgesetzt werden [3].

Die Bemessung von MRA nach der DIN 18232-5 erfolgt tabellarisch. Zur Anwendung der Tabellen wird eine Rauchabschnittsgröße von  $A = 400 \text{ m}^2$  und eine spezifische Energiefreisetzung  $\dot{q}$  von 300 kW/m<sup>2</sup> angesetzt [3]. Für Rauchabschnittsgrößen von 200 m<sup>2</sup>, 800 m<sup>2</sup> und 1.600 m<sup>2</sup> oder für eine höhere Energiefreisetzung sind in der Norm Korrekturwerte angegeben, die in Abhängigkeit von der Bemessungsgruppe korrigierte Volumenströme ergeben. 300 kW/m<sup>2</sup> entsprechen etwa der Energiefreisetzungsrates in einem typischen Büro- oder Wohnraum [10].

Aus der Brandentwicklungsdauer und der Brandausbreitungsgeschwindigkeit wird die Bemessungsgruppe der MRA ermittelt. Aus dieser Bemessungsgruppe wird unter Berücksichtigung der Höhe der raucharmen Schicht der abzuführende Volumenstrom und die mittlere Temperatur der Rauchgasschicht bestimmt. Die Brandentwicklungsdauer ist hierbei der Zeitraum von der Brandentstehung bis zum Beginn der Brandbekämpfung. In der Norm werden vier Zeiträume für die Brandentwicklungsdauer angesetzt. Unter normalen Verhältnissen darf eine mittlere Zeit von 10 min angesetzt werden, bei günstigen Verhältnissen, wie dem Vorhandensein einer Werkfeuerwehr, darf eine Brandentwicklungszeit von 5 min angesetzt werden. Bei ungünstigen Verhältnissen kann für die Bemessung eine Entwicklungsdauer von 15 min angesetzt werden und unter außergewöhnlich ungünstigen Verhältnissen eine Zeit von 20 min. Bei einer Brandentwicklungsdauer von mehr als 20 min ist eine maschinelle Rauchabzugsanlage ohne zusätzliche automatische Löschanlagen nicht mehr sinnvoll [3].



Aus der Temperatur des Rauchgasstroms und der Dicke der Rauchgasschicht wird mittels eines Nomogramms (Abbildung 1, nächste Seite) der Rauchgasvolumenstrom ermittelt, der über eine einzelne Absaugstelle maximal abgesaugt werden kann. Die tabellarisch aus der Norm ermittelten Rauchgastemperaturen berücksichtigen nicht die Wärmeverluste der Rauchschicht durch Strahlung und Wärmeabgabe an Umfassungsbauteile. Da die Rauchgasdichte temperaturabhängig ist, ist die Senkung der Temperatur auch mit einer Reduzierung des Rauchgasvolumenstroms verbunden. Insofern liegen die tabellarisch ermittelten Werte für Temperatur und Volumenstrom auf der sicheren Seite. Die Berechnung zur Korrektur der Wärmeverluste wird daher hier nicht durchgeführt. Die reduzierte Temperatur könnte vor allem auch zu reduzierten Temperaturanforderungen an die Bauteile der Rauchabzugsanlage führen, die in dieser Arbeit aber nicht berücksichtigt werden.

Aus dem maximalen Rauchgasvolumenstrom pro Absaugstelle ergibt sich die Anzahl der notwendigen Absaugstellen  $N$ .

$$N \geq \frac{\dot{V}_{RS}}{\dot{V}_{i,max}} \quad (1)$$

$\dot{V}_{RS}$  = abzuführender Volumenstrom,  
 $\dot{V}_{i,max}$  = zulässiger Volumenstrom je Absaugstelle

Der Mindestabstand  $s_{min}$  zwischen zwei Absaugstellen beträgt dabei:

$$s_{min} = 0,015 \cdot \sqrt{V_i} \quad (2)$$

$s_{min}$  in m  
 $V_i$  in m<sup>3</sup>/h

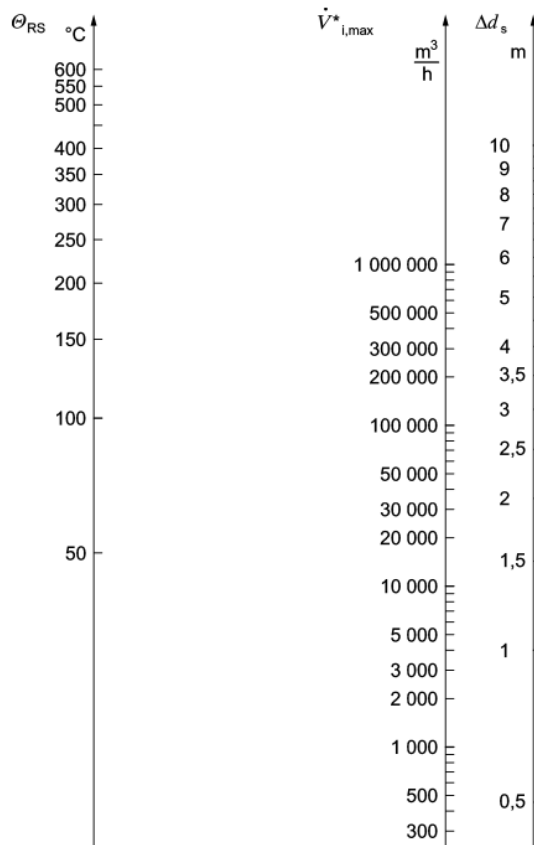


Abbildung 1: Nomogramm zur Ermittlung des maximalen Rauchgasvolumenstroms  $V^*$  in Abhängigkeit von Rauchgastemperatur und Rauchgasschichtdicke, nach DIN 18232-5 [3]

## 2.2. Planung der Entrauchung in Krankenhäusern

Nach den Bauordnungen aller 16 Bundesländer sind Krankenhäuser als Sonderbauten einzustufen<sup>2</sup>. Die weiteren rechtlichen Vorgaben zur Errichtung von Krankenhäusern unterscheiden sich aber von Land zu Land stark. Ein geregelter Sonderbau, d. h. ein Bau für den Sonderbauverordnungen erlassen sind, sind Krankenhäuser nur noch in zwei Bundesländern, namentlich in Brandenburg [11] und Berlin [12].

Zwei weitere Bundesländer haben Richtlinien für die Errichtung von Krankenhäusern aufgestellt. Im Saarland existiert eine „Richtlinie für den Bau und Betrieb und Krankenhäusern“ [13]. Das „Standard-Programm für Krankenhäuser in Schleswig-Holstein“ hat ebenfalls den rechtlichen Status einer Richtlinie [14].

<sup>2</sup> Meistens in §2 der entsprechenden Bauordnung, außer in BW (§38), NRW (§50), RLP (§50) und SH (§51)

In Baden-Württemberg wurden im April 2007 die „*Hinweise des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg über den baulichen Brandschutz in Krankenhäusern und baulichen Anlagen entsprechender Zweckbestimmung*“ (im Folgenden: Hinweise BW) herausgegeben, die die Landesbauordnung als Planungshilfe ergänzen soll aber nicht als Verordnung oder Richtlinie zu verstehen ist [15].

In Hamburg erschien im März 2016 der „*Bauprüfdienst Brandschutztechnische Anforderungen an Krankenhäuser*“ [16] (im Folgenden: BPD). Bauprüfdienste sind Arbeitsmittel, die in Hamburg den Mitarbeitern der Bauprüfabteilungen Empfehlungen und Erläuterungen für die Anwendung von Rechtsvorschriften geben sollen. Sie sind weder für die Verwaltungsmitarbeiter noch für die am Bau beteiligten bindend [17].

Es existiert zudem noch eine Muster-Krankenhausbauverordnung von 1976 (M-KhBauVO) die auf der damaligen Bauordnung basiert. Sie wurde in dieser Form nur in Nordrhein-Westfalen als Krankenhausbauverordnung (KhBauVO) in die Landesbestimmungen übernommen und ist dort seit dem 31.12.2009 außer Kraft getreten [18, 19]. Auch wenn die Muster-Krankenhausbauverordnung keine Rechtsnorm darstellt, kann sie heute noch Anwendung finden. Die Unfallkassen und Berufsgenossenschaften schreiben etwa in ihrer Veröffentlichung „*Sicheres Krankenhaus*“, dass die M-KhBauVO zur Orientierung für Bau und Betrieb von Krankenhäusern durchaus herangezogen werden kann [20].

In den übrigen Bundesländern ließen sich trotz intensiver Recherche keine Vorgaben der Länder jenseits der Landesbauordnungen für die Errichtung von Krankenhäusern finden.

### 2.2.1. Räumung in Krankenhäusern

Generell gilt für Krankenhäuser, dass eine Entfluchtung aus höher gelegenen Geschossen durch die notwendigen Treppenräume aufgrund der Mobilitätseinschränkungen der Patienten nicht immer möglich oder zumindest sehr zeitaufwendig ist. In Krankenhäusern wird daher oft für die Räumung<sup>3</sup> von Abschnitten das Konzept der Horizontalverschiebung angewendet, bei dem mobilitätseingeschränkte Personen zunächst in demselben Stockwerk in einen anderen Abschnitt gebracht werden und erst nach Eintreffen der Feuerwehr von dieser entschieden wird ob eine Evakuierung des Stockwerks oder des Gebäudes notwendig ist [1].

In den meisten Vorgaben ist daher geregelt, dass in Pflege-, OP- und Untersuchungsbereichen mindestens zwei Abschnitte vorhanden sein müssen, die bei einem Brand in einem Abschnitt ausreichend lange sicher gegen Brand und Rauchüberschlag sind. Die Details und die Begriffe unterscheiden sich dabei aber von Bundesland zu Bundesland. So sind zum Beispiel in Hamburg in OP-, Überwachungs- und Intensiv-Bereichen die Brandabschnitte zusätzlich in mindestens zwei Kompartiments zu unterteilen, in denen die medizinische Versorgung weiter sichergestellt werden kann. Die Kompartiments müssen voneinander durch feuerbeständige Wände und feuerhemmende, rauchdichte, selbstschließende Türen getrennt sein [16].

---

<sup>3</sup> Räumung meint das kurzfristige In-Sicherheit-bringen bei akuter Gefahr in einen naheliegenden sicheren Bereich. Evakuierung dagegen ist die organisierte längerfristige Verlegung in einen sicheren Bereich mit vergleichbarem Versorgungsstandard [1].

Normalpflegebereiche sind laut den Regelungen in mindestens zwei Brandabschnitte zu trennen von denen jeder Abschnitt einen Teil der Patienten des benachbarten Abschnitts vorübergehend aufnehmen können<sup>4</sup>.

Wie lange die Räumung eines Brandabschnitts dauert, ist unter anderem abhängig von der Tageszeit, dem verfügbaren Personal, der Patientenzahl und dem Anteil an mobilitätseingeschränkten Personen.

Von der Art der betroffenen Station (ambulante Station, Normalpflegestation, ICU<sup>5</sup>, etc.) hängt die Räumungszeit weniger ab. Der Anteil der mobilitätseingeschränkten Personen in einer Intensivstation ist höher im Vergleich zu einer Normalstation, dafür ist die Gesamtzahl der Patienten im Allgemeinen niedriger. Räumungsübungen haben gezeigt, dass bei guter personeller Besetzung die Räumung einer Station in weniger als zehn bis zu etwa fünfzehn Minuten abgeschlossen sein kann, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Riesner und Klinke berichteten bei den EIPOS-Sachverständigentagen von der Räumungsübung einer ICU-Station in der Universitätsklinik Schleswig-Holstein, die in zwölf Minuten abgeschlossen war [21].

In einem Bericht von Leledakis dauerte die vollständige Räumung einer normalen Pflegestation in einem realen Brandfall knapp sechzehn Minuten, der Brand ereignete sich allerdings erst gegen 21:15 Uhr, so dass bereits weniger Personal anwesend war [22].

Bei einer Räumungsübung im Herzzentrum einer deutschen Universitätsklinik, an der Mitarbeiter der Endreiß Ingenieurgesellschaft mitgewirkt haben, wurde eine ICU innerhalb von neun Minuten geräumt. Eine weitere Räumungsübung in einer anderen Universitätsklinik zeigte, dass die Räumung einer Normalpflegestation acht Minuten nach der Entdeckung des Brands abgeschlossen war<sup>6</sup>.

Bei den Räumungsübungen ist zu beachten, dass diese angekündigt waren und bei optimaler Personalbesetzung stattfanden, so dass in einem Realfall unter Umständen mehr Zeit benötigt wird.

### 2.2.2. Rauchableitung

Zur Rauchableitung sind nicht in allen Veröffentlichungen der Länder konkrete Ziele festgeschrieben. Die Muster-Krankenhausbauverordnung besagt allerdings in §22(6):

Flure ohne offenbare Fenster oder Oberlichter (innenliegende Flure), die als Rettungsweg dienen, müssen Abluftanlagen haben, die so beschaffen sind, daß sie im Brandfall Rauch ohne Gefahr für andere Räume abführen können. (§22(6) M-KhBauVO).

---

<sup>4</sup> In BW konkret geregelt mit: mindestens 30 v.H. Betten [15], in HH allgemeiner: die Personen des benachbarten Brandabschnittes, bei bettlägerigen Patienten einschließlich der Betten [16].

<sup>5</sup> Intensive Care Unit - Intensivstation

<sup>6</sup> Quelle: Firmeninterne Dokumente. Aus Datenschutzgründen sind die Namen der Krankenhäuser hier nicht genannt.

In der saarländischen Richtlinie wird ebenfalls Anlagentechnik beschrieben. Der Abschnitt 2.16.6 Richtlinie ist zu dem obenstehenden Paragraphen nahezu wortgleich, es wird nur statt von Abluftanlagen von Belüftungs- und Abluftanlagen geschrieben [13].

In Hamburg wird lediglich vorgeschrieben, dass notwendige Flure so beschaffen sein müssen, dass eine Rauchableitung aus den Fluren ohne Gefahr für die Patientenzimmer möglich sein muss. Dies kann bei außenliegenden Fluren auch über Fenster mit einer freien Öffnungsfläche von mindestens einem Quadratmeter geschehen. Bei innenliegenden Fluren muss eine vergleichbare Möglichkeit geschaffen werden, wie etwa ein Raum, der nicht der Patientenversorgung dient und über den der Rauch abgeleitet werden kann [16]. Diese Möglichkeit zur Rauchableitung dient allerdings der Entrauchung durch die Feuerwehr nach dem Löschen des Brands und nicht der Rauchfreihaltung zur Nutzung der Fluchtwege durch die im Gebäude befindlichen Personen. Die Bildung einer raucharmen Schicht zur Entfluchtung der Patienten vor dem Eintreffen der Feuerwehr durch maschinelle Entrauchungsanlagen wird nicht geregelt.

Sowohl der Hamburger Bauprüfdienst als auch die Hinweise BW schreiben außer der Unterteilung der Stockwerke in Brandabschnitte noch Rauchabschnitte von maximal 400 m<sup>2</sup> vor, was der Rauchabschnittsfläche für die tabellarische Bemessung von MRA nach DIN 18232-5 entspricht.

### 2.3. Forschungsergebnisse zur Entrauchung von Krankenhausfluren

2006 veröffentlichten Wallasch et al. „*Ein Beitrag zur Untersuchung der Entrauchung von Krankenhausfluren*“ [5] in welchem sie fünf Flurvarianten mit dem Fire Dynamics Simulator (FDS) simulierten, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Es handelt sich dabei um

- einen 30 m langen geraden Flurverlauf, mit Räumen auf beiden Seiten (FV 1)
- einen 30 m langen geraden Flurverlauf an einer Außenwand (FV 2),
- einen T-förmigen Flur mit einer Gesamtlänge von 30 m (FV 3),
- einen H-förmigen Flur mit einer Gesamtlänge von 55 m (FV 4),
- einen doppelt H-förmigen Flur mit einer Gesamtlänge von 30 m. (FV 5)

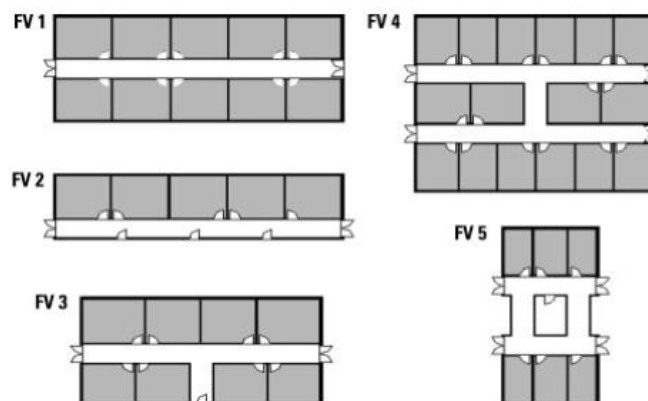


Abbildung 2: Von Wallasch et al. simulierte Flurvarianten [5]

Für jede Variante wurden vier verschiedene Entrauchungsvarianten (ERV) simuliert:

1. Natürliche Zu- und Abluft,
2. maschinelle Zu- und natürliche Abluft,
3. natürliche Zu- und maschinelle Abluft und
4. maschinelle Zu- und Abluft.

Die Entrauchung begann nach der 1. Brandminute. Die Luftabfuhr bzw. Luftzufuhrmenge bei maschineller Ab- bzw. Zuluft wurde in den Simulationen zwischen 500, 1.000, 2.000, 3.000 und 4.000 m<sup>3</sup>/h variiert.

Außerdem wurde angenommen das die Tür zwischen Brandraum und Flur insgesamt 5 Minuten offensteht, und zwar von der 2. bis zur 6. Brandminute.

Für die Beurteilung der Begehbarkeit von Rettungswegen dienen den Autoren Grenzwerte der Kohlendioxidkonzentration ( $\text{CO}_2 < 0,5 \%$ ), der Sauerstoffkonzentration ( $\text{O}_2 > 14 \%$ ), der Sichtweite ( $> 15 \text{ m}$ , bzw. halbe Rettungsweglänge) und der Temperatur ( $< 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Der Flur gilt nur dann als nutzbar, wenn alle Grenzwerte eingehalten sind.

Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass in allen Flur- und Entrauchungsvarianten nur bis zur 3. Minute die Grenzwerte eingehalten werden.

Eine ausschließlich natürliche Entrauchung (ERV 1) führt bei den Flurmodellen 1 und 4 dazu, dass der Flur erst nach über 30 min bzw. nach 24 Minuten wieder rauchfrei ist. Für die anderen Flurmodelle sind keine Ergebnisse für die natürliche Entrauchung angegeben.

Die maschinelle Entrauchung führt mit einer Zu- bzw. Abluftmenge von 4.000 m<sup>3</sup>/h zu den besten Ergebnissen. Bei den Flurgeometrien 2, 3 und 4 führen die Entrauchungsvarianten 2-4 zu ähnlichen Ergebnissen, der Flur ist nach neun Minuten, also drei Minuten nach dem Schließen der Tür des Patientenzimmers wieder begehbar. Bei den Flurvarianten 3 und 5 benötigt die ERV 2 etwas länger bis zur 12. Minute. Bei der Flurform 5 dauert es bei der Verwendung der ERV 4 ebenfalls bis zur 12. Minute. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 auf der nächsten Seite tabellarisch dargestellt.

Flurvariante (FV)	Entrauchungsvariante (ERV)	Zuluft [m <sup>3</sup> /h]	Abluft [m <sup>3</sup> /h]	Grenzwert eingehalten [Minuten]		
				bis	und	ab
1	1	na	na	3. min	>	30. min
1	2	4000	na	3. min		9. min
1	3	na	4000	3. min		9. min
1	4	4000	4000	3. min		9. min
2	2	4000	na	3. min		9. min
2	3	na	4000	3. min		9. min
2	4	4000	4000	3. min		9. min
3	2	4000	na	3. min		12. min
3	3	na	4000	3. min		9. min
3	4	4000	4000	3. min		9. min
4	1	na	na	3. min		24. min
4	2	2 x 4000	na	3. min		9. min
4	3	na	2 x 4000	3. min		9. min
4	4	2 x 4000	2 x 4000	3. min		9. min
5	2	2 x 4000	na	3. min		12. min
5	3	na	2 x 4000	3. min		9. min
5	4	4000	4000	3. min		12. min

Abbildung 3: Von Wallasch et al erhaltene Ergebnisse zur Einhaltung der Grenzwerte, na steht für natürliche Ab-/Zuluft [5]

Insgesamt sprechen die von Wallasch et al simulierten Entrauchungen deutlich für eine maschinelle Entrauchung im Vergleich zu einer natürlichen. Die Geometrie der Flurvariante 1 soll in dieser Arbeit ebenfalls simuliert werden. Die Annahmen, die Wallasch et al getroffen haben, werden aber nur zum Teil übernommen. Zusätzlich zu der dargestellten Flurvariante 1 soll mit einem Karreeförmigen Flur eine weitere Variante untersucht werden.

## 3. Methoden zum Nachweis der Wirksamkeit der Entrauchung

### 3.1. Numerische Methoden

Die Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb) nennt drei Gruppen von mathematisch deterministischen Modellen zur Simulation von Brandverläufen: Empirisch belegte Ansätze, Zonenmodelle und Feldmodelle (im Folgenden auch: CFD-Modelle, von engl.: Computational Fluid Dynamics). Empirisch belegte Ansätze meinen hierbei auf Experimenten beruhende Gleichungen die sich auf ganz bestimmte Problemstellungen beziehen, wie etwa die Abhängigkeit der Flammenhöhen von der Brandintensität [10].

#### 3.1.1. Zonenmodelle

Zonenmodelle beruhen auf vereinfachten Gleichungssystemen zur Lösung von Problemen der Strömungsdynamik. Im Fall von Zonenmodellen zur Untersuchung von Brandverhalten basieren sie auf der Trennung zwischen einer warmen Rauchgasschicht und einer darunterliegenden kälteren raucharmen Luftschicht. Die jeweilige Schicht hat ihre eigene Masse, innere Energie, mittlere Temperatur, Dichte und Volumen. Zwischen den Schichten liegt hierbei eine imaginäre horizontale Trennfläche, die den Massenaustausch zwischen den Schichten verhindert, außer etwa im Bereich der Plume<sup>7</sup> und speziellen Masseaustauschströmen. Innerhalb der Zonen werden die Fluide als ruhend angenommen. Ausnahmen bilden hier wiederum die Bereiche von Plume oder von Ventilationsöffnungen. Durch Bilanzgleichungen von Masse und Energie verändern sich die Schichten über die Zeit [10].

Der Plume-Massenstrom führt der Rauchgasschicht Masse und Energie zu und der raucharmen Schicht Energie. Massenströme zwischen den Schichten und der Umgebung werden auf Grundlage der Bernoulli-Gleichung über die Druckunterschiede in Abhängigkeit von der Raumhöhe berechnet. Die Energiebilanz wird über die pro Zeiteinheit durch die Verbrennung freigesetzte Energie und die durch Konvektion durch Öffnungen und Konvektion und Strahlung an die Umfassungsbauteile abgegebene Energie bestimmt [10].

Der Modellaufwand und folglich auch der Rechenaufwand sind deutlich geringer als bei CFD-Modellen. Im Vergleich zu CFD-Modellen sind Zonenmodelle dafür auch weniger exakt und beschreiben viele Parameter nur angenähert oder vereinfacht, da schon die Eingaben im Vergleich zu CFD-Modellen oft nur angenähert die tatsächliche Situation darstellen können. Die Bedeutung von Zonenmodellen im Vergleich zu CFD-Modellen hat in den vergangenen Jahren nicht zuletzt deswegen deutlich abgenommen. [10]

Ein Beispiel für ein Programm zur Entwicklung von Zonenmodellen ist etwa CFAST (Consolidated Model of Fire and Smoke Transport), das vom National Institute of Standards and Technology (NIST) entwickelt wurde und das seit 2015 in Version 7 vorhanden ist [23].

---

<sup>7</sup> Aufsteigende Heißrauchsicht über der Flamme



### 3.1.2. CFD Modelle

CFD-Modelle sind Verfahren um Probleme der Strömungsdynamik numerisch zu lösen. Im Vergleich zu Zonenmodellen sind die Gleichungssysteme weniger vereinfacht, sie basieren stärker auf den fundamentalen Gleichungssystemen. Aus den Kontinuitätsgleichungen zur Erhaltung von Masse, Energie und Impuls werden Erhaltungsgleichungen abgeleitet und die Veränderungen elementarer Größen beschrieben.

Da die Erhaltungsgleichungen in der Regel nicht analytisch gelöst werden können, lösen die Modelle sie numerisch. Dazu wird ein dreidimensionales Rechengitter erstellt und über das Gebiet gelegt. In den meisten Modellen ist die Auflösung des Gittes variabel. Üblicherweise werden für die Erstellung des Gitters ein kartesisches Koordinatensystem und rechtwinklige Gitterstrukturen verwendet, andere Strukturen sind auch möglich

Für Simulationen von Räumen in der Größe, die in dieser Arbeit dargestellt werden, werden üblicherweise Quader mit Kantenlängen von 10 – 40 cm verwendet. Neben einer Unterteilung des Raumes in endliche Volumina wird auch die Zeit diskretisiert und die Veränderungen des Systems nach einem kleinen Zeitschritt berechnet. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung bedeutet, dass die vorhandenen Erhaltungsgleichungen über endliche Zeitintervalle und Volumina integriert werden, diese Methode nennt sich daher Finite-Volumen-Methode.

Mit steigender Reynoldszahl gehen laminare Strömungen in turbulente Strömungen über. Die turbulenten Strömungen sind unregelmäßig, nicht stationär und dreidimensional. Die Darstellung von turbulenten Strömungen und sich bildenden Wirbeln ist durch die Auflösung des Gitters häufig beschränkt, so dass kleine Wirbel nicht dargestellt werden können. Zur Berücksichtigung wurden verschiedene Turbulenzmodelle entwickelt, die die durch die Turbulenzen entstehenden Effekte berücksichtigen, ohne die kleinsten Wirbel explizit zu berechnen. Dies kann beispielsweise durch zusätzliche Variablen in den hydrodynamischen Erhaltungsgleichungen geschehen.

Programme zur Erstellung von CFD-Modellen sind unter anderem KAMELEON FireEX, KOBRA-3D, SOLVENT oder FDS.

In dieser Arbeit wird FDS zur Erstellung der Modelle verwendet. FDS ist ein Programm zur Generierung von CFD-Modellen das seit 2000 vom NIST und dem VTT Technical Research Centre of Finland herausgegeben und aktualisiert wird. FDS wird verwendet, da es in den letzten 20 Jahren aufwendig validiert und verifiziert wurde. Für diese Arbeit wird FDS in der Version 6.7.3. verwendet.

Smokeview dient der grafischen Darstellung der in FDS gewonnenen Daten. Für diese Arbeit wird Version 6.7.10 verwendet.

### 3.2. Entwicklung der in der Simulation verwendeten Modelle

Ziel der Simulationen ist es festzustellen ob maschinelle Entrauchungsanlagen im Vergleich zu keinerlei Entrauchung zu einer Verbesserung oder einer Verschlechterung der Sicherheit der Rettungswege führen.

Es wurden insgesamt neun Simulationen durchgeführt. Dabei wurden zwei Flurgeometrien und vier verschiedene Szenarien pro Geometrie untersucht. Zusätzlich wurde die Simulation eines bereits erfolgten Realbrandversuchs durchgeführt und geprüft, ob sich die Ergebnisse der Simulation mit den Beobachtungen des Realbrandversuchs decken.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Rahmenbedingungen festgelegt, aus denen in Kapitel 3.4 das Modell erstellt wird. Für die Erstellung des Bemessungsbrandszenarios wird nach den Hilfestellungen des Leitfadens Ingenieurmethoden vorgegangen und zunächst die Brandraumgeometrie festgelegt, dann die Brandlast und die Brandphasen, und schließlich die Ventilationsbedingungen [10].

### 3.2.1. Die Flurvarianten

Bei den untersuchten Flurgeometrien handelt es sich um einen geraden Flur mit Zimmern an beiden Seiten und um einen Flur der drei Seiten eines Karrees bildet.

Die Varianten wurden gewählt, da sowohl die Hinweise BW, als auch der BPD eine maximale Rauchabschnittsgröße von 400 m<sup>2</sup> fordern. Der BPD nennt zusätzlich eine maximale Flurlänge von 30 m.

Aus der Kombination dieser Anforderungen wurde die erste Geometrie gebildet. Der Flur ist 30 m lang und die Gesamtfläche beträgt 391,5 m<sup>2</sup> (Abbildung 4).

Für die Erstellung der zweiten Variante wurde von einem quadratischen Grundriss ausgegangen und versucht einen in Deutschland möglichen Fluraufbau realistisch abzubilden. Die Fläche des Modells in der zweiten Variante beträgt rund 370 m<sup>2</sup> und der längste Fluchtweg vom Flur in den nächsten Rauchabschnitt ist knapp 18 m lang (Abbildung 5, nächste Seite).

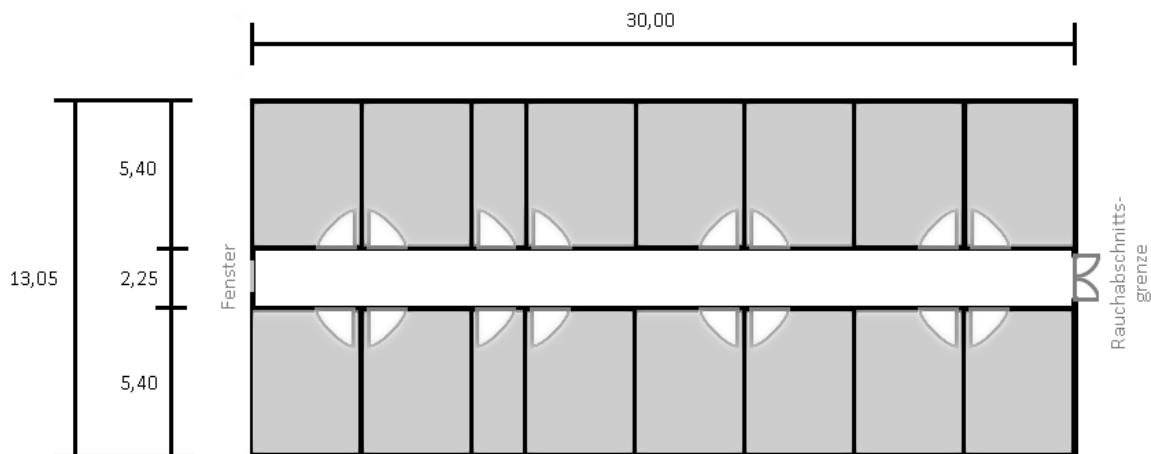


Abbildung 4: Modell 1: Langer gerade Flur, alle Angaben in m.

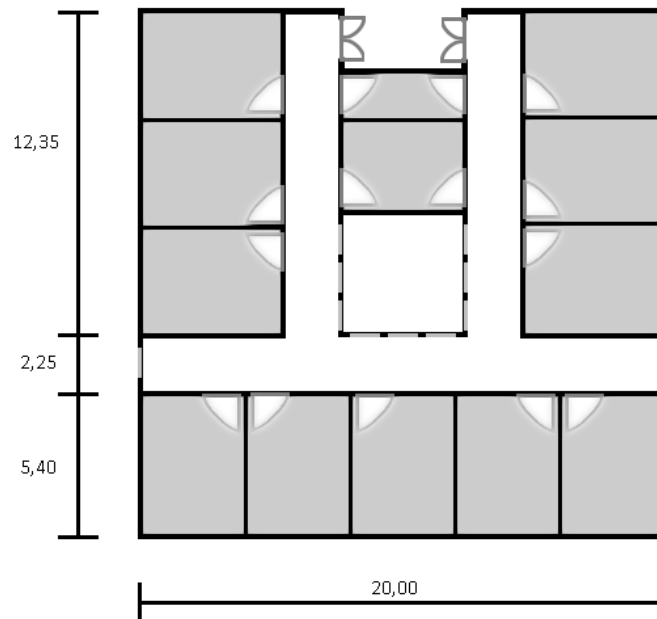


Abbildung 5: Modell 2: Karreeförmiger Flur, alle Angaben in m.

Für beide Varianten gelten die folgenden Annahmen:

- der Flur ist 2,25 m breit<sup>8</sup>
- der Flur ist 3 m hoch
- vorhandene Fenster haben die Maße  $B \times H = 1 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$
- der Brandraum ist ein 2-Personenzimmer mit  $16 \text{ m}^2$  Grundfläche und 3 m Höhe<sup>9</sup> (Abbildung 6)
- die Tür vom Brandraum zum Flur hat die Maße  $B \times H 1,35 \text{ m} \times 2,10 \text{ m}$
- Um Rechenzeit zu sparen, werden in der Simulation nur der Brandraum und der Flur dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass die Türen zu den anderen Räumen geschlossen sind.

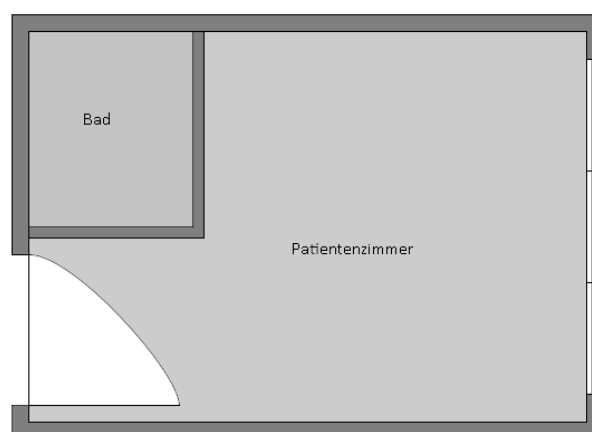


Abbildung 6: Patientenzimmer

<sup>8</sup> Mindestbreite nach DGUV Informationen 207-016 [24] und Hinweise BW [15].

<sup>9</sup> Mindestmaße für ein 2 Personen Patientenzimmer nach DGUV Informationen 207-027 [25]

### 3.2.3. Brandszenario

Die Rauchentwicklung bei einem Brand hängt stark davon ab, wie optimal eine Verbrennung abläuft. In dieser Arbeit soll die Rauchentwicklung bei dem Brand in einem durchschnittlichen Patientenzimmer als Grundlage für die Simulation dienen. Nach Reintsema und Hartung entstehen 14 % der Krankenhausbrände in den Patientenzimmern, die somit den zweithäufigsten Brandentstehungsort nach den öffentlichen Bereichen, wie Fluren, Treppenträumen, Aufzügen und Eingangsbereichen (insgesamt 19,9 %) bilden [26].

Nach der VDI 6019 ist der zeitliche Ablauf eines Brandes durch verschiedene Entwicklungsstufen gekennzeichnet. Erstens die Brandentstehungsphase mit niedriger Wärmefreisetzungsrate, dann der fortentwickelte Brand oder auch Brandentwicklungsphase, in dem Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche quadratisch zunehmen, gefolgt von einem stetigen Brandverlauf, mit konstanter Wärmefreisetzungsrate und Brandfläche beim Vollbrand und schließlich einem abklingenden Brand nach Beginn der Brandbekämpfungsmaßnahmen oder wenn ein ausreichend großer Teil der Brandlast verbrannt ist [27].

In Abbildung 7 wird die Wärmefreisetzungsrate während der Brandphasen eines natürlichen Brands, beginnend mit der Entwicklungsphase dargestellt. Die Brandentstehungs- und Schwelbrandphase sind nicht dargestellt, daher beginnt die Wärmefreisetzungsrate nicht bei null, sondern bei  $\dot{Q}_s$ . Die Wärmefreisetzungsrate ist bei einem ausreichend belüfteten Brandraum nur durch die Brandlast begrenzt (brandlastgesteuert). Ist die Ventilation unzureichend, so begrenzt diese die Wärmefreisetzungsrate, da dem Brand nicht genug Sauerstoff zur Verfügung steht (ventilationsgesteuert).

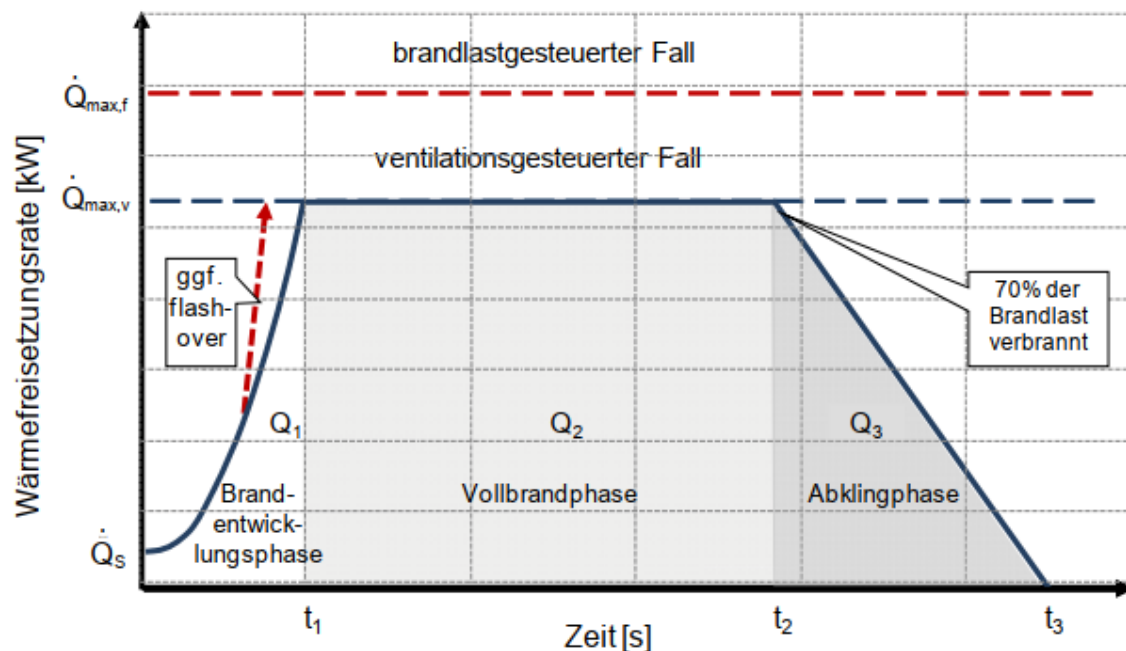


Abbildung 7: Brandphasen nach der Brandentstehungsphase, verändert nach Leitfaden der Ingenieurmethoden des Brandschutzes [10]

Für die Entwicklung der Modelle werden die Brandentwicklungsphase und die Vollbrandphase simuliert. Ein abklingender Brand durch Brandbekämpfung ist nicht Teil der Simulation, es wird zudem angenommen, dass genügend Brandlast vorhanden ist, damit während der Simulationsdauer nicht von selbst die Abklingphase eintritt.

Der Leitfaden für Ingenieurmethoden nennt zwei Ansätze für die Bemessung der Wärmefreisetzung in der Brandentwicklungsphase. Das  $t^2$ -Modell und das geometrische Modell, das mit einer flächenbezogenen Wärmefreisetzungsrates rechnet. Der geometrische Ansatz bestimmt zunächst die Entwicklung der Brandfläche in Abhängigkeit von der Zeit und danach mit flächenbezogenen Brandleistungen, stoffbezogenen Massenabbrandgeschwindigkeiten und Heizwerten die Brandverlaufskurve. Bei einer Ausbreitung in einem  $360^\circ$  Winkel entspricht der Brandverlauf etwa der  $t^2$ -Kurve. In dieser Arbeit wird für die Wärmefreisetzung das  $t^2$ -Modell zugrunde gelegt.

Das  $t^2$ -Modell verwendet verschiedene Brandentwicklungsklassen, langsam, mittel, schnell und sehr schnell, und beschreibt die Brandentwicklung nach einem quadratischen Ansatz. Für ein typisches Krankenzimmer kann eine mittlere Brandentwicklungsklasse angesetzt werden. Die Wärmefreisetzung steigt an, bis die maximale Wärmefreisetzungsrates (Brandlast- oder ventilationsgesteuert) erreicht wird, oder bei zu geringer Ventilation die Bedingungen für einen Flashover<sup>10</sup> gegeben sind. Gleichung (3) beschreibt die Entwicklung der Wärmefreisetzungsrates.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (3)$$

$\alpha$  in kW/s<sup>2</sup>, für eine mittlere Brandentwicklungsdauer ist  $\alpha = 0,01172$  kW/s<sup>2</sup>

In Gleichung (4) wird der Verlauf der Wärmefreisetzung über die charakteristische Brandentwicklungszeit  $t_g$  berechnet. Die charakteristische Brandentwicklungszeit entspricht der Branddauer bis zum Erreichen einer Brandstärke von 1 MW.  $\dot{Q}_S$  ist die Wärmefreisetzungsrates beim Übergang vom Entstehungs- in den Entwicklungsbrand. Für  $\dot{Q}_0$  wird ein Wert von 1000 kW angesetzt.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2 \quad (4)$$

Die charakteristische Brandentwicklungszeit  $t_g$  beispielsweise eines Wohnraums oder eines Krankenzimmers beträgt 300 s.

---

<sup>10</sup> Sprunghafter Übergang von einem Entwicklungsbrand in einen Vollbrand durch Entzünden aller brennbaren Oberflächen in einem Raum: Über einem örtlich begrenzten Brand werden unter der Decke unverbrannte Pyrolysegase angereichert. Bei der Überschreitung einer zündfähigen Konzentration und einer ausreichenden Zündtemperatur entzünden sich diese Gase und die Hitzestrahlung der mit Flammen durchsetzten Heißgase entzündet die im Raum befindlichen brennbaren Oberflächen [10].

Die maximale Wärmefreisetzung kann auf drei Möglichkeiten kontrolliert werden: Die maximal mögliche Brandfläche, die maximale Wärmefreisetzungsrates in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen und über die vorhandene Brandmasse.

$$\dot{Q}_{max,f} = A_{F,max} \cdot \dot{q} \quad (5)$$

Gleichung (5) beschreibt die maximale Wärmefreisetzung aus der gegebenen Fläche. Die maximale Brandfläche  $A_{F,max}$  beträgt 16 m<sup>2</sup> und spezifische Wärmefreisetzungsrates  $\dot{q}$  eines typischen Patientenzimmers wird in der Literatur mit 250 kW/m<sup>2</sup> angegeben [10]. Hieraus ergibt sich eine maximale Wärmefreisetzungsrates:  $\dot{Q}_{max,f} = 4.000 \text{ kW}$ .

Die maximale Wärmefreisetzung  $\dot{Q}_{max,v}$  in Abhängigkeit von den Ventilationsbedingungen berechnet sich nach Gleichung (6):

$$\dot{Q}_{max,v} = 0,1 \cdot \chi \cdot H_i \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad (6)$$

Verbrennungseffektivität  $\chi = 1$ , Heizwert  $H_i = 18,6 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$ , Fläche der Ventilationsöffnungen  $A_w$ , mittlere lichte Höhe der Ventilationsöffnung  $h_w$

Die ventilationsabhängigen maximalen Wärmefreisetzungsrates schwanken stark mit den gewählten Ventilationsbedingungen. Teilweise geöffnet steht in diesem Fall für eine 0,15 m breite Öffnung an jedem Fenster.

Nur Tür zum Flur offen:  $A_w = 2,835 \text{ m}^2, h_w = 2,10 \text{ m}$ .  
 $\Rightarrow \dot{Q}_{max,v} = 7.641 \text{ kW}$

Tür offen und Fenster teilweise geöffnet :  $A_w = 7,335 \text{ m}^2, h_w = 1,95 \text{ m}$ .  
 $\Rightarrow \dot{Q}_{max,v} = 10.817 \text{ kW}$

Nur Fenster offen:  $A_w = 4,50 \text{ m}^2, h_w = 1,50 \text{ m}$ .  
 $\Rightarrow \dot{Q}_{max,v} = 10.251 \text{ kW}$

Die maximale Wärmefreisetzung, die sich aus der Brandmasse ergibt, wird nicht berechnet, wie oben beschrieben wird angenommen, dass die Brandmasse ausreichend ist. Da unabhängig von den gewählten Bedingungen die ventilationsabhängigen maximalen Wärmefreisetzungsrates größer sind als die flächenabhängige maximale Wärmefreisetzungsrates wird die Wärmefreisetzungsrates durch die Fläche auf  $\dot{Q}_{max} = 4.000 \text{ kW}$  begrenzt.

Aus Gleichung (3) ergibt sich die Zeit, bis die Vollbrandphase erreicht wird. Mit einer maximalen Wärmefreisetzungsrates  $\dot{Q}_{max} = 4.000 \text{ kW}$  und einem Wert  $\alpha = 0,01172 \text{ kW/s}^2$  folgt für  $t_{max}$ :

$$t_{max} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha}} \approx 584 \text{ s}$$

In der Vollbrandphase wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Wärmefreisetzungsrates konstant bei der oben berechneten maximalen Wärmefreisetzungsrates liegt. Für die Modellierung der Brandausbreitungsphase in FDS wurden zur Vereinfachung statt einer quadratischen Steigung alle 60 Sekunden ein diskreter Punkt mit einem Prozentsatz der maximalen Wärmefreisetzung festgelegt zwischen denen die Wärmefreisetzung linear ansteigt. Die resultierende Kurve ist in Abbildung 8 dargestellt.

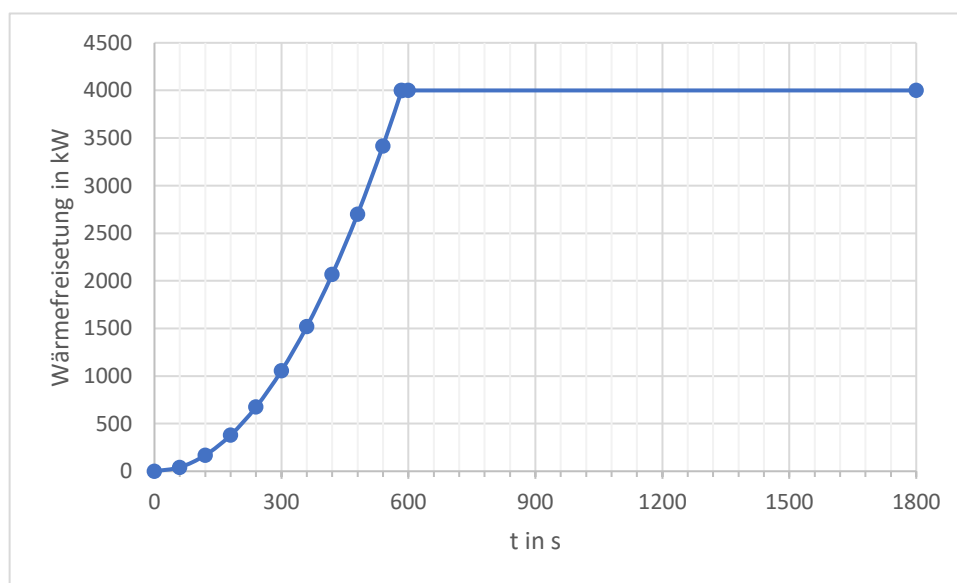


Abbildung 8: Wärmefreisetzungsrates im Modell

Für die Angabe der Ausbeute an CO und Ruß die bei dem Brand frei werden wurde der Kunststoff B nach Tabelle 8.4 des Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes zugrunde gelegt. Einen Großteil der Brandlast ein einem Krankenzimmer geht von Matratzen und Bezügen aus, die zum Beispiel aus Polyurethan bestehen können. Bei einem Brandlastgesteuerten Fall, wie dem vorliegenden werden die folgenden Ausbeuten  $Y$  bei der Erstellung der Modelle zugrunde gelegt:  $Y_{CO} = 0,060 \text{ g/g}$  und  $Y_{RU\beta} = 0,164 \text{ g/g}$  [10].

### 3.2.4. Bemessung der Entrauchung nach DIN 18232-5

Für die Entrauchungsanlagen in den Simulationen sollen die Bemessungen der maschinellen Entrauchung nach DIN 18232-5 dienen. Zur Bemessung der Entrauchungsanlage muss zunächst die Brandentwicklungsdauer festgelegt werden:

Die Alarmierungs- und Ausrückzeit der Feuerwehr beträgt nach AGBF-Schutzziel höchstens acht Minuten, plus etwa anderthalb Minuten Dispositionszeit. [28]. Bei einem komplexen Gebäude, wie einem Krankenhaus kann davon ausgegangen werden, dass vor dem ersten Löschangriff noch weitere Zeit für Erkundung und Entwicklung des Angriffsplans benötigt wird, so dass die Brandentwicklungsdauer in den meisten Fällen vermutlich über 10 min betragen wird. Es existieren allerdings wenige Veröffentlichungen zum tatsächlichen Zeitaufwand. Bei Leledakis Untersuchung zu einem Brand im Pflegebereich betrug die Zeit zwischen dem Auslösen der Brandmeldeanlage (BMA) und dem ersten Löschangriff der Feuerwehr 19 Minuten [22].

Für die Bemessung der MRA wurde einmal eine Brandentwicklungsdauer von 10 min angenommen, und einmal eine Brandentwicklungsdauer von 15 min. Die Brandentwicklungsdauer von 15 min scheint nach der obigen Begründung ein durchaus realistischer Wert zu sein und 10 min sind vermutlich zu niedrig angesetzt. Der Grund, warum die MRA nicht mit einer Brandentwicklungsdauer von 20 min bemessen werden kann, liegt in den Grenzen der Bemessung nach der DIN 18232-5.

Der Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes nennt für ein Krankenzimmer während der Brandentwicklungsphase eine experimentell ermittelte Brandausbreitungsgeschwindigkeit von 0,22 m/min [10]. Nach Tabelle 2 der DIN 18232-5, die Tabelle 1 abgebildet ist, liegt also eine **mittlere Brandausbreitungsgeschwindigkeit** vor.

*Tabelle 1: Brandausbreitungsgeschwindigkeiten nach DIN 18232-5 [3]*

<b>Brandausbreitungsgeschwindigkeit</b>	<b>m/min</b>
Besonders klein	0,15
Mittel	0,25
Besonders groß	0,45

Bei einer mittleren Brandausbreitungsgeschwindigkeit und einer Brandentwicklungsdauer von  $\leq 10$  min ergibt sich für die MRA die **Bemessungsgruppe 3** und bei einer Brandentwicklungsdauer von  $\leq 15$  min ergibt sich für die MRA die **Bemessungsgruppe 4**.

Abbildung 9 (nächste Seite) zeigt schematisch die verschiedenen Möglichkeiten für die Lage der Absaugöffnungen. In der Simulation werden nach unten gerichtete Absaugöffnungen (a) die in der Deckenebene liegen dargestellt.

Aus der Bemessungsgruppe 3 und der angestrebten Höhe  $d$  der raucharmen Schicht von 2,5 m ergibt sich ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom  $\dot{V}_{RS}$  von 75.000 m<sup>3</sup>/h und eine mittlere Rauchsichttemperatur  $\theta_{RS}$  von 290 °C. Aus der Bemessungsgruppe 4 und der angestrebten Höhe  $d$  der raucharmen Schicht von 2,5 m ergibt sich ein abzuführender Rauchgasvolumenstrom  $\dot{V}_{RS}$  von 128.000 m<sup>3</sup>/h und eine mittlere Rauchsichttemperatur  $\theta_{RS}$  von 400 °C.



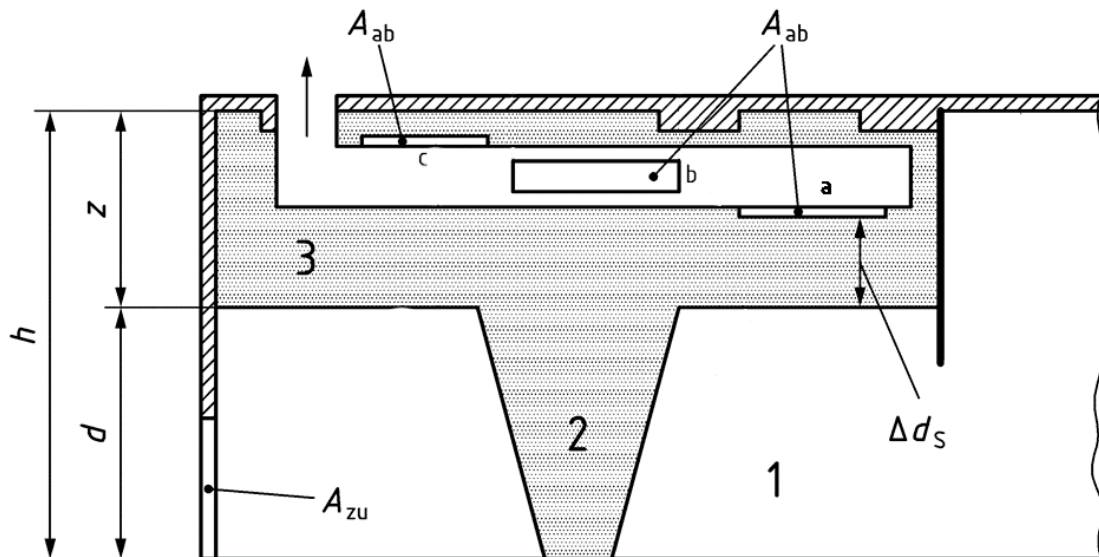


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Absaugstellen in der Rauchschrift, verändert nach DIN 18232-5 [3]

Legende zu Abbildung 9

1	Raucharme Schicht	2	Plume	3	Rauchschrift
$h$	Flurhöhe	$d$	Höhe der Raucharmen Schicht	$z$	Höhe der Rauchschrift ( $z = h - d$ )
$A_{zu}$	Fläche der Zuluftöffnungen	$A_{ab}$	Fläche der Abluftöffnungen	$\Delta d_s$	Dicke der Rauchschrift unter der Absaugöffnung
a	Nach unten gerichtete Abluftöffnung	b	Horizontale Abluftöffnung	c	Nach oben gerichtete Abluftöffnung

Die Flurhöhe  $h$  beträgt 3 m und die raucharme Schicht  $d$  soll 2,50 m hoch sein. Die Höhe der Rauchschrift  $z$  beträgt also 0,50 m. Die Dicke der Rauchschrift  $\Delta d_s$  beträgt ebenfalls maximal 0,50 m.

Aus dem Nomogramm ergibt sich mit diesen Werten ein maximal zulässiger Volumenstrom von 2.500 m<sup>3</sup>/h (orange in Abbildung 10) beziehungsweise 3.000 m<sup>3</sup>/h pro Absaugöffnung (rot in Abbildung 10).

Bei Gesamtvolumenströmen von 75.000 m<sup>3</sup>/h respektive 128.000 m<sup>3</sup> führt dies nach Gleichung (1) zu 30 Absaugöffnungen bei Bemessungsgruppe 3 und rund 43 Absaugöffnungen bei Bemessungsgruppe 4 die an der Decke verteilt werden müssten.

$$N \geq \frac{\dot{V}_{RS}}{\dot{V}_{i,max}} \quad (7)$$

$N$  = Anzahl der Absaugöffnungen, Werte wurden aufgerundet

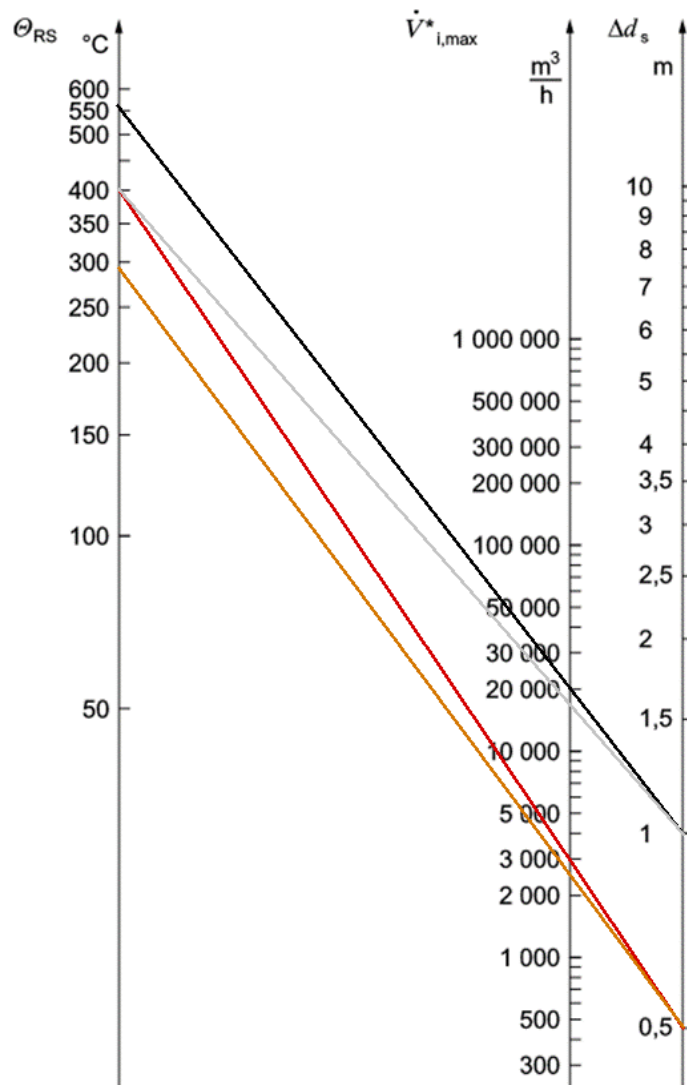


Abbildung 10: Nomogramm zur Berechnung des maximalen Volumenstroms pro Absaugstelle. Verändert nach DIN 18232-5 [3]

Orange: Höhe der Rauchsicht: 0,50 m, Bemessungsgruppe 3

Rot: Höhe der Rauchsicht: 0,50 m, Bemessungsgruppe 4.

Grau: Höhe der Rauchsicht 1,00 m, Bemessungsgruppe 3

Schwarz: Höhe der Rauchsicht: 1,00 m, Bemessungsgruppe 4

Da es nicht realistisch ist, 30 oder 43 Absaugstellen auf der Fläche der Decke zu verteilen, müssen die Annahmen verändert werden. Das beste Ergebnis, mit dem sich gerade noch nach der DIN bemessene MRAs darstellen lassen, ergibt eine Reduzierung der Höhe der raucharmeren Schicht auf 2,00 m und damit die Erhöhung der Schichtdicke der Rauchsicht auf 1,00 m.

Bei **Bemessungsgruppe 3** und einer Höhe der raucharmeren Schicht  $d$  von **2,00 m** ergibt sich ein Volumenstrom  $\dot{V}_{RS}$  von **64.000 m<sup>3</sup>/h** und eine mittlere Rauchgastemperatur  $\theta_{RS}$  von **400 °C**. Der maximale Volumenstrom pro Absaugstelle beträgt bei diesen Annahmen ca. **18.000 m<sup>3</sup>/h** (grau in Abbildung 10). Daraus folgt, dass min. vier Absaugöffnungen

gleichmäßig an der Decke verteilt werden müssen. Bei **vier** Absaugöffnungen ergibt sich ein Volumenstrom  $V_i$  von 16.000 m<sup>3</sup>/h pro Öffnung. Der Mindestabstand  $s_{min}$  zwischen den Absaugöffnungen nach Gleichung (2) beträgt **2,01 m**.

$$s_{min} = 0,015 \cdot \sqrt{V_i} \quad (8)$$

Bei **Bemessungsgruppe 4** und einer Höhe der raucharmen Schicht  $d$  von **2,00 m** ergibt sich ein Volumenstrom  $\dot{V}_{RS}$  von **112.000 m<sup>3</sup>/h** und eine mittlere Rauchgastemperatur  $\theta_{RS}$  von **560 °C**. Der maximale Volumenstrom pro Absaugstelle beträgt bei diesen Annahmen **20.000 m<sup>3</sup>/h**. Daraus folgt, dass min. sechs Absaugöffnungen gleichmäßig an der Decke verteilt werden müssen<sup>11</sup>. Bei **sieben** Absaugöffnungen mit einem Volumenstrom von je **16.000 m<sup>3</sup>/h** beträgt Mindestabstand  $s_{min}$  zwischen den Absaugstellen **2,01 m**.

Die berechneten Werte sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Ermittelte Werte für die Entrauchung nach DIN 18232-5

<b>Bemessungsgruppe</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Abzuführender Volumenstrom $\dot{V}_{RS}$	64.000 m <sup>3</sup>	112.000 m <sup>3</sup>
Mittlere Rauchgastemperatur $\theta_{RS}$	400 °C	560 °C
Maximaler Volumenstrom pro Absaugstelle $V_{i,max}$	18.000 m <sup>3</sup>	20.000 m <sup>3</sup>
Anzahl der Absaugstellen $N$	4	7
Resultierender Volumenstrom pro Absaugstelle $V_i$	16.000 m <sup>3</sup>	16.000m <sup>3</sup>
Mindestabstand zwischen Absaugstellen $s_{min}$	2,01 m	2,01 m

### 3.2.5. Beurteilungskriterien

Die Angaben, wie lange die Räumung einer Pflegestation dauert sind in der Literatur sehr unterschiedlich, kann aber bis zu 15 Minuten dauern. Für eine erfolgreiche Freihaltung der Rettungswege wird also festgelegt, dass diese länger als 15 Minuten rauchfrei sein müssen. Die maximale Simulationsdauer beträgt 30 min.

<sup>11</sup> Diese Werte führen dazu, dass die Temperaturklasse der Entrauchungsventilatoren größer als F842 wäre und bereits außerhalb des Anwendungsbereichs der Normen liegen. Da die Bauteilbemessung nicht Gegenstand der Arbeit ist wurden die Simulationen trotzdem durchgeführt um zu testen ob mit dieser Dimensionierung eine ausreichende Rauchfreihaltung erreicht werden könnte. Es kann trotzdem schon an dieser Stelle angemerkt werden, dass durch die niedrige Deckenhöhe und die ungünstigen Verhältnisse bei der Brandentwicklung die Normen an ihre Grenzen stoßen.

Der vfdb nennt als Nachweiskriterien für die Personensicherheit<sup>12</sup> in Rettungswegen

1. die Höhe der raucharmen Schicht
2. die Qualität der raucharmen Schicht, hier vor allem
  - a. die optische Dichte pro Weglänge, bzw. die Erkennungsweite
  - b. die Wirkung toxischer Gase
3. thermische Einwirkungen

Die Höhe der raucharmen Schicht soll laut vfdb min. 2,5 m betragen, die aber wie oben diskutiert hier nicht erreichbar ist. Stattdessen wird versucht eine raucharme Schicht von 2,00 m Höhe zu erreichen

Die Gase, die bei Brandopfern am häufigsten zur Erstickung führen, sind Kohlenmonoxid (CO) und Cyanwasserstoff (HCN) gegebenenfalls durch Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Wirkung verstärkt. Zwischen der Konzentration von CO und der HCN-Konzentration besteht bei üblichen Bränden eine gewisse Korrelation. Die Korrelation hängt von der Art der Brandlasten ab und reicht von CO : HCN > 50 : 1, bei Brandlasten mit einem geringen Stickstoffanteil, bis zu CO : HCN = 12,5 : 1 bei Brandlasten mit einem hohen Stickstoffanteil (>2%) [10].

Schaumstoffmatratzen und latexfreie Matratzenbezüge, wie sie in Krankenhäusern verwendet werden, bestehen oft aus Polyurethan, daher ist davon auszugehen, dass ein signifikanter Anteil der Brandlast stickstoffhaltig ist und sich bei einer hohen CO-Konzentration auch die HCN-Konzentration erhöht ist. Da die Werte aber korrelieren, wird zur Vereinfachung der Modelle nur das Entstehen von Kohlenmonoxid dargestellt.

Die Tabelle 8.3 des Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes nennt Beurteilungsgrößen und Anhaltswerte zur Beurteilung der spezifischen Schutzziele.

Die Rauchdichte beschreibt die lichttrübende Wirkung des Rauches und kann statt über die optische Dichte  $D_L$  auch über den Extinktionskoeffizienten  $K$  beschrieben werden. Der Unterschied in der Beschreibung zwischen optischer Dichte und Extinktion liegt in der mathematischen Formulierung als negativer dekadischer Logarithmus oder natürlicher Logarithmus der relativen Lichttransmission geteilt durch die Weglänge. Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen  $D_L$  und  $K$ :

$$D_L = \frac{K}{\ln(10)} \quad (9)$$

In dieser Arbeit meint Rauchdichte immer die optische Dichte  $D_L$ .

---

<sup>12</sup> Im Folgenden als spezifische Schutzziele bezeichnet

Zwischen der Erkennungsweite  $S$  und der Rauchdichte besteht im Wesentlichen ein reziproker Zusammenhang, der sich für nichttreizenden Rauch über die folgende Formel beschreiben lässt.

$$S = \frac{C}{K} = \frac{C}{\ln(10) \cdot D_L} \quad (10)$$

Die Konstante  $C$  wurde in Beobachtungen ermittelt und hängt von der Rauchzusammensetzung und der Leuchtdichte ab. Als Mittelwert für ein hinterleuchtetes Rettungszeichen etwa gilt  $C = 8$ .

Aufgrund der besonders sensiblen Personengruppen in Krankenhäusern wurden als Grenzwerte die Werte angenommen, die bei längerer Aufenthaltsdauer (<30 min) gelten. Die Grenzwerte in der Version 2013 des Leitfadens Ingenieurmethoden unterscheiden sich zum Teil von den von Wallasch et al verwendeten Werten. Als Grenzwerte für diese Arbeit werden die Werte aus dem Leitfaden Ingenieurmethoden verwendet, die in Tabelle 3 dargestellt sind. Der Rettungsweg gilt als frei, wenn alle spezifischen Schutzziele eingehalten sind.

Tabelle 3: Beurteilungsgrößen der Schutzzieleinhaltung

Beurteilungsgröße	Grenzwert
Erkennungsweite <sup>13</sup>	15 m
CO-Konzentration	100 ppm
CO <sub>2</sub> -Konzentration	1 Vol.-%
Gastemperatur	45 °C
Rauchdichte	0,1 m <sup>-1</sup>

Zur Prüfung ob die Schutzziele eingehalten wurden in einer Höhe von 2,10 m, 1,95 m und 1,80 m über dem Boden Schnitte mit den Kriterien Erkennungsweite, CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, und Temperatur ausgewertet<sup>14</sup>. Außerdem wurden vertikale Schnitte in der Flurmitte gemacht, die den horizontalen Verlauf der optischen Rauchdichte zeigen.

### 3.3. Realbrandversuch

Für den Realbrandversuch wurde auf der Veranstaltung Feuer&Rauch 2019 der Endreiß-Ingenieurgesellschaft ein verkürzter Modellflur in Trockenbauweise errichtet. Der Flur war rund 12,40 m lang, 2,48 m breit und 2,40 m hoch. An den Flur angeschlossen war ein rund 11 m<sup>2</sup> (2,31 m x 4,80 m) großes „Patientenzimmer“, in dem Holzpaletten aufgeschichtet waren. Der Grundriss des Modellflur ist in Abbildung 11 (nächste Seite) abgebildet.

<sup>13</sup> In der Quelle wird ein Bereich von 10 m – 20 m angegeben, weswegen hier der Mittelwert verwendet wird.

<sup>14</sup> Vgl. auch Wallasch et al [5].

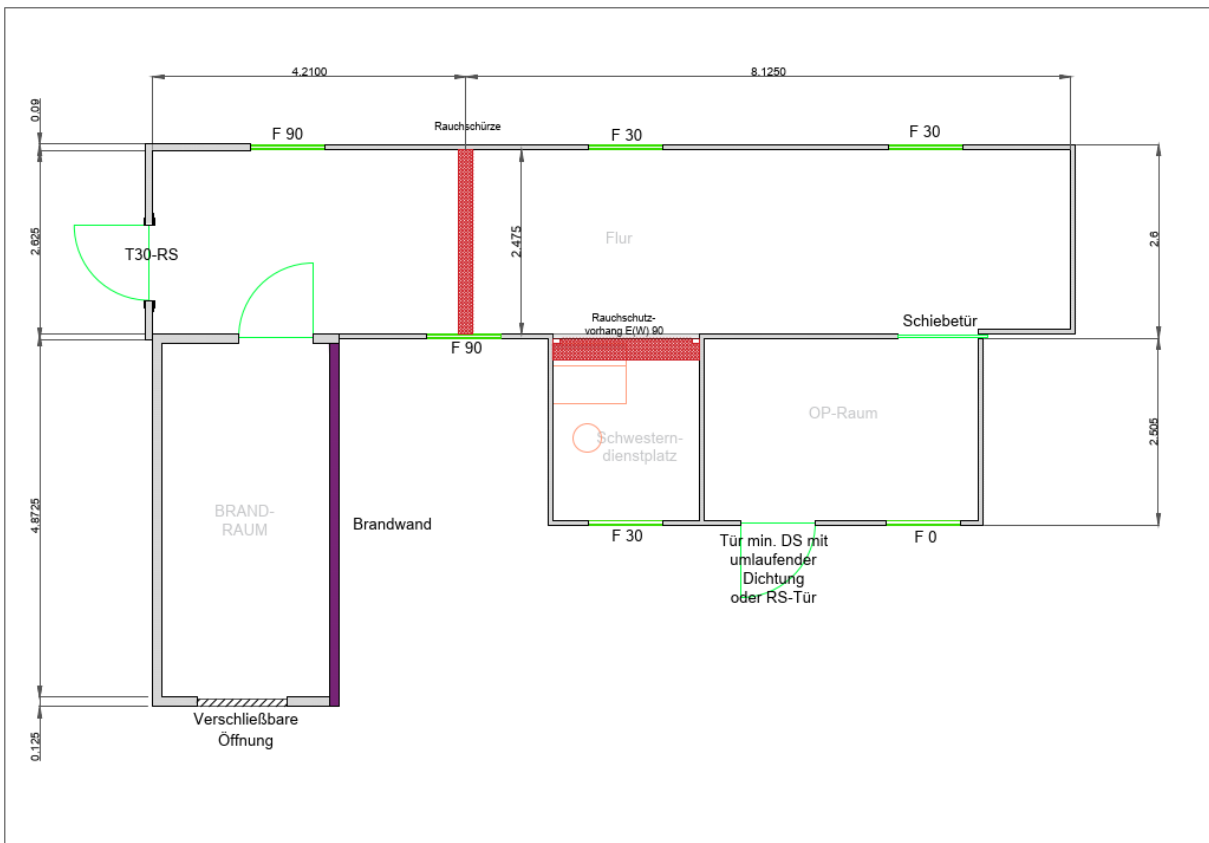


Abbildung 11: Grundriss des für den Realbrandversuch verwendeten Modellflurs, Quelle: Endreß Ingenieurgesellschaft

Zur Entrauchung des Flurs wurde ein Axialventilator der Firma TROX verwendet, der an der entferntesten Seite des Flurs angebracht war. Der Ventilator konnte auf der höchsten Stufe maximal einen Volumenstrom von 60.000 m<sup>3</sup>/h abführen und hatte in einer niedrigeren Einstellung ein abgeführtes Volumen von etwa 20.000 m<sup>3</sup>/h. Um die Absaugung in Deckennähe zu simulieren, wurde vor dem Ventilatorauslass eine geneigte Abdeckung als Prallwand angebracht, die im Abstand von etwa 33 cm zur Decke offen war (Abbildung 12, s. nächste Seite).

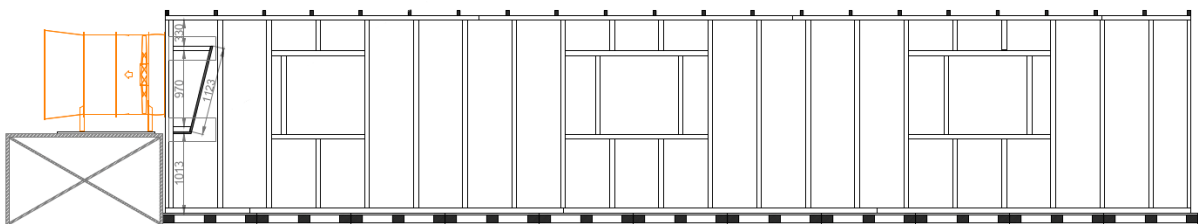


Abbildung 12: Schnitt Ventilatoreinbau im Modellflur, Quelle: Endreß Ingenieurgesellschaft

Im Rahmen der Veranstaltung wurden in dem Modellflur auch noch andere brandschutztechnische Vorrichtungen geprüft, die in Abbildung 11 eingezeichnet sind. Zum einen gab es eine bodenschließende textile Rauchschürze im Flur und einen Rauchschutzworhang vor dem Schwesterndienstplatz, die die Rauchausbreitung im Flur im ersten Versuchsteil verzögerten, dann aber von außen angesteuert geöffnet wurden.

Zum anderen wurde der im Plan als OP-Raum bezeichnete Raum mit einem weiteren Ventilator von der Decke belüftet und geprüft ob die Überströmung bei verschiedenen Öffnungsgraden der Schiebetür zur Rauchfreihaltung ausreicht.

Für die Simulation des Realbrandversuchs werden Vereinfachungen angenommen:

1. Das Öffnen und Schließen der Schiebetür werden nicht simuliert. Stattdessen wird permanent eine Öffnung von etwa 10% der Öffnungsfläche angenommen, da die Tür im späteren Versuchsverlauf, als der im Flur angebrachte Entrauchungsventilator anlief, leicht geöffnet war.
2. Die im Flur angebrachte Rauchschrze wird nach der erstmaligen Öffnung nicht wieder geschlossen. Im Realbrandversuch wurde die Elektronik im Versuchsverlauf durch die Hitze beschädigt und die Rauchschrze fiel zu, im späteren Versuchsverlauf wurde die Rauchschrze durch die Hitze vollständig zerstört und der Rauch konnte beim Einschalten des Ventilators im Flur ungehindert strömen.
3. Der Rauchschrzvorhang vor dem Schwesterndienstplatz wird nicht dargestellt. Die Rauchfreihaltung im ersten Teil des Experiments war erfolgreich, und nach der Öffnung war der Vorhang im Experiment nicht weiter Teil der Betrachtung.
4. Der Abbrand der Holzpaletten wird ebenfalls nicht simuliert. Im Realbrandversuch war genügend Brandlast vorhanden, damit sich ein Vollbrand entwickeln konnte, der über die komplette Versuchsdauer durch die Ventilation gesteuert wurde und nicht in die Abklingphase übergehen konnte.

Die Maße des Flurs werden für das Modell auch leicht variiert, damit die Wände und Decken auf den Grenzen des modellierten Feldgitters liegen. Der Flur hat hier die Innenmaße  $L \times B \times H$  12,45 m x 2,55 m x 2,40 m. Die Abdeckung vor dem Ventilator hat einen Abstand von 45 cm und die Öffnung zur Decke beträgt nur 0,30 m.

Zur Untersuchung der Wirkung der Entrauchung wurde im Versuch mehrfach das Absaugvolumen des Ventilators verändert, und die Zuluftöffnungen, also die Flurtür und die verschließbare Öffnung an der Seite Brandraum geöffnet und geschlossen. Analog zu den Annahmen die in Kapitel 3.2.3. für die Brandentwicklung und die Vollbrandphase getroffen werden ergibt sich hier folgendes:

Die Brandentwicklung ist schnell mit  $\alpha = 0,04689 \text{ kW/s}^2$ .

Die spezifische Wärmefreisetzung  $\dot{q}$  von 1,5 m hoch gestapelten Holzpaletten beträgt maximal 3.746 kW/m<sup>2</sup>.

Der Heizwert  $H_i$  von Zellulose beträgt etwa  $17,1 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$ .

Bei einer Fläche von 11 m<sup>2</sup> ergibt sich auf die Fläche bezogen nach Gleichung (5) eine maximale Wärmeleistung  $\dot{Q}_{max,f} = 41.536 \text{ kW}$ .

Die maximale ventilationsbedingte Wärmefreisetzung nach Gleichung (6) beträgt  $\dot{Q}_{max,v} = 4.830 \text{ kW}$ .

Bei dem Realbrandversuch ist die maximale Wärmefreisetzung also nicht die Größe des Raums, sondern durch die Ventilation begrenzt. Die Zeit  $t$  bis zum Erreichen von  $\dot{Q}_{max}$  lässt sich mit Gleichung (3) bestimmen und beträgt  $t_{max} = 321 \text{ s}$ . Daraus ergibt sich für den Verlauf der Wärmefreisetzung im Modell des Realbrandversuchs der folgende Graph:

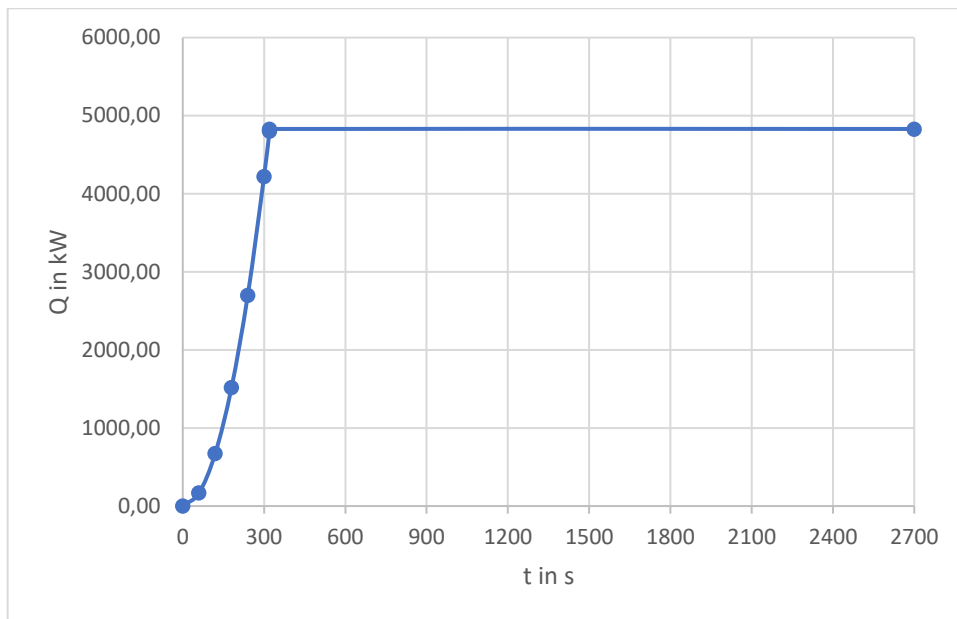


Abbildung 13: Wärmefreisetzungsrates im Modell des Realbrandversuchs

Für die Angabe der Ausbeute Ruß die bei dem Brand frei wird wurde Zellulose nach Tabelle-8.4 des Leitfadens Ingenieurmethoden des Brandschutzes zugrunde gelegt. Bei einem ventilationsgesteuerten Fall beträgt die Rußausbeute  $Y_{Ru\beta} = 0,028 \text{ g/g}$  und die CO-Ausbeute  $Y_{CO} = 0,004 \text{ g/g}$ . Da der CO-Gehalt im Realbrandversuch nicht gemessen wurde, wird allerdings drauf verzichtet den Gehalt in der Simulation zu verschiedenen Zeitpunkten zu bestimmen.

### 3.4. Die Modelle

#### 3.4.1. Modell des Realbrandversuchs

Zunächst wurde das Modell des Realbrandversuchs erstellt. Das zugrundeliegende Gitter hat die Ausmaße  $14,10 \times 9,15 \times 2,70$ . Das Gitter wurde in Volumina von  $0,15 \times 0,15 \times 0,15$  aufgeteilt. Der Realbrandversuch dauerte 40 Minuten vom Entzünden bis zum Beginn des Löschens durch die Feuerwehr. Die Simulationszeit beträgt daher ebenfalls 40 Minuten, oder wie im Modell angegeben 2.400 Sekunden.

Der Flur hat die Innenmaße  $L \times B \times H$   $12,45 \text{ m} \times 2,55 \text{ m} \times 2,40 \text{ m}$ . Das Patientenzimmer hat die Innenmaße  $2,25 \text{ m} \times 4,95 \text{ m}$ . Auf der vom Patientenzimmer entfernten Seite des Flures wird Ventilation modelliert, die den Entrauchungsventilator darstellen soll. Zu vorgegeben Zeiten werden die Volumenströme angepasst wie in Tabelle 4 (nächste Seite) dargestellt. Zuluftöffnungen sind die Flurtür und die Öffnung im Brandraum, die geschlossen und geöffnet werden um unterschiedliche Auswirkungen der Lüftung darzustellen. Zu Anfang sind die Flurtür, die Rauchschräge, und die Öffnung des Brandraums offen.



Tabelle 4: Simulierte Vorgänge im Modellflur

Zeit in s	Zeit in min	Vorgang
135	2:15	Schließen der Rauchschrürze
660	11:00	Schließen der Flurtür
720	12:00	Öffnen der Rauchschrürze
1.020	17:00	Öffnen der Flurtür
1.105-1.135	18:25-18:55	Anschalten des Ventilators auf 33 % Leistung
1.290	21:30	Schließen der Brandraumöffnung
1.350-1.390	22:30-23:00	Hochfahren des Ventilators auf volle Leistung
1.530-1.580	25:30-26:00	Runterfahren des Ventilators auf 33 % Leistung
1.580	26:00	Schließen der Flurtür und Öffnen der Brandraumöffnung
1.580-1.610	26:00-26:30	Hochfahren des Ventilators auf volle Leistung
1.710	28:30	Ausschalten des Ventilators, Öffnen der Flurtür

In Abbildung 14 ist die Geometrie abgebildet wie sie in FDS modelliert wurde. Zur Beschleunigung der Rechenzeit sind die freien Flächen die in der Abbildung außerhalb des Flurs und links vom Brandraum befinden mit inerten Blöcken gefüllt, da die Luftbewegungen und der Temperaturverlauf in diesen Bereichen nicht Teil der Betrachtung sind. Zur Auswertung der Simulation wird der Temperaturverlauf und die Sichtweite in drei horizontalen Schnitten in 1,80 m, 1,95 m und 2,10 m untersucht, sowie in einem vertikalen Schnitt entlang der Flurachse.

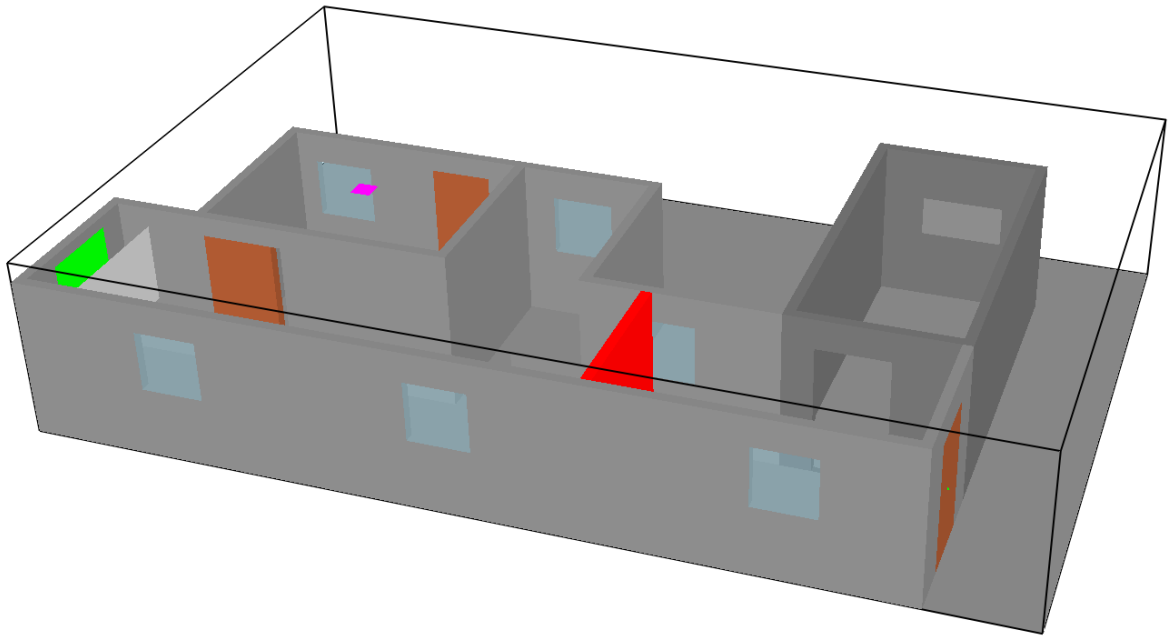


Abbildung 14: Modell des Realbrandversuchflurs, Decke zur besseren Visualisierung nicht dargestellt. Brandraum in dunkelgrau, Zuluft im OP-Raum in rosa, Entrauchung in Grün, Rauchschürze in Rot.

### 3.4.2. Modelle der numerischen Untersuchung.

Für die Flure wurden pro Variante vier Modelle entwickelt. In den Modellen wurden je nach Klasse der Entlüftung unterschiedlich viele Entlüftungsöffnungen simuliert. In Abbildung 15 auf der nächsten Seite ist Flurvariante 1 dargestellt mit den sieben Abluftöffnungen (grün), die für die Bemessungsklasse 4 angenommen wurden. Bei Klasse drei und ohne Entrauchung werden entsprechend vier und keine Entrauchungsöffnung modelliert. Die Fenster des Brandraums stehen in den Modellen jeweils 0,15 m offen, da keinerlei Belüftung im Brandraum zu einem Absturz der Simulation führte<sup>15</sup>.

Jedes Modell wurde mit einer Gitterauflösung von 0,15 m x 0,15 m x 0,15 m berechnet. Für jeden Flur wurde nur der Flur und der Brandraum simuliert. Die leeren Flächen, die nicht vor Fenstern liegen, wurden mit inerten Blöcken ausgefüllt.

<sup>15</sup> Zur Belüftung des Brandraums wurden teilweise mehrere Varianten von offenen Fenstern modelliert, so dass das ausgewertete Modell von Flurvariante 1 ohne Entrauchung neben zwei teilweise geöffneten Fenstern eines aufweist, das vollständig offen ist. Auf die Entwicklung im Flur hat dies aber nur einen vernachlässigbaren Einfluss.

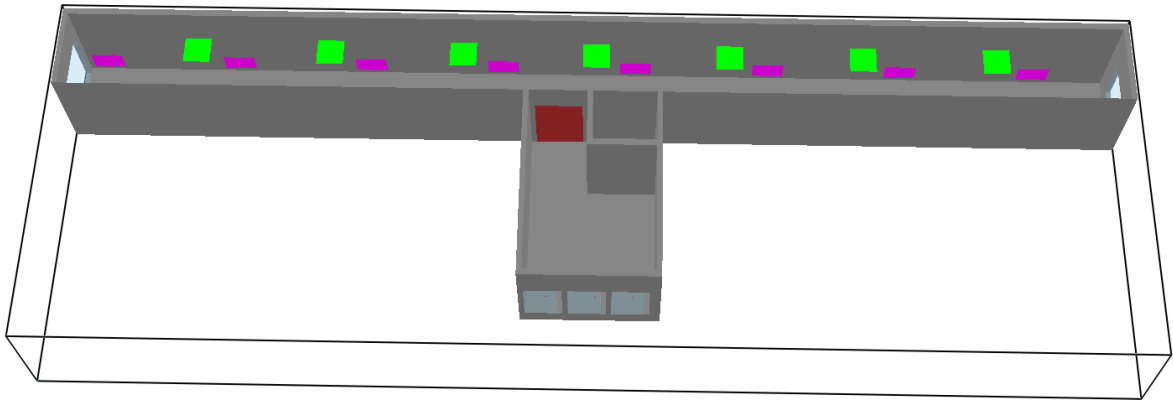


Abbildung 15: Modell der Flurvariante 1, Decke zur besseren Visualisierung nicht dargestellt, Zuluft in rosa, Entrauchung in grün.

Abbildung 16 zeigt die Flurvariante 2 mit den vier Entlüftungsöffnungen für Entrauchung nach Bemessungsklasse 3. Auch hier liegen inerte Blöcke in den nicht vor Fenstern liegenden Flächen.

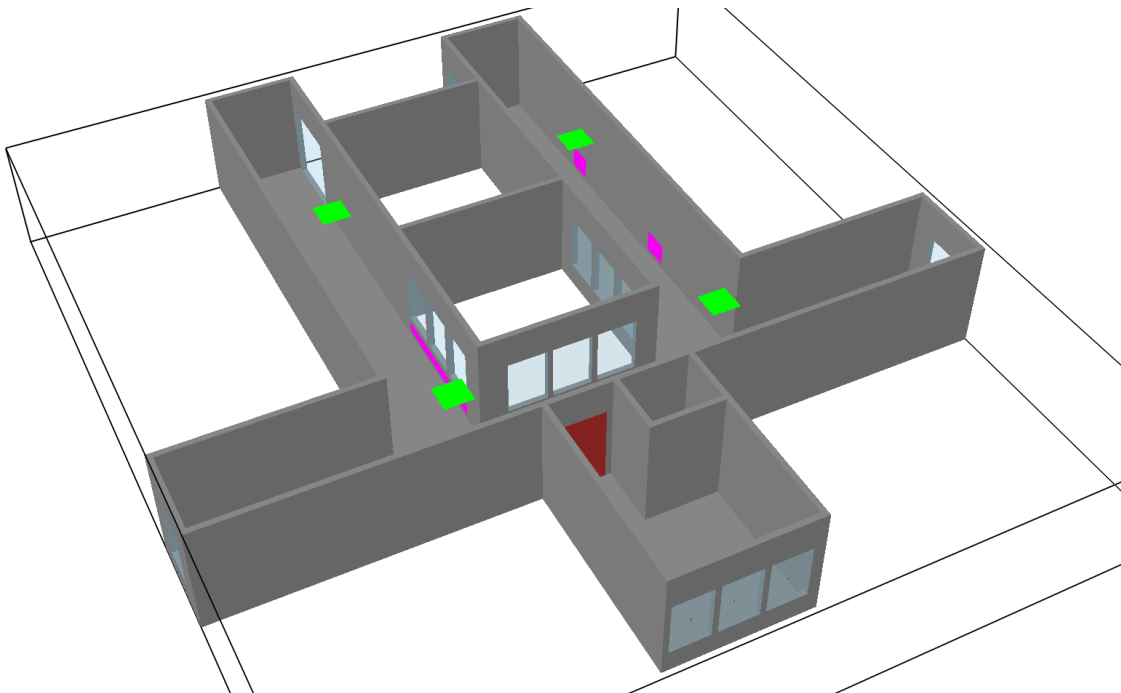


Abbildung 16: Modell der Flurvariante 2, Decke zur besseren Visualisierung nicht dargestellt, Zuluft in rosa, Entrauchung in grün.

Als Vergleichswert dient jeweils eine Simulation in der keine maschinelle oder natürliche Entrauchung stattfindet, sondern nur Möglichkeiten zur Rauchableitung durch die Feuerwehr vorhanden sind wie es zum Beispiel vom Hamburger Bauprüfdienst gefordert ist [16]. Die Rauchableitung durch die Feuerwehr wird nicht dargestellt. Neben den zum Teil offenen Fenstern im Brandraum werden außerdem Leckagen über den anderen Fenstern simuliert,

durch die Rauch aus dem Flur in die Umgebung austreten kann. Bei dem Vergleichsmodell und den beiden Modellen mit Entrauchung bleibt die Tür zwischen Brandraum und Flur jeweils dauerhaft geöffnet.

Im nächsten Szenario wird die Tür eine Minute nach Beginn des Brands geöffnet, für fünf Minuten offengelassen und anschließend wieder geschlossen. Es verbleibt lediglich eine Leckage durch die Tür, da die Türen von Patientenzimmern nicht dichtschießend ausgeführt werden müssen. Entrauchung findet in diesem Modell nicht statt.

In einem weiteren Modell wurden Zu und Abluft mit einer maschinellen Entrauchung nach Bemessungsgruppe 3 der DIN 18232-5 ausgelegten Ventilation simuliert. Die Ventilation startet eine Minute nach Beginn der Brandausbreitung.

Im vierten Modell wurden Zu und Abluft mit einer maschinellen Entrauchung nach Bemessungsgruppe 4 ausgelegten Ventilation simuliert. Die Ventilation startet eine Minute nach Beginn der Brandausbreitung.

Für Flurvariante 2 wurde noch ein fünftes Szenario untersucht, in dem die Tür ebenfalls nach fünf Minuten wieder geschlossen wird und gleichzeitig eine Entlüftung nach Bemessungsgruppe 3 vorhanden ist.

## 4. Ergebnisse

Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse wird bei den Modellfluren als untere Grenze der Farbskala ein Wert von null angenommen, als obere Grenze der Skala das doppelte des in Tabelle 3 dargestellten Grenzwertes. Die Ausnahme bildet hierbei die Temperatur bei der 20 °C die untere und 70 °C die obere Grenze bilden. Die Grenzen wurden gewählt, damit der festgelegte Grenzwert den Mittelpunkt der Skala darstellt (Abbildung 17). Zur Auswertung wird von der Darstellung der Parameter alle 10 Sekunden ein Bild gemacht und diese Bilder analysiert. Die angegebenen Maximalwerte wurden ebenfalls graphisch ermittelt, indem die Grenzen variiert wurden bis der entsprechende Maximalwert zu erkennen war.

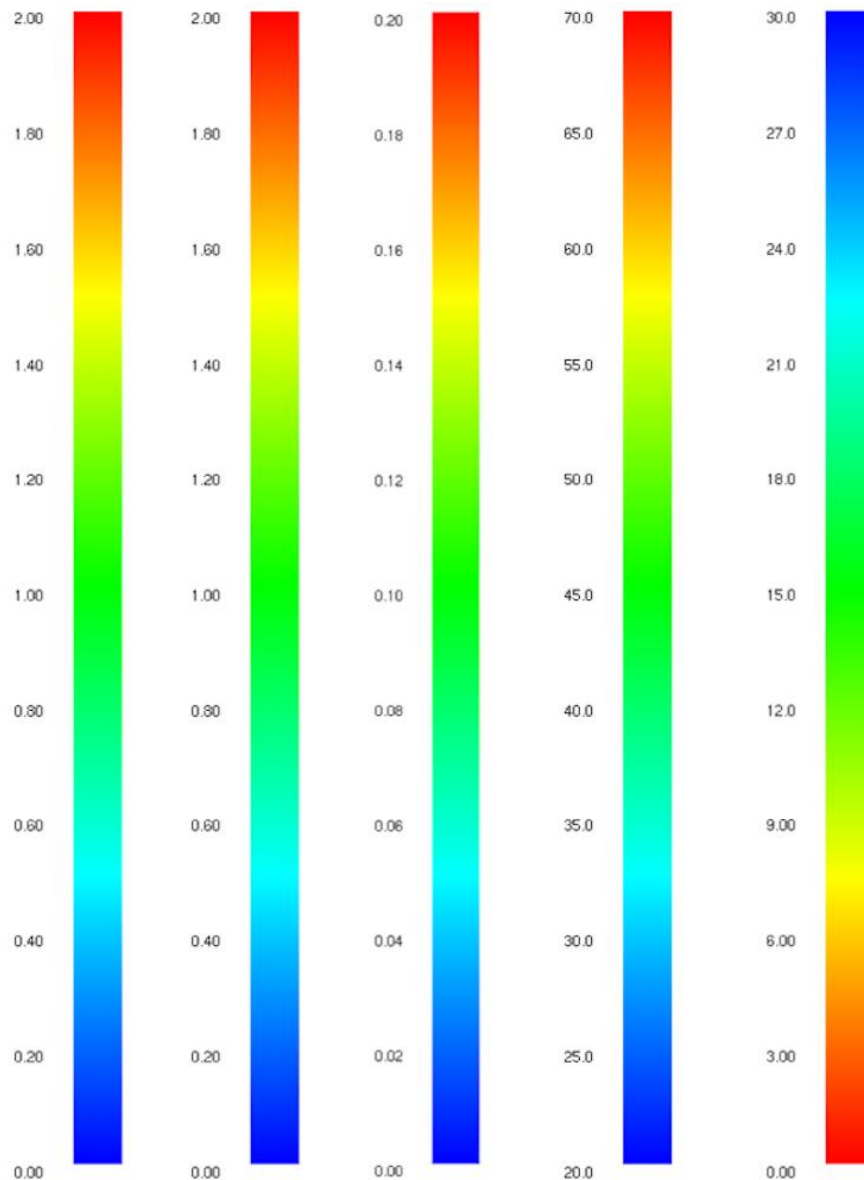


Abbildung 17: Farbskalen zur Bewertung der Ergebnisse von links nach rechts CO in  $10^{-4}$  kg/kg, CO<sub>2</sub> in  $10^{-2}$  kg/kg, optische Dichte in  $m^{-1}$ , Temperatur in °C und Sichtweite in m.

Bei der Darstellung der Ergebnisse des Realbrandversuchs wird abweichend hiervon die Temperatur von 20 °C bis zu einem Maximum von 1300 °C darstellt, da hier nicht die Grenzwerte überprüft, sondern die berechneten Werte mit den Messwerten aus dem Brandversuch (s. Anhang) verglichen werden.

#### 4.1. Vergleich der Ergebnisse der Simulation mit dem Realbrandversuch

Bei  $t = 0$  s zeigt sich für Temperatur und Sichtweite folgendes Bild (Abbildung 18). Die Temperatur beträgt überall etwa 20 °C und die Sichtweite 30 m und mehr.

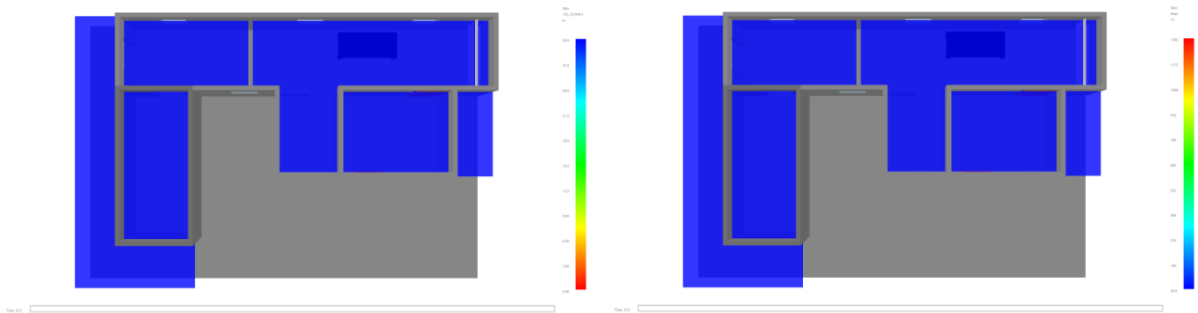


Abbildung 18: Sichtweite (links) und Temperatur (rechts) zum Beginn der Simulation, Höhe 1,80 m

In den ersten 60 Sekunden breitet sich der Rauch bereits im Flur aus und die Temperatur im Brandraum beträgt in der Simulation etwa 100 °C (gemessen: 25 °C)

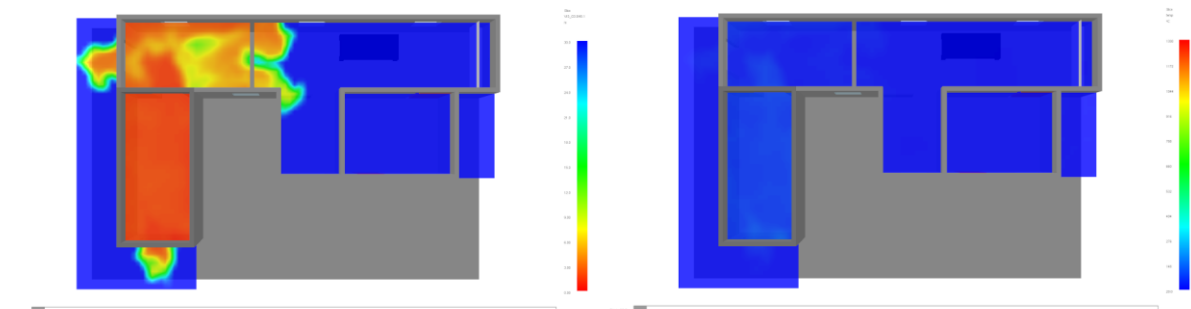


Abbildung 19: Sichtweite (links) und Temperatur (rechts) nach 60 s, Höhe 1,80 m

Im Vergleich zeigt sich, dass die Brandausbreitungsphase im Realbrandversuch erst nach etwa fünf Minuten begann und vorher die Entwicklungsbrandphase vorlag, die in diesem Modell nicht berücksichtigt ist. Daher sind zu Beginn Rauch- und Temperaturentwicklung im Modell größer als im Realfall. Im Realbrandversuch begann der Flur erst nach etwa 2 min zu verrauchen, worauf die Rauchschürze hinabgelassen wurde. Das Modell zeigt hingegen nach zwei Minuten schon eine deutliche Verräucherung des Flurs, die in Abbildung 20 (nächste Seite) zu sehen ist.

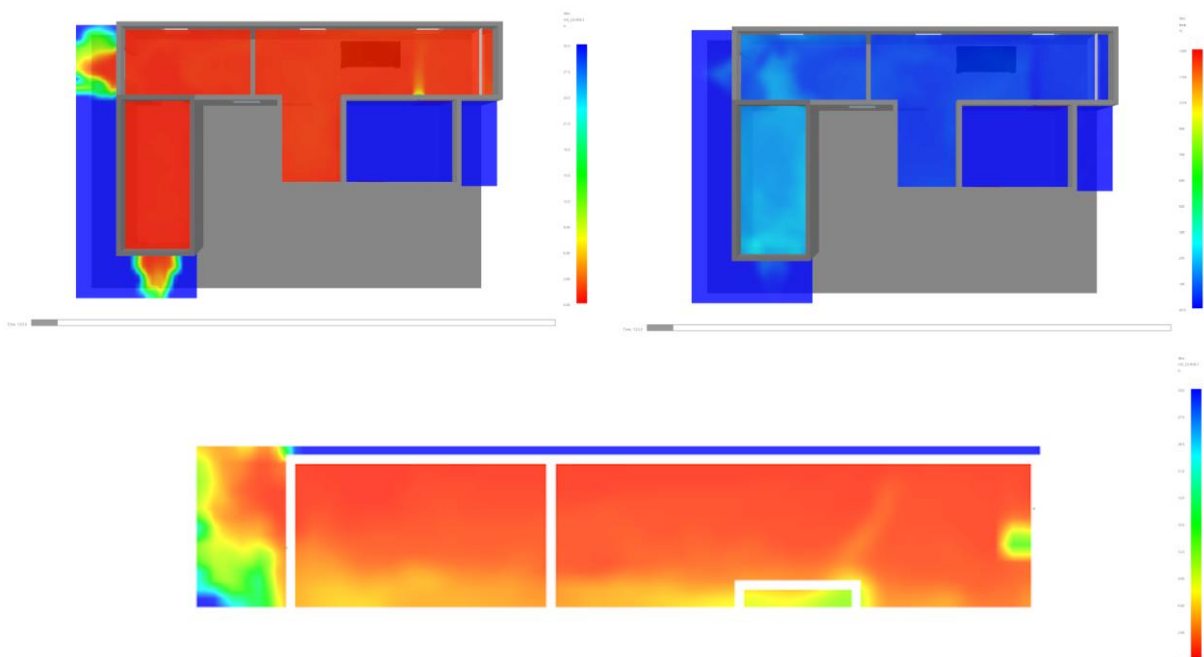


Abbildung 20: Sichtweite (links) und Temperatur (rechts) nach 120 s, Höhe 1,80 m; Sichtweite in der Flurmitte im Querschnitt (unten)

Nach dem Hinablassen der Rauchschrürze musste für die Stabilität der Simulation der Überdruckventilator im OP-Raum abgeschaltet werden, was in der Simulation zu einer Verrau- chung des OP-Raums geführt hat, die im realen Fall so nicht eingetreten ist. Abbildung 21 zeigt diese beginnende Verrau- chung des OP-Raums. Außerdem ist zu sehen, dass die Sicht- weite auf der linken Seite der Rauchschrürze etwas geringer ist als auf der rechten Seite.

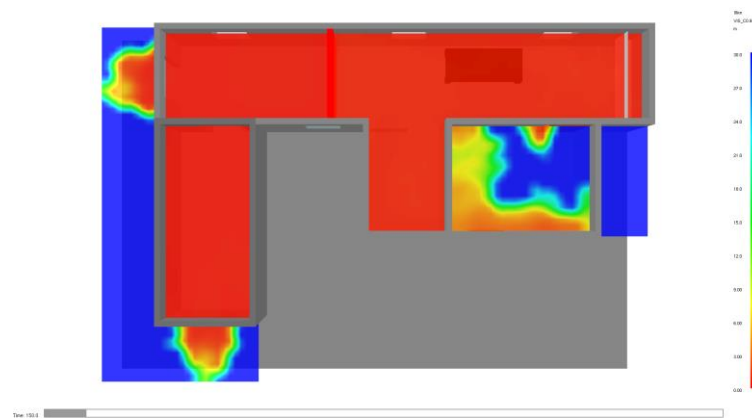


Abbildung 21 Sichtweite nach 150 s, Höhe 1,80 m

Im Realbrandversuch wurde während der Zeit zwischen der zweiten und der zwölften Brand- minute die Dichtigkeit der Rauchschrürze gezeigt und die Brandentwicklung überwacht. Nach 11 Minuten wurde die T30-RS Tür vom Flur nach draußen geschlossen um den Effekt der veränderten Ventilation zu testen. Die Temperatur im Brandraum betrug nach 660 Sekunden in der Simulation etwa 680-720 °C (Abbildung 22), im Realbrand wurden 680 °C gemessen.

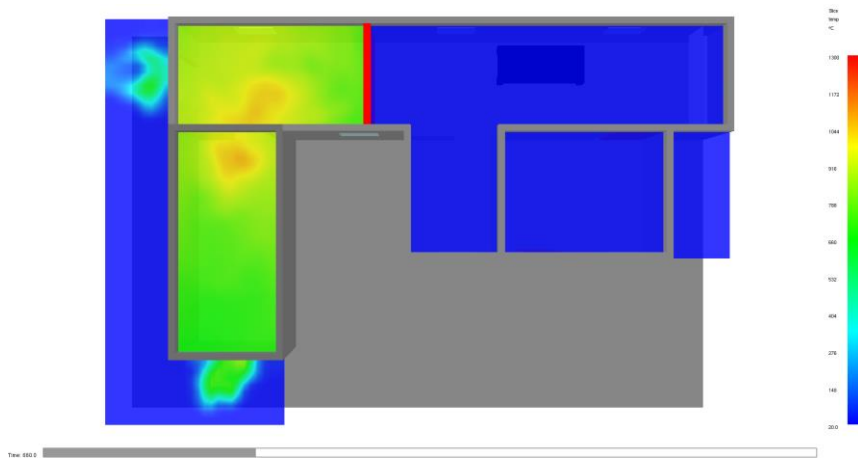


Abbildung 22: Temperatur nach 660 s, Höhe 2,10 m

Das Schließen der Flurtür führte im realen Brand zu einem Temperaturabfall auf etwa 500 °C. Das Modell zeigt ebenfalls ein Sinken der Temperatur. Abbildung 23 zeigt die Temperatur nach 720 Sekunden, sie beträgt etwa 550 °C, ist also etwas höher als der gemessene Wert.

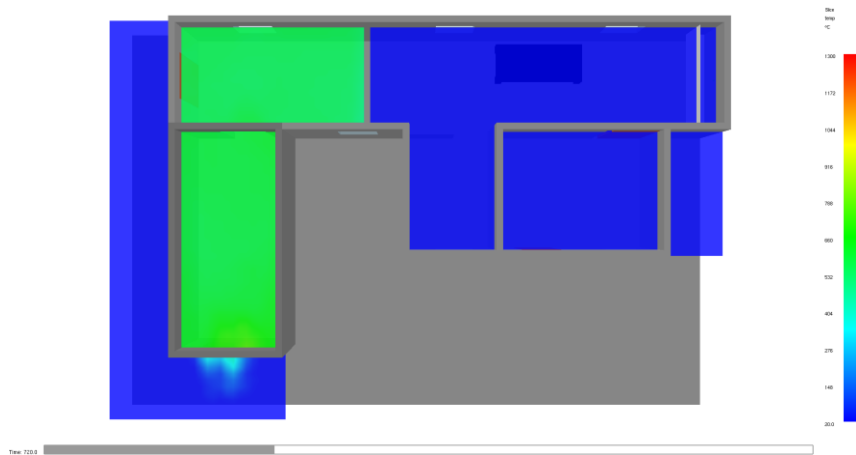


Abbildung 23: Temperatur nach 720 s, Höhe 1,80 m

Nach 720 Sekunden wird die Rauchschürze wieder geöffnet und der Ventilator im OP-Raum wieder hochgefahren. Dies führt dazu, dass innerhalb von 70 Sekunden ( $t = 790$  s) der OP-Raum wieder fast rauchfrei ist, so wie es im Versuch der Fall war. Der Flur wurde jetzt auch im Realbrand so komplett verraucht, wie er es im Modell schon vor dem Hinablassen der Rauchschürze war.

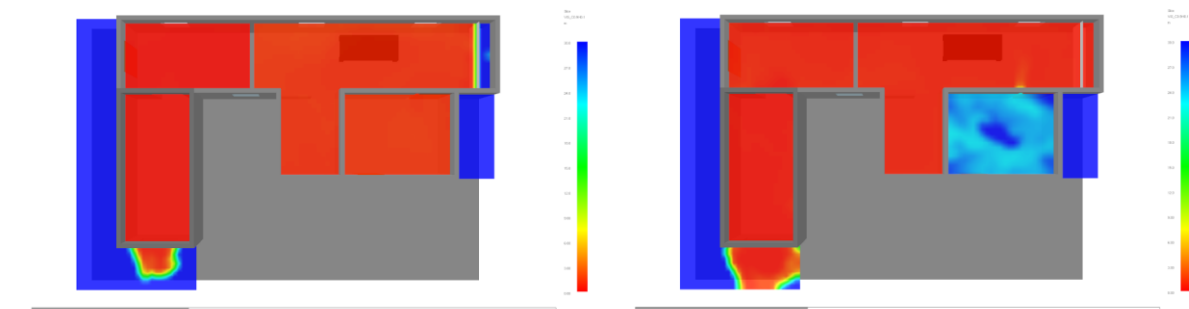


Abbildung 24: Sichtweite nach 720 s und nach 790 s, Höhe 1,80 m



Die Temperatur im Brandraum fällt nach dem Öffnen der Rauchschürze kurz auf 500 °C ab, bevor sie wieder stark ansteigt und in den Messungen im Brandraum nach 900 Sekunden ein vorläufiges Maximum von rund 800 °C erreicht. Im Flur vor dem Brandraum sinkt die gemessene Temperatur nach dem Öffnen ebenfalls kurz auf unter 200 °C, steigt dann ebenfalls rapide an und beträgt nach 900 Sekunden rund 600 °C. Abbildung 25 zeigt die Temperatur im Modell nach 900 Sekunden, die im Brandraum mit 950 °C höher ist als die gemessene. Die Temperatur im Flur ist im Gegensatz dazu mit 400-500 °C niedriger.

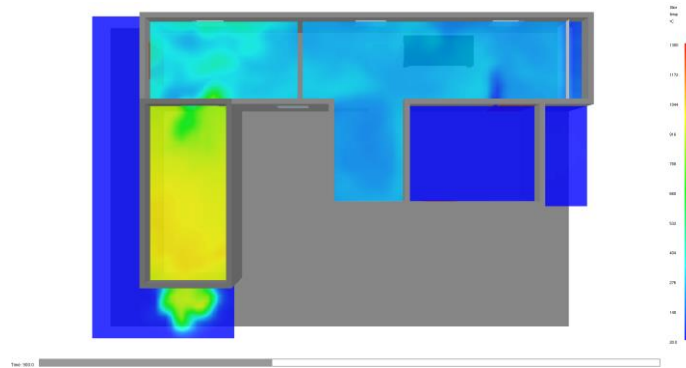


Abbildung 25: Temperatur nach 900 s, Höhe 1,80 m

Nach 1.105 Sekunden lief der große Entrauchungsventilator an, was im Realbrandversuch zu einer noch stärkeren Verrauchung des Flurs und aus dem Brandraum in den Flur schlagenden Flammen führte. Die Simulation zeigt ebenfalls, dass es durch das Anschalten des Ventilators zu keiner Verbesserung der Sichtweite kommt und dass die Temperatur tatsächlich direkt vor dem Brandraum am größten ist. Das Modell zeigt hier in der Spitze rund 1.050 °C, im Versuch wurden etwa 900 °C gemessen. Die Temperatur im Brandraum selbst beträgt in der Simulation etwa 600-700 °C, die gemessene Temperatur beträgt rund 700 °C (Abbildung 26)

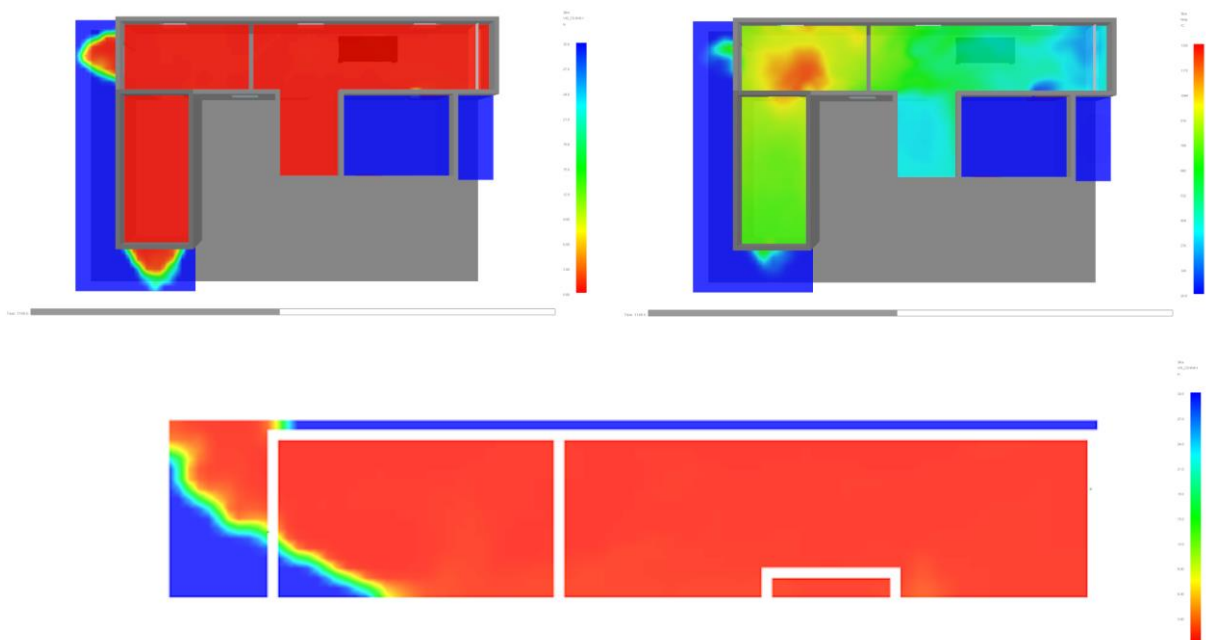


Abbildung 26: Sichtweite (links) und Temperatur (rechts) nach 1.140 s, Höhe 1,80 m, Sichtweite in der Flurmitte im Querschnitt (unten)

Die Sichtweite verbessert sich im Verlauf der Simulation nicht mehr, weswegen nachfolgend vor allem die Temperatur betrachtet werden soll.

Nach 1.290 Sekunden wurde im Versuch die Öffnung im Brandraum geschlossen, und anschließend nach 1.350 Sekunden der Ventilator auf Volllast gefahren. Dies führte dazu, dass die Temperatur im Flur um rund 300 °C auf 600 C gesunken ist. In der Simulation lässt sich ein ähnliches Ergebnis beobachten, die Temperatur vor dem Brandraum sinkt hier auch ab, liegt allerdings mit 800 °C wieder über den gemessenen Werten.

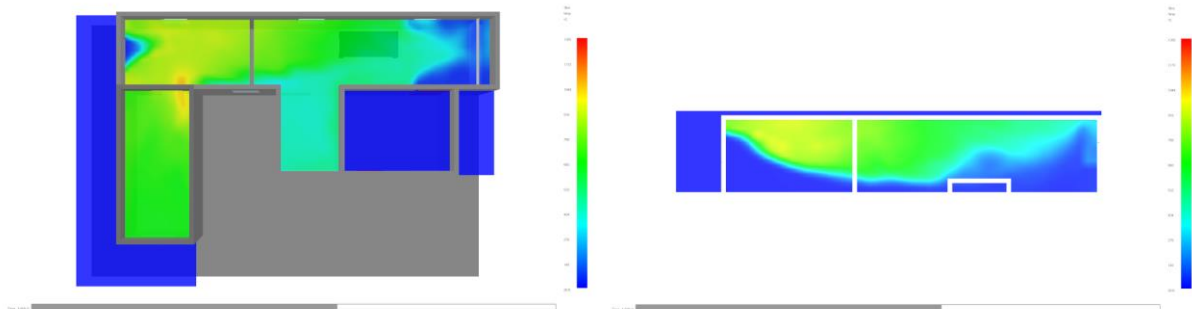


Abbildung 27: Temperatur nach 1.400 s, Höhe 1,80 m (links), Temperatur in der Flurmitte im Querschnitt (rechts)

Als nächstes wurde im Realbrandversuch bei einer geschlossenen Tür und einem offenen Verschluss des Brandraums der Ventilator auf Volllast gefahren ( $t = 1620$  s). Es schlugen Flammen aus dem Ventilator und die Rauchgase im Flur entzündeten sich. Die Messergebnisse zeigten nach dem Hochfahren des Ventilators einen sprunghaften Anstieg der Temperatur im Flurbereich vor dem OP und ein Absinken der Temperaturen vor dem Brandraum, was kurzzeitig sehr ähnlichen Temperaturen vor dem OP und vor dem Brandraum geführt hat. Die gemessenen Temperaturen im realen Flur betragen zwischen 600 °C und 700 °C.

Im Modell führt das Hochfahren des Ventilators bei geschlossener Tür zu einer homogenen Verteilung der Temperatur im Flur, wie in Abbildung 28 zu sehen, die Temperatur im Modell ist mit 500 °C niedriger als im realen Fall. In Abbildung 28 ist außerdem zu sehen, dass durch die starke Ventilation keine Flammen mehr aus der Öffnung im Brandraum schlagen, wie es etwa in Abbildung 22 oder Abbildung 26 noch passiert.

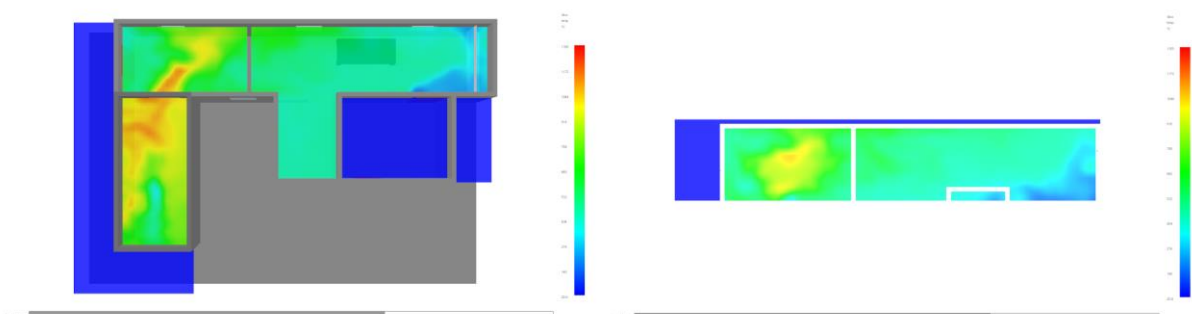


Abbildung 28: Temperatur nach 1.630 s, Höhe 1,80 m (links), Temperatur in der Flurmitte im Querschnitt (rechts)

Nach 1.710 Sekunden wurde der Ventilator wieder abgeschaltet und die Tür geöffnet, woraufhin auch wieder Flammen aus beiden Öffnungen schlugen. Abbildung 29 zeigt die Temperaturverteilung im Modell 30 Sekunden nach dem Abschalten. Im Brandraum herrschen im Modell Temperaturen von 900 °C - 1.000 °C, im Flur vor dem Brandraum um die 750 °C und im Flur vor dem OP etwa 300 °C. Gemessen wurden 900 °C, 750 °C und 750 °C.

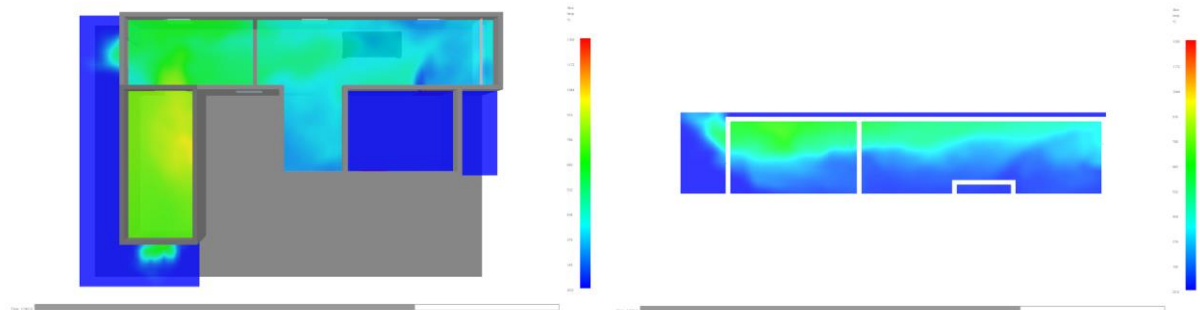


Abbildung 29: Temperatur nach 1740 s, Höhe 1,80 m (links), Temperatur in der Flurmitte im Querschnitt (rechts)

Die Messungen zeigen, dass zwischen der 30. Minute und dem Beginn des Löschen nach 40 Minuten die Temperatur im Brandraum noch leicht anstieg, von etwa 950 °C auf 1100 °C. Im Flur direkt vor dem Brandraum fiel die Temperatur erst auf etwa 600 °C und schwankte anschließend um einen Wert von etwa 750 °C. Im Flur vor dem OP fiel die Temperatur mit exponentiellem Verlauf von 700 °C auf etwa 300 °C ab.

Abbildung 30 zeigt die Temperatur im Modell nach 1860 Sekunden. Im Brandraum herrschen Temperaturen von etwa 1.000 °C. Im Flur vor dem Brandraum entsprechen die Temperaturen mit rund 750 °C den gemessenen. Die im Flur vor dem OP berechneten Temperaturen sind mit etwas über 400 °C niedriger als die tatsächlich gemessenen.

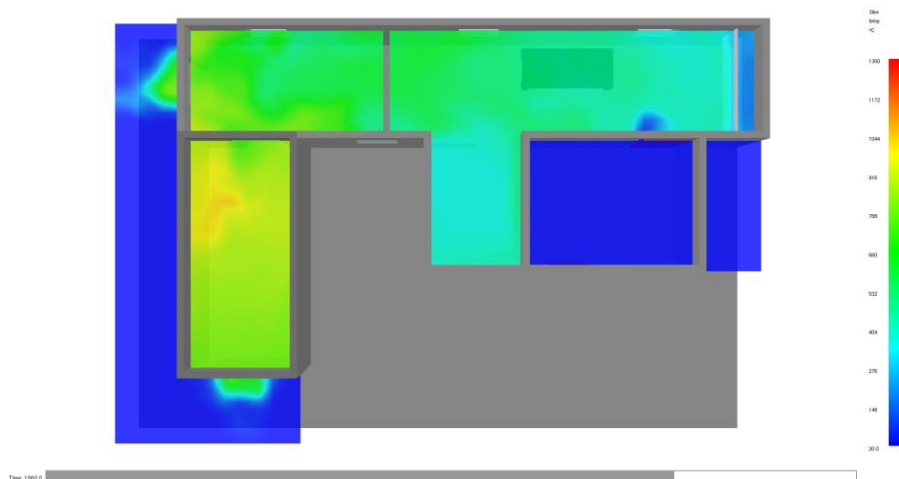


Abbildung 30: Temperatur nach 1860 s, Höhe 1,80 m

Nach 2400 Sekunden zeigt sich dann folgendes Bild für die Temperaturverteilung: Die Temperatur im Brandraum ist etwas gesunken und liegt im Bereich von etwa 900 °C - 950 °C ist aber auch gleichmäßiger verteilt. Die Temperatur im Flur entspricht immer noch in etwa den gemessenen 750 °C. Die Temperatur im Flurbereich vor dem OP hat sich nicht groß verändert und liegt mit 400 °C jetzt über den im Realfall gemessenen Werten.

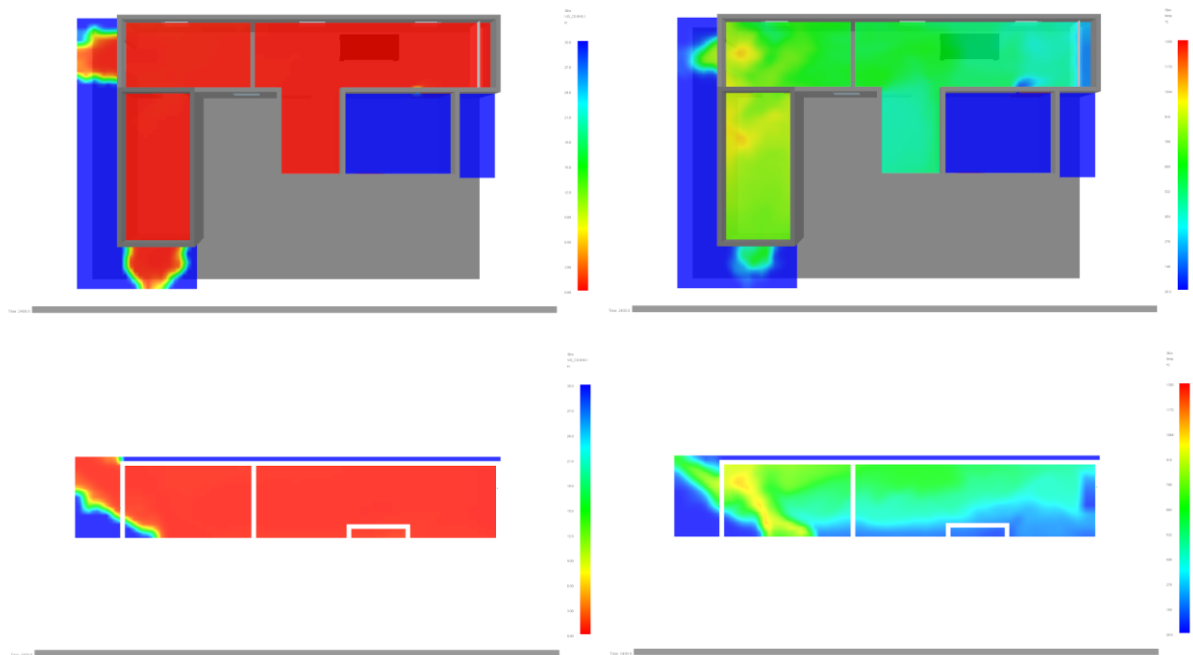


Abbildung 31: Sichtweite (links) und Temperatur (rechts) nach 2.400 s, Höhe 1,80 m (oben), Flurmitte im Querschnitt (unten)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei der Entwicklung der Brandverlaufskurve für das Modell die Brandentstehungs- bzw. Schwelbrandphase vernachlässigt wurden, die in dem realen Brandgeschehen vorhanden war, dadurch kam es im Modell früher zu einem Anstieg der Temperatur als es im Realbrand der Fall war. Im mittleren bis späteren Brandverlauf waren die Temperaturen dann zunächst in beiden Szenarien ähnlich.

Nur im hinteren Teil des Flurs vor dem OP-Bereich unterschieden sich die Werte zwischen dem Modell und dem realen Brand häufiger. Der sprunghafte Anstieg der Temperatur nach dem Anschalten des Ventilators gefolgt von dem exponentiellen Abfall konnte in dem Modell nicht wiedergegeben werden.

Die Rauchentwicklung und die Entwicklung der Sichtweite war insgesamt im Modell ähnlich wie im Versuch, außer dass durch die Vernachlässigung der Schwelbrandphase die Effekte im Realbrand etwas verzögert im Vergleich zum Modell auftraten.

## 4.2. Rauchausbreitung in einem geraden Flur

### 4.2.1. Rauchausbreitung ohne Entrauchungsanlage

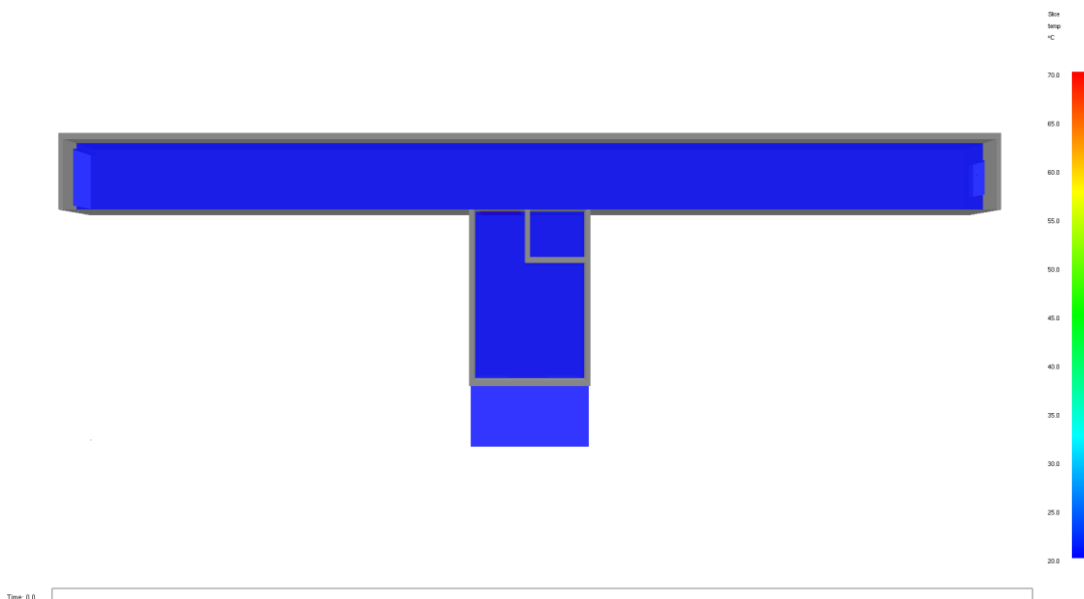


Abbildung 32: Temperatur nach 0 Sekunden, 1,80 m Höhe

In Abbildung 32 ist der Flur zu Beginn der Simulation bei  $t = 0$  s exemplarisch an der Temperatur dargestellt.

Nach 60 Sekunden wird die Tür zwischen Brandraum und Flur geöffnet. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Temperatur im Brandraum in 1,80 m Höhe zwischen 30 °C und 40 °C, die Sichtweite beträgt weniger als 6 m, der CO-Gehalt der Luft liegt bei 80 ppm – 100 ppm und der CO<sub>2</sub>-Gehalt bis zu 0,4 %. Abbildung 33 zeigt die einzelnen Werte graphisch.

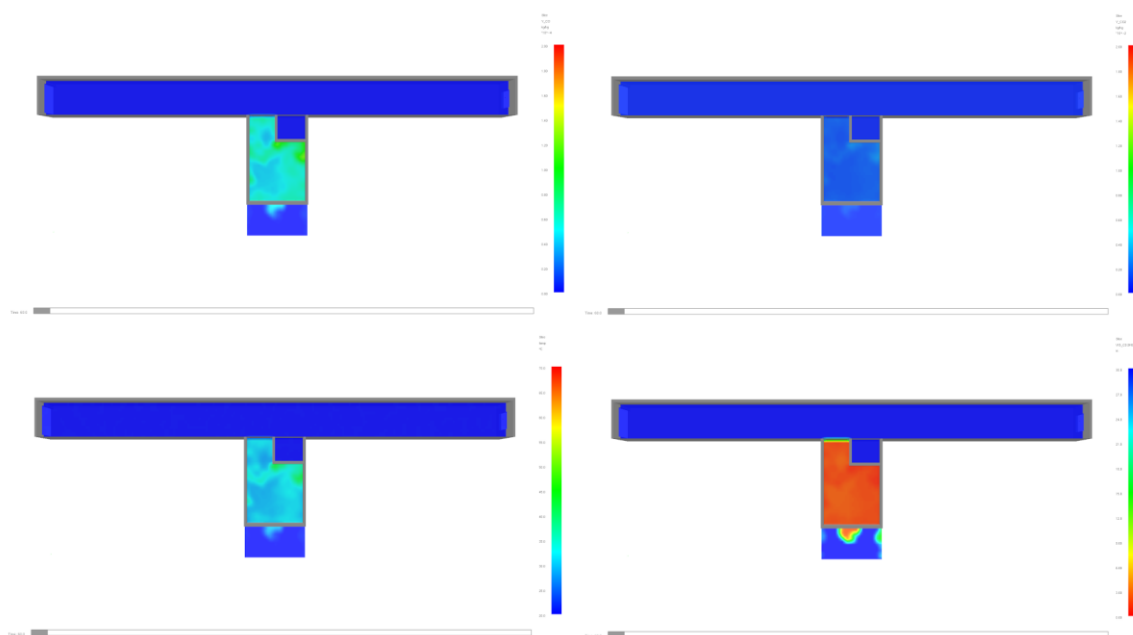


Abbildung 33: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 60 Sekunden, Höhe 1,80 m

Nach dem Öffnen der Tür breitet sich der Rauch aufgrund der fehlenden Ableitung rasch auf dem Flur aus. 90 Sekunden nach Beginn des Brands ergibt sich folgendes Bild:

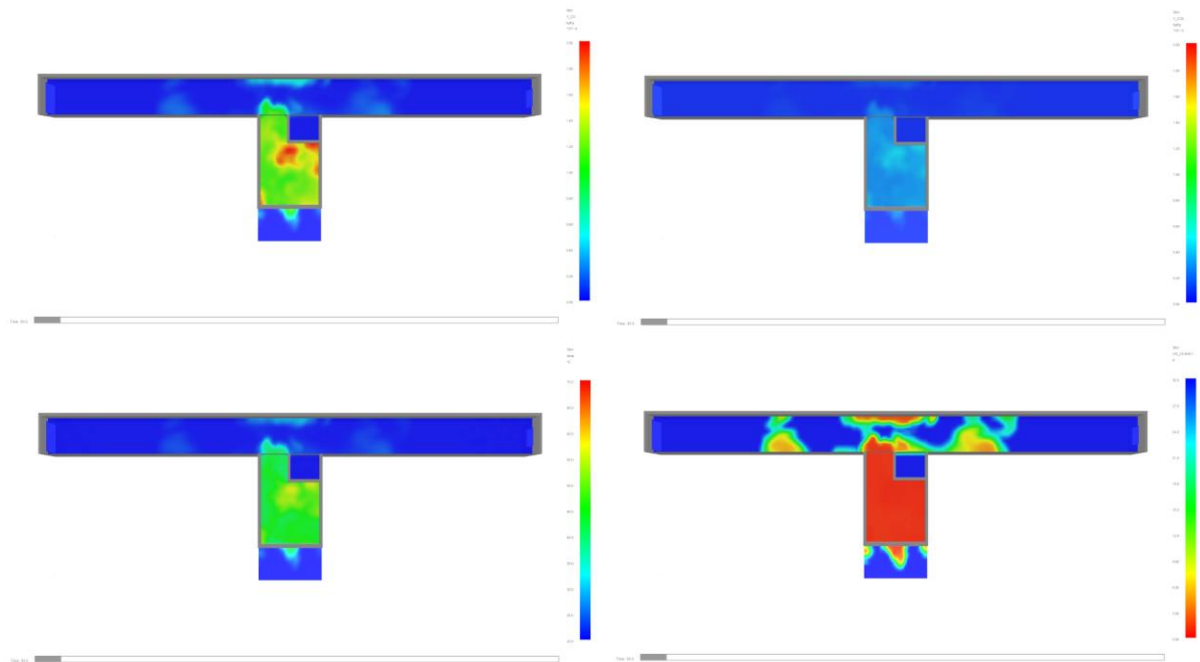


Abbildung 34: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 90 Sekunden, Höhe 1,80 m

Wie zu sehen, ist die Sichtweite in 1,80 m Höhe vor allem direkt vor dem Brandraum teilweise bereits eingeschränkt. Außerdem sinkt abkühlender Rauch in einiger Entfernung vom Brandraum auch wieder ab und reduziert dort die Sichtweite. Der Schnitt in 2,10 m Höhe (Abbildung 35) zeigt ebenfalls die Rauchausbreitung nach 90 Sekunden und Abbildung 36 (nächste Seite) zeigt die optische Rauchdichte im Flur im Querschnitt. In beiden Abbildungen ist gut zu sehen, wie der Rauch zunächst aus dem Brandraum nach oben steigt sich unter der Decke ausbreitet und später wieder nach unten sinkt.

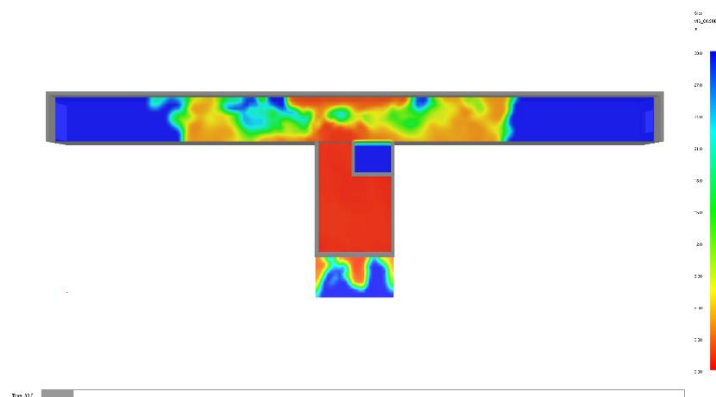


Abbildung 35: Sichtweite nach 90 Sekunden, Höhe 2,10 m

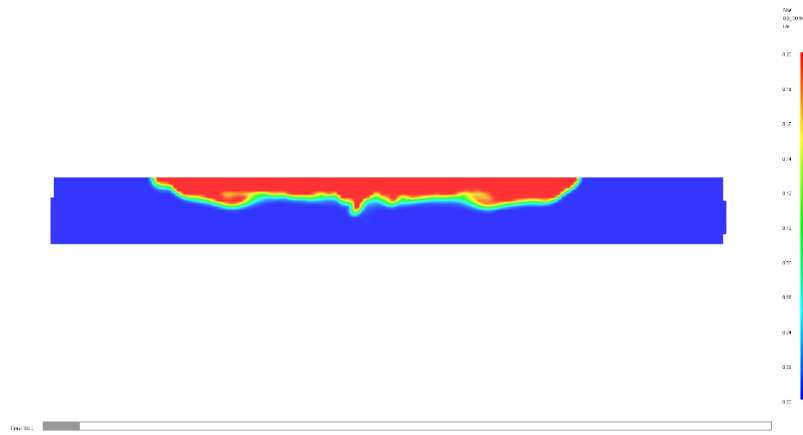


Abbildung 36: Rauchdichte im Flur nach 90 Sekunden, Querschnitt

Der Rauch breitet sich im Flur weiter aus bis er an die äußeren Wände trifft. Hier verliert der Rauch schneller Wärme an die Umfassungsbauteile und beginnt nach unten zu sinken, so dass die Sichtweite zunächst an den Enden des Flurs abnimmt. Nach  $t = 120$  s beträgt die Sichtweite in großen Teilen des Flurs selbst in einer Höhe von 1,80 m nur 15 m und weniger (Abbildung 37).

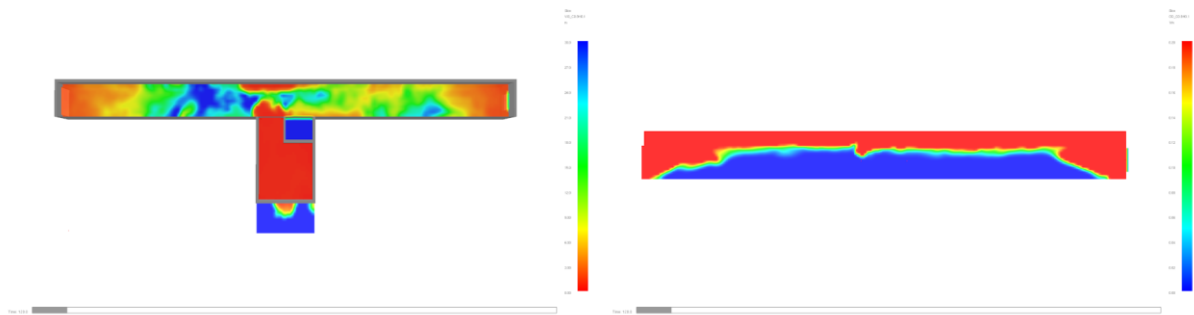


Abbildung 37: Sichtweite, Höhe 1,80 m (links), optische Dichte, Querschnitt (rechts) nach 120 Sekunden,

Nach 150 Sekunden, 90 Sekunden nach Öffnung der Tür zum Brandraum, beträgt die Sichtweite in 1,80 m Höhe im kompletten Flur an keiner Stelle mehr als 3 m (Abbildung 38).

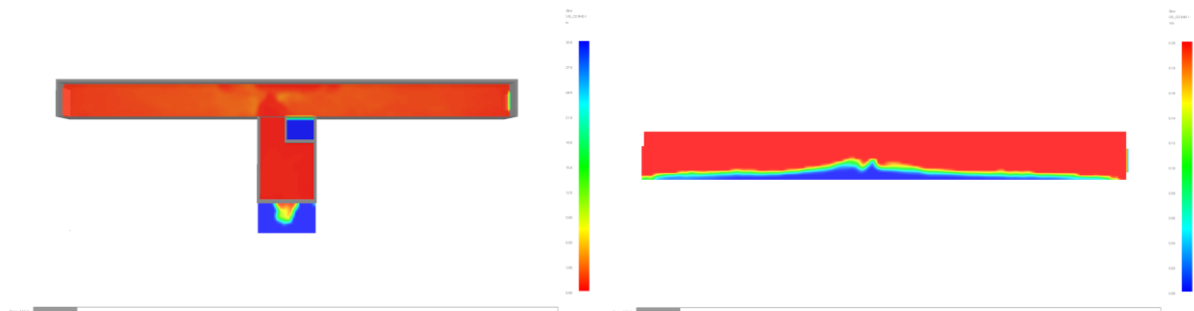


Abbildung 38: Sichtweite, Höhe 1,80 m (links), optische Dichte, Querschnitt (rechts) nach 150 Sekunden,

Die anderen überwachten Werte überschreiten ebenfalls kurz darauf im kompletten Flur die vorgegebenen Grenzwerte, der CO-Gehalt nach 190 s, der CO<sub>2</sub>-Gehalt nach 280 s und die Temperatur nach etwa 240 s. Aufgrund der nicht vorhandenen Rauchableitung sinken die Werte auch nicht wieder ab, sodass sich nach etwa fünf Minuten bis zum Ende der Simulation folgendes Bild (Abbildung 39) im Flur zeigt, bei dem alle Grenzwerte dauerhaft um ein Vielfaches überschritten wurden.

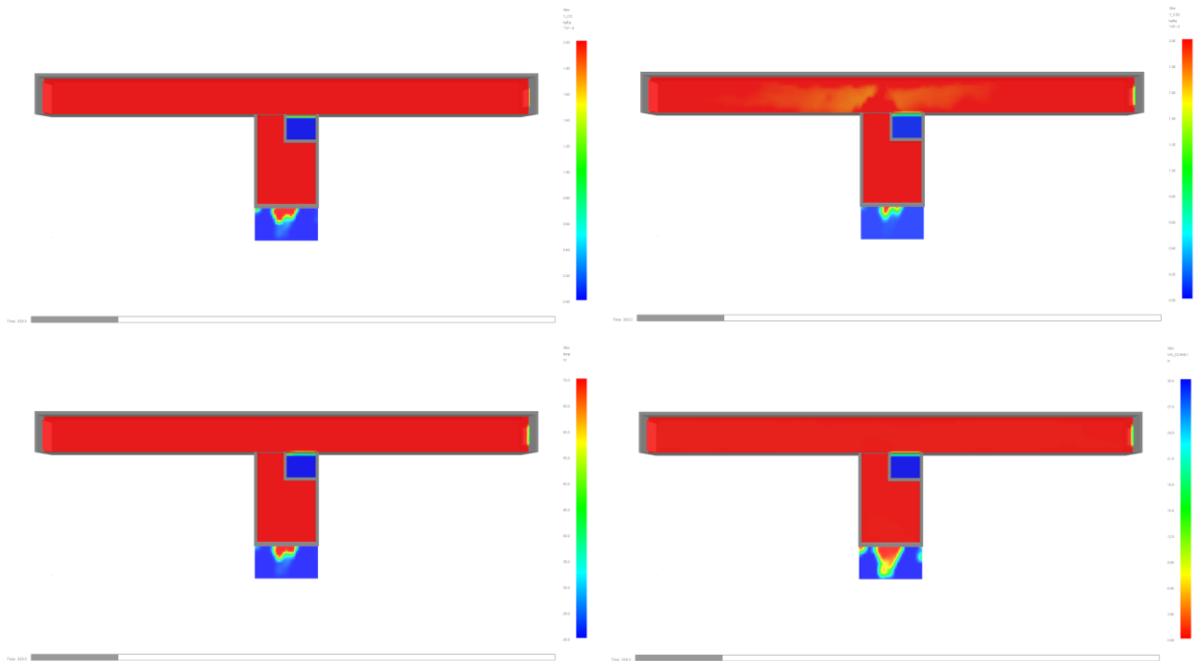


Abbildung 39: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 300 Sekunden, Höhe 1,80 m

Da es keine Entlüftung und damit wenig Luftbewegung auf dem Flur gibt, sind die Schadstoffkonzentrationen und die Temperatur im kompletten Flurverlauf ziemlich ausgeglichen. Da die Tür außerdem offenbleibt und immer neuer Rauch in den Flur strömen kann steigt die Konzentration der Schadstoffe bis zum Ende an. Die Maximalwerte, die am Ende im Flur erreicht werden, sind ein CO-Gehalt von etwa 6.000 ppm, der damit den Grenzwert um das 60-fache überschreitet und ein CO<sub>2</sub>-Gehalt von etwa 11 %, also das 11-fache des Maximalwerts. Die Temperatur beträgt im Flur in allen Schichten nach 1800 Sekunden etwa 100 °C - 120 °C.

#### 4.2.2. Rauchausbreitung mit geschlossener Tür

Beim nächsten Modell wird die Tür nach dem Öffnen fünf Minuten offengelassen und dann wieder geschlossen, insgesamt 360 Sekunden nach Beginn der Simulation. Die ersten 360 Sekunden verlaufen bei diesem Modell beinahe identisch zu dem vorherigen Modell. Nach 90 Sekunden ähnelt die Rauchausbreitung im Flur daher der Ausbreitung, die dem ersten Modell zu sehen war. Abbildung 40 zeigt die Sichtweite nach 90 Sekunden. Es sind kleine Unterschiede zu sehen, die vermutlich durch das komplett offene Fenster im ersten Modell hervorgerufen werden, da sich die Modelle sonst bis hierhin nicht unterscheiden. Aber wie zu sehen ist, sind diese Unterschiede vernachlässigbar gering.



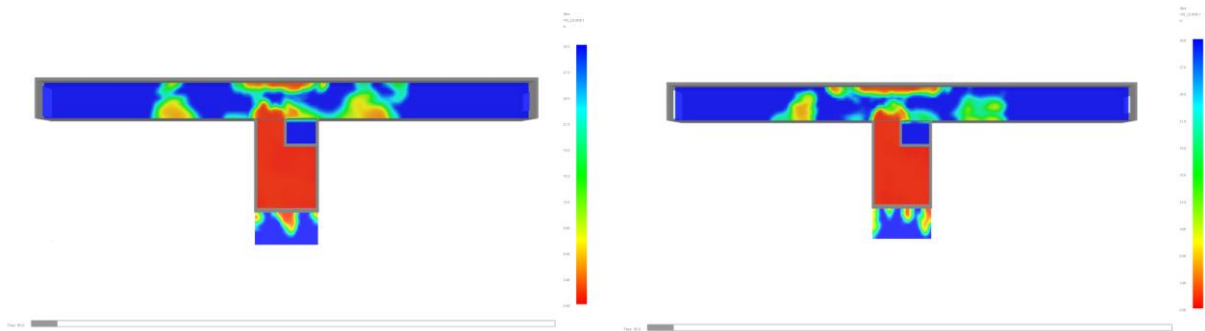


Abbildung 40: Sichtweite nach 90 s, Höhe 1,80 m, links erstes Modell, rechts zweites Modell

Nach 360 Sekunden sind im Flur wie bei dem ersten Modell alle Grenzwerte deutlich überschritten. Der CO-Gehalt in einer Höhe von 1,80 m beträgt zu diesem Zeitpunkt etwa 1.800 ppm, der CO<sub>2</sub>-Gehalt etwa 4 % und die Rauchgastemperatur etwa 110 °C.

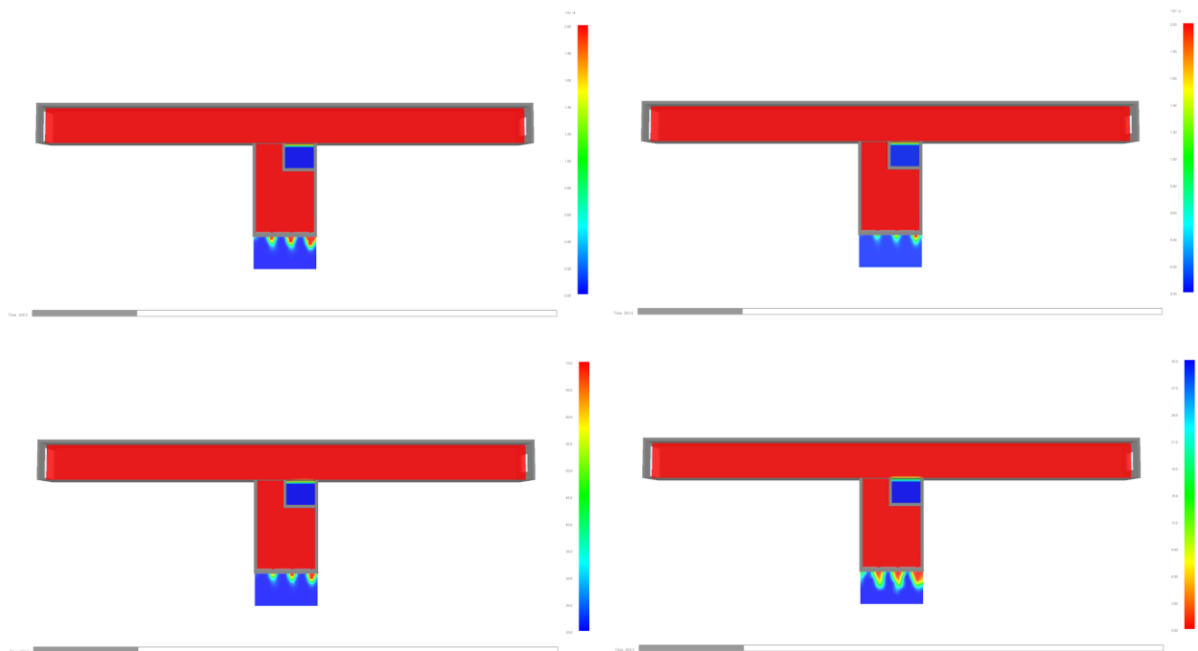


Abbildung 41: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite nach 360 s, Höhe 1,80 m

Nach dem Schließen der Tür strömt außer durch eine kleine Leckage kein neuer Heißrauch mehr in den Flur. In der Folge sinkt die Temperatur des Rauchgases im Flur rapide und erreicht 90 Sekunden nach dem Schließen der Tür, 450 Sekunden nach Beginn der Simulation, den Grenzwert von 45 °C. Die anderen Grenzwerte bleiben aufgrund der geringen Luftbewegungen im Flur allerdings weiter deutlich überschritten. Der CO-Gehalt liegt zu diesem Zeitpunkt bei rund 1.450 ppm und der CO<sub>2</sub>-Gehalt bei etwa 3 %. Die Situation nach 450 Sekunden ist in Abbildung 42 (nächste Seite) dargestellt.

Bei Beobachtungen des CO-Gehalts fällt auf, dass die Abnahme nicht linear verläuft. Abbildung 43 stellt die Abnahme des CO-Gehalts über die Zeit da. Für die Darstellung wird ein über die Länge des Flurs gemittelter Wert verwendet, tatsächlich unterscheidet sich der Gehalt von CO im Verlauf des Flurs. In der auf der Fensterseite liegenden Flurhälfte (rechts in den

Abbildungen) ist der CO-Gehalt der Luft um etwa 50 ppm – 100 ppm niedriger als in der fensterabgewandten Hälfte.

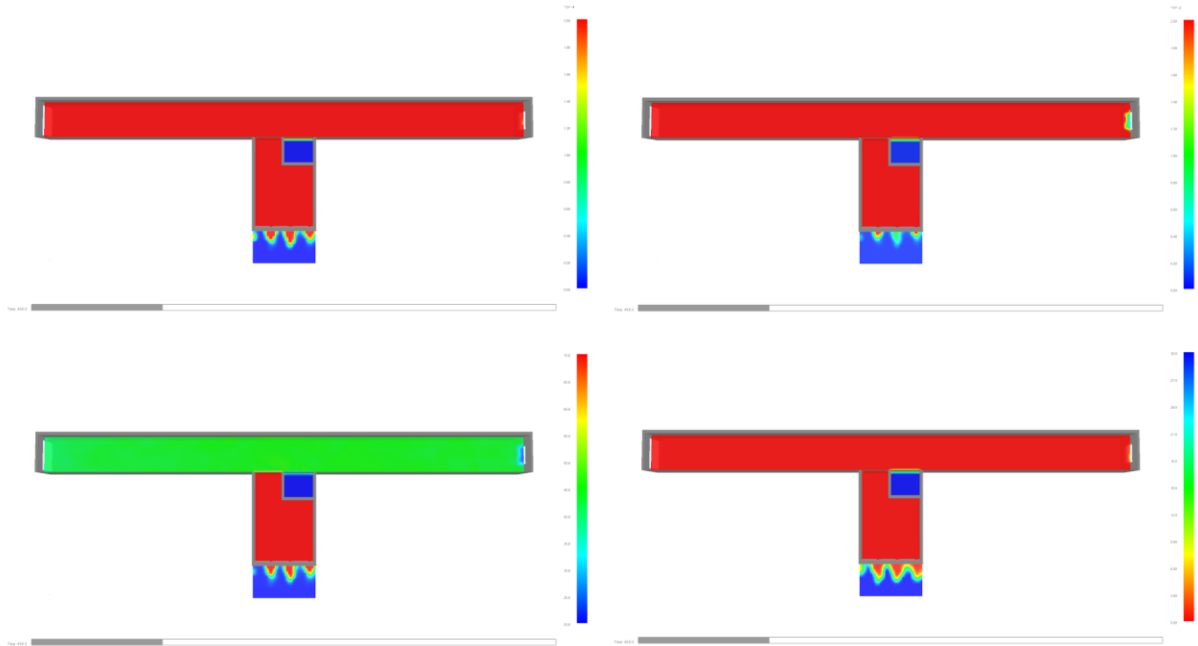


Abbildung 42: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 450 Sekunden, Höhe 1,80 m

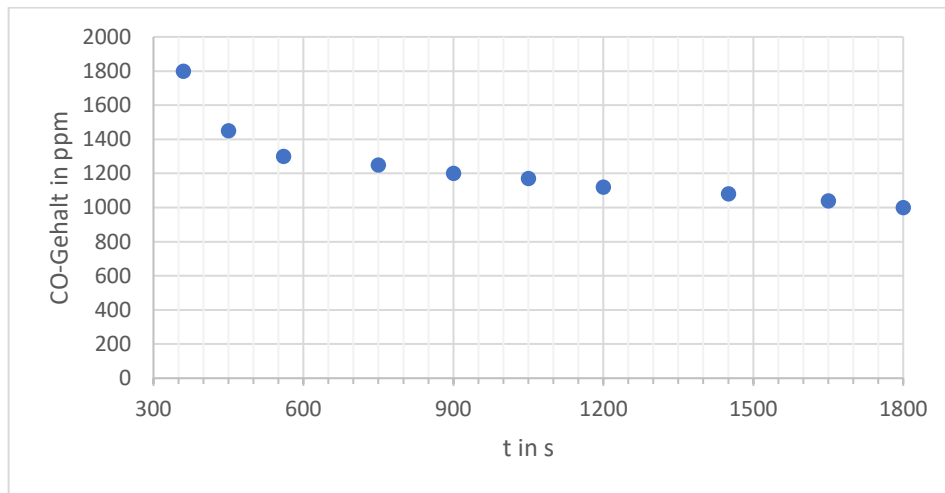


Abbildung 43: Abnahme des mittleren CO-Gehalts über die Zeit der Simulation

Auch die CO-Konzentration und die Rauchdichte sinken durch die Leckagen im Flurfenster zwar weiter langsam ab, aber es werden trotzdem bis zum Ende der Simulation nach 1.800 Sekunden die Grenzwerte nicht mehr unterschritten, so dass der Rettungsweg weiter unbenutzbar bleibt. Die Abbildungen Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die Situation nach 1.200 Sekunden und nach 1.800 Sekunden. An der Darstellung der Temperatur ist hier außerdem die Leckage der Tür gut zu sehen, durch die ein wenig Hitze in den Flur strömt.

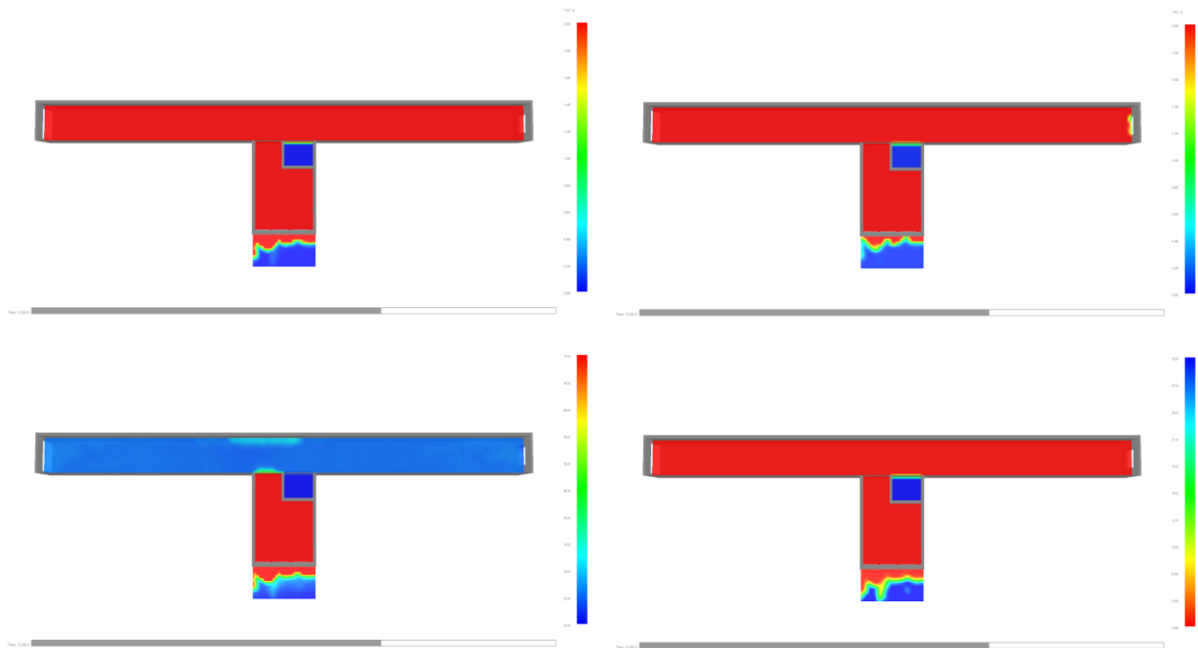


Abbildung 44: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 1.200 Sekunden, Höhe 1,80 m

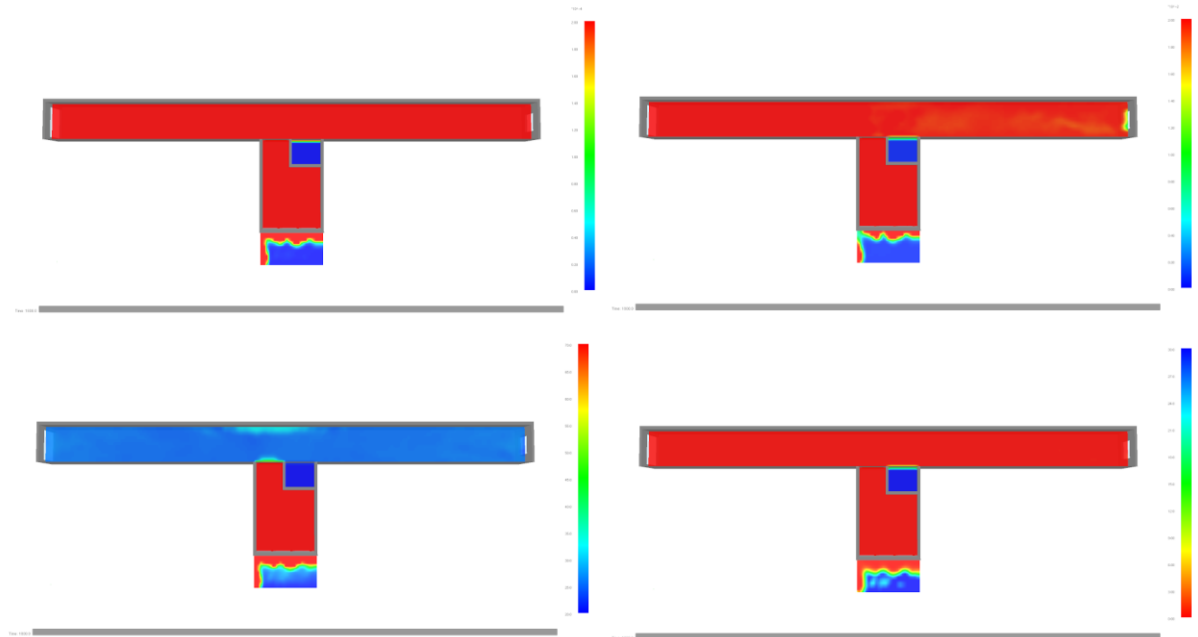


Abbildung 45: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 1.800 Sekunden, Höhe 1,80 m

Am Ende der Simulation beträgt der CO-Gehalt wie beschrieben etwa 1.000 ppm und der CO<sub>2</sub>-Gehalt etwa 2 %. Zusammenfassend führt das Schließen der Tür zwar zu einer langsamen Abnahme der Schadstoffkonzentration im Flur, aufgrund der fehlenden Luftumwälzung ist die Abnahmerate allerdings viel zu gering, um eine nennenswerte Auswirkung auf die Sicherheit der Rettungswege zu haben.

#### 4.2.3. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3

Bei den Modellen mit einer Entrauchungsanlage springt die Entrauchung gleichzeitig mit dem Öffnen der Tür 60 Sekunden nach Beginn der Brandausbreitung an und ist nach etwa 30 Sekunden vollständig hochgefahren. Nach 60 Sekunden zeigt sich noch dasselbe Bild wie beim Modell ohne Entrauchungsanlage. In den ersten 60 Sekunden ist die Entwicklung bei allen Modellen der Flurvariante 1 identisch zu den in Abbildung 32 und Abbildung 33 gezeigten Darstellungen. Nach 90 Sekunden zeigt sich aber vor allem in der Sichtweite bereits ein Unterschied. Die Rauchausbreitung ist durch die Entrauchungsanlage deutlich eingeschränkt. Abbildung 46 zeigt die Sichtweite in 2,10 m Höhe im Vergleich.

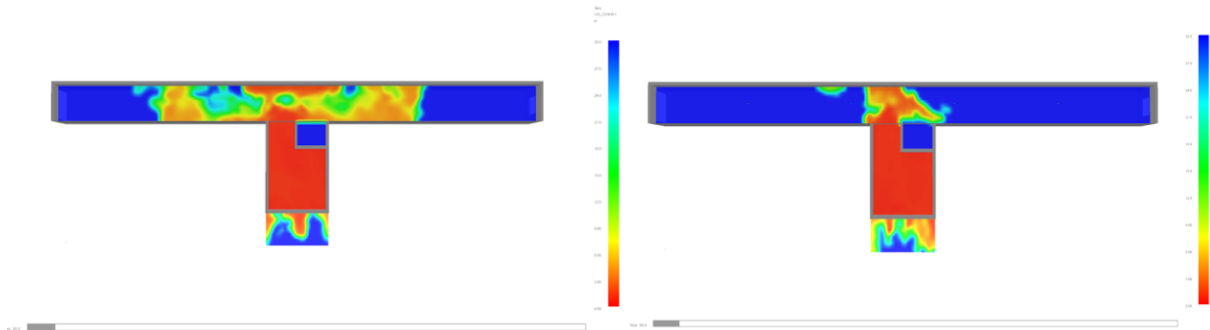


Abbildung 46: Sichtweite ohne (links) und mit Entrauchung (rechts) nach 90 s, Höhe 2,10 m

Auch nach 150 Sekunden, als im Flur ohne Entrauchungsanlage die Sichtweite bereits nicht mehr als 3 m betrug, zeigt die Entrauchung eine deutliche Verbesserung. Wie Abbildung 47 (nächste Seite) zeigt beträgt außer im Bereich unmittelbar vor dem Brandraum die Sichtweite im kompletten Flur noch 30 m und mehr. Auch die Schadstoffkonzentration und die Temperatur waren in großen Teilen des Flurs nicht erhöht.

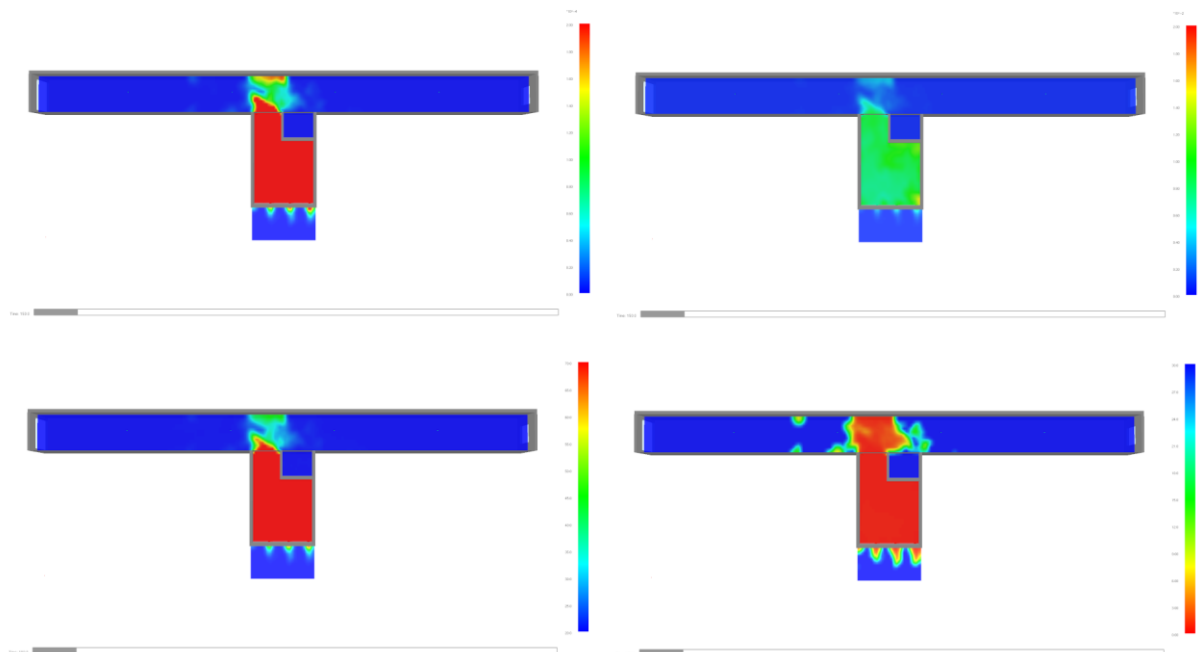


Abbildung 47: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 150 Sekunden, Höhe 1,80 m

Nach 600 Sekunden blockiert der Rauch einen knapp 4 m breiten Bereich unmittelbar vor dem Brandraum, während der Rest des Flurs weitestgehend rauchfrei ist. Die Rauchschwaden sind im Bereich von 1,80 m bis 2,10 m allerdings auch beinahe gleich breit, wie in Abbildung 48 zu sehen.

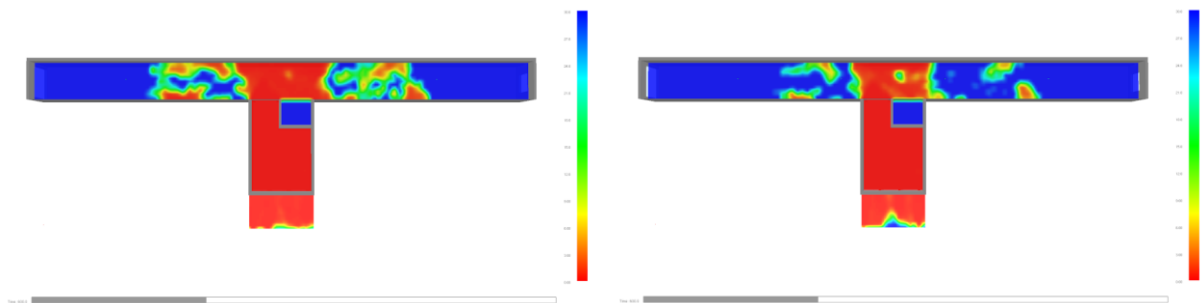


Abbildung 48: Sichtweite nach 600 s, Höhe 2,10 m (links) und Höhe 1,80 m (rechts)

Die Bilder für die Schadstoffkonzentrationen und die Temperatur sind ähnlich, in allen Fällen breitet sich der Rauch nur wenig über den Flur aus.

Nach 900 Sekunden zeigt sich das Bild wenig verändert. Bis auf den Bereich unmittelbar vor dem Brandraum werden die Grenzwerte im Flur nicht erreicht (Abbildung 49). Im Bereich vor dem Brandraum liegt die CO-Konzentration bei rund 1000 ppm und die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei rund 2 %.

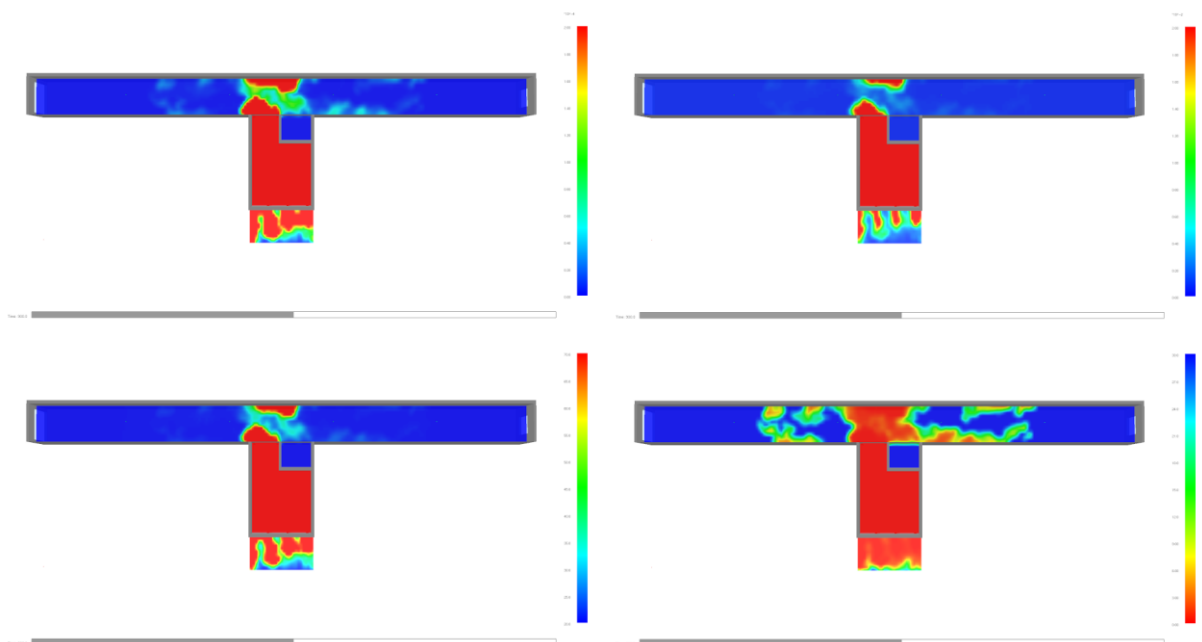


Abbildung 49: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 900 Sekunden, Höhe 1,80 m

Die horizontale Rauchverteilung nach 900 Sekunden ist in Abbildung 50 dargestellt und ändert sich im Verlauf der Simulation beinahe gar nicht. Tatsächlich bleibt es bis zum Abschluss der Simulation in etwa bei der Rauchausbreitung, die in den Abbildungen Abbildung

49 und Abbildung 50 zu sehen ist, so dass der Flur in großen Teilen betretbar bleibt. Abbildung 51 zeigt die Verteilung nach 1.800 Sekunden, in einer Höhe von 1,95 m, also direkt unter der gewünschten raucharmen Schicht.

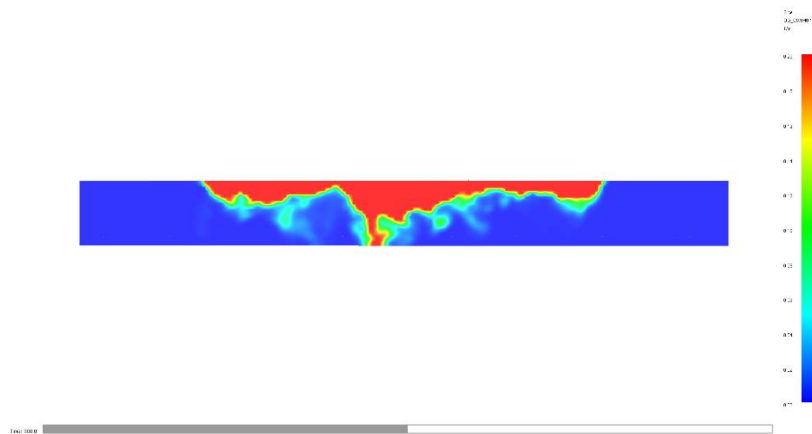


Abbildung 50: Optische Dichte nach 900 s, Flurmitte im Querschnitt

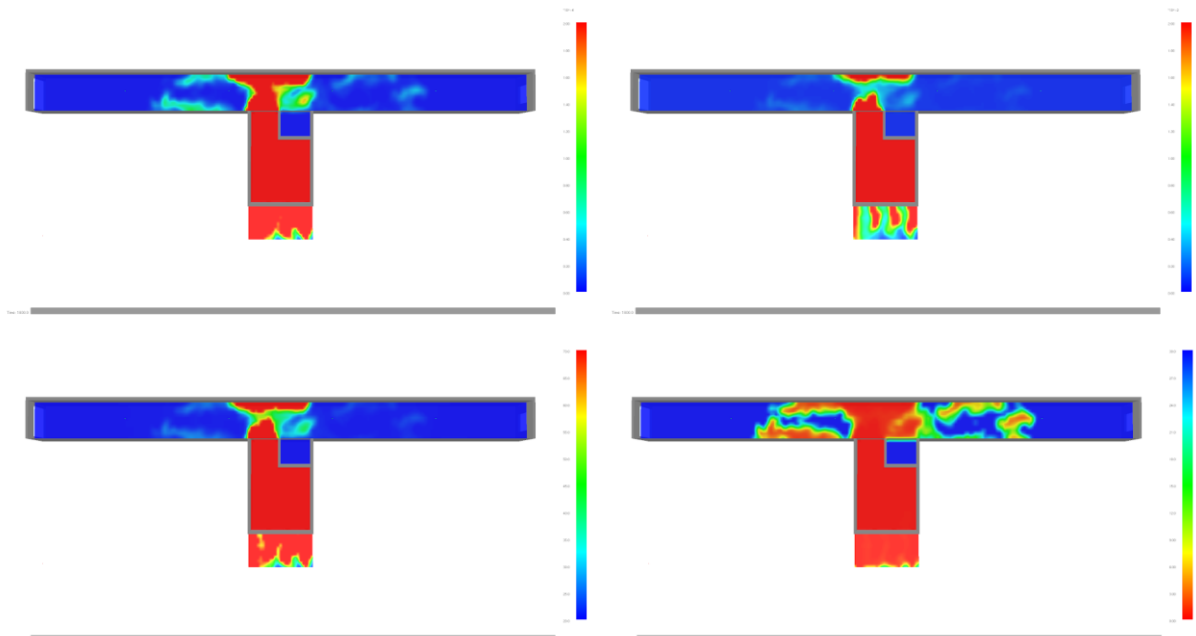


Abbildung 51: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 1.800 Sekunden, Höhe 1,95 m

Der horizontale Verlauf der optischen Dichte (Abbildung 50) zeigt, dass eine Rauchschicht unter der Decke gebildet, allerdings ist diese Entrauchung bereits stark genug, dass sich die Rauchschicht nicht über den kompletten Flur ausbreitet. Es ist in den Abbildungen Abbildung 50 und Abbildung 51 auch gut zu sehen, dass die Unterseite der Rauchschicht nicht eben ist, sondern durch Verwirbelungen die Dicke der Rauchschicht lokal stark variiert und Teile der Rauchschicht unter der Höhe von 2,00 m liegen. In einem großen Teil des Flurs bleiben die Grenzwerte aber eingehalten.

#### 4.2.4. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 4

Wie oben beschrieben läuft die Entrauchung gleichzeitig mit dem Öffnen der Tür 60 Sekunden nach Beginn der Brandausbreitung an und ist nach etwa 30 Sekunden vollständig hochgefahren. Nach 90 Sekunden zeigt sich hier in der Rauchausbreitung bereits ein deutlicher Unterschied zu dem Modell ohne Entrauchung. Die Rauchausbreitung ist durch die Entrauchungsanlage deutlich eingeschränkt. Abbildung 52 zeigt die Sichtweite in 2,10 m Höhe im Vergleich.

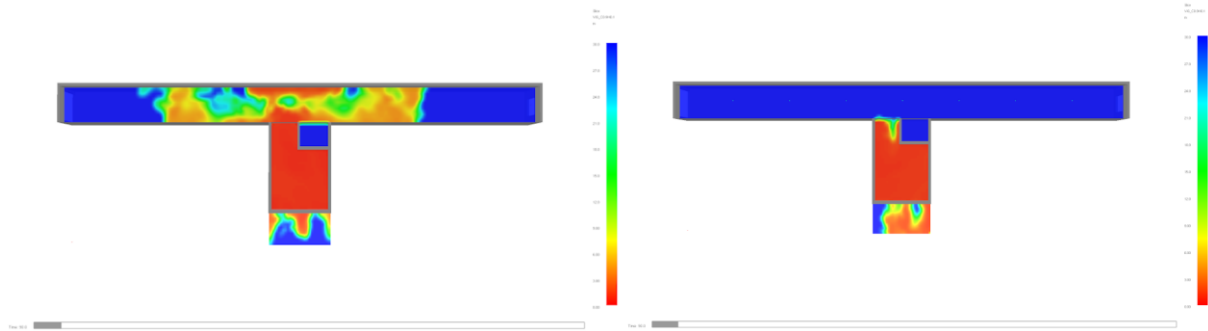


Abbildung 52: Sichtweite im Flur nach 90 s, ohne Entrauchung (links) mit Entrauchung (rechts), Höhe, 2,10 m

Wie zu sehen, tritt bei Entrauchung in diesem Umfang zu Beginn des Brandes nahezu kein Rauch mehr aus. Erst nach 300 Sekunden ist die Sichtweite in dem Teil des Flurs vor dem Brandraum eingeschränkt. Wie bei dem vorherigen Modell kommt es kaum zu einer Ausbreitung von Rauch in der Länge des Flurs. Abbildung 53 zeigt die Schadstoffkonzentration, die Temperatur und die Sichtweite nach 300 Sekunden, Abbildung 54 (nächste Seite) den vertikalen Verlauf der optischen Dichte im Flur.

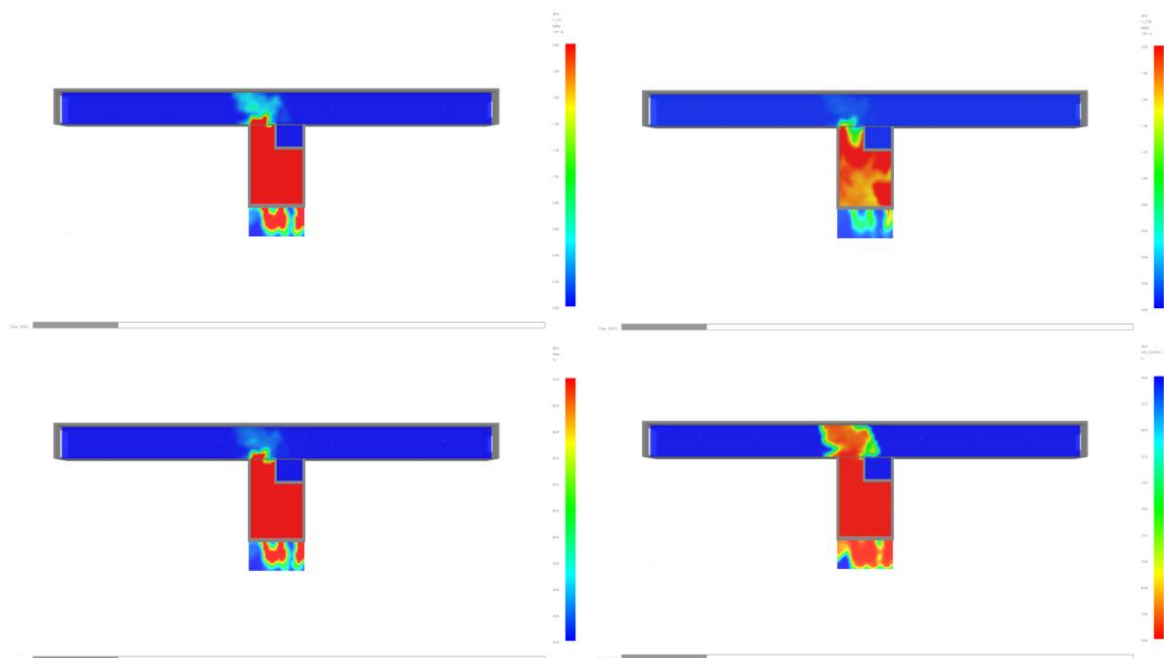


Abbildung 53: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 300 Sekunden, Höhe 1,80 m

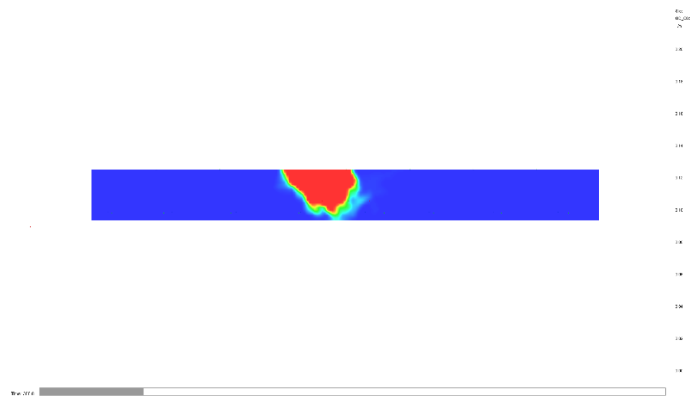


Abbildung 54: Optische Dichte nach 300 s, Flurmitte im Querschnitt

Die in den vorherigen beiden Abbildungen sichtbare Ausbreitung des Rauchs ist gleichzeitig auch die maximale Ausbreitung, die bis zum Ende der Simulation erreicht wird. Die Konzentration der Schadstoffe steigt noch an, sodass vor allem der CO-Gehalt im Bereich vor der Tür ständig über dem Grenzwert liegt, allerdings nur in diesem sehr begrenzten Bereich. Kurzzeitig kann es passieren, dass die Schadstoffkonzentration in einem größeren Bereich erhöht ist. Abbildung 55 zeigt als Beispiel ein kurzzeitiges Maximum in der Ausbreitung von CO nach 1.210 Sekunden.

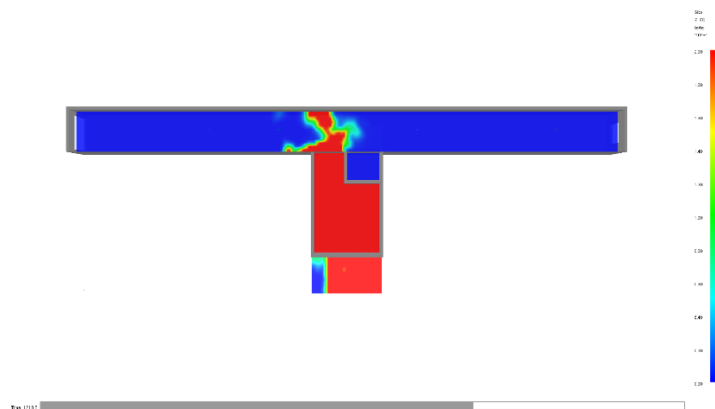


Abbildung 55: CO-Gehalt nach 1.210 s, Höhe 1,95 m

Die hier gezeigte Spitze hat eine CO-Konzentration zwischen 800 ppm - 1.000 ppm. Im restlichen Flur tritt im gesamten Verlauf keine nennenswerte Erhöhung der Konzentration der betrachteten Schadstoffe auf. Abbildung 50 (nächste Seite) zeigt die Ausbreitung von CO, CO<sub>2</sub>, Temperatur, sowie die Einschränkung der Sichtweite nach 1.800 Sekunden.



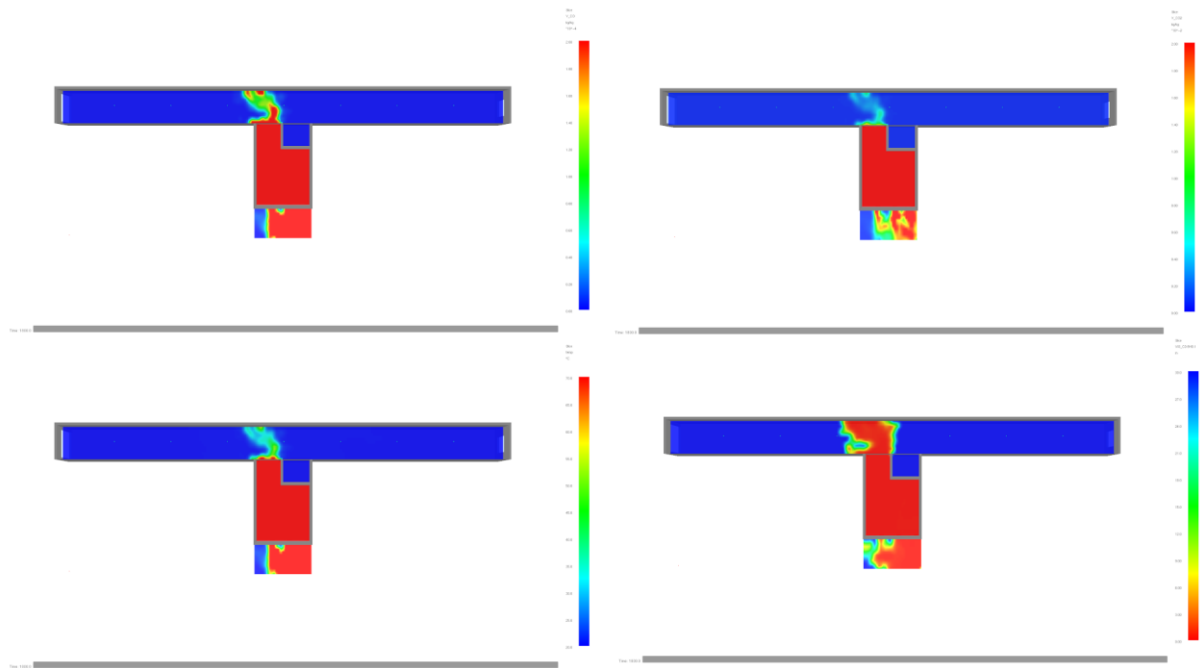


Abbildung 56: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 1.800 Sekunden, Höhe 1,80 m

Der höchste CO-Gehalt im Flur lag wie oben beschrieben bei etwa 1.000 ppm, der höchste CO<sub>2</sub>-Gehalt bei etwa 3 %, die Temperatur im Maximum bei etwa 120 °C, all diese Spitzen traten aber für wenige Sekunden auf und nur im Bereich unmittelbar vor der Tür. Der CO-Gehalt und die Sichtweite überschritten im Bereich vor der Tür dauerhaft die Grenzwerte, mit einem CO-Gehalt von etwa 600 ppm und der dargestellten Sichtweite von 0 m. Da in einem Großteil des Flures die spezifischen Schutzziele aber dauerhaft eingehalten wurden, ist die Freihaltung der Rettungswege in diesem Modell erfolgreich, wenn auch nicht über die gewünschte Herstellung einer raucharmen Schicht.

### 4.3. Rauchausbreitung in einem karreeförmigen Flur

#### 4.3.1. Rauchausbreitung ohne Entrauchungsanlage

In Abbildung 57 ist der Flur zu Beginn der Simulation bei  $t = 0$  s exemplarisch an der Temperatur dargestellt. Da es in den folgenden Modellen mehr als einen Flurschnitt gibt, werden die zwei betrachteten Flure folgend X und Y benannt. Der parallel zu Flur X liegende Flur wird in den Auswertungen nicht betrachtet, da sich die Ergebnisse aus Flur X entweder übertragen lassen oder die Ausbreitung in Flur X stärker ist als im Parallelflur.

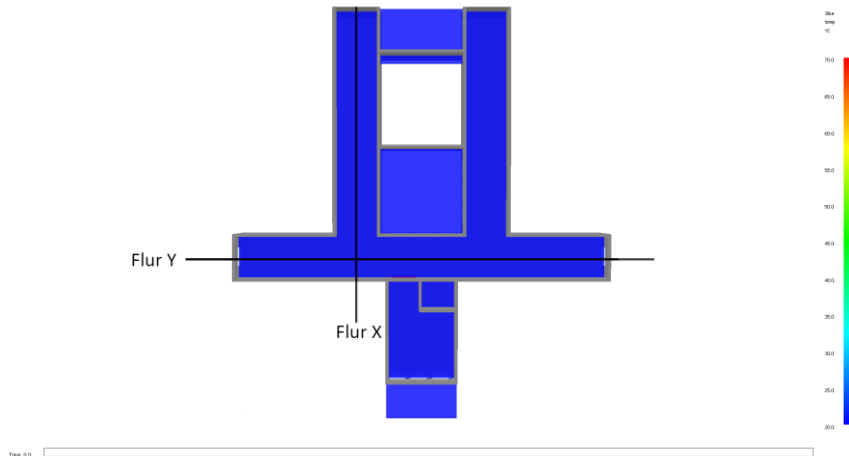


Abbildung 57: Temperatur nach 0 s, Höhe 1,80 m

Wie bei dem Modell der vorherigen Flurform wurde die Tür zwischen Brandraum und Flur nach 60 Sekunden geöffnet. 90 Sekunden nach Simulationsbeginn beginnt der Rauch sich im Flur ausbreiten (Abbildung 58). Mit Ausnahme der Sichtweite werden die Grenzwerte zu diesem Zeitpunkt auch im Brandraum noch eingehalten.

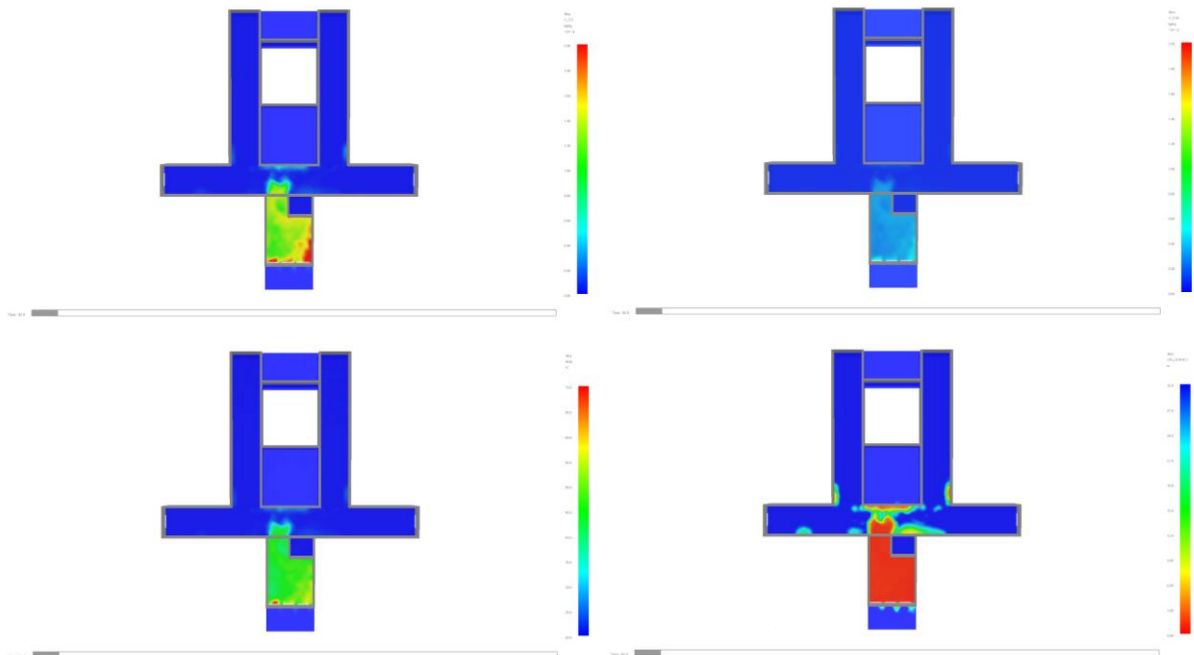


Abbildung 58: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 90 Sekunden, Höhe 1,80 m

Nach 130 Sekunden beträgt die Sichtweite im angrenzenden Flur in 1,80 m Höhe bereits weniger als 3 m und der Rauch dringt in die senkrecht verlaufenden Flurstücke ein, die bereits 40 Sekunden später ebenfalls verraucht sind.

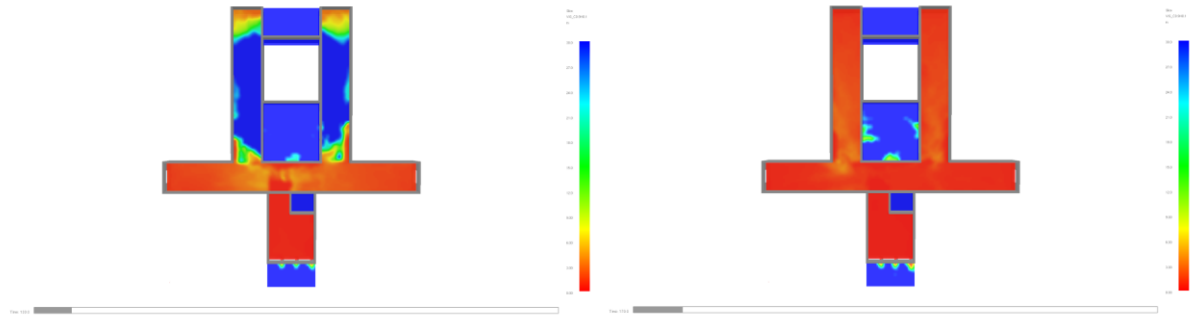


Abbildung 59: Sichtweite nach 130 Sekunden (links) und nach 170 Sekunden (rechts), Höhe 1,80 m

Auch hier zeigt sich wieder, dass der Rauch sich zunächst an der Decke entlang ausbreitet, an der entfernt liegenden Seite abkühlt und absinkt und der Flur von beiden Seiten verraucht. Abbildung 60 zeigt die vertikale Veränderung der Rauchdichte in 120 Sekunden.

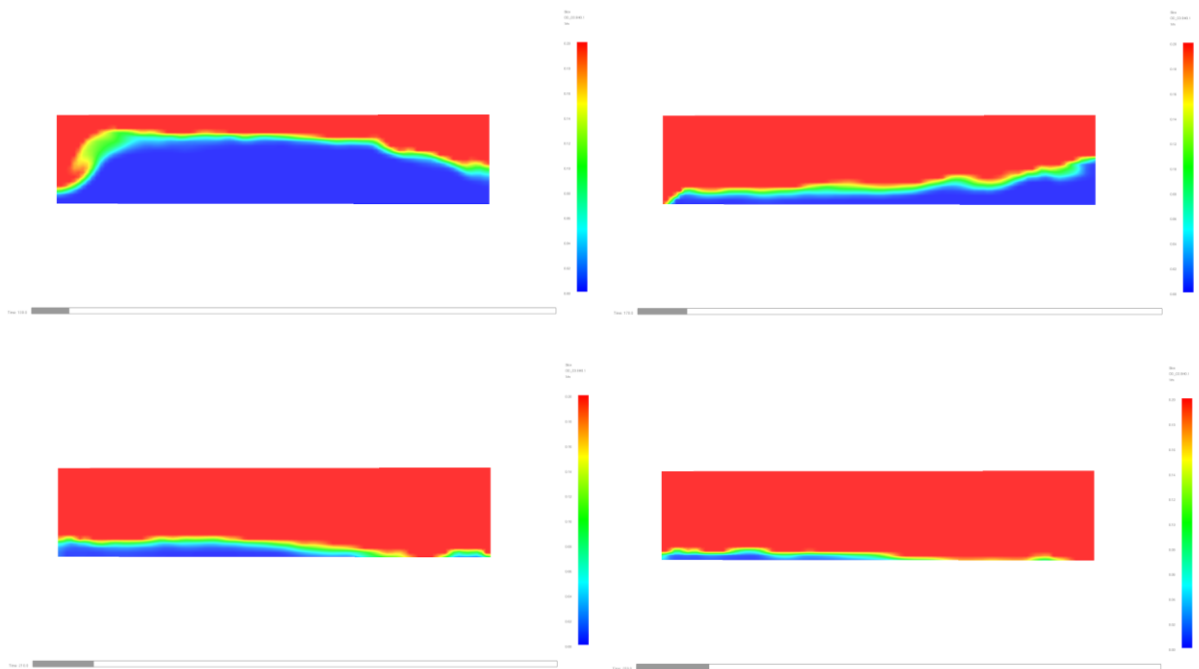


Abbildung 60: Rauchdichte nach 130 s, 170 s, 210 s und 250 s (oben links nach unten rechts), Flur X, Flurmitte im Querschnitt

Ansonsten zeigt sich bei dieser Simulation ohne Entrauchung und große Luftbewegungen im Flur ein ähnliches Bild wie in Flurvariante 1 auch. Alle anderen überwachten Grenzwerte werden nach kurzer Zeit überschritten und bleiben bis zum Ende überschritten. Der CO-Gehalt übersteigt den vorgegebenen Grenzwert im kompletten Flur nach 200 Sekunden, der CO<sub>2</sub>-Gehalt nach 380 Sekunden, und die Temperatur nach 420 Sekunden. In Abbildung 61 (nächste Seite) sind die Zeitpunkte gezeigt, zu denen die Grenzwerte überschritten werden.

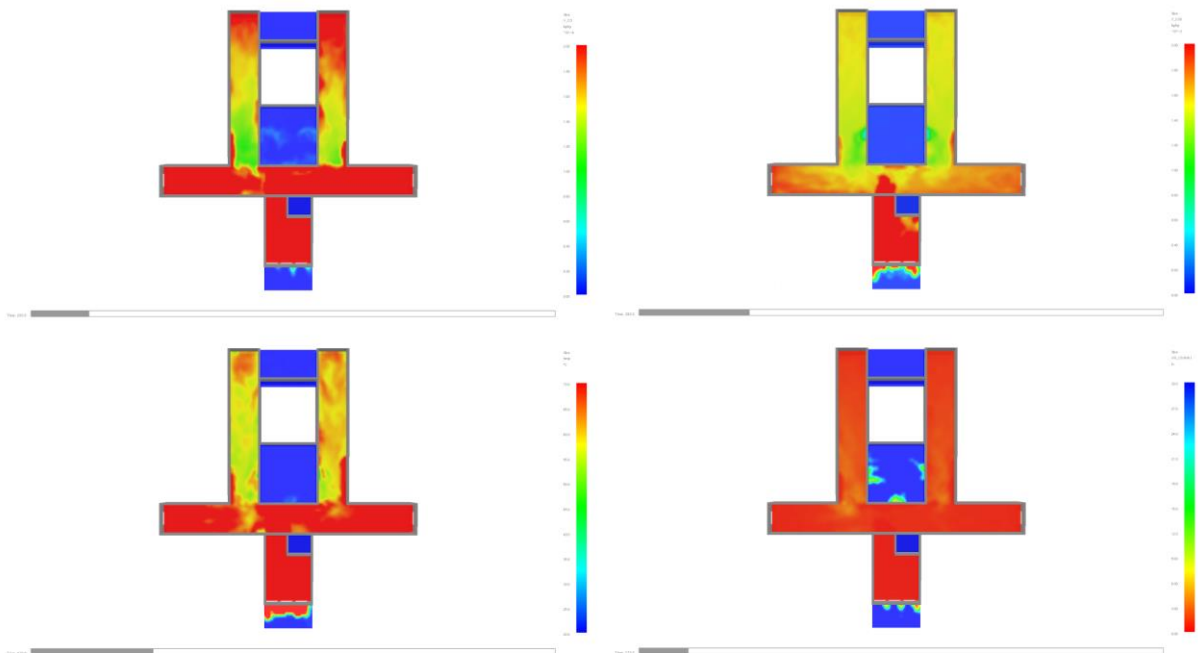


Abbildung 61: CO-Gehalt (200 s), CO<sub>2</sub>-Gehalt (380 s), Temperatur (420 s) und Sichtweite (170 s) bei Überschreitung der Grenzwerte im kompletten Flur, Höhe 1,80 m

Wie in der anderen Flurvariante steigen die Schadstoffkonzentrationen durch die offene Tür bis zum Ende hin an. Der maximale CO-Gehalt im Flur beträgt nach 1.800 Sekunden rund 4.700 ppm, also beinahe das 50-fache des Grenzwertes. Der maximale CO<sub>2</sub>-Gehalt beträgt etwa 8,5 % und die maximale Temperatur etwa 120 °C. Die Werte sind geringer als im geraden Flur, zum einen weil das Luftvolumen im Flur in dieser Variante größer ist, zum anderen da durch mehr Fenster eine größere Leckagefläche vorhanden ist, über die ein Teil der Schadstoffe an die Umgebung abgegeben werden kann.

#### 4.3.2. Rauchausbreitung mit geschlossener Tür

Die Rauchausbreitung ist in den ersten 360 Sekunden identisch mit dem vorherigen Fall. Zu dem Zeitpunkt als die Tür zwischen Flur und Brandraum geschlossen wird, zeigt sich folgendes Bild (Abbildung 62, nächste Seite) für die beobachteten Parameter. Der CO-Gehalt im kompletten Flur beträgt nach 360 Sekunden etwa 1.200 ppm, der CO<sub>2</sub>-Gehalt etwa 3 % und die Rauchgastemperatur etwa 100 °C in Flur Y und etwa 70 °C in den Querfluren.

Wie in der Flurvariante 1 hat das Schließen der Tür zwar den Effekt, dass kein neuer Heißrauch in den Flur strömt und somit die Temperatur schnell abnimmt, allerdings gibt es im Flur kaum Luftbewegungen und die anderen Parameter werden nur langsam reduziert. Das größere Luftvolumen und die größeren Leckageflächen sorgen dafür, dass die Bedingungen in diesem Modell etwas besser sind, aber auch in diesem Modell bleiben die Grenzwerte bis zum Ende der Simulation überschritten.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt nimmt in diesem Modell soweit ab, dass er am Ende den Grenzwert um weniger als das doppelte übersteigt, so dass sich die Abnahme mit den gewählten Grenzen graphisch darstellen lässt (Abbildung 63, nächste Seite)

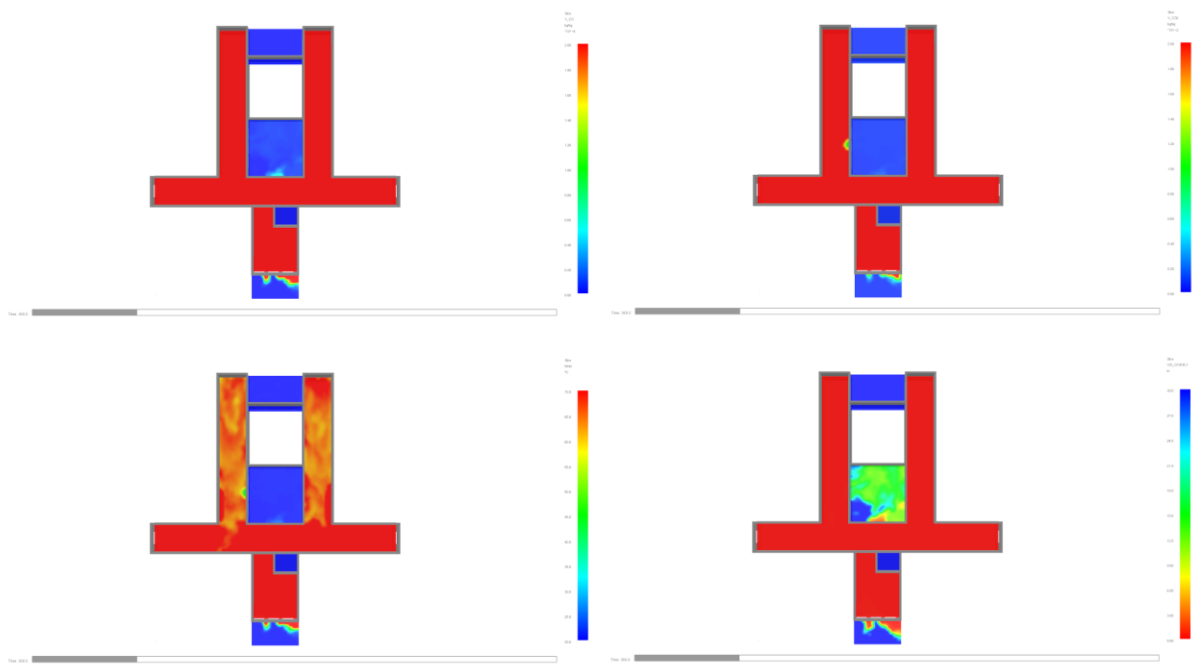


Abbildung 62: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 360 s, Höhe 1,80 m

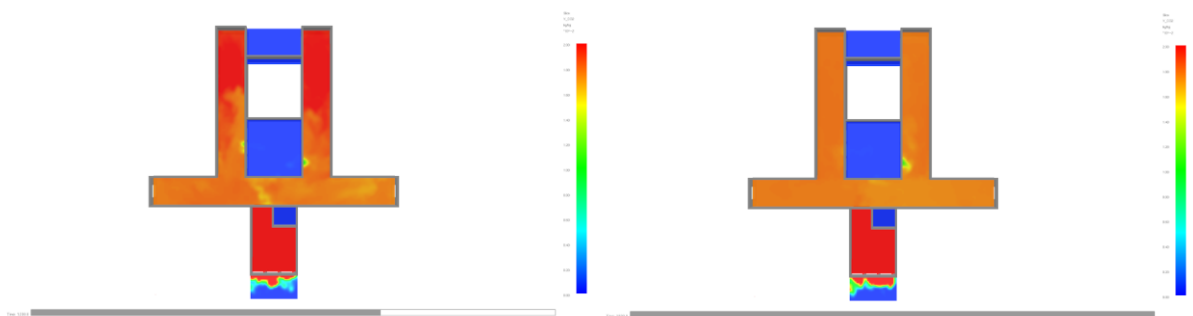


Abbildung 63: CO<sub>2</sub>-Gehalt nach 1200 s (links) und nach 1.800 s (rechts), Höhe 1,80 m

Der CO-Gehalt nach 1.800 Sekunden liegt bei etwa 800 ppm und der CO<sub>2</sub>-Gehalt bei etwa 1,7 %. Abbildung 63 zeigt die Abnahme des CO<sub>2</sub>-Gehalts zwischen der 1.200 und der 1.800 Sekunde.

Auch in diesem Modell zeigt sich, dass ein Schließen der Tür zwar einen positiven Einfluss auf die Reduzierung der Rauchgase im Flur hat, aber der Mangel an Luftbewegung dafür sorgt, dass dieser Effekt zu lange braucht um zur Freihaltung der Rettungswege beitragen zu können.

### 4.3.3. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3

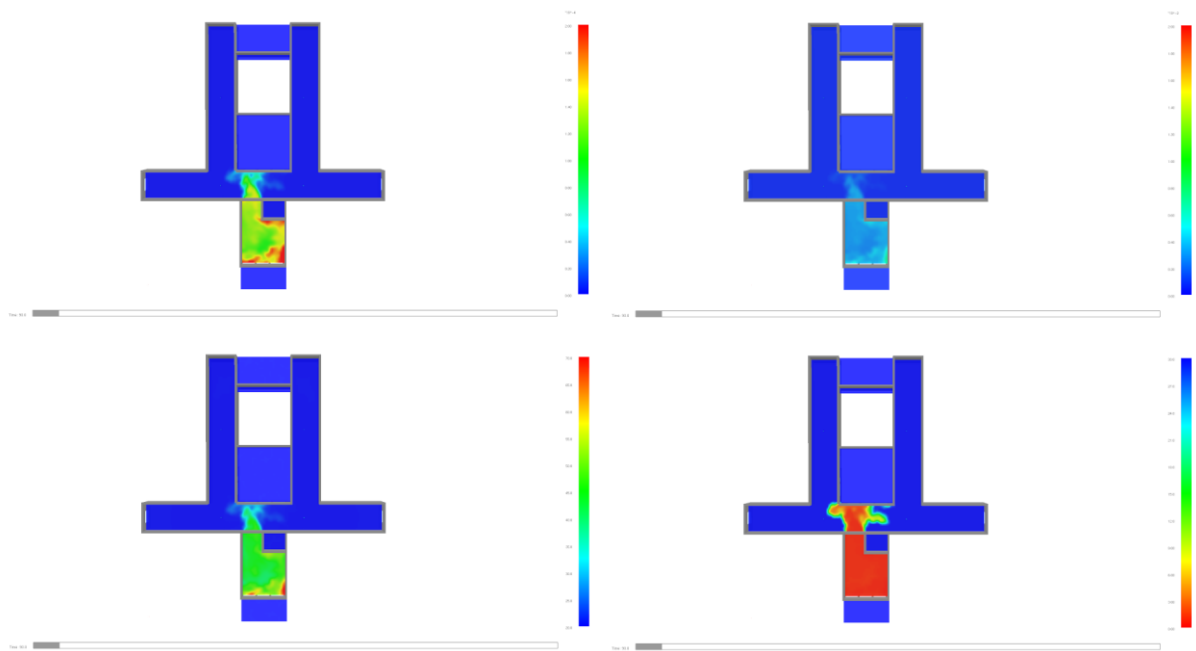


Abbildung 64: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 90 Sekunden, Höhe 1,80 m

Nach 90 Sekunden zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den vorherigen Modellen. Die Tür ist seit 30 Sekunden offen und der Rauch beginnt sich auf dem Flur zu verteilen. Im Gegensatz zu den vorherigen Modellen ohne Entrauchungsanlage ist die Rauchausbreitung aber in diesem Fall zumindest eingeschränkt. Während ohne Entrauchung nach 130 Sekunden das angrenzende Flurstück (Flur Y) und nach 170 Sekunden der komplette Flur verraucht waren dauert es hier länger bis Flur Y verraucht ist. Nach 240 Sekunden ist allerdings der an den Brandraum angrenzende Flur Y selbst in einer Höhe von 1,80 m schon so verraucht, dass die Sichtweite weniger als 15 m beträgt (Abbildung 65). Die angrenzenden Querflure bleiben aber zunächst weitestgehend rauchfrei. Der CO-Gehalt hat den Grenzwert von 100 ppm nach 240 Sekunden ebenfalls überschritten, während CO<sub>2</sub> und Temperatur dauerhaft unter den entsprechenden Werten blieben.

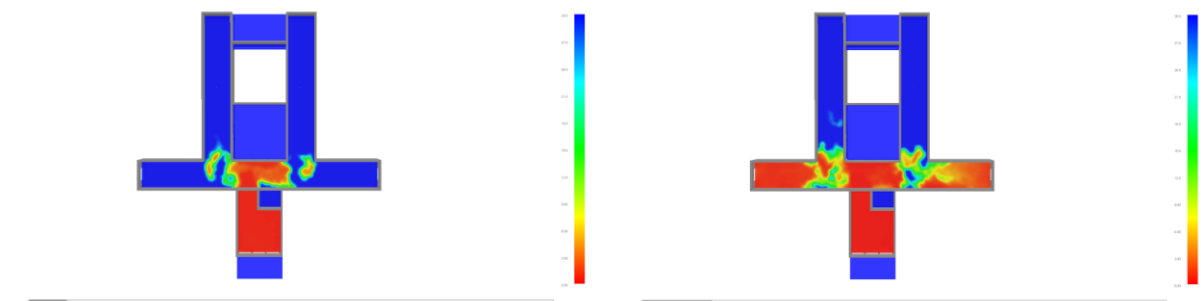


Abbildung 65: Sichtweite nach 130 s (links) und 240 s (rechts), Höhe 1,80 m

Abbildung 66 zeigt den vertikalen Verlauf der optischen Rauchdichte. Es ist gut zu sehen, dass sich keine stabile raucharme Schicht in ausreichender Höhe bildet, sondern der Rauch überall außer direkt unter den Entrauchungsöffnungen bis beinahe zum Boden absinkt.

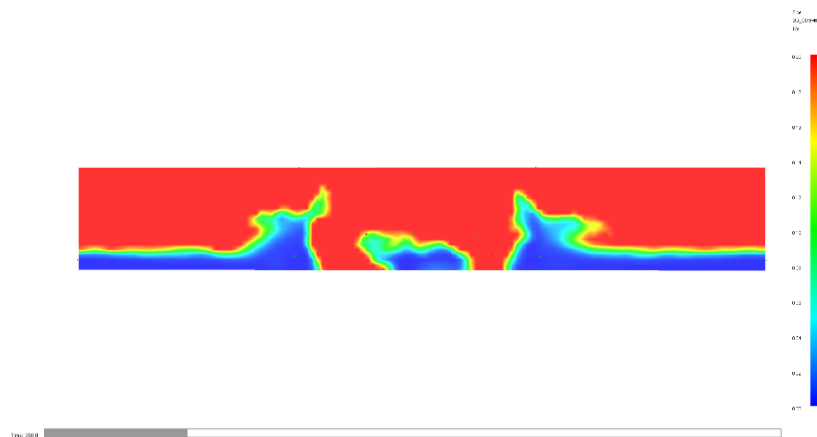


Abbildung 66: Optische Rauchdichte nach 350 s, Flur Y, Flurmitte im Querschnitt

Während die Sichtweite und die optische Dichte in einer Höhe von 1,80 m und 1,95 m die geforderten Grenzwerte deutlich unter- bzw. überschreiten und die Bildung einer raucharmen Schicht nicht zu erkennen ist, zeigen die anderen überwachten Werte zumindest in Ansätzen das Prinzip. Der CO-Gehalt etwa liegt zwar in allen drei Schichten über dem Grenzwert, die Konzentration steigt aber mit der Höhe und beträgt in einer Höhe von 1,80 m 400 ppm, bei 1,95 m 700 ppm und bei 2,10 m fast 1.000 ppm. Beim CO<sub>2</sub>-Gehalt, der in Abbildung 67 dargestellt ist, liegt die Konzentration auf der linken Flurseite in 1,80 m Höhe bei 0,80 %, in 1,95 m Höhe bei 1,30 % und in 2,10 m Höhe bei 1,80 %.

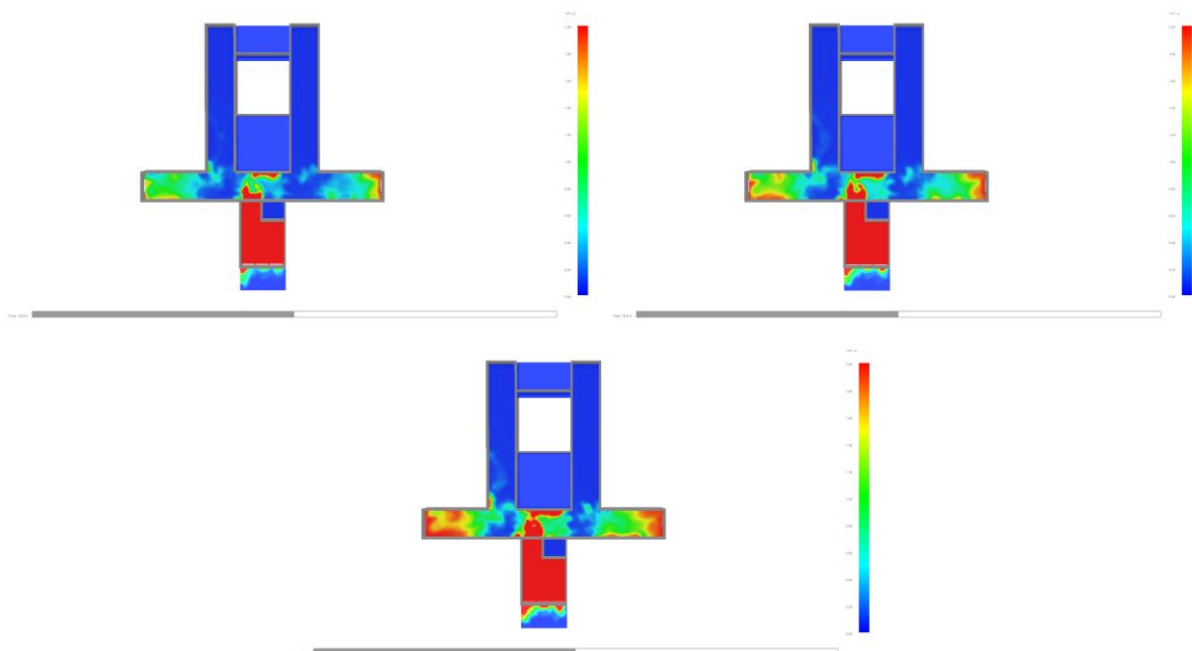


Abbildung 67: CO<sub>2</sub>-Gehalt nach 900 s, Höhe 1,80 m (oben links), Höhe 1,95 m (oben rechts), Höhe 2,10 m (unten)

In die beiden Querflure dringen immer mal wieder kurzzeitig Rauchschwaden ein, aber langfristig bleiben diese frei und begehbar. Abbildung 68 etwa zeigt das Eindringen von ein wenig Rauch in Flur X nach 760 s und den wieder reduzierten Rauchgehalt 20 Sekunden später.

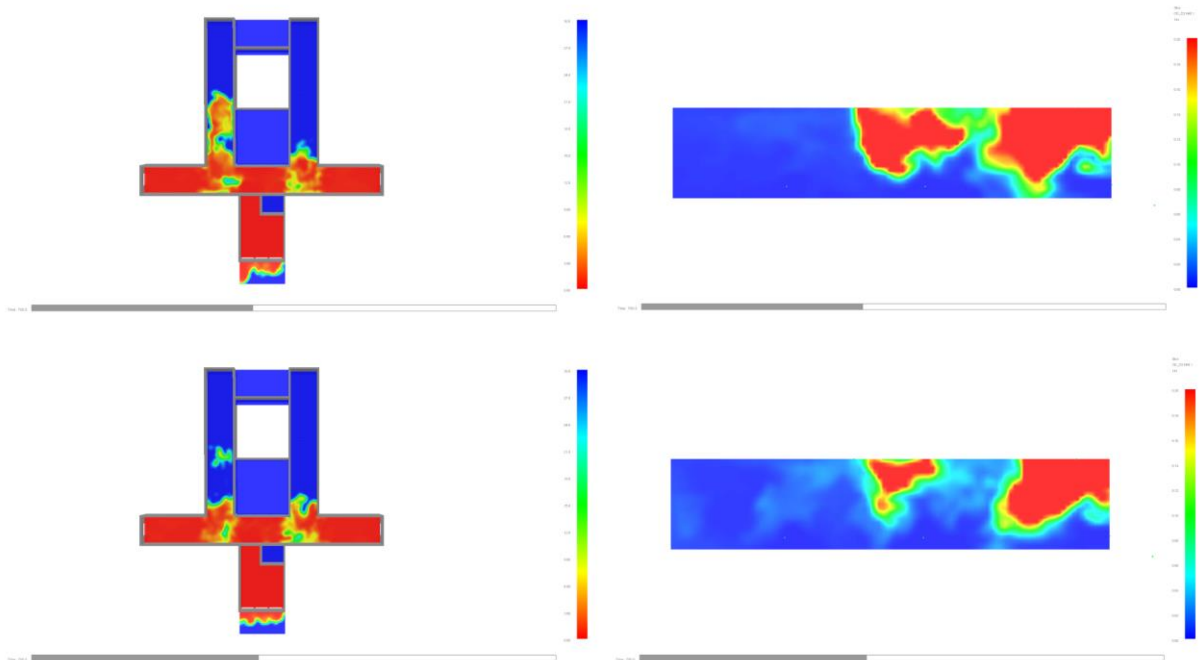


Abbildung 68: Sichtweite (links), Höhe 1,80 m und optische Rauchdichte (rechts), Flur X, Flurmitte im Querschnitt, je nach 760 s (oben) und nach 780 s (unten)

Auffällig ist hier auch, dass der Rauch vor allem in den linken Flur X eindringt und weniger in den dazu parallel verlaufenden Flur obwohl die Zuluft und die Abluftöffnungen symmetrisch verteilt sind.

Bis zum Ende der Simulationsdauer blieb der Rauch ansonsten aber auf Flur Y beschränkt. Die Grenzwerte von Sichtweite und Kohlenmonoxid blieben dabei dauerhaft überschritten, während Temperatur und Kohlendioxid unterhalb der Grenzwerte blieben. Abbildung 69 (nächste Seite) zeigt die überwachten Parameter nach 1.800 Sekunden.



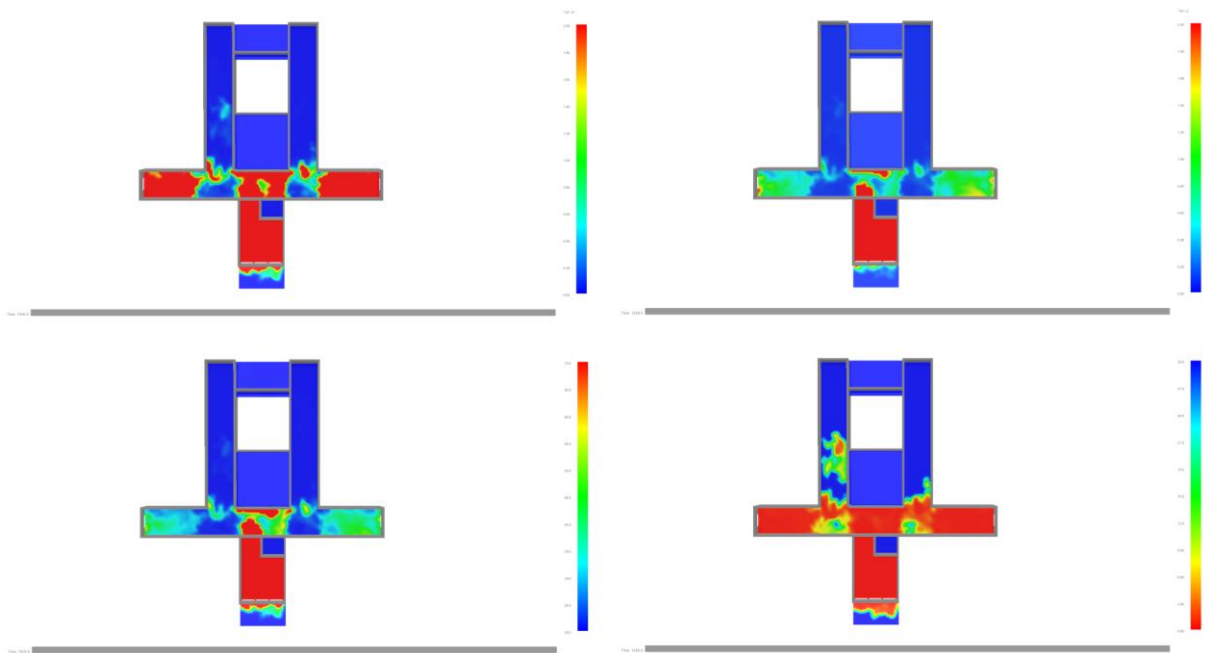


Abbildung 69: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 1800 Sekunden, Höhe 1,80 m

Zusammenfassend ist die Entrauchung also ausreichend um die zwei Querflure rauchfrei zu halten, kann aber im an den Brandraum angrenzenden Flur nicht für eine dauerhaft raucharme Schicht von 2,00 m Höhe sorgen. Die Rauchausbreitung ist aber auch in Flur Y zunächst eingeschränkt im Vergleich zu den Modellen ohne Entrauchung und geht langsamer voran. Die ersten drei Minuten nach dem Öffnen der Tür ist Flur Y noch benutzbar, bevor die Sichtweite zu sehr eingeschränkt und der CO-Gehalt in der Luft zu groß wird.

#### 4.3.4. Rauchausbreitung mit Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 4

Nach 90 Sekunden zeigt sich auch in diesem Versuch das bekannte Bild von der beginnenden Rauchausbreitung auf dem Flur, wobei der hohe Rußanteil dafür sorgt, dass die Sichtweite am schnellsten reduziert wird. Abbildung 70 zeigt die Ausgangssituation, die dem vorherigen Modell stark ähnelt.

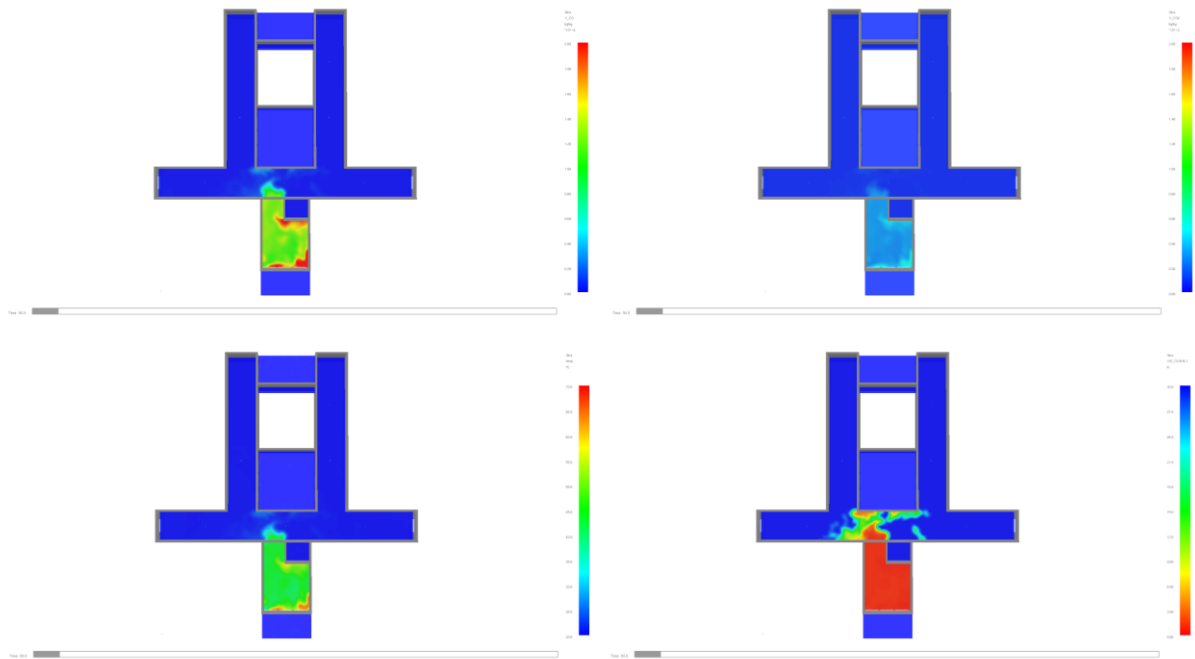


Abbildung 70: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 90 Sekunden, Höhe 1,80 m

Ebenfalls wie im vorherigen Modell ist auch bei dieser stärkeren Entrauchung der Flur trotzdem nach 240 Sekunden extrem stark verraucht und die Sichtweite beträgt im an den Brandraum angrenzenden Flur Y weniger als 3 m (Abbildung 71). Auch hier bildet sich keine raucharme Schicht aus, sondern die Rauchsicht reicht bis nahezu auf den Boden.

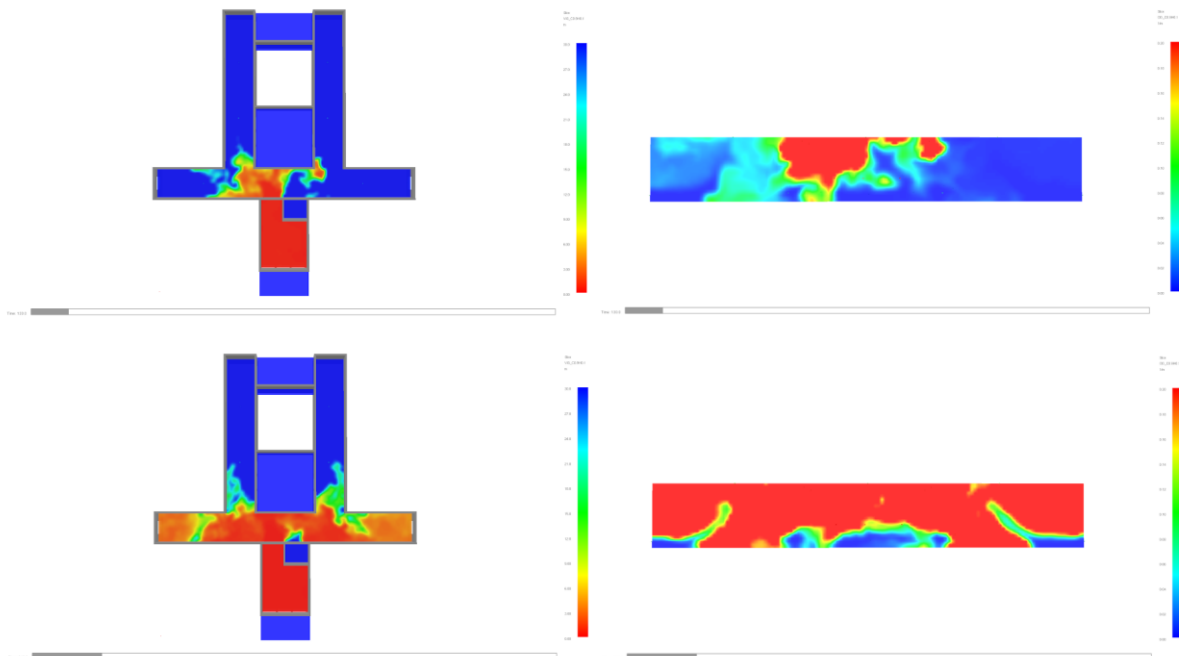


Abbildung 71: Sichtweite, Höhe 1,80 m (links) und optische Rauchsichte in Flur Y im Querschnitt (rechts), nach 130 s (oben) und nach 240 s (unten)

Im Gegensatz zu dem vorherigen Modell ist bei diesem Modell allerdings nur die Sichtweite, beziehungsweise die optische Dichte eingeschränkt. Temperatur, CO-Gehalt und CO<sub>2</sub>-Gehalt

überschreiten im Flur nur unmittelbar vor der Öffnung zum Brandraum die Grenzwerte. Abbildung 72 zeigt die Rauchausbreitung nach 600 Sekunden. Es kommt allerdings gelegentlich zu Anstiegen der überwachten Parameter, insbesondere des CO-Gehalts, die eine kurzzeitige Überschreitung in größeren Flurteilen zur Folge haben.

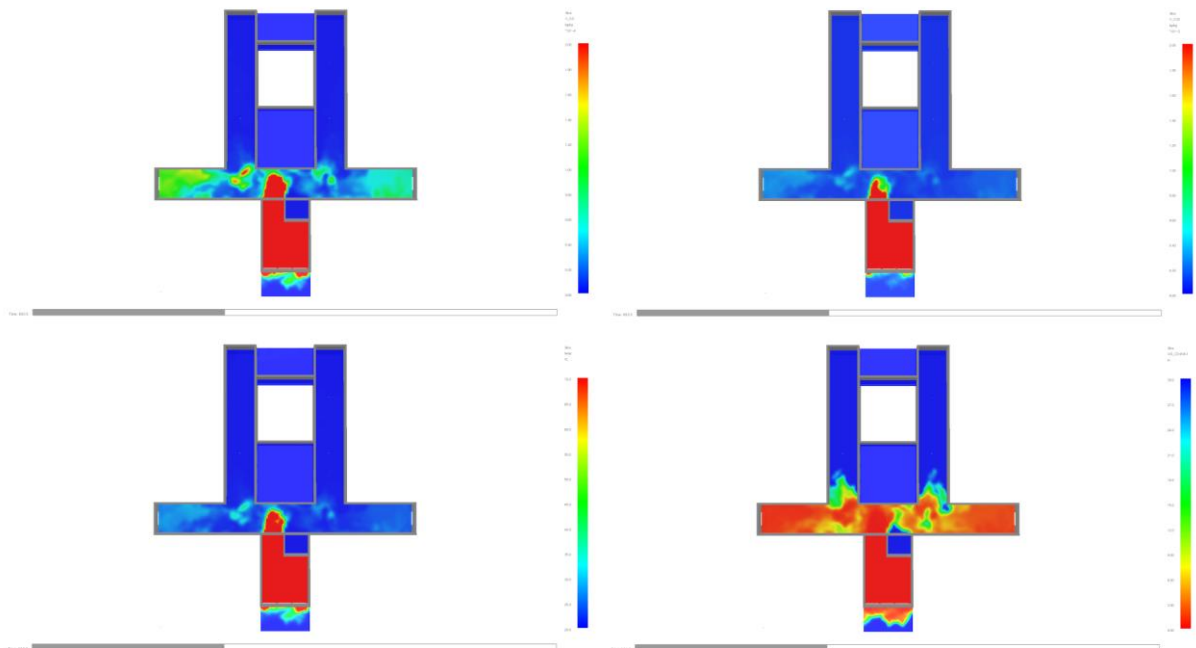


Abbildung 72: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts unten) nach 600 Sekunden, Höhe 1,80 m

Das Auftreten von solchen Ausreißern folgt dabei keinem erkennbaren zeitlichen Muster. Während etwa nach 540 Sekunden der Grenzwert für CO in der linken Flurhälfte fast 100 Sekunden überschritten bleibt, folgen anschließend fast drei Minuten ohne Überschreitung des Grenzwertes, wiederum gefolgt von mehreren Überschreitungen die jeweils weniger als 20 Sekunden andauern. Abbildung 73 zeigt so einen Fall für die Überschreitung des CO-Gehalt nach 950 Sekunden und die Veränderung 20 Sekunden später. Der CO-Gehalt beträgt hier kurzzeitig 600 ppm - 1.000 ppm.

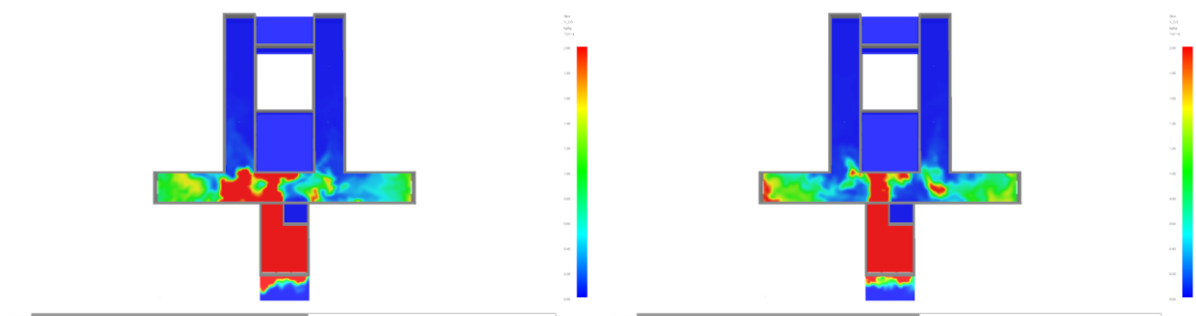


Abbildung 73: CO-Gehalt nach 950 s (links) und 970 s (rechts), Höhe 1,80 m

In die beiden quer verlaufenden Flure dringt der Rauch nur wenig ein, Abbildung 74 etwa zeigt die optische Rauchdichte in Flur X nach 1.020 Sekunden, die so auch in etwa die maximale Ausbreitung des Rauchs in die Querflure darstellt.

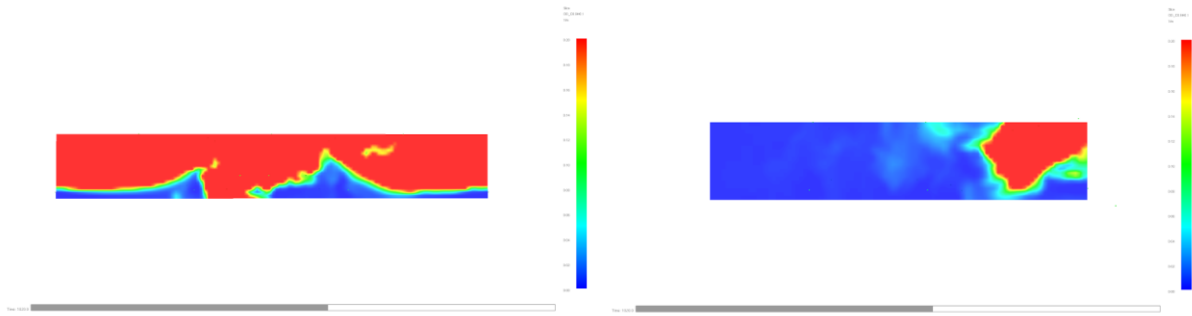


Abbildung 74: Rauchdichte nach 1.020 s, Flur Y (links) und Flur X (rechts), Flurmitte im Querschnitt

Insgesamt ist die Rauchausbreitung in diesem Modell etwas geringer als im vorherigen Modell. Allerdings ist auch nicht so viel geringer, wie es bei einer Entrauchung mit dem 1,75-fachen abgeführten Volumenstrom erwartet werden könnte. Die Sichtweite bleibt in Flur Y weiter stark eingeschränkt und auch eine raucharme Schicht bildet sich nicht aus. Die Sichtweite ist entweder bis beinahe auf Bodenhöhe komplett eingeschränkt, wie im Flur Y oder die Flure sind fast vollständig rauchfrei, wie die beiden quer verlaufenden Flure.

#### 4.3.5. Rauchausbreitung mit geschl. Tür und Entrauchungsanlage nach Bemessungsgruppe 3

Die ersten 360 Sekunden verlaufen in diesem Modell identisch zu dem in Abschnitt 4.3.3. dargestellten Modell. Nach 360 Sekunden, in dem Moment wo die Tür zum Brandraum geschlossen wird, zeigt sich daher als Ausgangslage das gleiche Bild wie in Abbildung 64 (Seite 61). In Abbildung 75 wird zusätzlich noch der vertikale Verlauf der optischen Rauchdichte nach 360 Sekunden gezeigt.

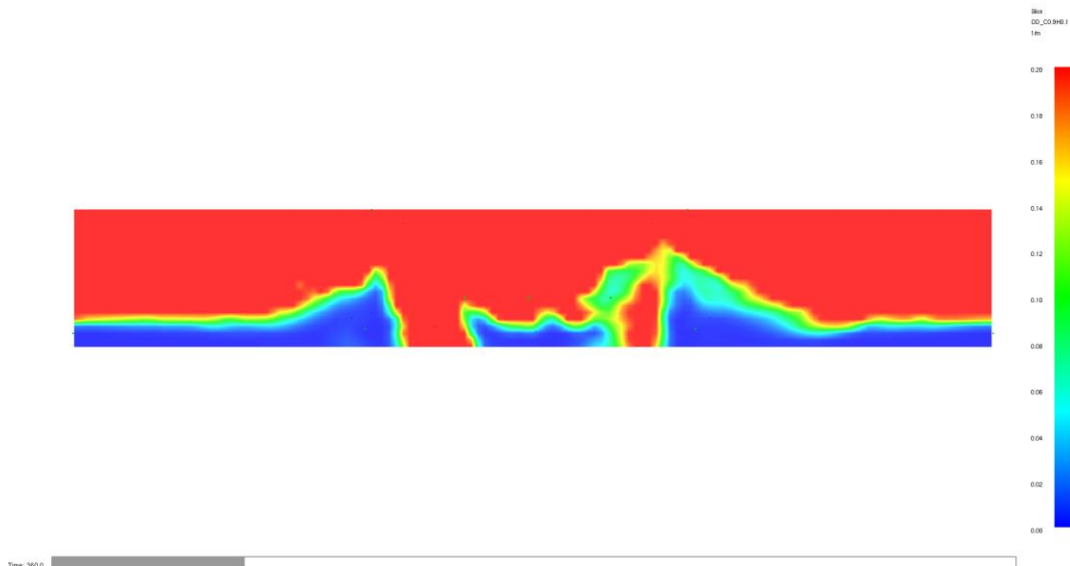


Abbildung 75: Optische Rauchdichte, Flur Y, Flurmitte im Querschnitt

Nachdem die Tür geschlossen ist und die Entrauchung weiter arbeitet kommt es zu einer deutlichen Reduzierung des Rauchs. 120 Sekunden nach dem Schließen der Tür ist der mittlere Teil des Längsflurs bereits wieder rauchfrei, wie in Abbildung 76 zu sehen. Außerdem sind auch in den Stichfluren die Konzentrationen der Schadstoffe bereits unter den Grenzwert reduziert. Nur die Sichtweite bleibt noch eingeschränkt. Der vertikale Verlauf der optischen Dichte zeigt allerdings auch hier keine raucharme Schicht. Der mittlere Flurteil ist nahezu rauchfrei, während in den Stichfluren der Rauch noch bis nahezu auf den Boden steht.

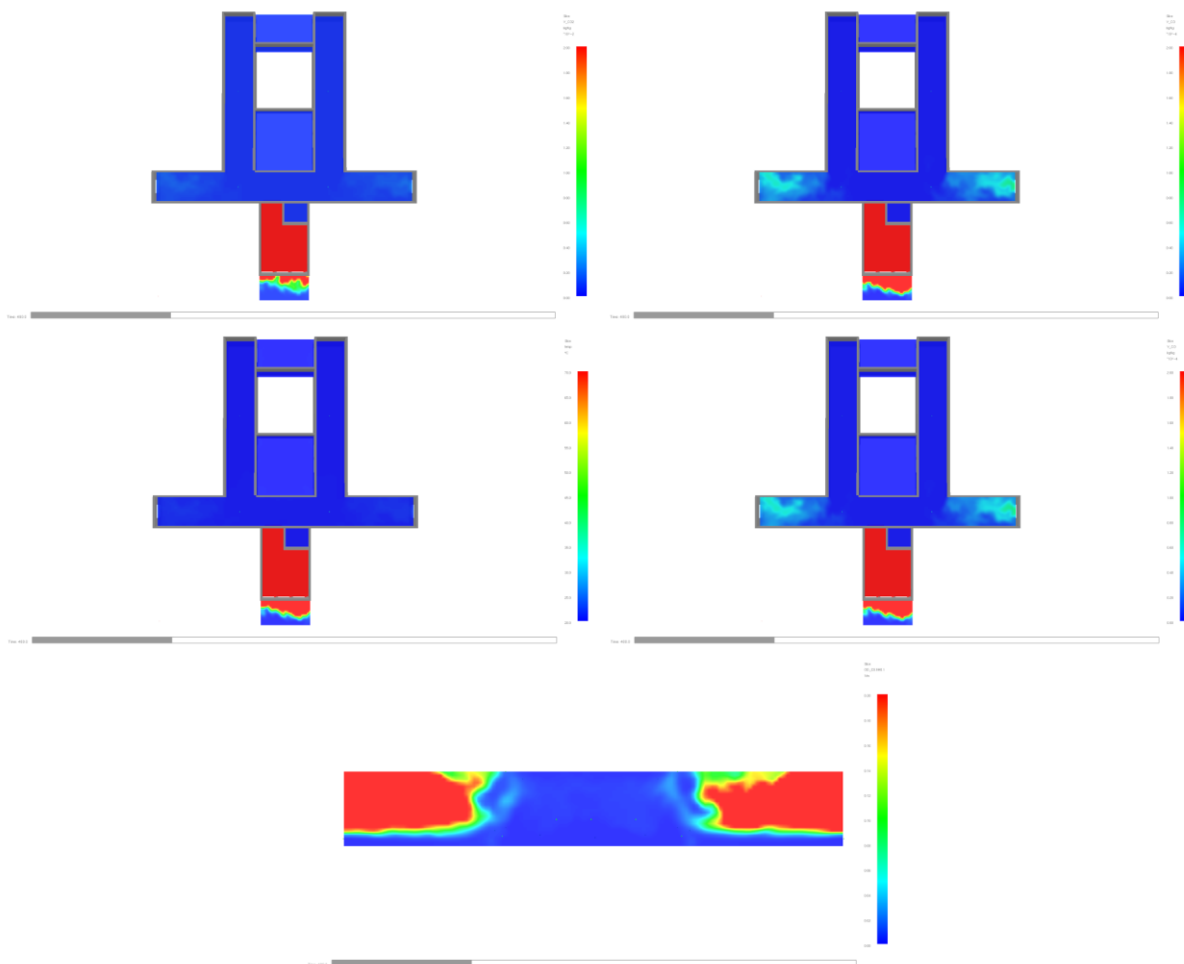


Abbildung 76: CO-Gehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und Sichtweite (links oben nach rechts mitte) nach 480 Sekunden, Höhe 1,80 m, optische Rauchdichte, Flurmitte im Querschnitt

Abbildung 77 (nächste Seite) zeigt das Unterschreiten der Grenzwerte für Sichtweite und Rauchdichte nach 580 Sekunden, also 220 Sekunden nach dem Schließen der Tür und die fast vollständige Rauchfreiheit nach 700 Sekunden. Auffällig ist jedoch, dass sich die Höhe der Rauchschicht kaum ändert. Während die Rauchdichte im Ganzen über die Zeit abnimmt nimmt sie in allen Höhenlagen recht gleichmäßig ab. Danach bleiben bis zum Ende der Simulation alle Grenzwerte eingehalten und der Rettungsweg frei. Die Sichtweite übertrifft weitere 60 Sekunden später auch die 30 m, die als obere Grenze festgelegt waren.

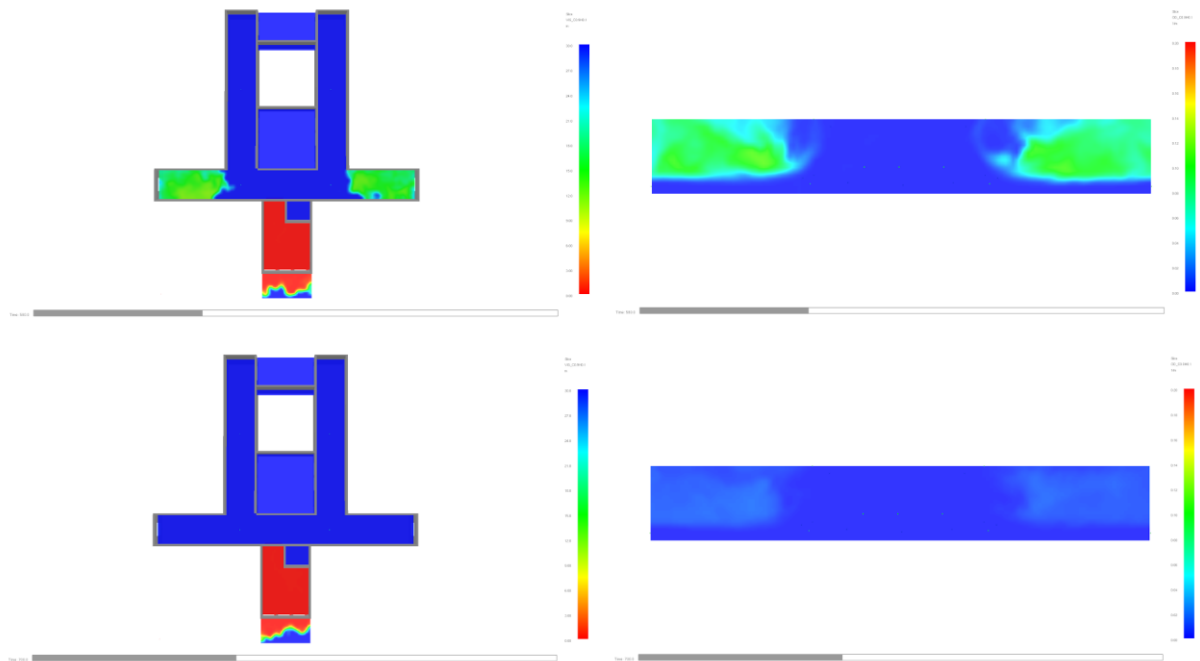


Abbildung 77: Sichtweite (links), Höhe 1,80 m, optische Rauchdichte (rechts), Flurmitte im Querschnitt nach 580 s (oben) und nach 700 s (unten)

In diesem Modell gelingt als einzigem eine vollständige Rauchfreihaltung aller Rettungswege. Weniger als vier Minuten nach dem Schließen der Tür sind alle Grenzwerte im Flur wieder eingehalten. Tatsächlich führt die Entrauchung in Kombination mit dem Schließen der Tür dazu, dass bis auf die zusammenhängenden Schutzziele optische Dichte und Sichtweite kein Grenzwert in größeren Teilen des Flurs überschritten wird. Die Sichtweite unterschreitet den Grenzwert nach 240 Sekunden und bleibt insgesamt für 440 Sekunden unterschritten, bevor für den Rest der Simulationsdauer der Rettungsweg wieder frei ist.

## 5. Diskussion

Bei dem Modell des Realbrandversuch traten einige Probleme auf. Zunächst wurde im Modell die Brandentwicklungsphase nicht berücksichtigt, sondern direkt nach dem Entzünden die Brandausbreitungsphase dargestellt, so dass zu Beginn die Rauch- und Wärmeentwicklung deutlich größer war als im realen Fall.

Im mittleren und späteren Brandverlauf waren die im Modell ermittelten Temperaturen und die gemessenen Temperaturen dann im Brandraum und dem Bereich unmittelbar vor dem Brandraum ausreichend ähnlich.

Im Bereich vor dem OP kam es gerade während der Ventilationsphasen zu großen Unterschieden zwischen den gemessenen und den berechneten Werten. Die Ursache für die großen Unterschiede ist eine Rauchgasdurchzündung, die im realen Brand im Flur auftrat und die Rauchgase im kompletten Flur entzündete, was zu einem kurzzeitigen massiven Temperaturanstieg führte und sich im Modell nicht im Umfang dieser Arbeit darstellen lässt.

Ein weiteres Problem war der Überdruckventilator im OP-Raum. Im Gegensatz zum Realbrandversuch war nach dem Schließen der Rauchschrze der rechte Flurteil hermetisch dicht, weil etwa die offene Austrittsfläche des großen Ventilators und baulich bedingte Undichtigkeiten in den Umfassungsbauteilen nicht modelliert wurden. Dies hätte dazu geführt, dass durch den Luftstrom der Druck in dem Flurteil übermäßig stark angestiegen und die Simulation schließlich abgestürzt wäre.

Zur Lösung dieses Problems wurde der Ventilator im OP-Raum abgeschaltet, während die Rauchschrze geschlossen war. Dies führte dazu, dass der OP-Raum während dieser Zeit verrauchte. Aber nachdem der Ventilator wieder anlief wurde der OP-Raum innerhalb von kurzer Zeit wieder rauchfrei und blieb es dann trotz leicht geöffneter Schiebetür dauerhaft.

Insgesamt bildet das Modell den Realversuch in großen Teilen hinreichend genau ab. Die Beobachtungen von Temperatur- und Rauchentwicklung im Brandraum und unmittelbar davor während der Vollbrandphase konnten im Modell wiedergefunden werden. Nur die Rauchgasdurchzündung, die während der letzten Ventilationsphase eintrat und für einen starken Temperaturanstieg vor dem OP sorgte, konnte im Modell so nicht dargestellt werden.

Das Versuchsergebnis, dass der OP-Raum von dem laufenden Überdruckventilator trotz teilweise geöffneter Schiebetür rauchfrei gehalten werden kann, konnte im Modell ebenfalls erreicht werden.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass es unabhängig von der Form des Flurs ohne Entrauchung bei einer offenen Tür zum Brandraum innerhalb von weniger als zwei Minuten zu einer vollständigen Verrauchung der Rettungswege kommen kann. Wenn der Flur verraucht ist, dann wird er es, ohne Einwirkung von außen, auch für weit über die dargestellte Zeit von einer halben Stunde bleiben, unabhängig davon, ob die Verbindung zur Rauchquelle später unterbrochen wird oder nicht.

In der ersten Flurvariante führt sowohl die Entrauchung nach Bemessungsklasse 3, als auch die nach Bemessungsklasse 4 zu einer Freihaltung der Rettungswege. Bei der Entrauchung nach Bemessungsklasse 3 bildet sich auch die gewünschte Rauchschrze an der Decke und die rauchärmere Schicht darunter, während die stärkere Entrauchung dafür sorgt, dass der Rauch

sich gar nicht erst verteilen kann. Trotzdem ist für die festgelegten Ziele die schwächere Entrauchung in dieser Flurvariante ausreichend, da gezeigt werden konnte, dass ein Großteil des Flurs in einer Höhe von 2,00 m weitestgehend rauchfrei bleibt.

Bei beiden Entrauchungen der ersten Flurvariante besteht noch Optimierungsbedarf, so war die gewählte Zahl der Zuluftöffnungen zu hoch, da versucht wurde nahe an die in der DIN 18232-5 geforderte Nachströmgeschwindigkeit von 1 m/s zu kommen. Ein Wert der sich bei dieser Flurform mit der bemessenen Entrauchung nicht realistisch erreichen lässt. Bei einem Volumenstrom von 17,77 m<sup>3</sup>/s müsste die Zuluftfläche 17,77 m<sup>2</sup> umfassen und soll zusätzlich mindestens einen Meter unter der gewünschten Rauchsicht liegen. Wenn die Zuluftfläche also nur im unteren Drittel der Wand liegen kann, müssten 17,77 m<sup>2</sup> Zuluftfläche auf einer Wandfläche von knapp 62 m<sup>2</sup> verteilt werden und würden etwas über 28 % der unteren Wandfläche einnehmen.

Insgesamt funktioniert die Rauchfreihaltung durch die maschinelle Entrauchung zwar in diesem Modell, aber es mussten hier bereits Abweichungen von den Vorgaben der Normenreihe in Kauf genommen werden. Die von vfdb und der DIN 18232-5 geforderte raucharme Schicht von 2,50 m Höhe lässt sich mit der so geplanten klassischen Entrauchung gar nicht erreichen, hier mussten Abstriche gemacht und die Höhe auf 2,00 m reduziert. Zusätzlich ist die in der DIN geforderten Zuluftgeschwindigkeit bei Geometrien wie diesem schmalen und niedrigen Krankenhausflur nicht zu erreichen.

Bei der Entrauchung der zweiten Flurvariante zeigt sich das interessante Bild, das bei einer offenen Tür der angrenzende Flur trotz Entrauchung, die den gleichen Volumenstrom aufweist wie in der ersten Variante, innerhalb von drei Minuten vollständig verrauchte und sich keine raucharme Schicht bildet. Die anderen beiden Flurabschnitte blieben dafür weitestgehend rauchfrei. Die Abbildung 78 und Abbildung 79 zeigen die Ursache hierfür. Aufgrund der gewählten Zuluftöffnungen bilden sich in Flur Y Wirbel die den Rauch in diesen Bereichen halten während ein großer Teil der Zuluft direkt wieder in die Entlüftung gerät. Diese Wirbel erklären ebenfalls, dass sich im letzten Modell der Rauch in den Stichfluren länger hält und nicht von unten nach oben abnimmt, sondern die Rauchdichte gleichmäßig abnimmt.

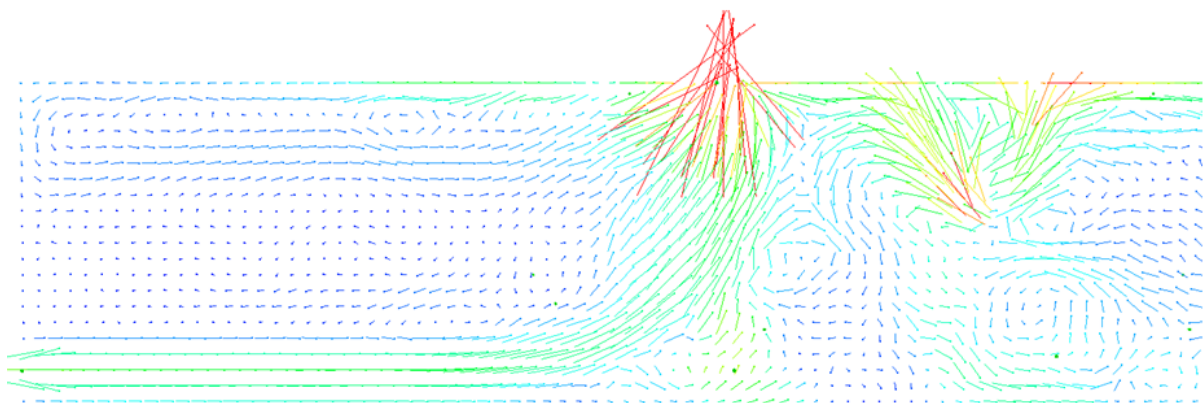


Abbildung 78: Geschwindigkeitsvektoren in der linken Hälfte von Flur Y im Querschnitt



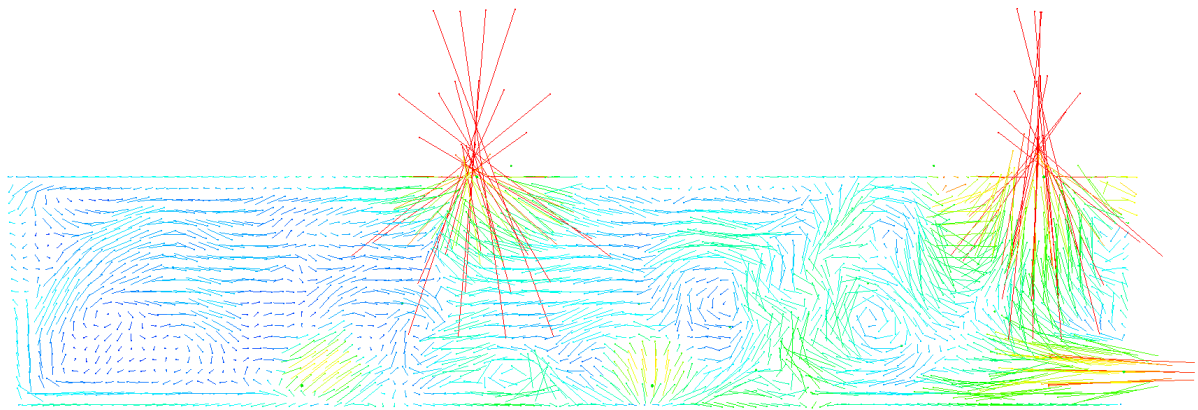


Abbildung 79: Geschwindigkeitsvektoren in Flur X im Querschnitt

In Flur X hingegen bilden sich in der Nähe zum verrauchten Flur Wirbel, die dafür sorgen, dass der Rauch nicht weit in diesen Flur eindringen kann, sondern in der Nähe der Entrauchungsöffnung verbleibt bis er abgesaugt wird.

In der Flurvariante 2 gibt es zwischen der Rauchfreihaltung nach Bemessungsklasse 3 und 4 keinen großen Unterschied, so dass auch hier die geringere Klasse vorzuziehen wäre. Hier zeigt sich gut, dass das eingangs erwähnte „viel hilft viel“ bei Entrauchung nicht immer unbedingt zutrifft. Das Schließen der Tür im letzten Modell in Kombination mit der Entrauchung hat hier eindeutig das beste Ergebnis gebracht, da hier eine vollständige Rauchfreihaltung nach weniger als zehn Minuten erreicht werden konnte.

Optimierungsbedarf haben die Modelle in dieser Flurvariante sicherlich in den Zuluftöffnungen. Es sollte verhindert werden, dass sich die gezeigten Verwirbelungen bilden und somit eine tatsächlich raucharme Schicht erreicht werden, anstelle eines nach weniger als drei Minuten vollständig verrauchten Bereichs und eines weitestgehend rauchfreien Bereichs.

Das Schutzziel der Rauchfreihaltung ist in der zweiten Flurvariante bei offener Tür nicht erreicht worden, da der an den Brandraum angrenzende Flur innerhalb von drei Minuten verraucht war und dann nicht mehr rauchfrei wurde. Es konnte aber gezeigt werden, dass selbst bei nicht optimaler Entrauchung nur durch das Schließen der Tür innerhalb von vier Minuten wieder ein sicherer Rettungsweg erreicht wurde.

Abschließend ist die in dieser Arbeit geplante und untersuchte maschinelle Entrauchung nur mit Einschränkungen als wirksam zu betrachten. Während in der ersten Flurvariante eine raucharme Schicht erreicht werden konnte, gelang dies nur mit Abweichung von den in der Norm gewünschten Werten. In der zweiten Flurvariante wurde gar keine raucharme Schicht erreicht, aber es konnte durch das Schließen der Tür bei gleichzeitiger Entrauchung der Rettungsweg nach anfänglicher Verrauchung wieder rauchfrei werden kann. In dieser Variante müsste zum Beispiel geprüft werden, ob Veränderungen der Zuluft zu deutlich anderen Ergebnissen bei der Rauchfreihaltung führen.

Da diese Arbeit eher die obere Grenze der Volumenströme behandelt hat könnten weitere Untersuchungen zeigen, ob und wie weit der abgeführte Volumenstrom reduziert werden kann ohne das Schutzziel der Rauchfreihaltung zu verletzen.

## Literatur

- [1] Oppermann S, Wirtz S, Schallhorn J, Moecke H: Das Krankenhaus als Notfallort. Notfall & Rettungsmedizin 2003; 6(8):591–5. doi: 10.1007/s10049-003-0608-8.
- [2] Bundesverband technischer Brandschutz e.V. (bvfa): Brände in Krankenhäusern - bvfa-Statistik 2020 [Stand: 18.01.2020]. Verfügbar unter: <https://www.bvfa.de/121/themen/branchen-im-brennpunkt/krankenhaeuser/braende-in-krankenhaeusern/>.
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). DIN 18232-5: Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 5: Maschinelle Rauchabzugsanlagen (MRA); Anforderungen, Bemessung. Berlin: Beuth Verlag GmbH. November 2012.
- [4] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). DIN EN 12101-3: Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 3: Bestimmungen für maschinelle Rauch- und Wärmeabzugsgeräte. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Dezember 2015.
- [5] Wallasch K, Pabst, Hans Joachim, Werner, Ulf-Jürgen, Kornadt O: Ein Beitrag zur Untersuchung der Entrauchung von Krankenhausfluren. Bauphysik 2006; 28(3):210–4.
- [6] Fachverband Tageslicht und Rauchschutz e. V.: FVLR Heft 2. Leitfaden zur Planung und Dimensionierung von natürlichen RWA 2. Verfügbar unter: [https://www.fvlr.de/downloads/FVLR-Hefte/FVLR\\_Heft\\_2.pdf](https://www.fvlr.de/downloads/FVLR-Hefte/FVLR_Heft_2.pdf).
- [7] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). DIN 18232-1: Rauch- und Wärmefreihaltung Teil 1: Begriffe, Aufgabenstellung. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Februar 2002.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN). DIN EN 12101-1: Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 1: Bestimmungen für Rauchschürzen, Änderung A1. Berlin: Beuth Verlag GmbH. März 2006.
- [9] Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau: Grundlagenpapier Entrauchung. Unterstützende Maßnahmen für Selbst- und Fremddrettung, Löschangriff, Sach- und Umweltschutz. Frankfurt am Main. VDMA Allgemeine Lufttechnik; September 2012.
- [10] vfdb: Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes; Technischer Bericht vfdb TB 04-01. Altenberge, Braunschweig; November 2013.
- [11] *Verordnung über bauaufsichtliche Anforderungen an Krankenhäuser und Pflegeheime im Land Brandenburg (BbgKPBauV) in der Fassung vom 21. Februar 2003, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Dezember 2006.*

- [12] *Verordnung über Errichtung und Betrieb von Krankenhäusern, Krankenhausaufnahme, Führung von Krankengeschichten und Pflegedokumentationen und Katastrophenschutz in Krankenhäusern (KhsVO) in der Fassung vom 30. August 2006, zuletzt geändert durch Art. 1 Erste ÄndVo vom 27. März 2017.*
- [13] *Richtlinie über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern (KhBauR) in der Fassung vom 01. März 2003, zuletzt geändert durch Erlass vom 17. Juli 2008.*
- [14] Ministerium für Soziales, Gesundheit, Familie und Gleichstellung des Landes Schleswig-Holstein: Standardprogramm für Krankenhäuser in Schleswig-Holstein. August 2012.
- [15] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg: Hinweise des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg über den baulichen Brandschutz in Krankenhäusern und baulichen Anlagen entsprechender Zweckbestimmung; April 2007.
- [16] Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen der Hansestadt Hamburg: Bauprüfdienst (BPD) 3/2016 Brandschutztechnische Anforderungen an Krankenhäuser (BPD Krankenhäuser). Hamburg; März 2016.
- [17] Behörde für Stadtentwicklung und Wohnen der Hansestadt Hamburg: Bauprüfdienste. Verfügbar unter: <https://www.hamburg.de/baugenehmigung/152950/start-baupruefdienste/>.
- [18] *Muster einer Verordnung über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern (M-KhBauVO) in der Fassung vom Dezember 1976.*
- [19] *Verordnung über den Bau und Betrieb von Krankenhäusern - Krankenhausbauverordnung - (KhBauVO) in der Fassung vom 28. April 2005.*
- [20] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): *Sicheres Krankenhaus - Gesetze, Verordnungen und Regelungen.* Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV)2016 [Stand: 29.01.2020]. Verfügbar unter: <https://pb.sicheres-krankenhaus.de/planungsbuero/bauliche-anforderungen/gesetze-verordnungen-und-regelungen>.
- [21] Riesner F, Klinke M: *Wie räumt man ein Krankenhaus oder besser eine Krankenhausstation.* EIPOS-Tagungsband Brandschutz 2019 2019.
- [22] Leledakis G: *Brand und Notfalleвакуierung im Krankenhaus der Maximalversorgung.* Der Notarzt 2017; 33(03):104–8. doi: 10.1055/s-0042-117786.

- [23] McGrattan K: CFAST 7 Released. FDS-SMV Developer Blog2015 [Stand: 02.02.2020]. Verfügbar unter: <http://fds-smv.blogspot.com/2015/11/cfast-7-released.html>.
- [24] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): Neu- und Umplanung im Krankenhaus unter Gesichtspunkten des Arbeitsschutzes -Basismodul; DGUV Informationen 207-016. Berlin; April 2016.
- [25] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V.: Neu- und Umbauplanung im Krankenhaus unter Gesichtspunkten des Arbeitsschutzes. Anforderungen an Pflegebereiche; DGUV Informationen 207-027. Berlin. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV); Januar 2019. Verfügbar unter: <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/regelwerk-nach-fachbereich/gesundheitsdienst-und-wohlfahrtspflege/>.
- [26] Reintsema J, Hartung C(H): Brandschutz im Krankenhaus - Analyse von Bränden im Krankenhaus und Empfehlungen zur Risikominimierung für Patienten und Personal, 1. Auflage. Wegscheid: WIKOM GmbH2002.
- [27] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI). VDI 6019 Blatt 1: Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden - Brandverläufe, Überprüfung der Wirksamkeit. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Mai 2006.
- [28] AGBF Bund: Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten Fortschreibung vom 19. November 2015.

## Anhang

### FDS-Eingaben Realbrandversuch

```
&HEAD      CHID='Realbrandversuch Modell_1',
           TITLE='Realbrandversuch Krankenhausflur' /
&TIME      T_END = 2400. /
&DUMP      PLOT3D_QUANTITY(1:2)='TEMPERATURE', 'VELOCITY',
           WRITE_XYZ=.TRUE., STATUS_FILES=.TRUE., MASS_FILE=.TRUE.,
           DT_RESTART=30, NFRAMES=2400/
&DEVC      ID = 'Timer', XYZ = 1.5,7.95,1.00, QUANTITY = 'TIME' /
&MESH      XB=0.0,14.1,0.0,9.15,0.0,2.7, IJK=94,61,18 /
```

### Brand

```
&REAC      FUEL = 'Holzpalette', SOOT_YIELD = 0.028,
           CO_YIELD = 0.004, HEAT_OF_COMBUSTION = 16000,
           C = 12.0, H= 20.0, O = 10.0 /
&SURF      ID = 'FEUER', HRRPUA = 435.57,
           RAMP_Q = 'Feuerausbreitung', COLOR = 'RED' /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 0.0, F = 0.00 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 60.0, F = 0.035 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 120.0, F = 0.140 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 180.0, F = 0.315 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 240.0, F = 0.559 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 300.0, F = 0.874 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 320.0, F = 0.994 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 321.0, F = 1. /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 2700.0, F = 1. /
&VENT      XB = 1.65,3.90,1.65,6.60,0.00,0.00, SURF_ID = 'FEUER' /
```

### Geometrie Realbrandversuch

```
***Boden***
&OBST      XB=0.0,14.1,0.0,9.15,0.0,0.0, PERMIT_HOLE =.FALSE,
           COLOR = GRAY /
***Wände***
&MATL      ID='GLASS', CONDUCTIVITY=0.78, SPECIFIC_HEAT=0.84,
           DENSITY=2700/
&MATL      ID='WOOD', CONDUCTIVITY=0.22, SPECIFIC_HEAT=1.76,
           DENSITY=400/
&MATL      ID='Gipskarton', CONDUCTIVITY=0.25, SPECIFIC_HEAT=0.96,
           DENSITY=650/
&SURF      ID = 'GLASS', MATL_ID = 'GLASS', THICKNESS = 0.03,
           COLOR = 'SKY BLUE', TRANSPARENCY = 0.3 /
&SURF      ID = 'WOOD', MATL_ID = 'WOOD', THICKNESS = 0.05,
           COLOR = 'SIENNA' /
&SURF      ID = 'Brandwand', MATL_ID = 'Gipskarton',
           THICKNESS = 0.15, COLOR = 'DIM GRAY' /
&SURF      ID = 'Gipswand', MATL_ID = 'Gipskarton',
           THICKNESS = 0.09, COLOR = 'GRAY' /
&SURF      ID = 'Verschluss', MATL_ID = 'Gipskarton',
           THICKNESS = 0.015, COLOR = 'GRAY' /
```

```

*Nordwand Flur*
&OBST      XB = 1.50,13.95,9.0,9.15,0.0,2.4, SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 2.85,3.75,9.0,9.15,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&OBST      XB = 7.5,8.4,9.0,9.15,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&OBST      XB = 11.4,12.3,9.0,9.15,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&HOLE      XB = 2.85,3.75,8.99,9.16,1.05,1.95 /
&HOLE      XB = 7.5,8.4,8.99,9.16,1.05,1.95 /
&HOLE      XB = 11.4,12.3,8.99,9.16,1.05,1.95 /

*Südwand Flur*
&OBST      XB = 1.50,4.05,6.6,6.75,0.0,2.4, SURF_ID = 'Brandwand'/
&OBST      XB = 4.05,13.95,6.6,6.75,0.0,2.4, SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 5.25,6.15,6.6,6.75,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&OBST      XB = 11.55,12.6,6.6,6.75,0.0,2.10, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'WOOD' /
&HOLE      XB = 2.55,3.60,6.59,6.76,0.0,1.95 /
&HOLE      XB = 5.25,6.15,6.59,6.76,1.05,1.95 /
&HOLE      XB = 11.4,12.6,6.59,6.76,0.0,2.10 /
&HOLE      XB = 6.9,8.85,6.59,6.76,1.1,2.4 /
&HOLE      XB = 7.95,8.85,6.59,6.76,0.00,1.1 /

*Südwand Brandraum*
&OBST      XB = 1.50,3.9,1.5,1.65,0.00,2.4, SURF_ID = 'Brandwand'/
&OBST      XB = 2.1,3.3,1.5,1.65,1.05,1.65, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'Verschluss', CTRL_ID='Fenster' /
&HOLE      XB = 2.1,3.3,1.49,1.66,1.05,1.65 /
&CTRL      ID = 'Fenster', FUNCTION_TYPE = 'CUSTOM',
INPUT_ID = 'Timer', RAMP_ID = 'Cycle_F',
INITIAL_STATE = .FALSE /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 0., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 1289., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 1291., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 1579., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 1581., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_F', T = 2400., F = -1 /

*Südwand OP/Schwesternzimmer*
&OBST      XB = 6.75,12.75,3.75,3.9,0.0,2.4, SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 11.4,12.3,3.75,3.9,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&OBST      XB = 7.5,8.4,3.75,3.9,1.05,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'GLASS' /
&OBST      XB = 9.4,10.4,3.75,3.9,0.0,2.10, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'WOOD' /
&HOLE      XB = 11.4,12.3,3.74,3.91,1.05,1.95 /
&HOLE      XB = 9.4,10.4,3.74,3.91,0.0,2.10 /
&HOLE      XB = 7.5,8.4,3.74,3.91,1.05,1.95 /

*Westwand Flur/Brandraum*
&OBST      XB = 1.5,1.65,1.5,6.60,0.00,2.4, SURF_ID = 'Brandwand'/
&OBST      XB = 1.5,1.65,6.75,9.15,0.0,2.4, SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 1.5,1.65,7.35,8.4,0.0,1.95, PERMIT_HOLE = .FALSE,
SURF_ID = 'WOOD', CTRL_ID='Tuer' /
&HOLE      XB = 1.49,1.66,7.35,8.4,0.0,1.95 / Tür Flur

```

```

&CTRL      ID = 'Tuer', FUNCTION_TYPE = 'CUSTOM',
           INPUT_ID = 'Timer', RAMP_ID = 'Cycle_T',
           INITIAL_STATE = .FALSE/
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 0., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 659., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 661., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1019., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1021., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1579., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1581., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1709., F = 1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 1711., F = -1 /
&RAMP      ID = 'Cycle_T', T = 2400., F = -1 /

*Ostwände*
&OBST      XB = 3.90,4.05,1.50,6.60,0.00,2.40,
           SURF_ID = 'Brandwand'/
&OBST      XB = 13.95,14.10,6.60,9.15,0.00,2.40,
           SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 12.60,12.75,3.90,6.6,0.00,2.40,
           SURF_ID = 'Gipswand'/

*Westwand Schwesternzimmer / OP*
&OBST      XB = 6.75,6.9,3.90,6.60,0.00,2.40, SURF_ID = 'Gipswand'/
&OBST      XB = 8.85,9.00,3.90,6.60,0.00,2.40, SURF_ID = 'Gipswand'/

*Prallwand Ventilator*
&OBST      XB = 13.50,13.50,6.75,9.00,0.90,2.10, COLOR = 'SILVER' /
&OBST      XB = 13.50,13.95,6.75,9.00,0.90,0.90, COLOR = 'SILVER' /

***Decke***
&OBST      XB=1.5,4.05,1.5,6.6,2.4,2.55, SURF_ID = 'Brandwand',
           COLOR = 'INVISIBLE'/
&OBST      XB=1.5,14.1,6.6,9.15,2.4,2.55, SURF_ID = 'Gipswand',
           COLOR = 'INVISIBLE'/
&OBST      XB = 6.60,12.75,3.75,6.6,2.4,2.55, SURF_ID = 'Gipswand',
           COLOR = 'INVISIBLE'/

***Inerte Blöcke ***
&OBST      XB = 4.05,6.75,0.0,6.6,0.0,2.7, COLOR = 'INVISIBLE',
           SURF_ID = 'INERT' /
&OBST      XB =6.75,14.1,0.0,3.75,0.0,2.7,COLOR = 'INVISIBLE',
           SURF_ID = 'INERT' /

***Ventilation***
&SURF      ID='Ventilator_groß', VOLUME_FLOW = 16.666,
           RAMP_V='Vent_Schaltung' /
&VENT      XB = 13.95,13.95,7.2,8.4,1.05,2.25,
           SURF_ID='Ventilator_groß', COLOR = 'MAGENTA' /
&DEVC      XB = 13.95,13.95,7.2,8.4,1.05,2.25, ID = 'Ventilation',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T= 0.0, F=0.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung',T=1105.0, F=0.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1135.0, F=0.33 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1350.0, F=0.33 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1380.0, F=1.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1500.0, F=1.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1530.0, F=0.33 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1580.0, F=0.33 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1610.0, F=1.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1710.0, F=1.0 /
&RAMP      ID='Vent_Schaltung', T=1740.0, F=0.0 /

```

```

&SURF      ID='Ventilator_klein', VOLUME_FLOW =-0.972 /
&VENT      XB = 10.65,10.95,5.10,5.40,2.4,2.4,
            SURF_ID='Ventilator_klein', COLOR = 'GREEN' /
***Mesh-Grenzen***
&VENT      MB= 'YMIN', SURF_ID = 'OPEN' /
&VENT      MB = 'XMIN', SURF_ID = 'OPEN' /
&VENT      MB = 'ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

```

## Dokumentation

```

&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE /

&TAIL /

```

## FDS-Eingaben Modellflure

### Brand

```

&REAC      FUEL='KUNSTSTOFF', SOOT_YIELD=0.164, CO_YIELD = 0.060,
            C = 10, H= 22 , N = 2, O = 4, HEAT_OF_COMBUSTION = 19200/
&SURF      ID='FEUER', HRRPUA = 250.0, RAMP_Q = 'Feuerausbreitung',
            COLOR = 'RED' /

&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 0.0, F = 0.00 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 60.0, F = 0.010 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 120.0, F = 0.042 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 180.0, F = 0.094 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 240.0, F = 0.168 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 300.0, F = 0.264 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 360.0, F = 0.379 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 420.0, F = 0.517 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 480.0, F = 0.675 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 540.0, F = 0.854 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 584.0, F = 1.00 /
&RAMP      ID = 'Feuerausbreitung', T = 1800.0, F = 1.00 /

***Flurvariante 1***
&VENT      XB= 13.35,16.95,2.15,6.00,0,0, SURF_ID='FEUER' /
&VENT      XB= 13.35,15.00,6.00,7.65,0,0, SURF_ID='FEUER' /

***Flurvariante2***
&VENT      XB= 8.40,12.00,2.15,6.00,0,0, SURF_ID='FEUER' /
&VENT      XB= 8.40,10.05,6.00,7.65,0,0, SURF_ID='FEUER' /

```

### Geometrie Flurvariante1

```

***Boden***
&OBST      XB = 0.00,30.30,7.65,10.20,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
            PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 13.20,17.10,2.10,7.65,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
            PERMIT_HOLE = .FALSE./

***Wände***
&MATL      ID='BETON', CONDUCTIVITY=1.1, SPECIFIC_HEAT=0.88,
            DENSITY=2500/

```



```

&MATL      ID='GLASS', CONDUCTIVITY=0.78, SPECIFIC_HEAT=0.84,
           DENSITY=2700/
&SURF      ID = 'BETON', MATL_ID = 'BETON', THICKNESS = 0.15,
           COLOR = 'GRAY' /
&SURF      ID = 'GLASS', MATL_ID = 'GLASS', THICKNESS = 0.05,
           COLOR = 'SKY BLUE', TRANSPARENCY = 0.3 /
&OBST      XB = 0.00,30.30,7.65,7.80,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&HOLE      XB = 13.50,14.85,7.64,7.81,0.00,2.10, COLOR = 'BROWN',
           DEVC_ID='Tueroeffnung'/
&DEVC      XYZ = 0,0,0, ID='Tueroeffnung', SETPOINT = 60.,
           QUANTITY = 'TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /
&OBST      XB = 0.00,30.30,10.05,10.20,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON'/
&OBST      XB = 13.20,17.10,2.10,2.25,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 13.35,14.40,2.10,2.25,0.50,2.00, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch1'/
&OBST      XB = 15.75,16.80,2.10,2.25,0.50,2.00, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch2'/
&DEVC      XYZ = 13.95,2.25,1.20, ID='Fensterbruch1',
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&DEVC      XYZ = 16.35,2.25,1.20, ID='Fensterbruch2',
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&HOLE      XB = 13.35,14.40,2.09,2.26,0.50,2.00 /
&HOLE      XB = 14.55,15.60,2.09,2.26,0.50,2.00 /
&HOLE      XB = 15.75,16.80,2.09,2.26,0.50,2.00 /
&OBST      XB = 0.00,0.15,7.80,10.05,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 0.00,0.05,7.95,9.90,0.00,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE./
&HOLE      XB = -0.01,0.16,7.95,9.90,0.00,2.10 /
&OBST      XB = 15.15,16.95,6.00,6.15,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 30.15,30.30,7.80,10.05,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 30.15,30.20,8.40,9.45,0.50,2.00, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch_Flur' /
&DEVC      XYZ = 30.15,9.00,1.20, ID='Fensterbruch_Flur',
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&HOLE      XB = 30.14,30.31,8.40,9.45,0.50,2.00 /
&OBST      XB = 13.20,13.35,2.25,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 16.95,17.10,2.25,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 15.00,15.15,6.00,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
***Decke***
&OBST      XB = 0.00,30.30,7.65,10.20,3.00,3.15, SURF_ID = 'BETON',
           COLOR = 'INVISIBLE' /
&OBST      XB = 13.20,17.10,2.10,7.65,3.00,3.15, SURF_ID = 'BETON',
           COLOR = 'INVISIBLE' /
***Inerte Blöcke***
&OBST      XB = 0.00,13.20,0.00,7.65,0.00,3.15, SURF_ID = 'INERT',
           COLOR = 'INVISIBLE' /
&OBST      XB = 17.10,30.30,0.00,7.65,0.00,3.15, SURF_ID = 'INERT',
           COLOR = 'INVISIBLE' /

```

## Geometrie Flurvariante 2

```
***Boden***
&OBST      XB = 0.00,20.40,7.65,10.20,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
           PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 8.25,12.15,2.10,7.65,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
           PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 5.40,7.95,10.20,22.50,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
           PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 12.45,15.00,10.20,22.50,0.00,0.00, COLOR = 'GRAY',
           PERMIT_HOLE = .FALSE./
***Wände***
&MATL      ID='BETON', CONDUCTIVITY=1.1, SPECIFIC_HEAT=0.88,
           DENSITY=2500/
&MATL      ID='GLASS', CONDUCTIVITY=0.78, SPECIFIC_HEAT=0.84,
           DENSITY=2700/
&SURF      ID = 'BETON', MATL_ID = 'BETON', THICKNESS = 0.15,
           COLOR = 'GRAY' /
&SURF      ID = 'GLASS', MATL_ID = 'GLASS', THICKNESS = 0.05,
           COLOR = 'SKY BLUE', TRANSPARENCY = 0.3 /
***in x-z-Ebene***
&OBST      XB = 0.00,20.40,7.65,7.80,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&HOLE      XB = 8.55,9.90,7.64,7.81,0.00,2.10, COLOR = 'BROWN',
           DEVC_ID='Tueroeffnung'/
&DEVC      ID='Tueroeffnung', XYZ = 0,0,0, SETPOINT = 60.,
           QUANTITY = 'TIME', INITIAL_STATE=.FALSE. /
&OBST      XB = 0.00,5.55,10.05,10.20,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 14.85,22.40,10.05,10.20,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 5.40,7.95,22.35,22.50,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 12.45,15.00,22.35,22.50,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 7.95,12.45,19.95,20.10,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 7.95,12.45,14.85,15.00,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 10.20,12.00,6.00,6.15,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 8.25,12.15,2.10,2.25,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 8.40,9.45,2.10,2.25,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch_Pat_1'/
&OBST      XB = 9.60,10.65,2.10,2.25,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch_Pat_2'/
&OBST      XB = 10.80,11.85,2.10,2.25,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
           PERMIT_HOLE = .FALSE., DEVC_ID='Fensterbruch_Pat_3'/
&DEVC      ID='Fensterbruch_Pat_1', XYZ = 9.00,2.25,1.20,
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&DEVC      ID='Fensterbruch_Pat_2', XYZ = 10.05,2.25,1.20,
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&DEVC      ID='Fensterbruch_Pat_3', XYZ = 11.40,2.25,1.20,
           SETPOINT = 450., QUANTITY = 'TEMPERATURE',
           INITIAL_STATE=.TRUE. /
&HOLE      XB = 8.40,9.45,2.10,2.25,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 9.60,10.65,2.10,2.25,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 10.80,11.85,2.10,2.25,0.60,2.10 /
```

```

&OBST      XB = 7.80,12.60,10.05,10.20,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 8.55,9.60,10.05,10.20,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 9.75,10.80,10.05,10.20,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE./
&OBST      XB = 10.95,12.00,10.05,10.20,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE./
&HOLE      XB = 8.55,9.60,10.05,10.20,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 9.75,10.80,10.05,10.20,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 10.95,12.00,10.05,10.20,0.60,2.10 /
***in y-z-Ebene***
&OBST      XB = 0.00,0.15,7.80,10.05,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 20.25,20.40,7.80,10.05,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 0.00,0.15,8.40,9.45,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 20.25,20.40,8.40,9.45,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&HOLE      XB = -0.01,0.16,8.40,9.45,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 20.24,20.41,8.40,9.45,0.60,2.10 /
&OBST      XB = 8.25,8.40,2.25,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 12.00,12.15,2.25,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 10.05,10.20,6.00,7.65,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 5.40,5.55,10.20,22.35,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 7.80,7.95,10.20,22.35,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 7.80,7.95,20.25,22.20,0.00,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 7.80,7.95,10.80,11.85,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 7.80,7.95,12.00,13.05,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 7.80,7.95,13.20,14.25,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&HOLE      XB = 7.79,7.96,20.25,22.20,0.00,2.10 /
&HOLE      XB = 7.79,7.96,10.80,11.85,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 7.79,7.96,12.00,13.05,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 7.79,7.96,13.20,14.25,0.60,2.10 /
&OBST      XB = 12.45,12.60,10.20,22.35,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /
&OBST      XB = 12.45,12.60,20.25,22.20,0.00,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 12.45,12.60,10.80,11.85,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 12.45,12.60,12.00,13.05,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&OBST      XB = 12.45,12.60,13.20,14.25,0.60,2.10, SURF_ID = 'GLASS',
PERMIT_HOLE = .FALSE. /
&HOLE      XB = 12.44,12.61,20.25,22.20,0.00,2.10 /
&HOLE      XB = 12.44,12.61,10.80,11.85,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 12.44,12.61,12.00,13.05,0.60,2.10 /
&HOLE      XB = 12.44,12.61,13.20,14.25,0.60,2.10 /
&OBST      XB = 14.85,15.00,10.20,22.35,0.00,3.00, SURF_ID = 'BETON' /

```

**\*\*\*Decke\*\*\***

&OBST XB = 0.00,20.40,7.65,10.20,3.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 8.25,12.15,2.10,7.65,3.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 5.40,7.95,10.20,22.50,3.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 12.45,15.00,10.20,22.50,3.00,3.15,COLOR='INVISIBLE'/

**\*\*\* Inerte Blöcke\*\*\***

&OBST XB = 0.00,8.25,0.00,7.65,0.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 12.15,20.40,0.00,7.65,0.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 0.00,5.40,10.20,22.50,0.00,3.15, COLOR = 'INVISIBLE'/  
&OBST XB = 15.00,20.40,10.20,22.50,0.00,3.15,COLOR='INVISIBLE'/  
&OBST XB = 7.95,12.45,15.00,19.45,0.00,3.00,COLOR = 'INVISIBLE'/

### Lüftung Flurvariante 1 BMK 3

**\*\*\*Abluft\*\*\***

&SURF ID = 'Abluft', COLOR = 'GREEN', VOLUME\_FLOW = 4.444,  
RAMP\_V='Abluft\_Start' /  
&RAMP ID = 'Abluft\_Start', T= 0.0, F= 0.0 /  
&RAMP ID = 'Abluft\_Start', T= 60.0, F= 0.0 /  
&RAMP ID = 'Abluft\_Start', T= 90.0, F= 1.0 /  
&VENT XB =5.55,6.30,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF\_ID = 'Abluft',  
IOR=-3 /  
&DEVC XB =5.55,6.30,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft1',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =11.70,12.45,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF\_ID = 'Abluft',  
IOR=-3 /  
&DEVC XB =11.70,12.45,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft2',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =17.85,18.60,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF\_ID = 'Abluft',  
IOR =-3 /  
&DEVC XB =17.85,18.60,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft3',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =24.00,24.75,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF\_ID = 'Abluft',  
IOR=-3 /  
&DEVC XB =24.00,24.75,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft4',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /

**\*\*\*Zuluft\*\*\***

&SURF ID = 'Zuluft', COLOR = 'MAGENTA', VOLUME\_FLOW = -1.111,  
RAMP\_V='Zuluft\_Start' /  
&RAMP ID = 'Zuluft\_Start', T = 0.0, F = 0.0 /  
&RAMP ID = 'Zuluft\_Start', T = 60.0, F = 0.0 /  
&RAMP ID = 'Zuluft\_Start', T = 90.0, F = 1.0 /  
&VENT XB =1.20,2.10,7.80,7.80,0.15,0.75, SURF\_ID = 'Zuluft',  
IOR=2 /  
&DEVC XB =1.20,2.10,7.80,7.80,0.15,0.75, ID = 'Zuluft\_Sued1',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =4.20,5.10,7.80,7.80,0.15,0.75, SURF\_ID = 'Zuluft',  
IOR=2 /  
&DEVC XB =4.20,5.10,7.80,7.80,0.15,0.75, ID = 'Zuluft\_Sued2',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =8.10,9.00,7.80,7.80,0.15,0.75, SURF\_ID = 'Zuluft',  
IOR=2/  
&DEVC XB =8.10,9.00,7.80,7.80,0.15,0.75, ID = 'Zuluft\_Sued3',  
QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /  
&VENT XB =12.00,12.90,7.80,7.80,0.15,0.75, SURF\_ID = 'Zuluft',  
IOR=2 /

```

&DEVC      XB =12.00,12.90,7.80,7.80,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Sued4', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =16.95,17.85,7.80,7.80,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=2 /
&DEVC      XB =16.95,17.85,7.80,7.80,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Sued5', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =19.80,20.70,7.80,7.80,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=2 /
&DEVC      XB =19.80,20.70,7.80,7.80,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Sued6', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =23.70,24.60,7.80,7.80,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft' , IOR=2/
&DEVC      XB =23.70,24.60,7.80,7.80,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Sued7', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =27.60,28.50,7.80,7.80,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft' , IOR=2/
&DEVC      XB =27.60,28.50,7.80,7.80,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Sued8', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =0.30,1.20,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=-2 /
&DEVC      XB =0.30,1.20,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord1', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =4.20,5.10,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft' , IOR=-2/
&DEVC      XB =4.20,5.10,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord2', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =8.10,9.00,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=-2 /
&DEVC      XB =8.10,9.00,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord3', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =12.00,12.90,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft' , IOR=-2/
&DEVC      XB =12.00,12.90,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord4', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =15.90,16.80,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft' , IOR=-2/
&DEVC      XB =15.90,16.80,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord5', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =19.80,20.70,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=-2 /
&DEVC      XB =19.80,20.70,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord6', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =23.70,24.60,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=-2/
&DEVC      XB =23.70,24.60,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord7', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =27.60,28.50,10.05,10.05,0.15,0.75,
            SURF_ID = 'Zuluft', IOR=-2/
&DEVC      XB =27.60,28.50,10.05,10.05,0.15,0.75,
            ID = 'Zuluft_Nord8', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
***Leckage Flurfenster***
&SURF      ID = 'Fenster_Leck', COLOR = 'SKY BLUE' /
&VENT      XB = 30.15,30.15,8.40,9.45,2.00,2.01,
            SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Vent Fenster_I' /
&VENT      XB = 30.30,30.30,8.40,9.45,2.00,2.01,
            SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Vent Fenster_A' /

```

```

&HVAC      ID = 'LEAK_Fenster',TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID = 'Vent Fenster_I',VENT2_ID='Vent Fenster_A',
           AREA =0.0105 /

```

## Lüftung Flurvariante 2 BMK 4

### \*\*\*Abluft\*\*\*

```

&SURF      ID = 'Abluft', COLOR = 'GREEN', VOLUME_FLOW = 4.444,
           RAMP_V='Abluft_Start' /
&RAMP      ID = 'Abluft_Start', T= 0.0, F= 0.0 /
&RAMP      ID = 'Abluft_Start', T= 60.0, F= 0.0 /
&RAMP      ID = 'Abluft_Start', T= 90.0, F= 1.0 /
&VENT      XB = 3.60,4.35,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF_ID = 'Abluft',
           IOR = -3 /
&DEVC      XB = 3.60,4.35,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft1',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 9.75,10.50,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF_ID = 'Abluft',
           IOR = -3 /
&DEVC      XB = 9.75,10.50,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft2',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 15.90,16.65,8.55,9.30,3.00,3.00, SURF_ID = 'Abluft' /
&DEVC      XB = 15.90,16.65,8.55,9.30,3.00,3.00, ID = 'Abluft3',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 6.30,7.05,13.65,14.40,3.00,3.00, SURF_ID = 'Abluft',
           IOR = -3 /
&DEVC      XB = 6.30,7.05,13.65,14.40,3.00,3.00, ID = 'Abluft4',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 6.30,7.05,18.00,18.75,3.00,3.00, SURF_ID = 'Abluft',
           IOR = -3 /
&DEVC      XB = 6.30,7.05,18.00,18.75,3.00,3.00, ID = 'Abluft5',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 13.20,13.95,13.65,14.40,3.00,3.00,
           SURF_ID = 'Abluft', IOR = -3 /
&DEVC      XB = 13.20,13.95,13.65,14.40,3.00,3.00, ID = 'Abluft6',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 13.20,13.95,18.00,18.75,3.00,3.00,
           SURF_ID = 'Abluft', IOR = -3 /
&DEVC      XB = 13.20,13.95,18.00,18.75,3.00,3.00, ID = 'Abluft7',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /

```

### \*\*\*Zuluft\*\*\*

```

&SURF      ID = 'Zuluft', COLOR = 'MAGENTA', VOLUME_FLOW = -2.828,
           RAMP_V='Zuluft_Start' /
&RAMP      ID = 'Zuluft_Start', T = 0.0, F = 0.0 /
&RAMP      ID = 'Zuluft_Start', T = 60.0, F = 0.0 /
&RAMP      ID = 'Zuluft_Start', T = 90.0, F = 1.0 /
&VENT      XB = 0.15,0.15,7.95,9.90,0.15,0.45,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= 1 /
&DEVC      XB = 0.15,0.15,7.95,9.90,0.15,0.45, ID = 'Zuluft_Sued1',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 20.25,20.25,7.95,9.90,0.15,0.45,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= -1 /
&DEVC      XB = 20.25,20.25,7.95,9.90,0.15,0.45,
           ID = 'Zuluft_Sued2',
           QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 8.55,12.00,10.05,10.05,0.15,0.45,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= -2 /

```

```

&DEVC      XB = 8.55,12.00,10.05,10.05,0.15,0.45,
           ID = 'Zuluft_Sued3', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB = 6.30,7.05,7.80,7.80,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft' , IOR= 2 /
&DEVC      XB = 6.30,7.05,7.80,7.80,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_Sued4', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =13.20,13.95,7.80,7.80,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft' , IOR= 2 /
&DEVC      XB =13.20,13.95,7.80,7.80,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_Sued5', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =7.80,7.80,10.80,14.25,0.15,0.45,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= -1/
&DEVC      XB =7.80,7.80,10.80,14.25,0.15,0.45,
           ID = 'Zuluft_West1', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =5.55,5.55,13.65,14.40,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= 1 /
&DEVC      XB =5.55,5.55,13.65,14.40,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_West2', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =5.55,5.55,18.00,18.75,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft', IOR= 1 /
&DEVC      XB =5.55,5.55,18.00,18.75,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_West3', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =12.60,12.60,10.80,14.25,0.15,0.45,
           SURF_ID = 'Zuluft' , IOR= 1 /
&DEVC      XB =12.60,12.60,10.80,14.25,0.15,0.45,
           ID = 'Zuluft_Ost1', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =14.85,14.85,13.65,14.40,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft' , IOR= -1/
&DEVC      XB =14.85,14.85,13.65,14.40,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_Ost2', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
&VENT      XB =14.85,14.85,18.00,18.75,0.15,0.75,
           SURF_ID = 'Zuluft' , IOR= -1/
&DEVC      XB =14.85,14.85,18.00,18.75,0.15,0.75,
           ID = 'Zuluft_Ost3', QUANTITY = 'VOLUME FLOW' /
***Leckage***
&SURF      ID = 'Fenster_Leck', COLOR = 'SKY BLUE' /
&VENT      XB = 20.25,20.25,8.40,9.45,2.10,2.12,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_I1'/
&VENT      XB = 20.40,20.40,8.40,9.45,2.11,2.12,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_A1'/
&HVAC      ID ='LEAK_Fenster_1', TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID='Leckage_I1',VENT2_ID='Leckage_A1',AREA=0.0105/
&VENT      XB = 0.15,0.15,8.40,9.45,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_I2' /
&VENT      XB = 0.00,0.00,8.40,9.45,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_A2' /
&HVAC      ID ='LEAK_Fenster_2', TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID='Leckage_I2',VENT2_ID = 'Leckage_A2',AREA=0.0105/
&VENT      XB = 8.55,12.00,10.05,10.05,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_I3' /
&VENT      XB = 8.55,12.00,10.20,10.20,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_A3' /
&HVAC      ID ='LEAK_Fenster_3', TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID='Leckage_I3',VENT2_ID='Leckage_A3',AREA=0.0315/

```

```

&VENT      XB = 7.80,7.80,10.80,14.25,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_I4' /
&VENT      XB = 7.95,7.95,10.80,14.25,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_A4' /
&HVAC      ID = 'LEAK_Fenster_4', TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID='Leckage_I4', VENT2_ID='Leckage_A4', AREA=0.0315/
&VENT      XB = 12.60,12.60,8.40,9.45,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_I5' /
&VENT      XB = 12.45,12.45,8.40,9.45,2.10,2.11,
           SURF_ID = 'Fenster_Leck', ID = 'Leckage_A5' /
&HVAC      ID = 'LEAK_Fenster_5', TYPE_ID = 'LEAK',
           VENT_ID='Leckage_I5', VENT2_ID='Leckage_A5', AREA=0.0315/

```

## Dokumentation

```

&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON DIOXIDE' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' /
&SLCF      PBZ=1.80, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON DIOXIDE' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' /
&SLCF      PBZ=1.95, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'TEMPERATURE' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'VISIBILITY' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON DIOXIDE' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'MASS FRACTION',
           SPEC_ID = 'CARBON MONOXIDE' /
&SLCF      PBZ=2.10, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
***Flurvariante 1***
&SLCF      PBZ=8.925, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
***Flurvariante 2***
&SLCF      PBZ=8.925, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
&SLCF      PBZ=6.675, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /
&SLCF      PBZ=13.725, QUANTITY = 'OPTICAL DENSITY' /

```



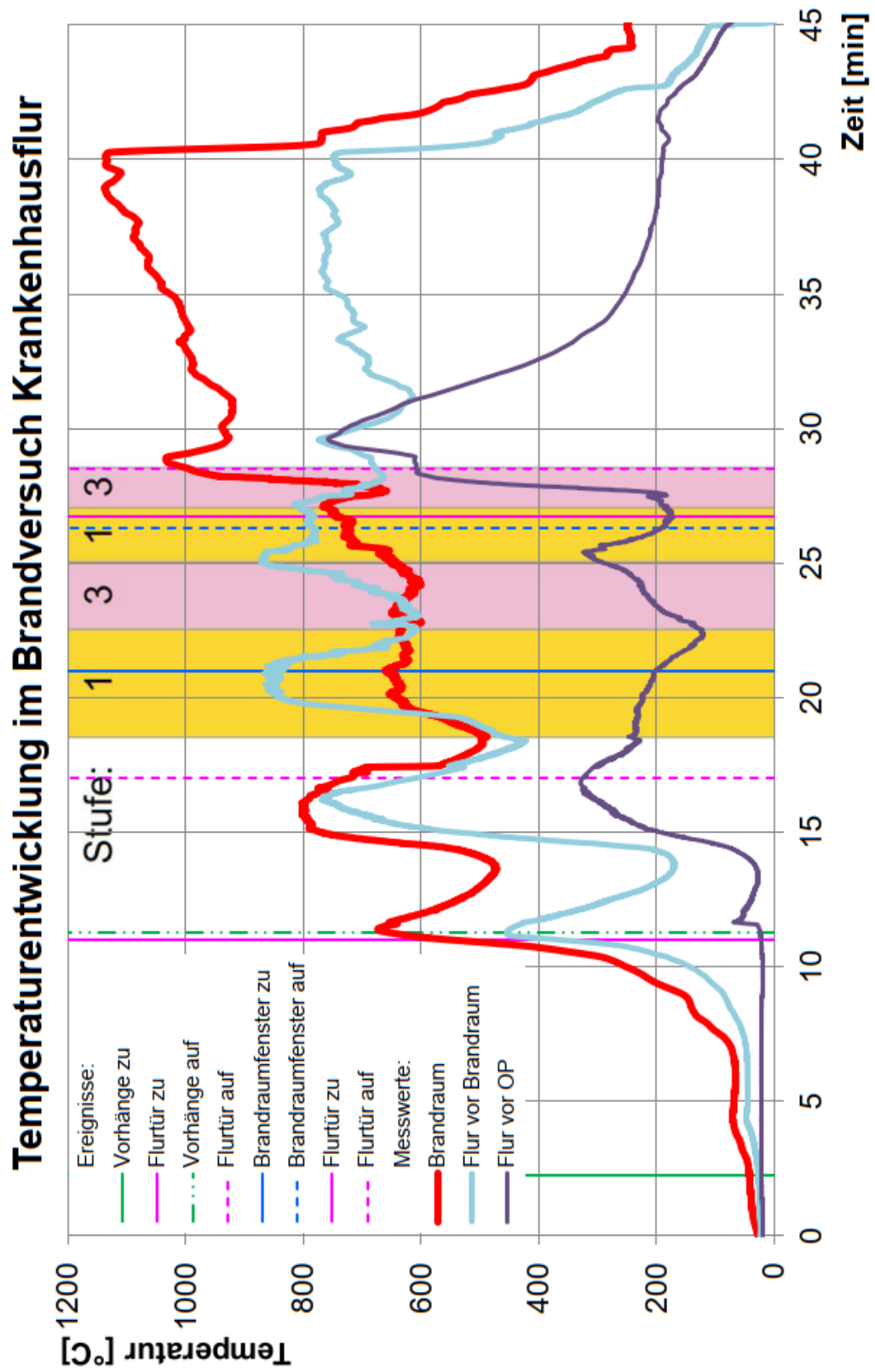


Abbildung 80: Temperaturentwicklung im Brandversuch, Quelle: Endreß-Ingenieurgesellschaft

## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Oberursel, den .....

.....  
(Bastian Heins)