

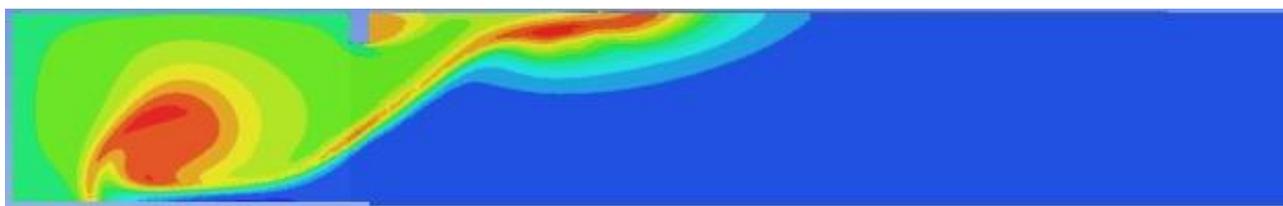
BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

**Maßnahmen zur Optimierung der Einsatztaktik bei Bränden in Räumen
ohne direkten Zugang ins Freie**

Teil 2



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

193

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄN-
DER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-ANGELEGENHEI-
TEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 193

Maßnahmen zur Optimierung der Einsatztaktik bei Bränden in Räumen ohne direkten Zugang ins Freie

Von

Dietmar Schelb

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dez. 2017

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: 193	Titel des Berichtes: Maßnahmen zur Optimierung der Einsatztaktik bei Bränden in Räumen ohne direkten Zugang ins Freie Teil 2		ISSN: 0170-0060
Autoren: Dietmar Schelb		durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: 2 / 2015		auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: 7. Dez. 2017			
Seitenzahl: 66	Bilder: 68	Tabellen: 2	Literaturverweise: 5
Kurzfassung: Einfache Formeln werden gezeigt, wie die Stärke und Dauer von ventilationsgesteuerten Bränden abgeschätzt werden können. Strömungs- und Temperaturverteilungen in einem Raum bei verschiedenen Zu- und Abluftbedingungen werden mittels dreidimensionaler Strömungssimulation (CFD) anschaulich dargestellt, eine Bilanz der Wärmeströme aufgestellt. Die Funktionsweise und Voraussetzungen für das Funktionieren eines Verschlusses an einer Tür zum Brandraum werden aufgezeigt. Das Pulsieren bei stark unterventilierten Bränden wird erläutert. Ein Backdraft, der sich in einen angrenzenden 10m langen Flur ausbreitet, wird simuliert und die zeitliche Temperaturverteilung im Flur und im Raum dargestellt. Das Ergebnis der Simulation zeigt in Übereinstimmung mit realen Ereignissen, dass ein Backdraft ein rasch verlaufender Prozess mit hohen Temperaturen bis 1000°C ist.			
Schlagwörter: CFD, dreidimensionale Strömungssimulation, Vernetzen, Zwei-Schritt-Verbrennungsmodell, ventilationsgesteuerter Brand, Backdraft, Pulsieren, Wärmeströme			

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Geometrie des Raums für CFD.	13
Abbildung 2: Detailansichten Oberlicht, Fenster (violett) gekippt	14
Abbildung 3: Stromlinien der Frischluft und des Rauchgases zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.	16
Abbildung 4: Wie vorige Abbildung aber Ansicht schräg von unten	17
Abbildung 5: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	17
Abbildung 6: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.	18
Abbildung 7: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.	19
Abbildung 8: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	20
Abbildung 9: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	20
Abbildung 10: X-Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren in der Mitte des Oberlichts (y-z Ebene) zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	21
Abbildung 11: Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung (senkrecht zum Fenster) in der Mitte des Oberlichts (y-z-Ebene) zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	21
Abbildung 12: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	22
Abbildung 13: Wie vorige Abbildung aber Ansicht schräg von unten	22
Abbildung 14: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	23
Abbildung 15: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Raum zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.	23
Abbildung 16: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	24
Abbildung 17: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.	25
Abbildung 18: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	25
Abbildung 19: CO-Konzentration nach 30min.	26
Abbildung 20: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	27
Abbildung 21: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht	27

Abbildung 22: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	28
Abbildung 23: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	28
Abbildung 24: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	29
Abbildung 25: Zum Vergleich: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$ bei geöffnetem Oberlicht	29
Abbildung 26: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	30
Abbildung 27: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.	30
Abbildung 28: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	31
Abbildung 29: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht	31
Abbildung 30: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	32
Abbildung 31: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	32
Abbildung 32: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	33
Abbildung 33: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$	33
Abbildung 34: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	34
Abbildung 35: Temperaturgefärbte Stromlinien bei 50% (obere Hälfte) verschlossener Tür.	35
Abbildung 36: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht	36
Abbildung 37: Längsschnitte der Temperaturverteilung	36
Abbildung 38: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien	37
Abbildung 39: Temperaturgefärbte Stromlinien. Luft strömt zur Tür ein und das Abgas strömt ausschließlich durch das Oberlicht ins Freie	38
Abbildung 40. Wie Abb. 39 aber andere Ansicht	38
Abbildung 41: Längsschnitte der Temperaturverteilung	39

Abbildung 42: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$	39
Abbildung 43: Temperaturgefärbte Stromlinien. Luft strömt zur Tür ein, Abgas aus.	40
Abbildung 44: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Raum.	40
Abbildung 45: Temperatur auf der Innenseite der Decke nach 30min,	41
Abbildung 46: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Beton	42
Abbildung 47: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien. HRR 50kW	43
Abbildung 48: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 100kW	44
Abbildung 49: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 250kW	44
Abbildung 50: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 500kW	45
Abbildung 51: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 50kW	45
Abbildung 52: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 100kW	46
Abbildung 53: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 250kW	46
Abbildung 54: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR von max. 500kW.	47
Abbildung 55: Druckverteilung bei HRR = 50kW	48
Abbildung 56: Druckverteilung bei HRR = 100kW	49
Abbildung 57: Druckverteilung bei HRR = 250kW	49
Abbildung 58: Zum Vergleich die Druckverteilung bei 50% verschlossener Tür und geöffnetem Oberlicht	50
Abbildung 59: Schnittebene (links) und Skala der Sauerstoffkonzentration für die folgenden Abbildungen	52
Abbildung 60: Zeitliche Abfolge im Abstand von je 1s des Einströmens von Frischluft.	54
Abbildung 61: Zeitlicher Temperaturverlauf beim backdraft	56
Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der Sauerstoffkonzentration	57
Abbildung 63: Ausschnitt des Gitters.	62
Abbildung 64: Draufsicht auf das Gitter mit den beiden Extrusionen rechts für die Tür und links für das Fenster	62

Abbildung 65:Gitter mit dem gekippten Fenster (violett). Die Spaltbreite beträgt oben 35mm	63
Abbildung 66: Schnitt durch das Volumengitter. Im Kreis markierter Bereich s. nächste Abbildung	63
Abbildung 67:Ausschnitt des Gitters im Bereich des Fensters.	64
Abbildung 68: Detailansicht der Prismenschicht. Erste Zelhöhe 3mm, zweite ca. 6mm	64

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	8
2. BRENNSTOFF- UND VENTILATIONSKONTROLLIERTE BRÄNDE	9
2.1. Benötigte Luftmengen zur Verbrennung	9
2.2. Geschlossene Räume	10
2.3. Räume mit Frischluftzufuhr	11
3. BRAND IN EINEM RAUM MIT VERSCHIEDENEN ZU- UND ABLUFT-ÖFFNUNGEN	12
3.1. Geometrie des Brandraumes	12
3.2. Randbedingungen & Materialdaten	14
3.3. Strömungsverhältnisse bei konstanter HRR (50kW) bei verschiedenen Zuluftbedingungen während der ersten 30 min	16
3.3.1. Oberlicht offen	16
3.4. Das Kellerfenster steht einen Spalt offen	22
3.4.1. Die Tür ist komplett geöffnet	27
3.4.2. Das Fenster und die Tür sind geöffnet	31
3.5. Teilweise verschlossene Tür bei HRR 50kW	35

3.5.1.	Obere Hälfte der Tür verschlossen und Fenster offen	35
3.5.2.	Tür zu 75% verschlossen und Fenster offen	38
3.5.3.	Tür zu 50% verschlossen und Fenster geschlossen	40
4.	TEMPERATUREN IN DER WAND	41
4.1.	Maximale HRR bei offenem Fenster	43
4.2.	Statische Druckverteilungen	48
4.3.	Wärmeeintrag in die Wände	51
4.3.1.	Bei konstant 50kW und unterschiedlichen Zu- und Abluftöffnungen	51
4.3.2.	Bei geöffnetem Oberlicht und unterschiedlichen HRR	51
5.	PULSIEREN BEI STARK UNTERVENTILIERTEM BRAND	52
6.	BACKDRAFT (RAUCHGASEXPLOSION)	55
7.	LITERATURVERZEICHNIS	59
8.	ZUSAMMENFASSUNG	60
9.	ANHANG	61
9.1.	Vernetzung	61
9.2.	CFD Software	61
9.3.	Temperaturleitfähigkeit	65

1. EINLEITUNG

Das Brandgeschehen in Kellerräumen bzw. in Räumen ohne Zugang ins Freie unterscheidet sich wegen der Ventilationsbedingungen in der Regel wesentlich von Bränden in Räumen mit äußerer Frischluftzufuhr, wie z.B. bei einem Zimmerbrand bei geöffnetem Fenster.

Im folgenden Bericht werden mögliche Brandszenarien mit Hilfe dreidimensionaler Strömungssoftware berechnet und visualisiert, so dass ein räumlicher und zeitlicher Eindruck des Brandgeschehens vermittelt wird.

Im ersten Teil werden Brände in einem Raum mit angrenzendem Flur, der durch eine Tür abgetrennt ist, dargestellt. Der Raum verfügt über ein für Kellerräume typisches Oberlicht mit den Abmessungen 800mm x 400mm. Die Frischluftzufuhr wird durch unterschiedliche Öffnungen des Oberlichtes sowie durch eine geöffnete Tür variiert.

Im zweiten Teil werden Phänomene wie das Pulsieren der Rauchgasströmung aus einem geöffneten Fenster sowie ein Backdraft simuliert, der sich bei rasch geöffneter Tür in einen Flur ausbreitet.

Die in diesem Bericht durchgeführten Simulationsberechnungen bilden jeweils ein Brandgeschehen unter idealisierten und vereinfachten Bedingungen ab, die in der Realität in dieser Form wohl kaum anzutreffen sein werden. Zu erkennen sind aber typische Strömungs- und Temperaturbedingungen, die sicherlich in qualitativ gut übereinstimmender Form bei den realen Einsätzen anzutreffen sind.

2. Brennstoff- und ventilationskontrollierte Brände

Ein Brand wird in seiner Stärke (genauer: der Wärmefreisetzungsrate gemessen in Watt) entweder durch das Angebot an Sauerstoff oder an Brennstoff begrenzt. Im ersten Fall wird der Brand als ventilationskontrolliert bezeichnet. Ein typisches Beispiel sind Kaminöfen oder Kohlegrills, die eine große Menge Brennstoff bevorraten und durch die Luftzufuhr in ihrer Leistung gesteuert werden. Auf der anderen Seite ist ein Lagerfeuer typisch für einen brennstoffkontrollierten Brand, da dessen Stärke durch Zugabe von Brennmaterial erhöht wird.

2.1. Benötigte Luftmengen zur Verbrennung

Die Brandlast bei einem Wohnungsbrand setzt sich in der Regel aus einem undefinierbaren Gemisch aus Holz, Pappe, Wolle, Leder und Kunststoffen zusammen. Bei Keller- bzw. Lagerräumen sind oft noch brennbare Flüssigkeiten wie Lacke, Spiritus, Terpentin und brennbare Gase (Propan, Butan) für Camping bzw. Grill beteiligt.

Die Heizwerte der oben aufgeführten Stoffe liegen in einem Bereich zwischen 4 kWh/kg (Papier) und über 12 kWh/kg, z.B. für flüssigen Grillanzünder und Kunststoffe, wie z.B. Polyethylen oder Polypropylen ([1], S. 262ff).

Der Bedarf an Verbrennungsluft pro Energiemenge hingegen bewegt sich bei den aufgeführten Stoffen in einem engen Bereich zwischen 1 und 1,25 kg/kWh. ([1], s. 261).

Damit kann eine Wärmefreisetzungsrate bei „gewöhnlichen“ Bränden alleine aus dem Luftverbrauch abgeschätzt werden. Es ist also bei der Brandstärke (genauer: der Wärmefreisetzungsrate) bei einem unterventilierten Brand nicht von Bedeutung, ob Massivholzmöbel und Ledercouchgarnitur oder Pappmobilier und Schaumstoffmatratzen brennen, sondern die Stärke wird einzig von der zugeführten Luft bestimmt.

Bei allen im Bericht aufgeführten Simulationen und Abschätzungen werden 20°C und Standard-Atmosphärendruck 1013,25hPa zu Grunde gelegt mit einer Luftdichte von 1,2 kg/m³.

2.2. Geschlossene Räume

Es hängt vom Brand ab, bis zu welcher Sauerstoffkonzentration dieser noch weiter abläuft. Je höher die Brandtemperatur, desto geringer die Mindestkonzentration an Sauerstoff, um das Feuer am Leben zu erhalten.

Sicherlich wird die Sauerstoffkonzentration im Raum nicht homogen verteilt sein, so dass das Feuer nur einen Teil des im Idealfall zur Verfügung stehenden Sauerstoffangebots zur Verbrennung nutzen kann.

Sicherlich sind aber einfache Abschätzungen der Maximalwerte abzuleiten, wenn der zur Verfügung stehende Sauerstoff komplett zur Verbrennung beiträgt:

- Hat z. B. ein Wohnzimmer mit 24m^2 ein Raumvolumen von rund 60m^3 können max. 60kWh freigesetzt werden. Ein typischer Vollbrand hat eine Leistung von rund $5\text{-}15\text{MW}$. Ein von Beginn an 6MW starker Brand hätte nach rund 36 Sekunden allen Sauerstoff verbraucht. Es ist also nicht möglich, dass sich in einem geschlossenen Raum von der Größe eines durchschnittlichen Zimmers ein Vollbrand entwickelt und unterhält, ohne dass von außen Frischluft zugeführt wird.
- Ein Industriehalle mit 1600m^2 Grundfläche und einer Deckenhöhe von 8m hat ein Raumvolumen von knapp 13.000m^3 , so dass mit dem Sauerstoffvorrat ein Brand mit 13MW für rund eine Stunde aufrecht erhalten werden könnte. Als Obergrenze kann daher abgeschätzt werden:

-

$$1 \text{ m}^3 \text{ Luft} = \text{max. } 1 \text{ kWh} = 3.6\text{MWsec.}$$

2.3. Räume mit Frischluftzufuhr

- Bei einem Wohnzimmerbrand mit offenem Fenster strömen z.B. knapp $1,5\text{m}^3$ Luft pro Sekunde durch das Fenster ein. Damit kann eine Wärmefreisetzungsrate im Innern von rund 5MW aufrecht erhalten werden.
- Ein typischer Straßenverkehrstunnel hat einen Querschnitt von 50m^2 : Bei einer moderaten mittleren Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung von 5km/h strömen rund 70m^3 Luft pro Sekunde. Damit kann ein extremer Brand mit 300MW mit Sauerstoff versorgt werden. Brände in Tunnels sind daher i.d.R. brennstoffgeregelt.

1m^3 Luft pro Sekunde = max. 3,6MW Wärmefreisetzungsrate

Anmerkung:

Diese einfachen Formeln sind die oberen Grenzen mit einer Genauigkeit von +- 50% und lediglich als Größenordnung für eine rasche Einschätzung des Brandgeschehens zu verstehen.

Am Rande sei bemerkt, dass Brände in den Wintermonaten bei hohem Luftdruck in der Ebene auf Meereshöhe genauso statt finden wie im Sommer bei niedrigem Luftdruck und in der Höhe. Die Luftdichte beträgt in der Ebene bei -10°C , 1040hPa und trockener Luft $1,377\text{kg}/\text{m}^3$ und in rund 1500m Höhe bei 25°C , 800hPa und feuchter Luft $0,926\text{kg}/\text{m}^3$. (z.B. [2]). Alleine die unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen können zu einer Abweichung von +-20% führen.

3. Brand in einem Raum mit verschiedenen Zu- und Abluft-öffnungen

3.1. Geometrie des Brandraumes

Mittels dreidimensionaler Strömungssimulationen wird das zeitliche Geschehen eines typischen Brandes in einem geschlossenen $56,5\text{m}^3$ großen Raum ($L=4300\text{mm}$ x $B=5470\text{mm}$ x $H=2400\text{mm}$) mit einer Betonwand mit Dicke 240mm dargestellt. Das Brandgeschehen wird unter verschiedenen Zuluft- und Abluftbedingungen simuliert: Fenster (Oberlicht) 400mm x 800mm und die gegenüberliegende Tür mit 1000mm x 2000mm . Als Brandquelle dient ein Quader mit 500mm x 600mm x 500mm , aus dessen 4 Seitenflächen und der Oberseite konstant gasförmiger Brennstoff ausströmt.

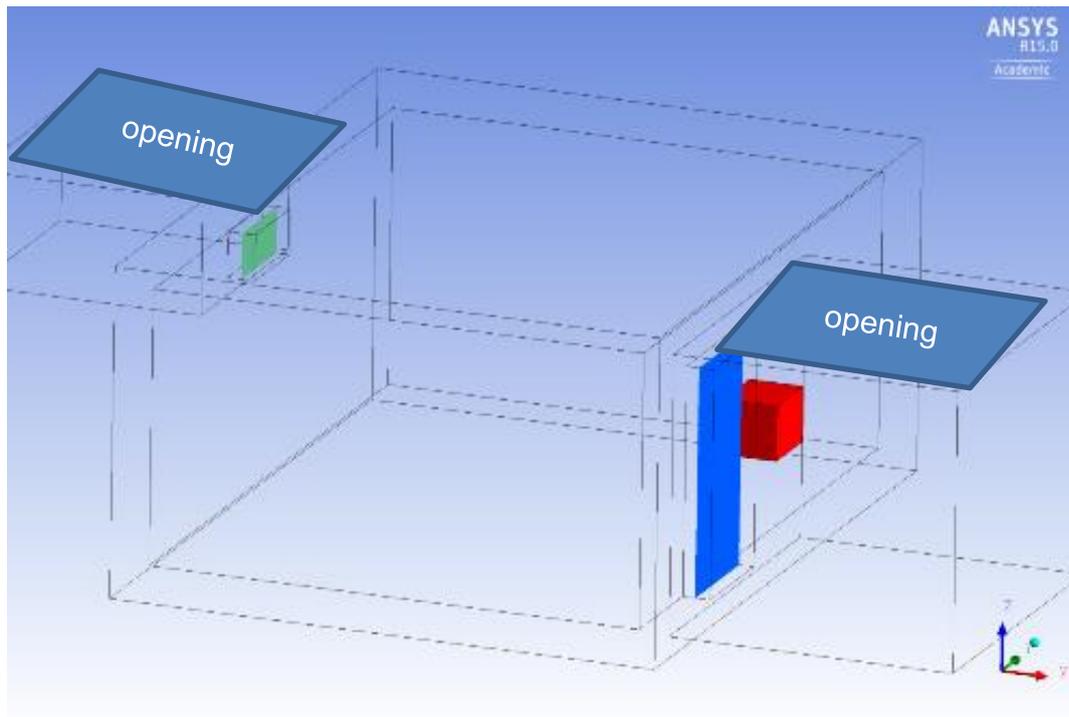


Abbildung 1: Geometrie des Raums für CFD.

Raum in x-Richtung innen 4300mm, in y-Richtung 5470mm, in z-Richtung (Höhe) 2400mm, Wanddicke 240mm. Oberlicht Breite 800mm, Höhe 400mm. Höhe Unterkante über Boden 1800mm, Abstand Oberkante zur Decke 200mm. Tür Höhe 2000mm, Breite 1000mm, Abstand zur Wand in +y- Richtung 3470mm, in -y 1000mm. Brandquelle freischwebender Quader, 500mm x 600mm x 500mm, Abstand zum Boden 120mm, Abstand zur Wand in x-Richtung 500mm, in y-Richtung 700mm. Ausströmen des Gases (Methan) durch die obere und die 4 Seitenflächen. Die Quader rechts und links bilden einen Teil der Umgebung ab, so dass das Ein- und Ausströmen durch Tür und Fenster korrekt abgebildet werden kann. Die openings = Decken der Quader sind eine Randbedingung bei der Simulation.

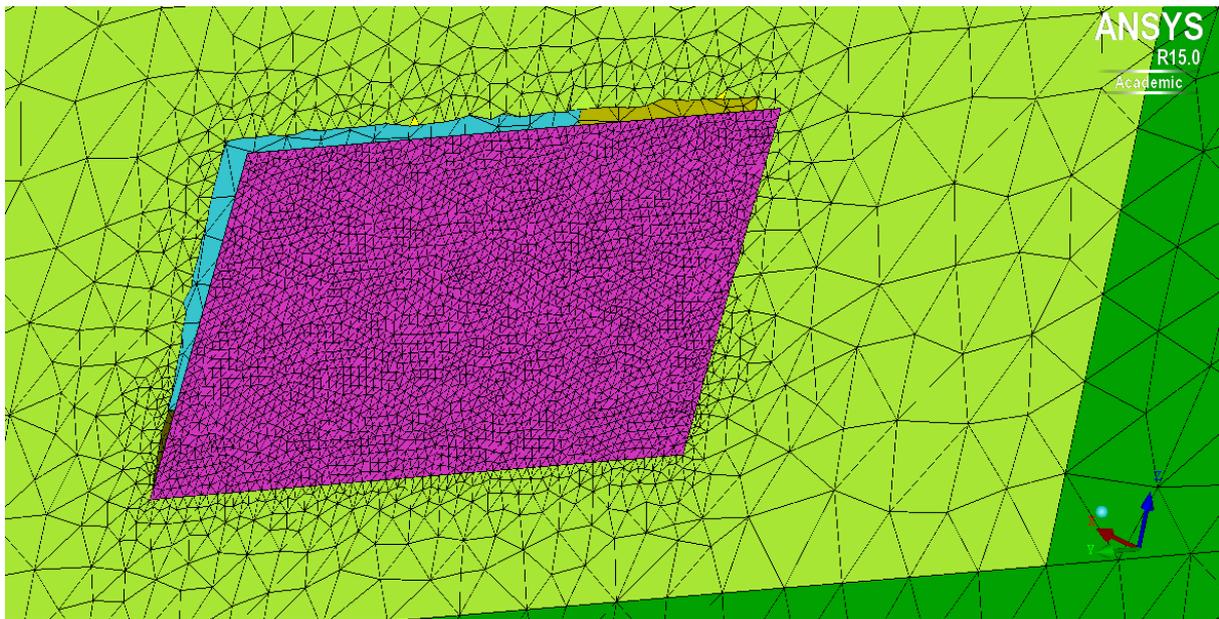
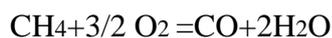


Abbildung 2: Detailansichten Oberlicht, Fenster (violett) gekippt

3.2. Randbedingungen & Materialdaten

Es strömt konstant 1gr Methan mit 500°C pro Sekunde aus, entsprechend einem oberen Heizwert von 50kW. Zum Zeitpunkt $t=0$ ist der Raum mit Luft bei Standard-Atmosphäre gefüllt, die Temperatur ist mit 500°C so hoch gewählt, dass im Modell die Zündung selbständig erfolgt.

Die Verbrennung wird vereinfacht mit einem Zwei-Schritt-Modell nach Westbrook und Dreyer [xx] berechnet (mit CO als Zwischenprodukt). Es ist nicht das Ziel der Simulationen, die Flamme korrekt abzubilden, sondern die Abgastemperaturen realitätsnah wiederzugeben.



Als Turbulenzmodell wird bei den transienten Berechnungen ein DES (detached eddy) verwendet, Auftriebskräfte werden natürlich berücksichtigt. Als Strahlungsmodell wird P1 grey verwendet.

Randbedingungen:

Horizontale Flächen (openings) mit Standard-Atmosphäre und ruhender Luft, kein Druckgradient.

Die Verbrennungs- und Turbulenzmodelle werden in einem kommenden Forschungsbericht (voraussichtl. Ende 2018) detailliert erläutert.

Stoffdaten

Luft: Ideales Gas, trocken, temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit

Methan: Ideales Gas

Beton: Wärmeleitfähigkeit 1,6W/mK, Dichte 2000kg/m³

3.3. Strömungsverhältnisse bei konstanter HRR (50kW) bei verschiedenen Zuluftbedingungen während der ersten 30 min

3.3.1. Oberlicht offen

Die einzige Öffnung im Raum ist das 800mm x 400mm große Oberlicht. Der Brand beginnt bei $t=0$ und verläuft über eine halbe Stunde mit einer konstanten Wärmefreisetzungsrate von 50kW.

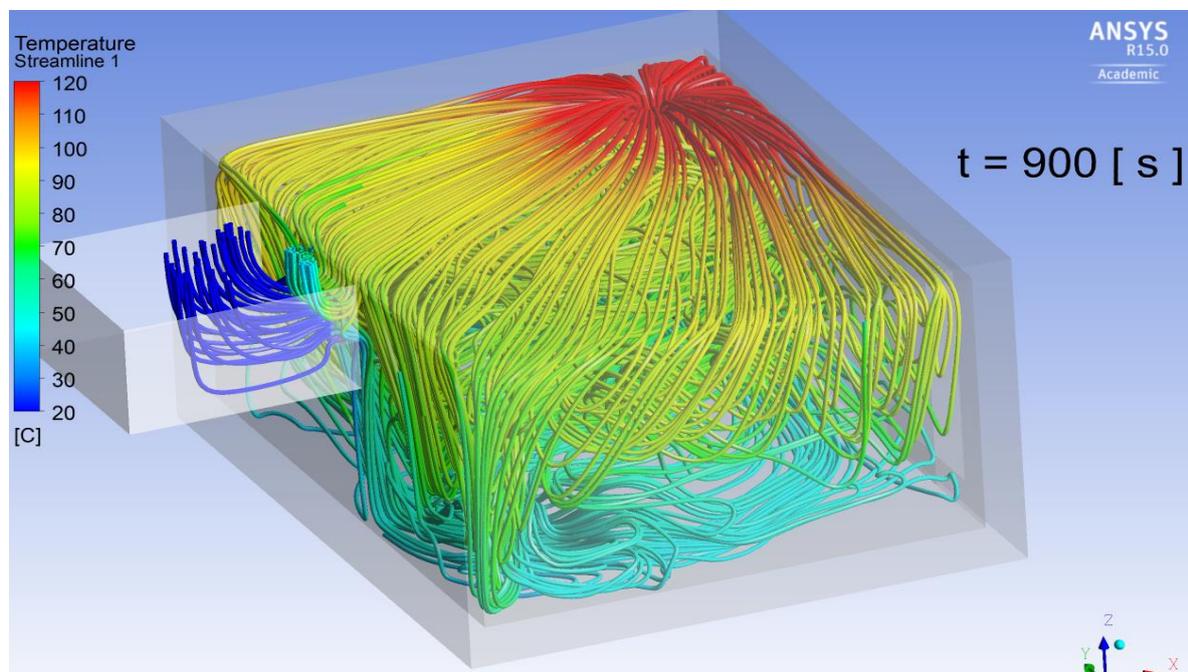


Abbildung 3: Stromlinien der Frischluft und des Rauchgases zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.

Die Stromlinien zeigen den Strömungsweg einiger ein- bzw. ausströmenden Gasteilchen. Einströmende Frischluft strömt unmittelbar nach Durchtritt durch das Oberlicht nahezu senkrecht auf den Boden und von dort parallel zum Boden hin zum Brandherd. Die Farbe der Stromlinien entspricht der Temperatur (Skala in der Abbildung links). Das blaue Bündel ganz links entspricht Frischluft mit 20°C . Nach Eintritt durch das Oberlicht erhöht sich die Temperatur auf $40 - 50^\circ\text{C}$ (hellblaue Farbe) und strömt am Boden entlang bis zum Brandherd, ohne sich weiter aufzuheizen. Dies zeigt, dass die einströmende Luft sich mit dem warmen Rauchgas praktisch nur im Bereich der Öffnung vermischt. Die Temperaturen sind unter der Decke direkt über dem Brandherd erwartungsgemäß am höchsten, aufgrund der geringen Wärmefreisetzungsrate von 50kW betragen die Temperaturen seitlich des Brandherdes um die 100°C . Das durch das Oberlicht auströmende Rauchgas kühlt schnell auf $40-50^\circ\text{C}$ ab, indem es sich mit der einströmenden Frischluft durchmischt.

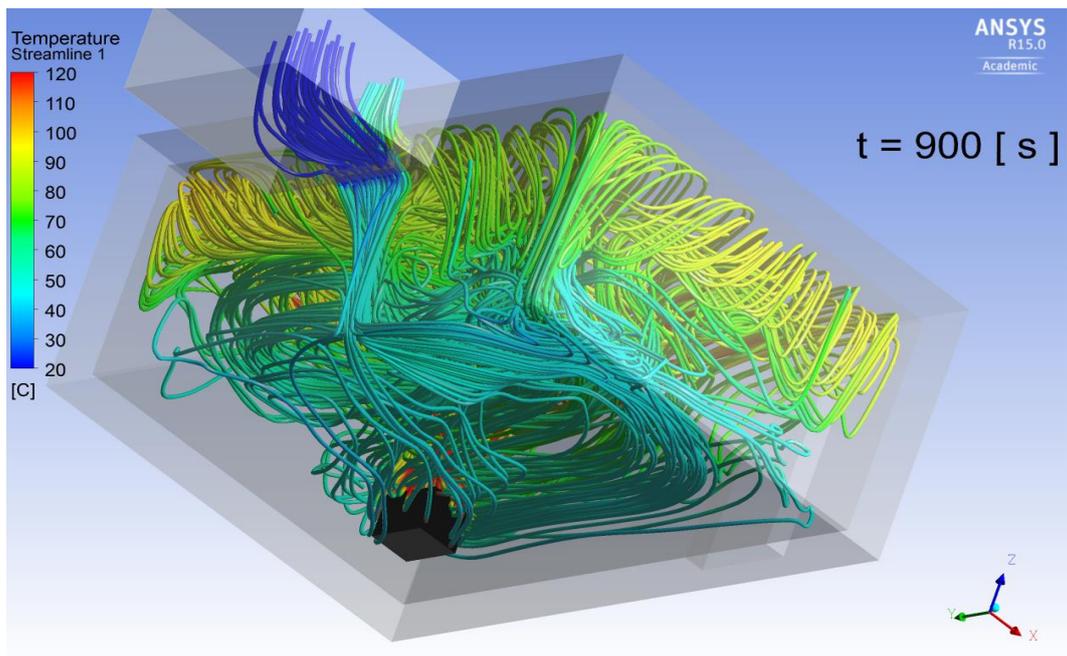


Abbildung 4: Wie vorige Abbildung aber Ansicht schräg von unten

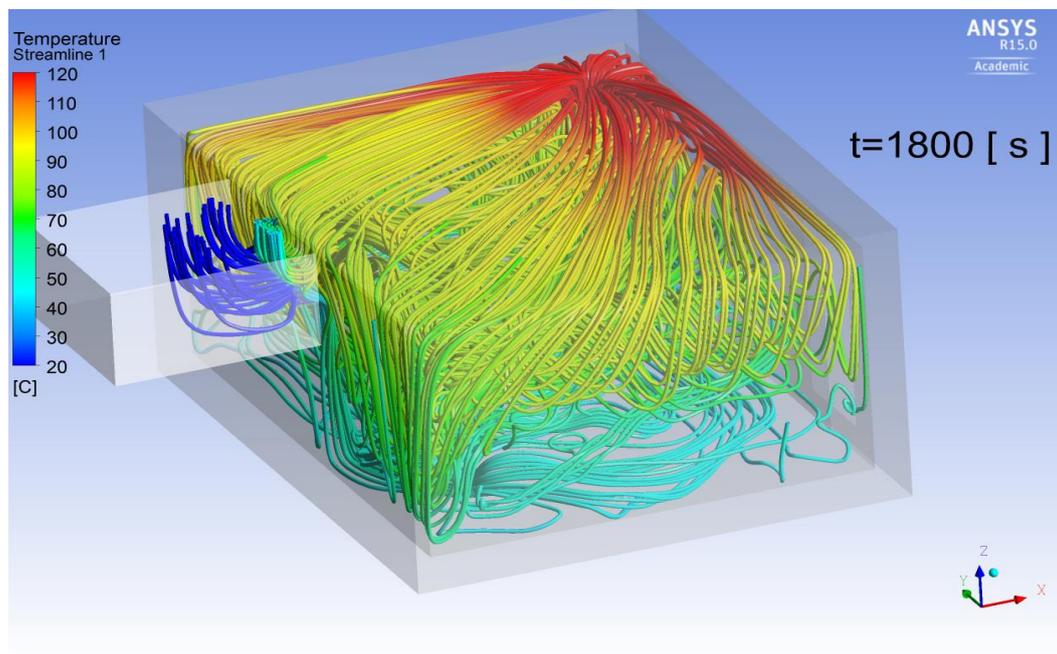


Abbildung 5: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt t=30min.

Das Strömungsmuster hat sich gegenüber dem Zustand bei 15min in Abb. 4 nicht geändert, die Temperaturen an der Decke sind jetzt aber ca. 10K höher, weil sich die Wände und Decken aufheizen.

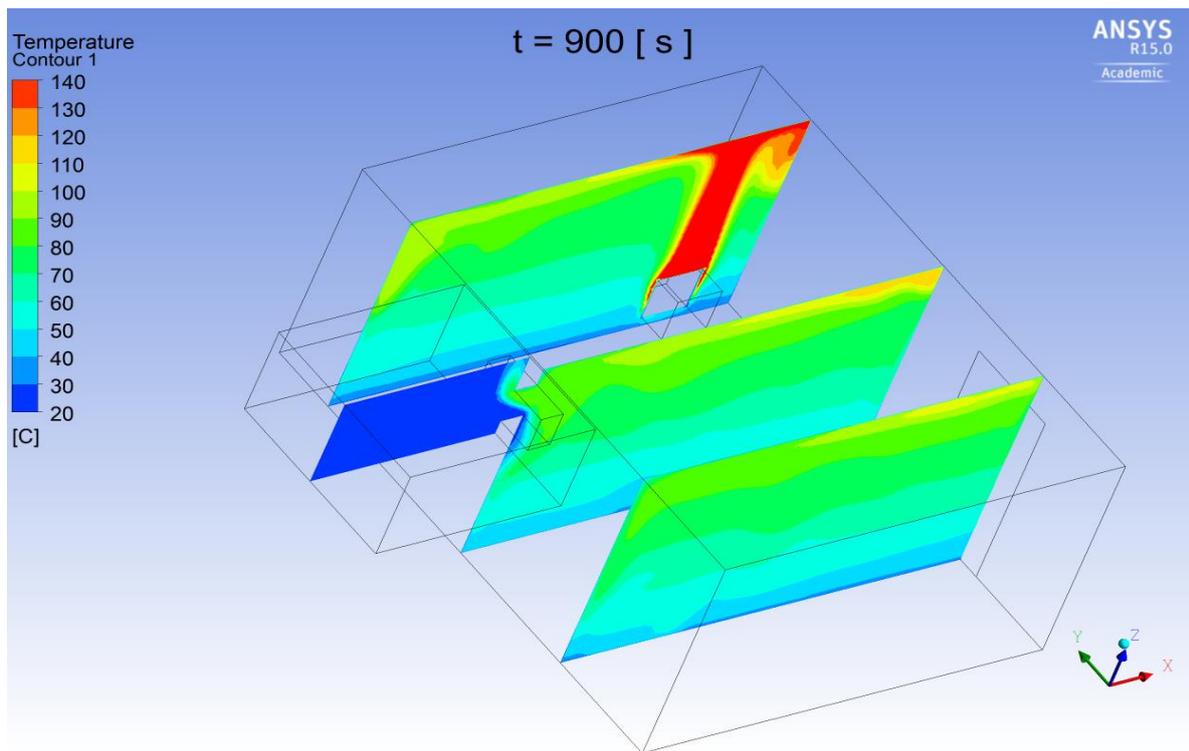


Abbildung 6: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.

Wände sind in der Abbildung ausgeblendet, Konturplots der Temperatur in drei parallelen Schnittebenen.

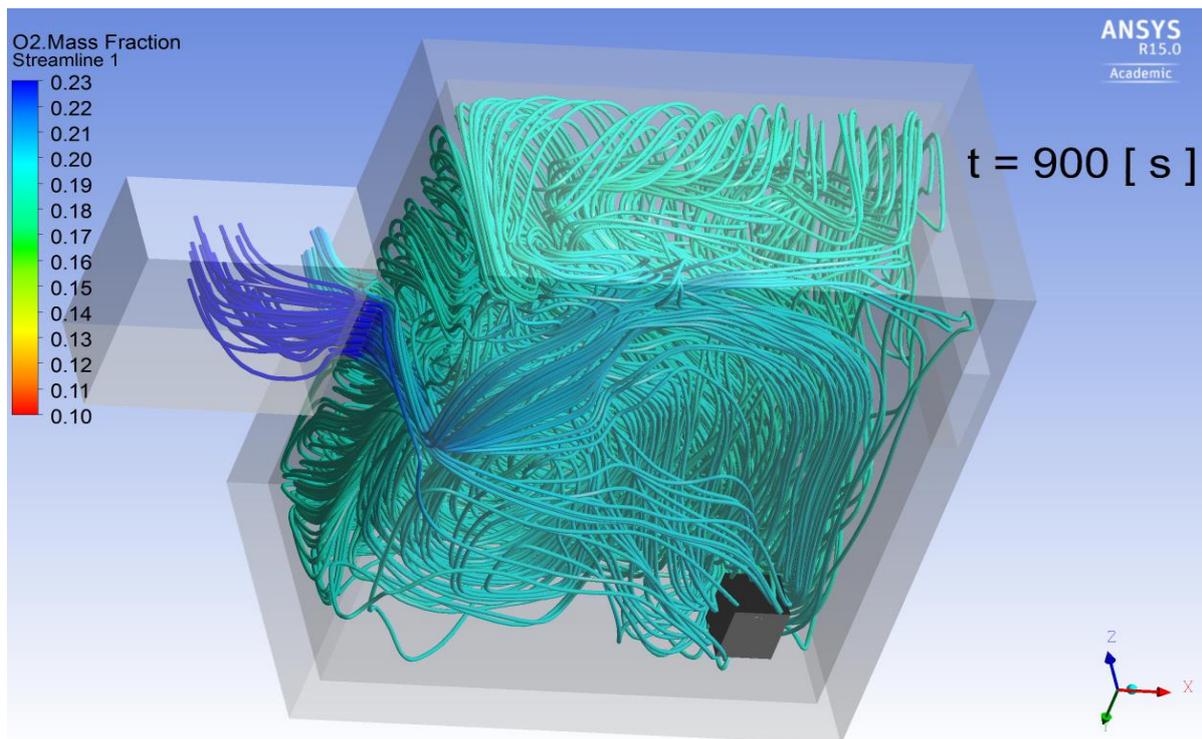


Abbildung 7: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.

In der Skala ist die massenbezogene Konzentration (Standard-Einstellung bei Ansys CFX) abgebildet. In trockener Luft beträgt die massenbezogene Konzentration von Sauerstoff 23% (gegenüber der gebräuchlichen volumetrischen Konzentration von 21%). Die höchste Sauerstoffkonzentration im Innern des Raumes findet sich am Boden, weil dort die (mit Rauchgas leicht vermischte) Frischluft entlangströmt. Die Konzentration im Raum oberhalb ist praktisch homogen (mit Ausnahme in unmittelbarer Nähe und oberhalb des Brandherdes, in dieser Abbildung nicht zu sehen).

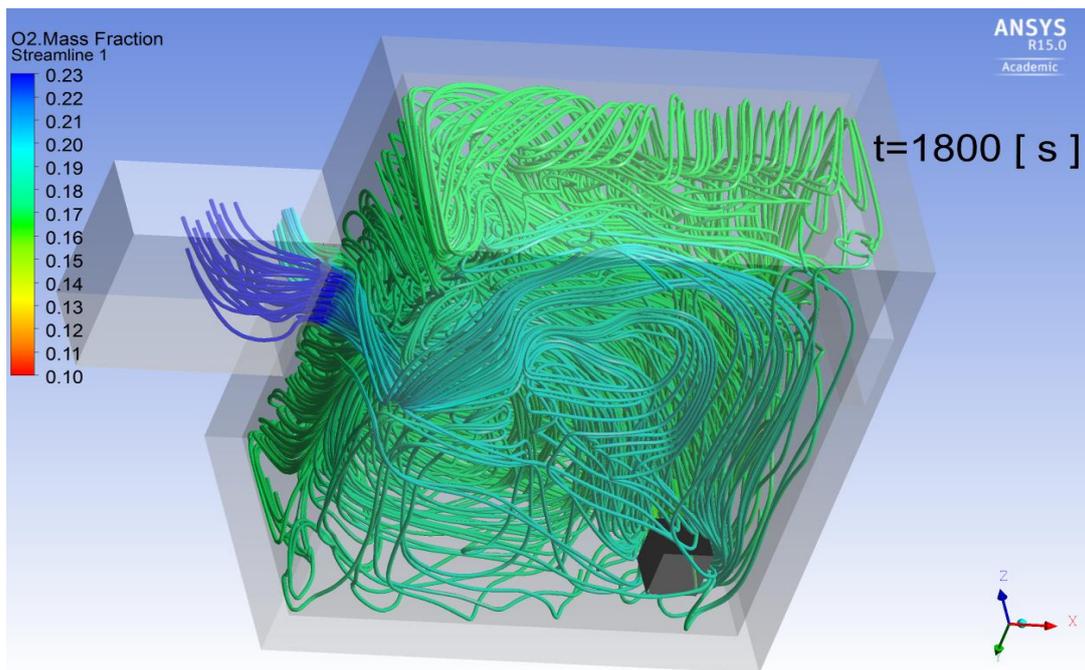


Abbildung 8: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

Praktisch keine Veränderung gegenüber dem Zustand bei 15 Minuten. Die Ursache wird in Abb. 11 erläutert.

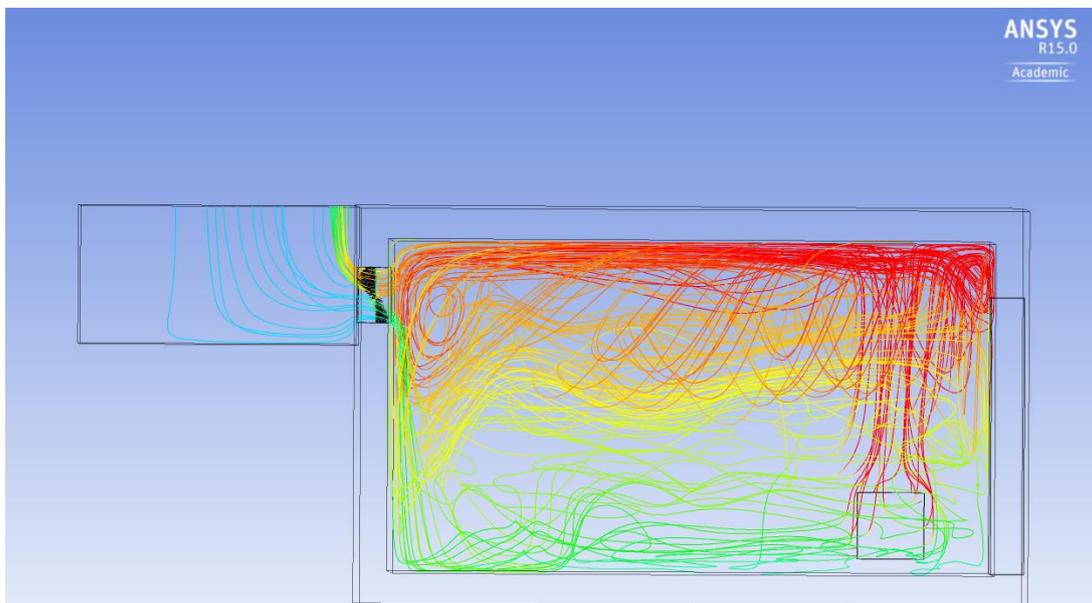


Abbildung 9: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

Zur Verdeutlichung der Strömung im Oberlicht. Strömungsrichtung durch das Fenster ist vorrangig in x -Richtung, d.h. senkrecht zur Öffnungsfläche.

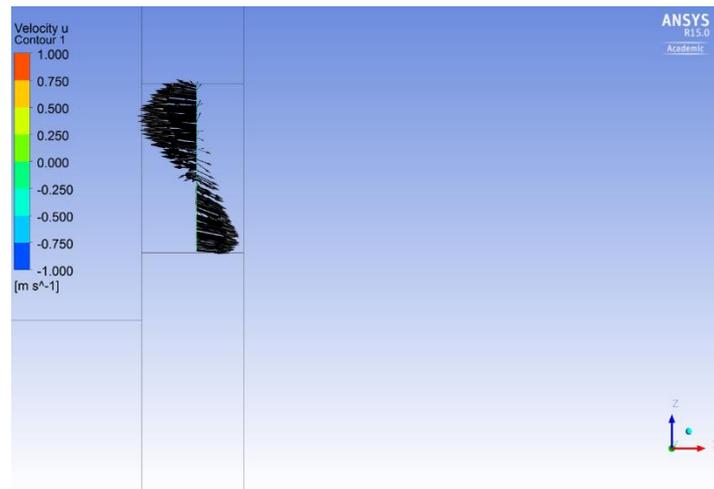


Abbildung 10: X-Komponenten der Geschwindigkeitsvektoren in der Mitte des Oberlichts (y-z Ebene) zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

In der größeren oberen Hälfte strömt das Rauchgas aus, in der kleineren unteren Hälfte strömt Frischluft ein.

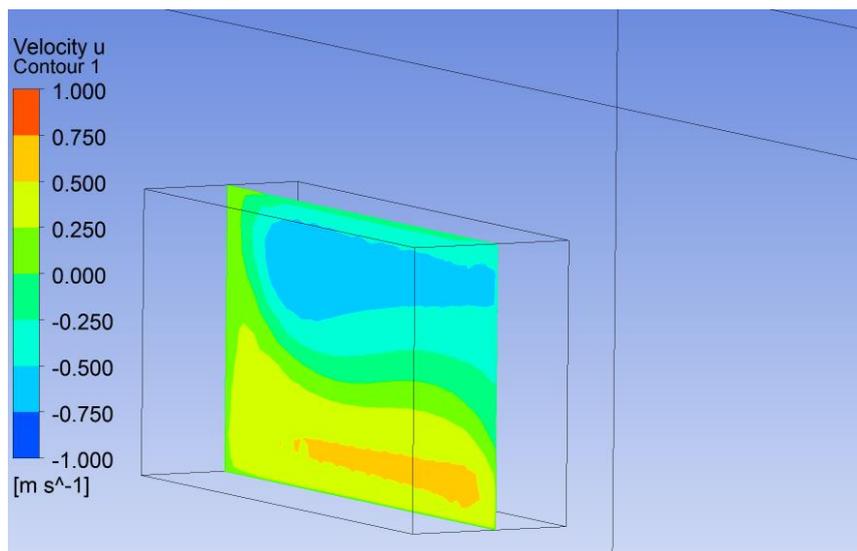


Abbildung 11: Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung (senkrecht zum Fenster) in der Mitte des Oberlichts (y-z-Ebene) zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

Positive Werte zeigen Einströmen in den Raum an, negative Ausströmen. Die maximale Einströmgeschwindigkeit liegt bei etwa $0,7\text{ms}^{-1}$. Im Mittel strömen rund $0,05\text{m}^3\text{s}^{-1}$ Frischluft zu, genug um 180kW Wärmefreisetzungsrates zu ermöglichen. (1m^3 Luft ermöglicht $1\text{kWh}=3,6\text{MWs}$. Somit $0,05\text{m}^3\text{s}^{-1} = 3,6\text{MWs} / 20\text{s} = 0,18\text{MW}$). Daher erklärt sich auch die massenbezogene Sauerstoffkonzentration von 17% in den Abbildungen 8 und 9. Bei einer Luftzahl von knapp 4 (es steht viermal so viel Luft zur Verfügung wie zur Verbrennung benötigt wird) beträgt der Sauerstoffanteil im Abgas noch 75% vom Ausgangswert, also rund 17%.

3.4. Das Kellerfenster steht einen Spalt offen

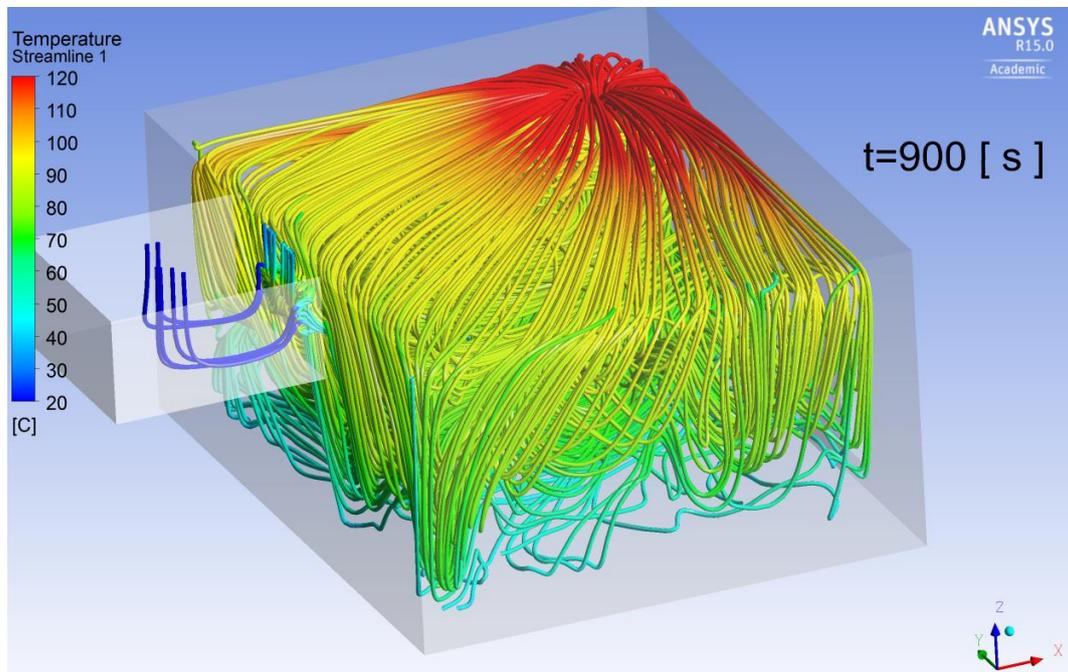


Abbildung 12: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$

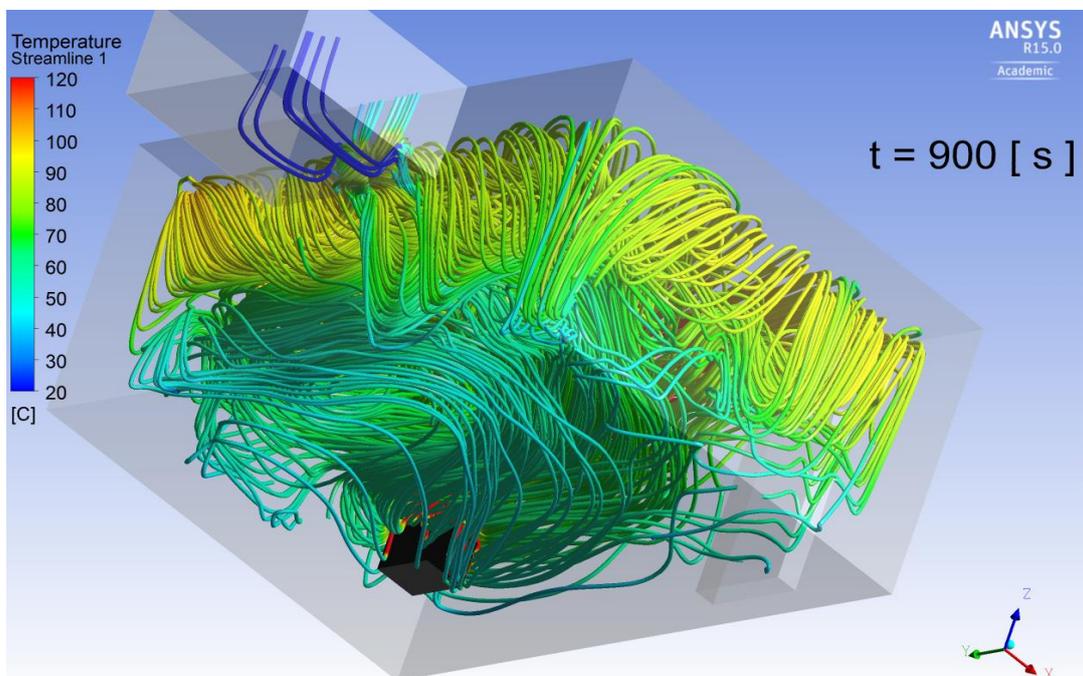


Abbildung 13: Wie vorige Abbildung aber Ansicht schräg von unten

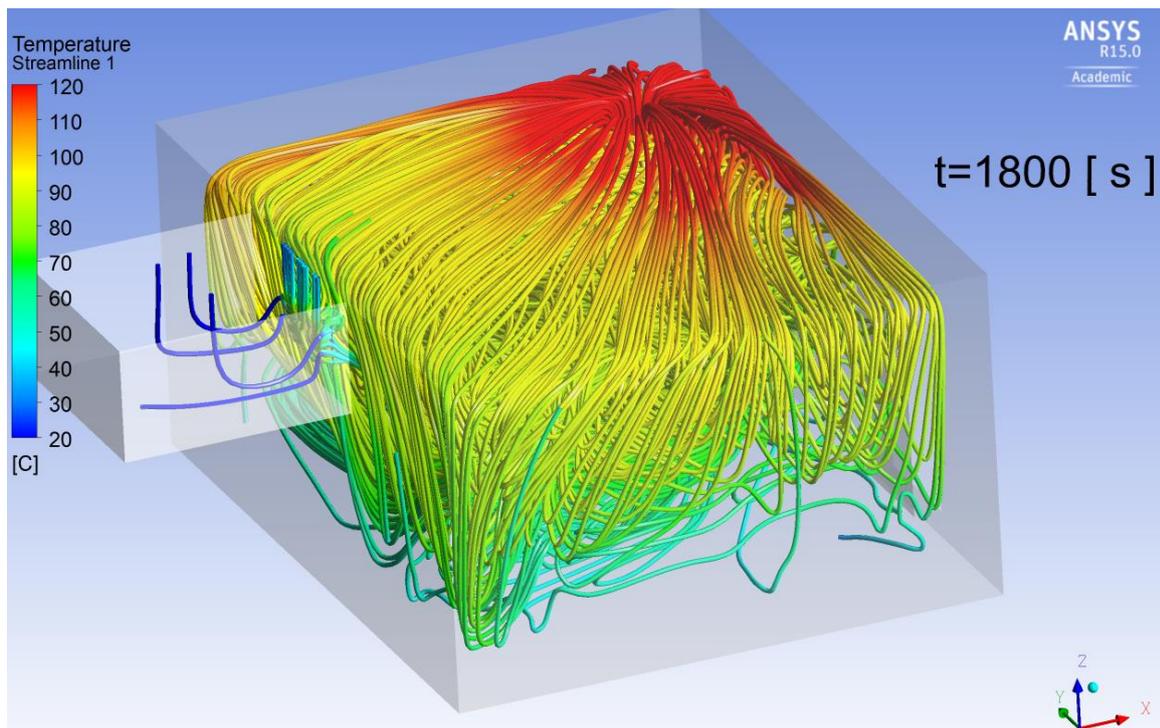


Abbildung 14: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30$ min

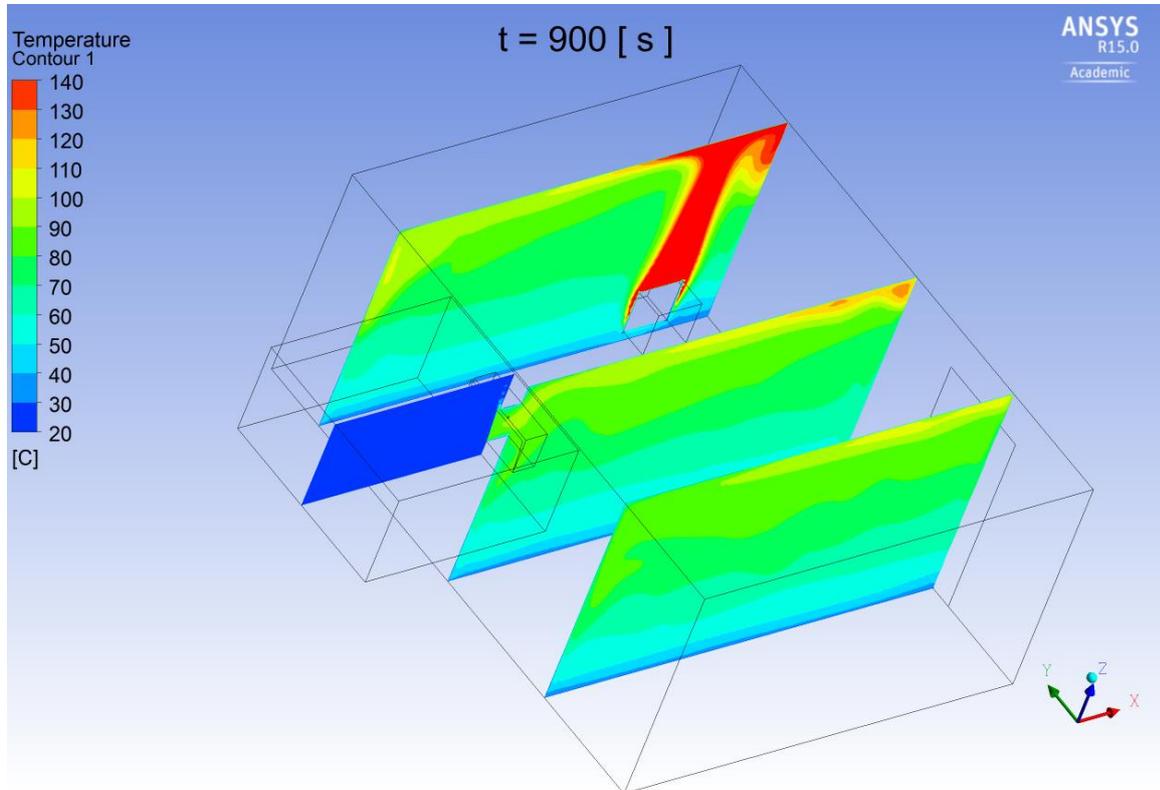


Abbildung 15: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Raum zum Zeitpunkt $t=15$ min.

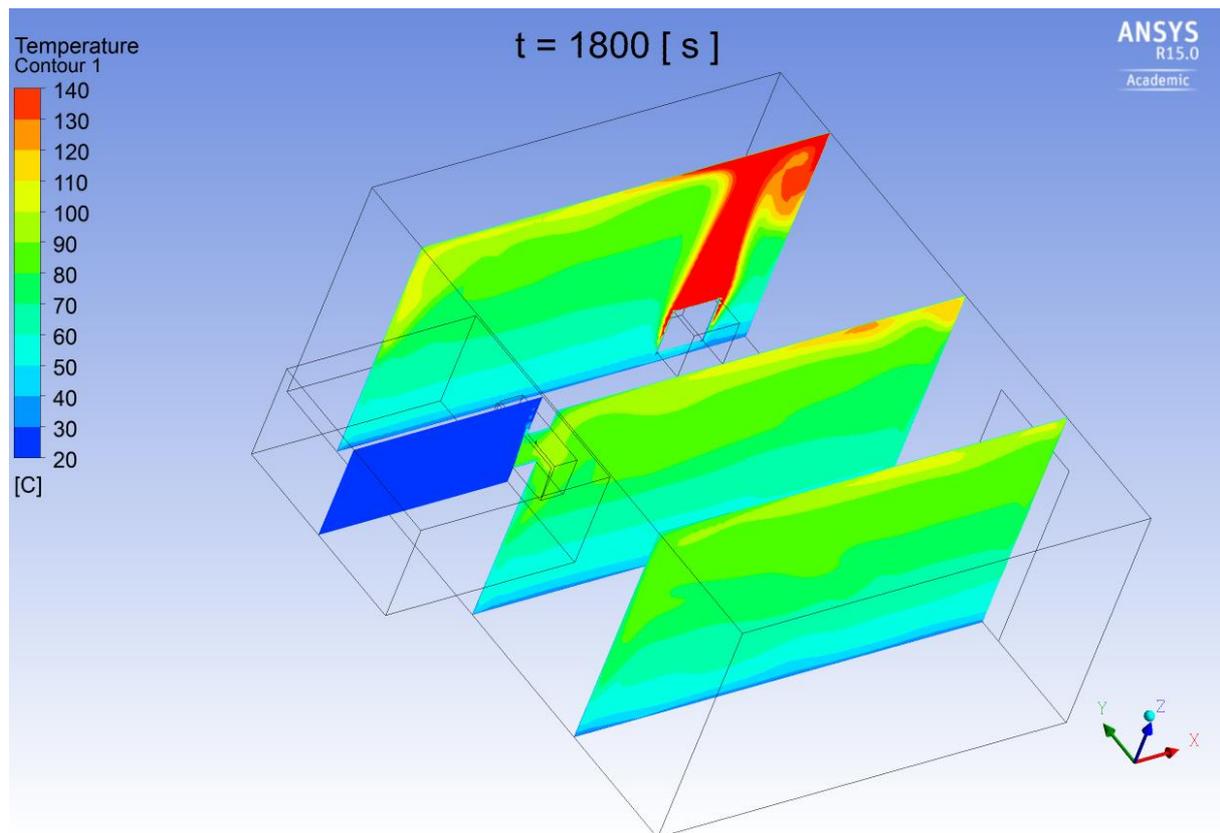


Abbildung 16: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

Die Temperaturverteilung im Raum ist nach 15 und 30min praktisch identisch zur Situation mit komplett geöffnetem Oberlicht. In beiden Fällen steht dem Brand genug Sauerstoff zur Verfügung, so dass die 50kW – Brände gleich verlaufen. Beim offenen Fenster strömt mehr Frischluft ein, doch deren Kühlwirkung ist vernachlässigbar.

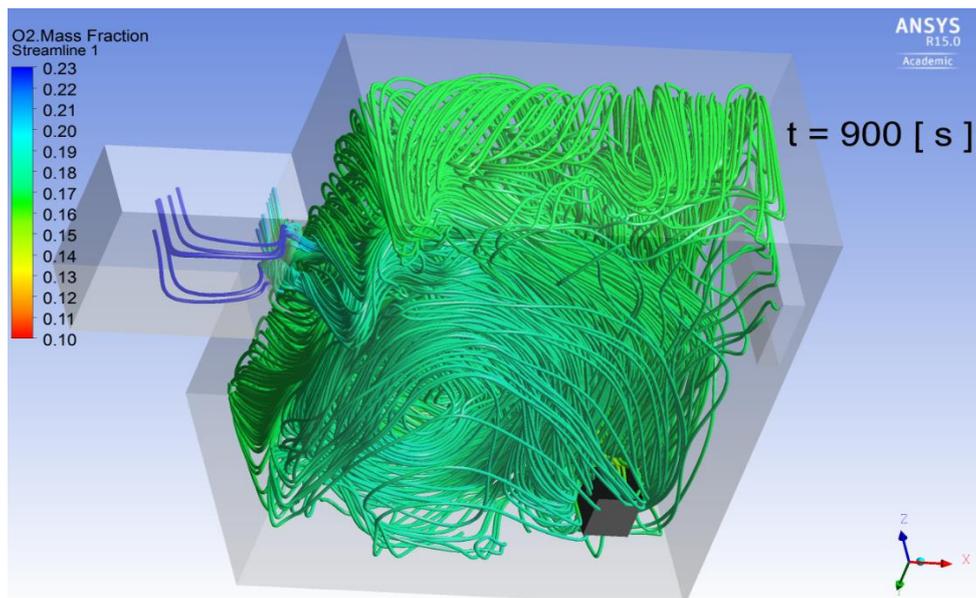


Abbildung 17: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$.

Die Konzentration ist auf etwa 16Vol% im Abgas gesunken-entsprechend einer Luftzahl von 4 bei der Verbrennung.

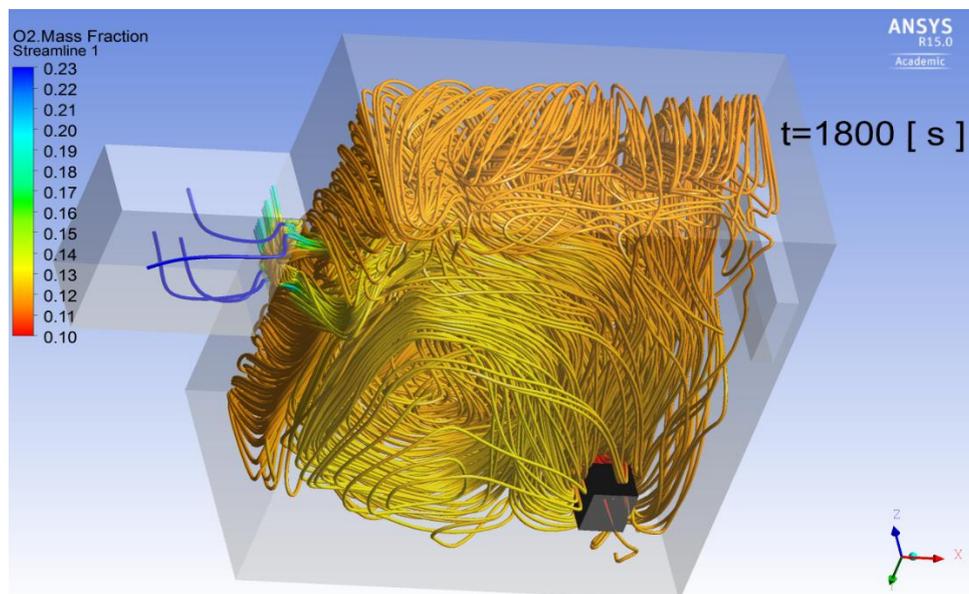


Abbildung 18: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$.

Die Konzentration sinkt nach einer halben Stunde auf rund 11Vol%. Die Frischluftzufuhr durch den Spalt am Oberlicht reicht offensichtlich nicht aus, um für die Verbrennung genügend Sauerstoff einzutragen. Das Feuer zehrt den Vorrat an Sauerstoff auf. Nach einer halben Stunde sind etwa 30m^3 Luft (die Hälfte des Raumvolumens) verbraucht, so dass sich im Mittel die Konzentration des Sauerstoffs halbiert. Die Luftzahl liegt noch bei 2. Nach spätestens einer Stunde wäre der Sauerstoffvorrat verbraucht und der Brand dann zum Erlischen gekommen.

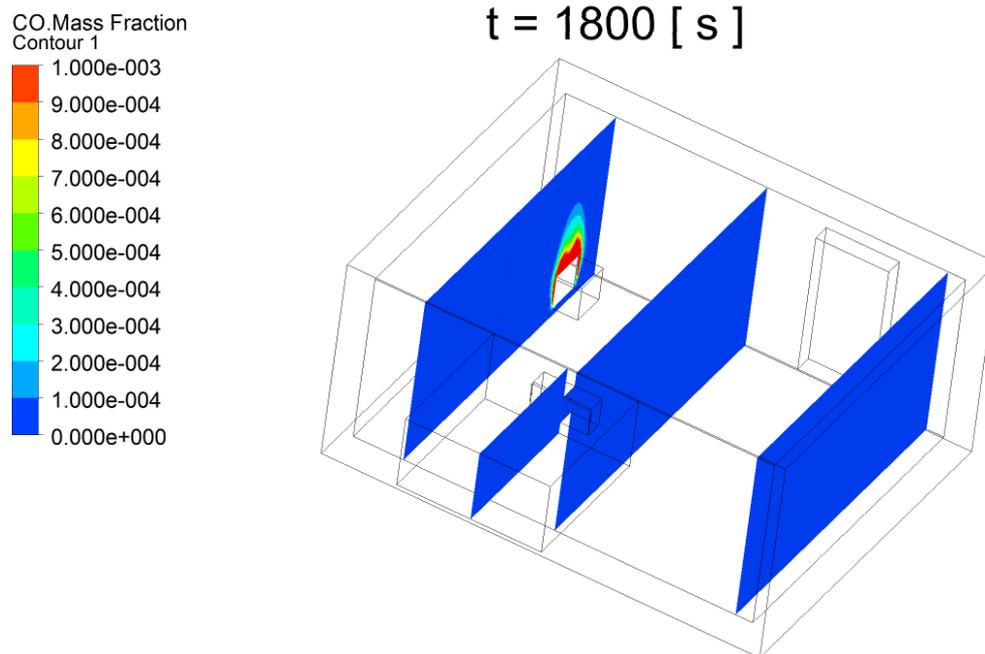


Abbildung 19: CO-Konzentration nach 30min.

Nur im Nahbereich des Brandes liegt die CO-Konzentration bei etwas über 1%. Es steht noch genügend Sauerstoff zur Verfügung, dass CO praktisch vollständig zu CO₂ oxidiert.

3.4.1. Die Tür ist komplett geöffnet

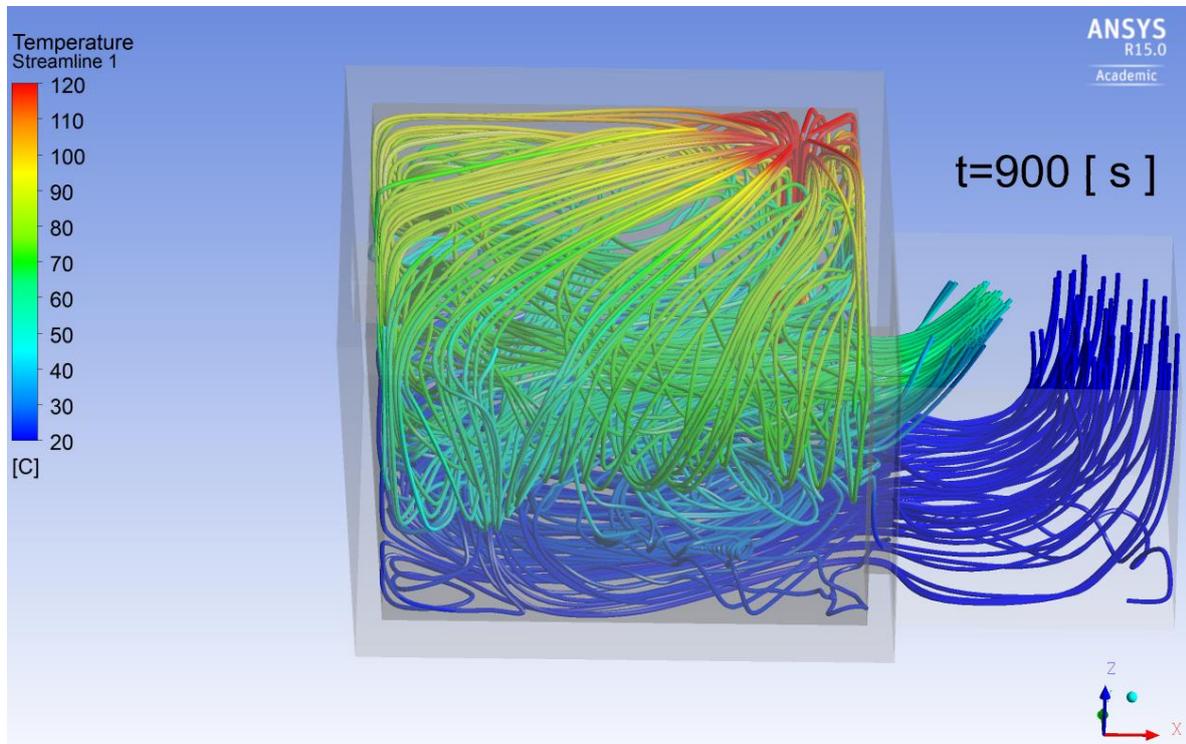


Abbildung 20: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$

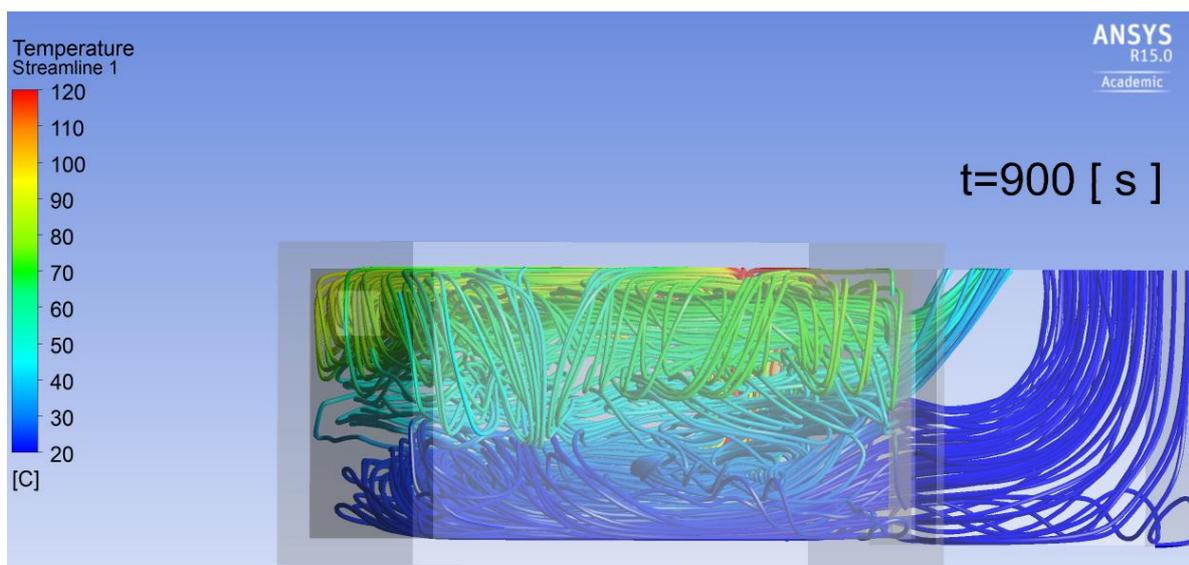


Abbildung 21: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht

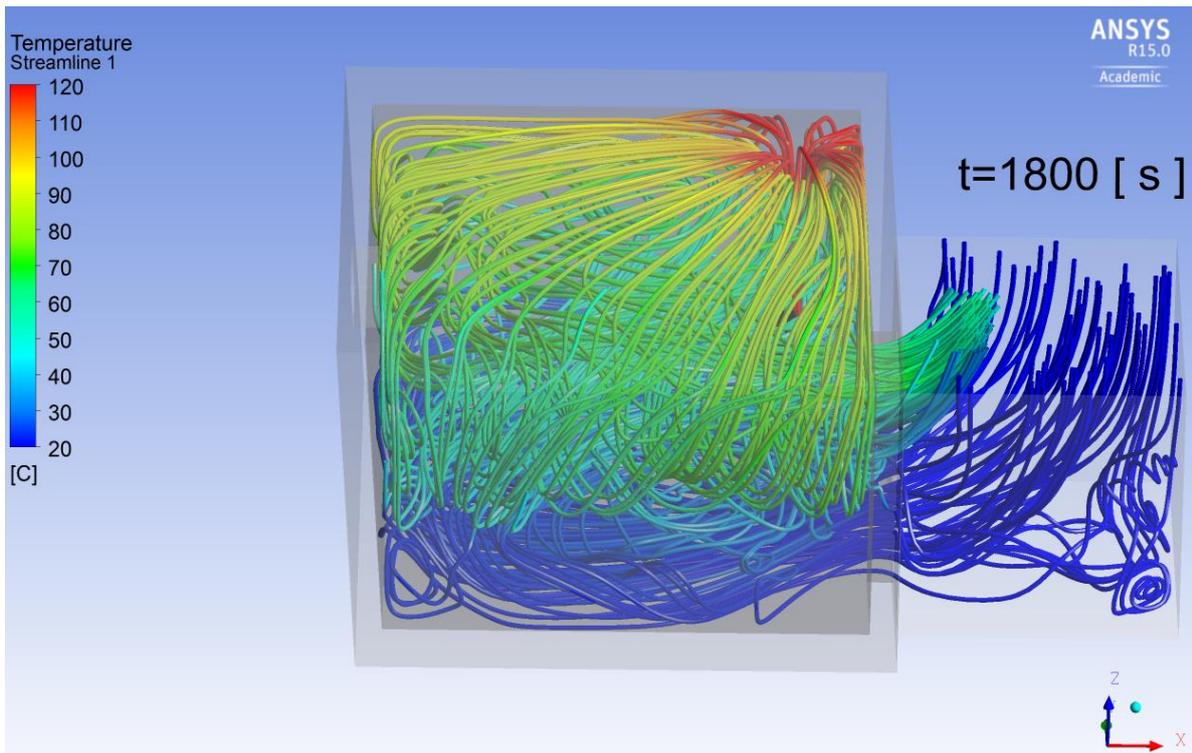


Abbildung 22: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt t=30min

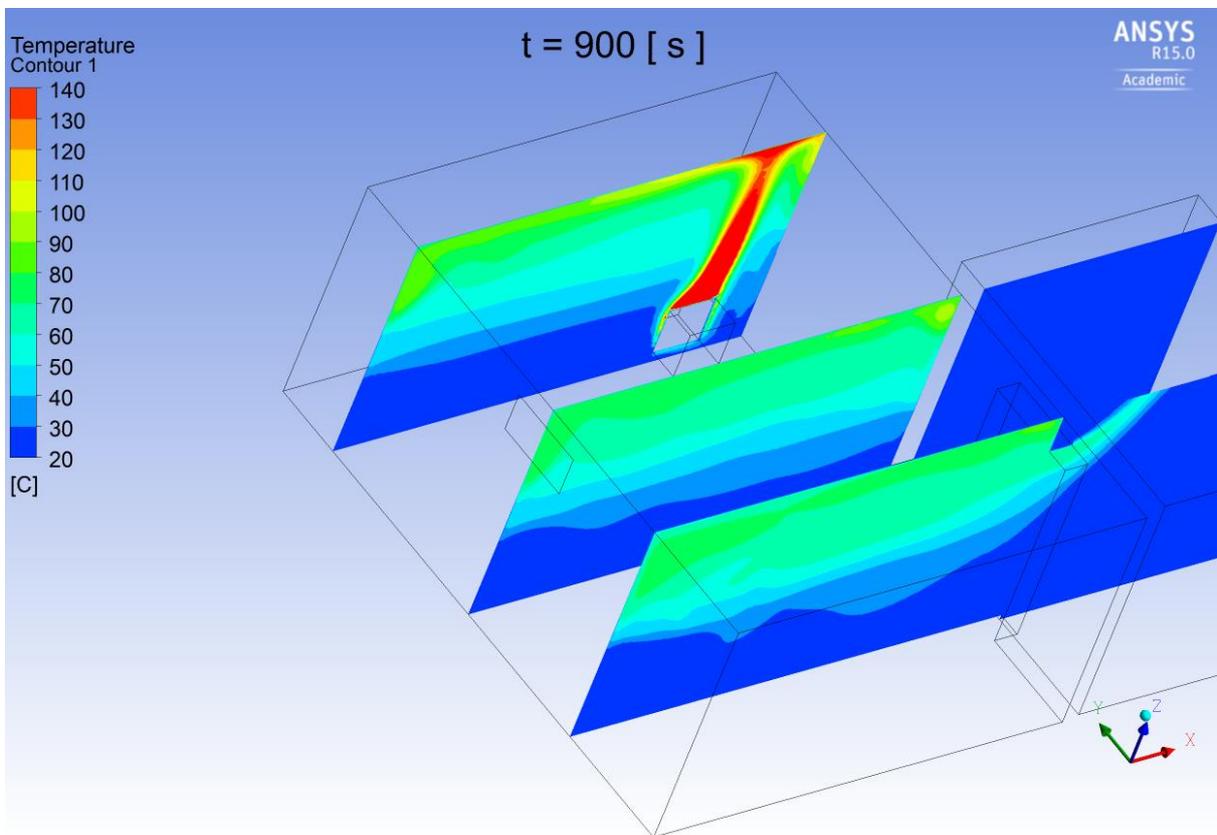


Abbildung 23: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt t=15min

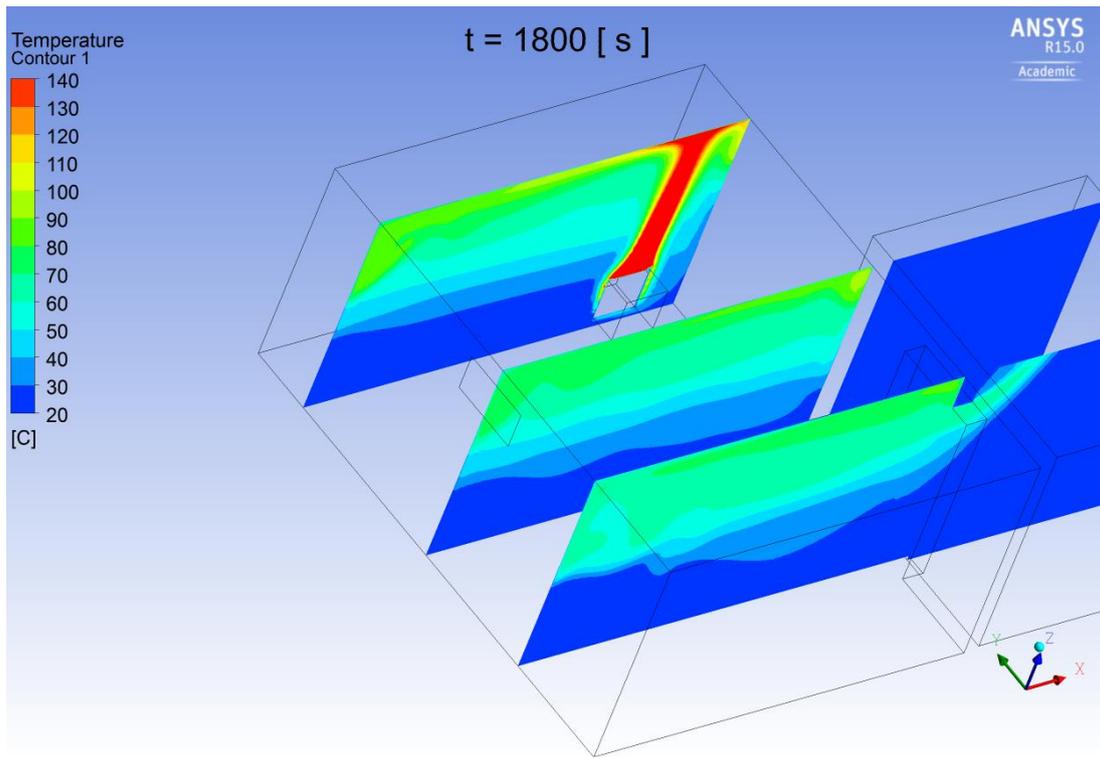


Abbildung 24: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$

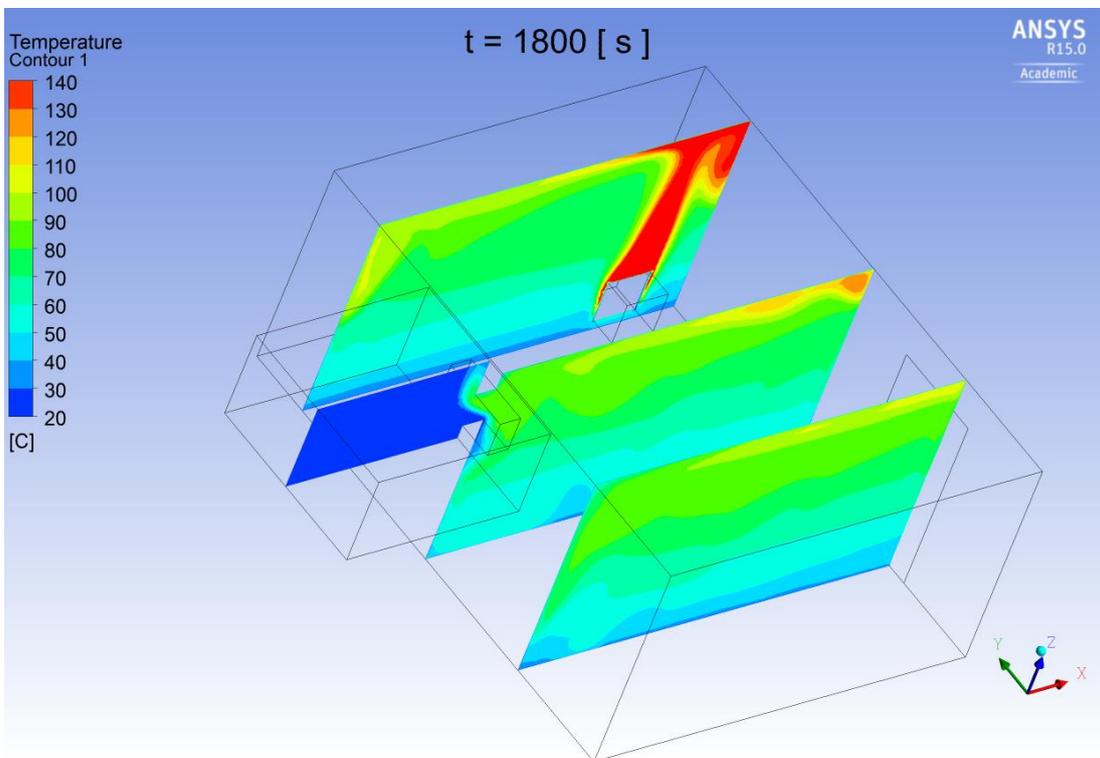


Abbildung 25: Zum Vergleich: Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$ bei geöffnetem Oberlicht

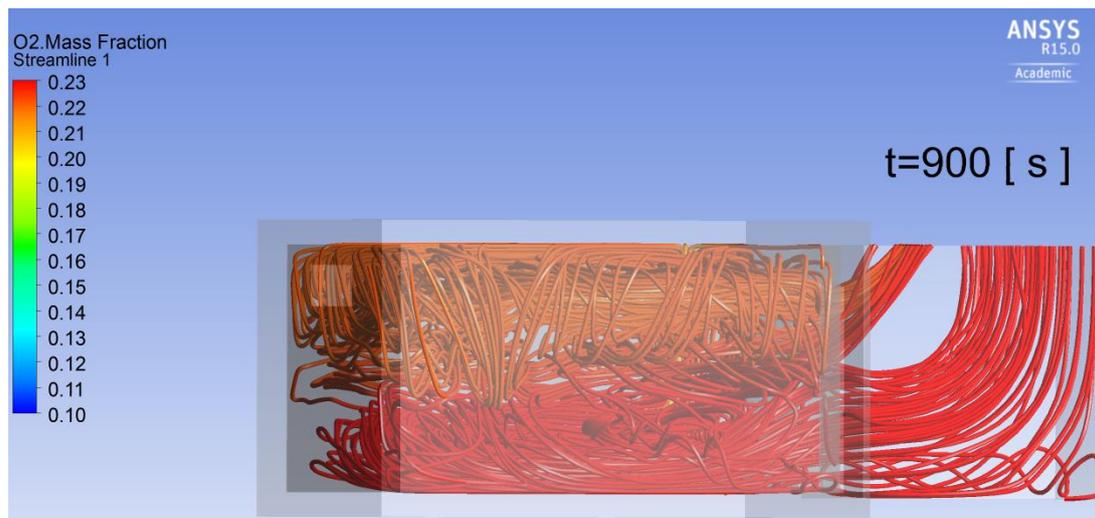


Abbildung 26: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15$ min

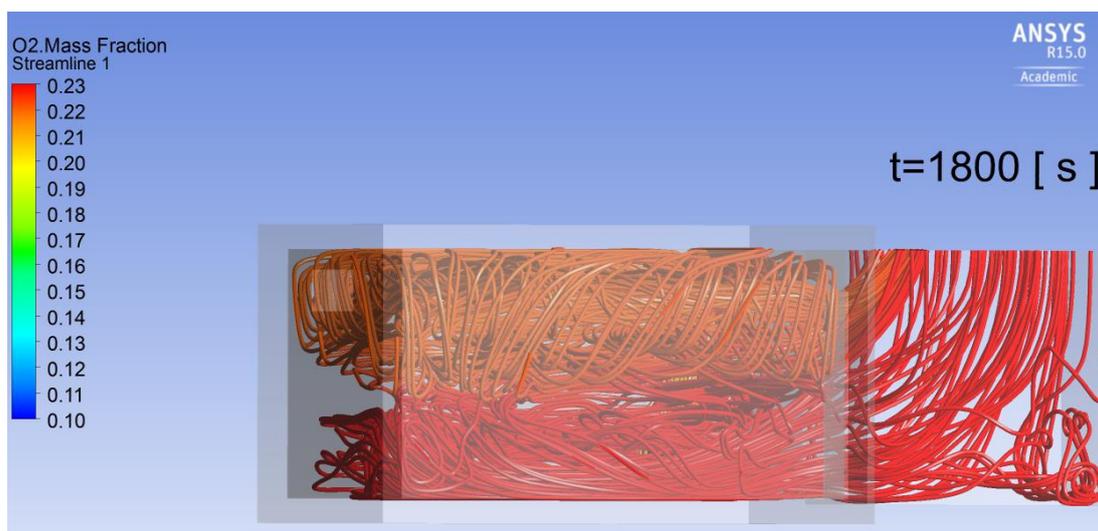


Abbildung 27: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30$ min.

Die Sauerstoffkonzentration ist in der oberen Raumhälfte auf lediglich rund 20 Volumenprozent reduziert entsprechend einer Luftzahl von rund 20. Durch die offene Tür kann also mehr als genug Verbrennungsluft einströmen.

Die Temperaturen sind bei offener Tür niedriger als bei geöffnetem Oberlicht, weil viel Luft durch die Tür einströmt und dadurch auch mehr verdünntes Abgas ausströmt. Zum einen ist die Verbrennungstemperatur wegen der hohen Luftzahl niedriger und zum anderen wird durch die hohen Frischluft- bzw. Abgasströme Wärme nach außen transportiert.

3.4.2. Das Fenster und die Tür sind geöffnet

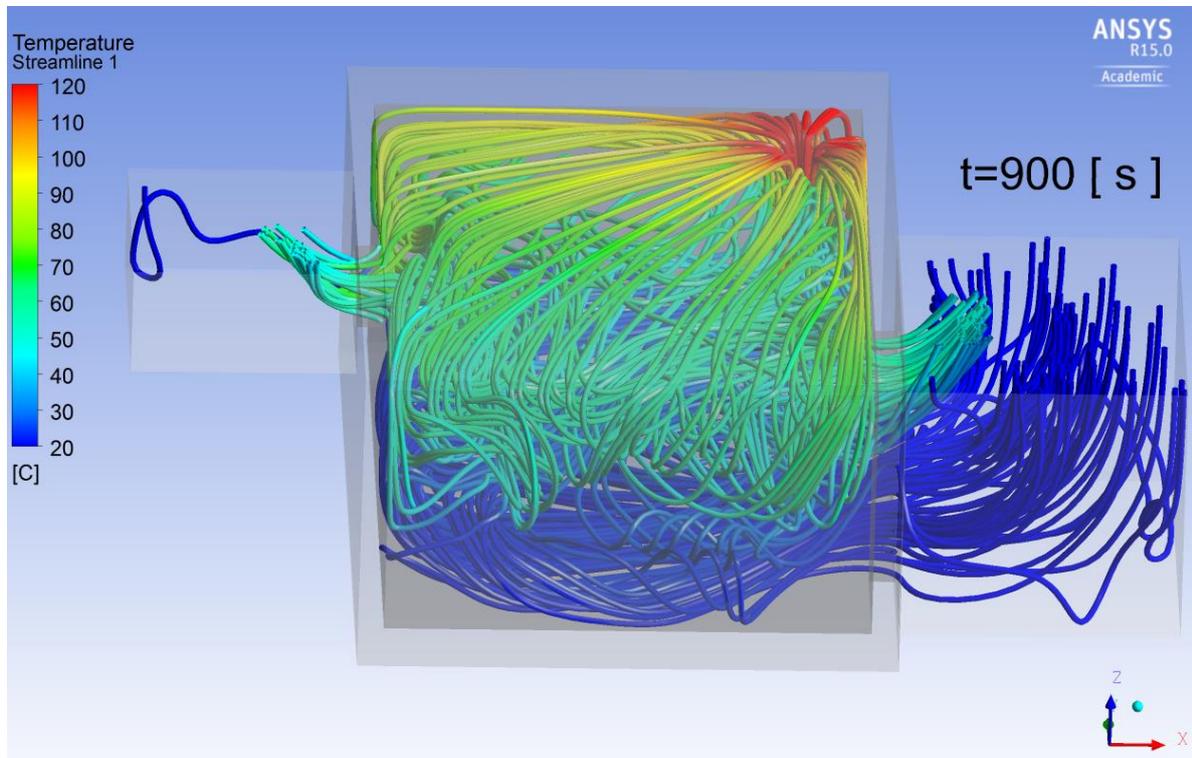


Abbildung 28: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$

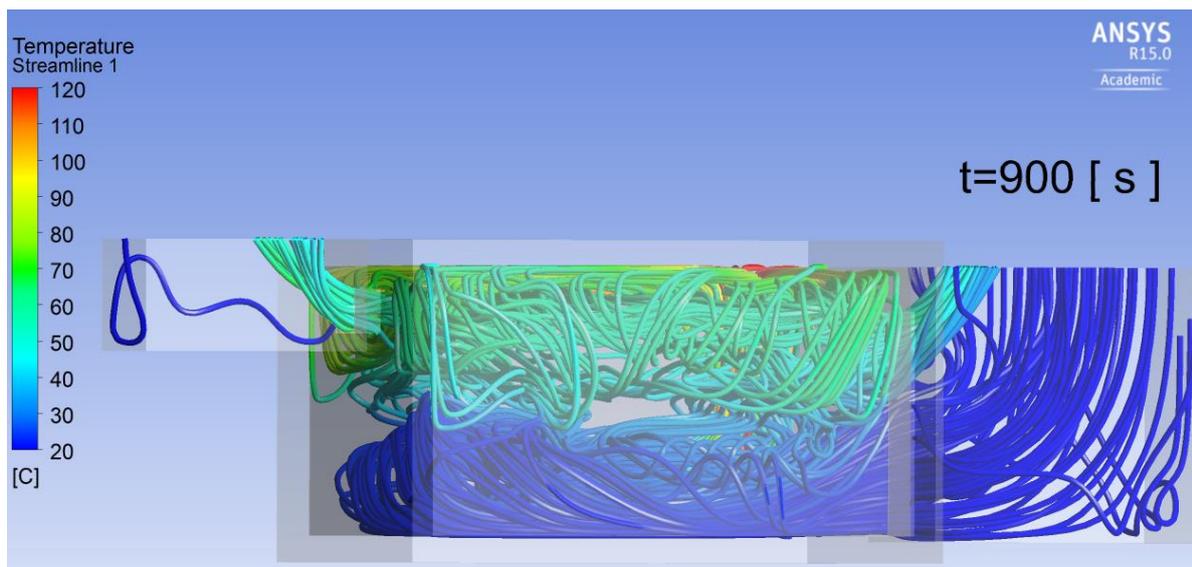


Abbildung 29: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht

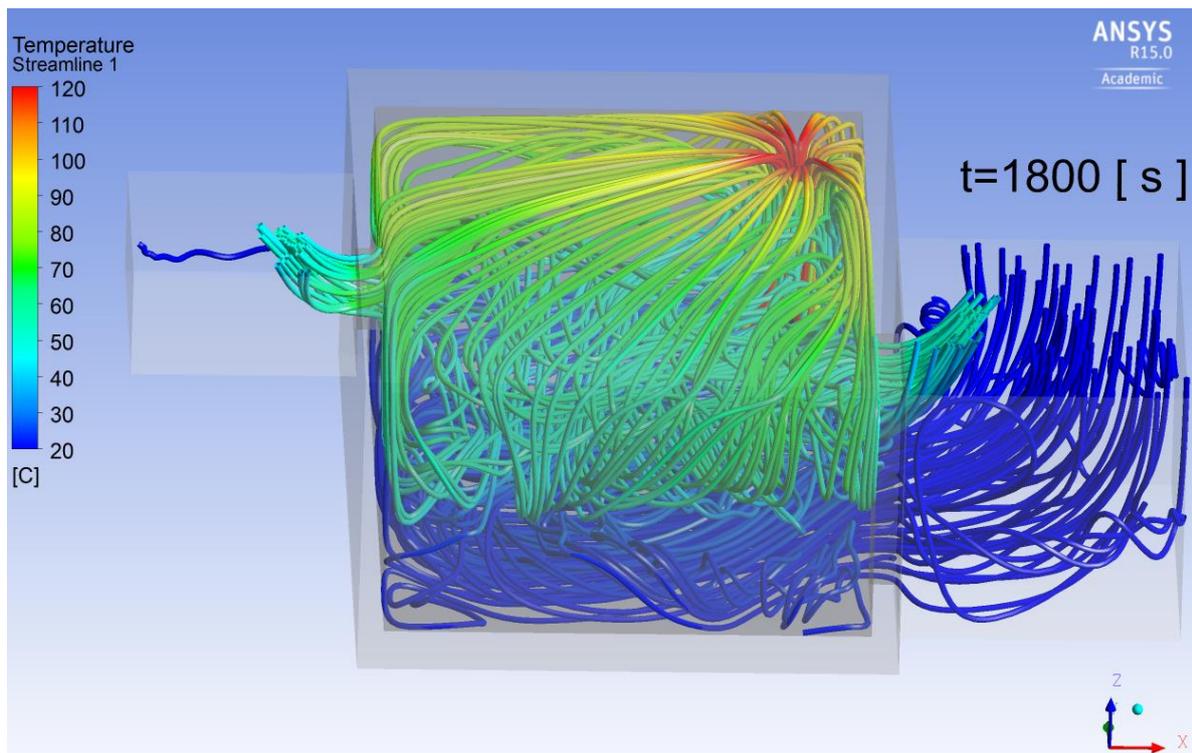


Abbildung 30: Temperaturgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$

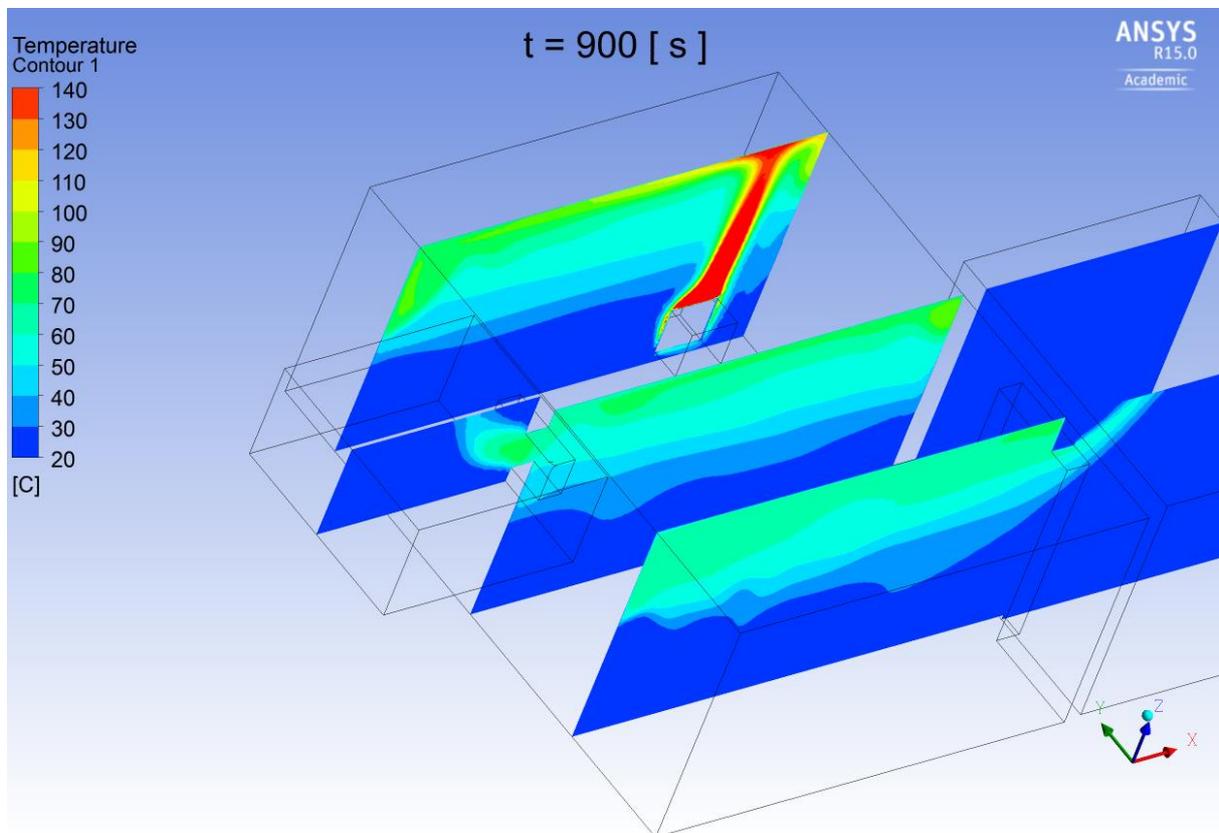


Abbildung 31: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$

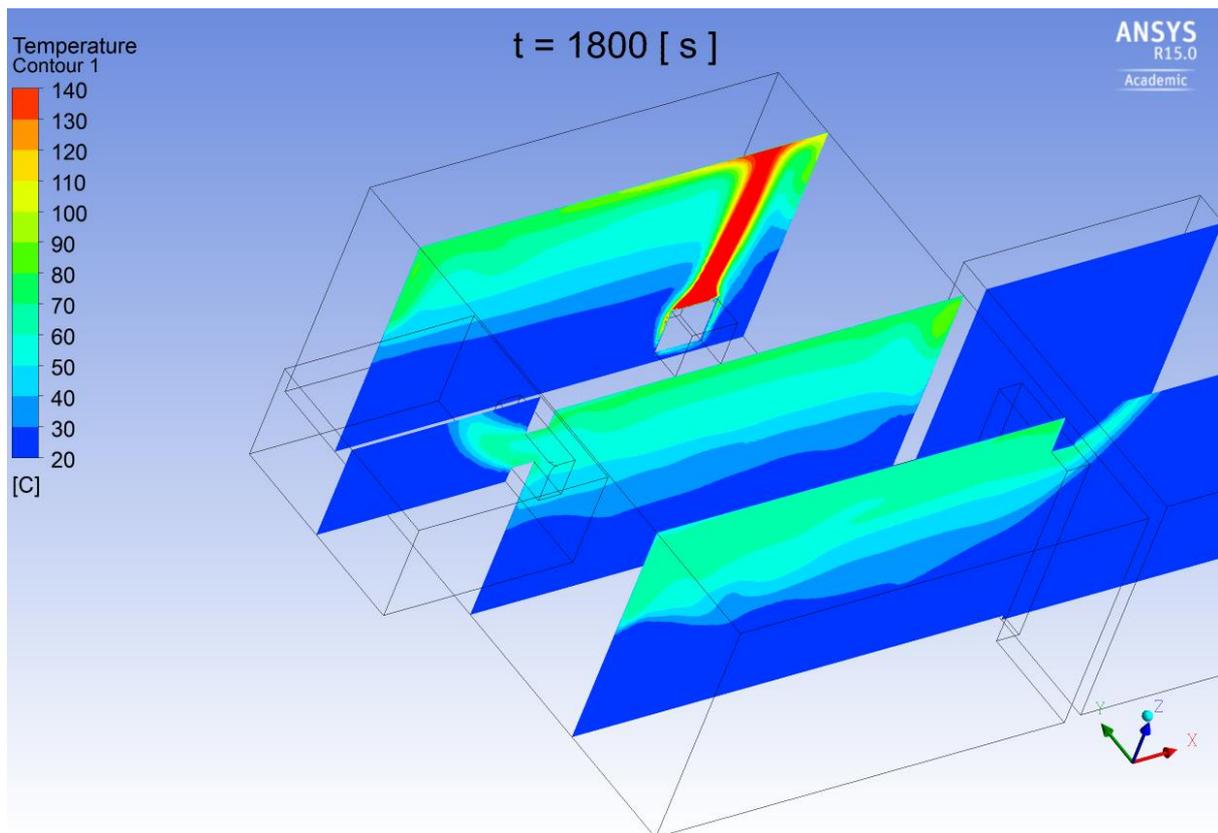


Abbildung 32: Längsschnitte der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$

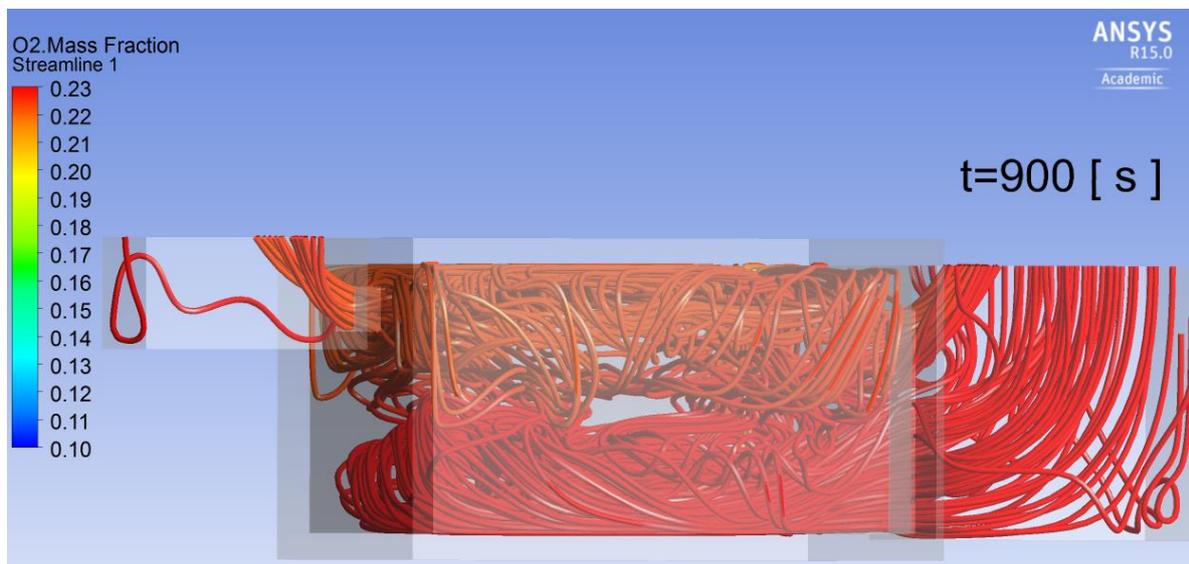


Abbildung 33: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=15\text{min}$

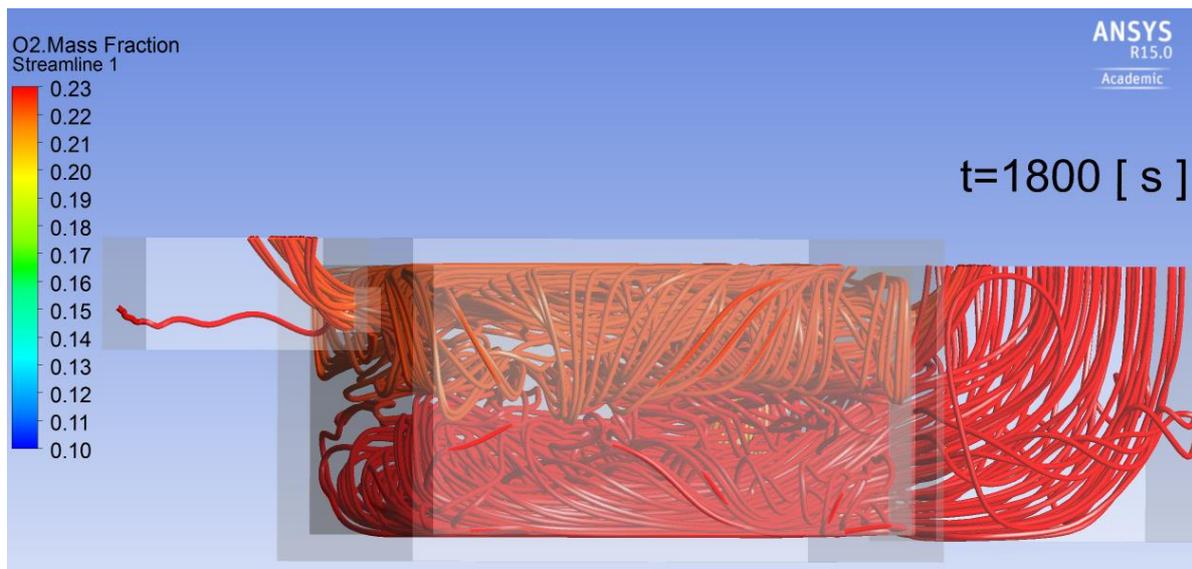


Abbildung 34: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30$ min

Für diesen Fall gilt praktisch dasselbe wie bei geöffneter Tür: Es findet eine hohe Frischluftzufuhr statt und die Temperaturen sind moderat.

3.5. Teilweise verschlossene Tür bei HRR 50kW

Im folgenden Teil wird die Wirkung eines Verschlusses gezeigt, der in der Tür angebracht ist. Bei der Simulation wird jetzt nicht mehr die zeitliche Entwicklung der Temperatur- und Strömungsverhältnisse berechnet, sondern der stationäre Zustand wird berechnet. Da sich zuvor gezeigt hat, dass bei genügend Luftzufuhr kaum zeitliche Änderungen bei der Innentemperatur auftreten kann der stationäre Fall berechnet werden. Der Vorteil liegt in der Verkürzung der Rechenzeit von mehreren Tagen auf wenige Stunden.

3.5.1. Obere Hälfte der Tür verschlossen und Fenster offen

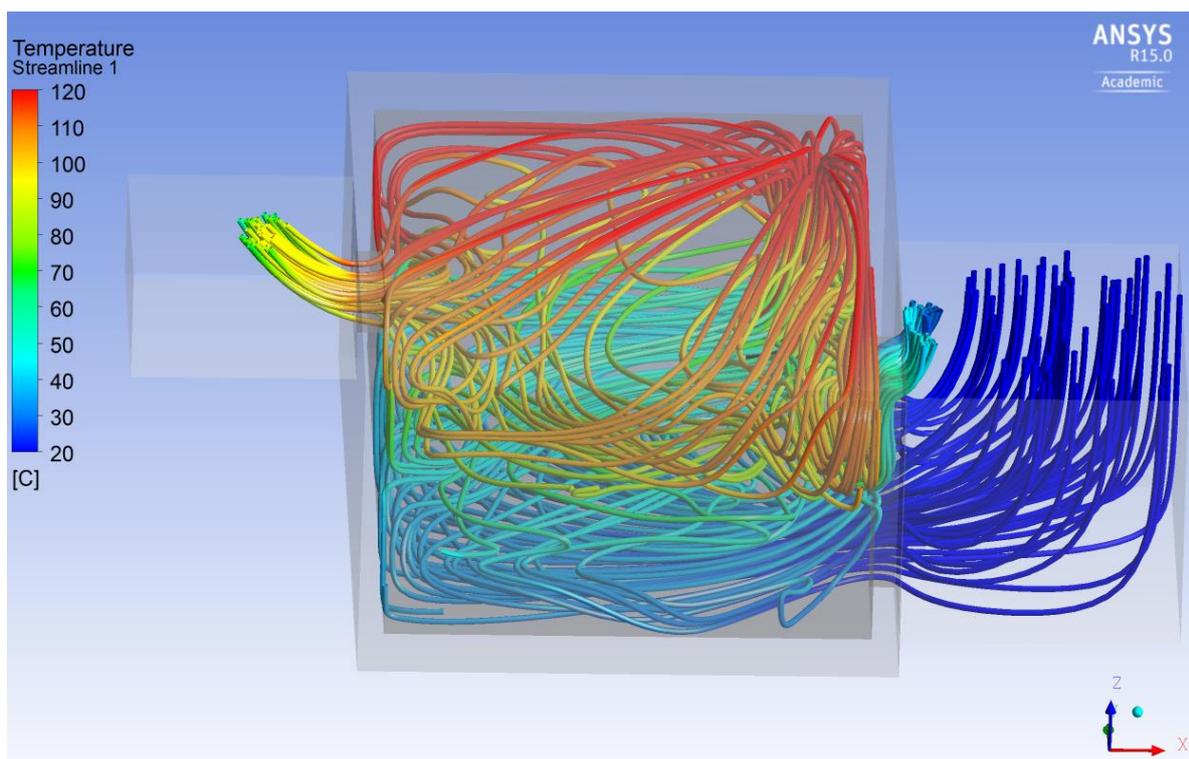


Abbildung 35: Temperaturgefärbte Stromlinien bei 50% (obere Hälfte) verschlossener Tür.

Luft strömt zur Tür ein, Abgas strömt hauptsächlich durch das Oberlicht und zu einem geringen Teil durch die Tür aus

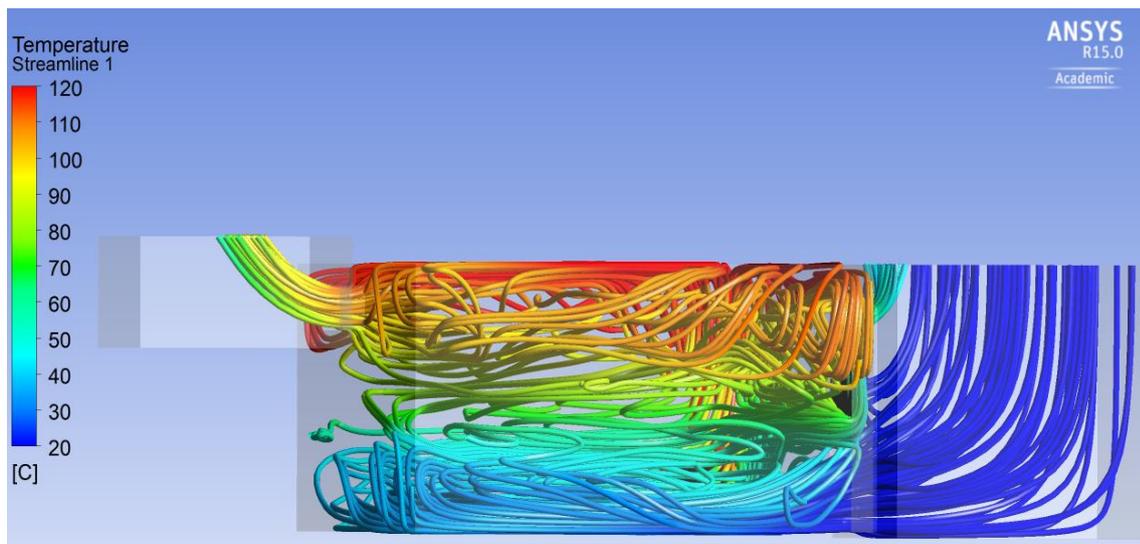


Abbildung 36: Wie vorige Abbildung aber andere Ansicht

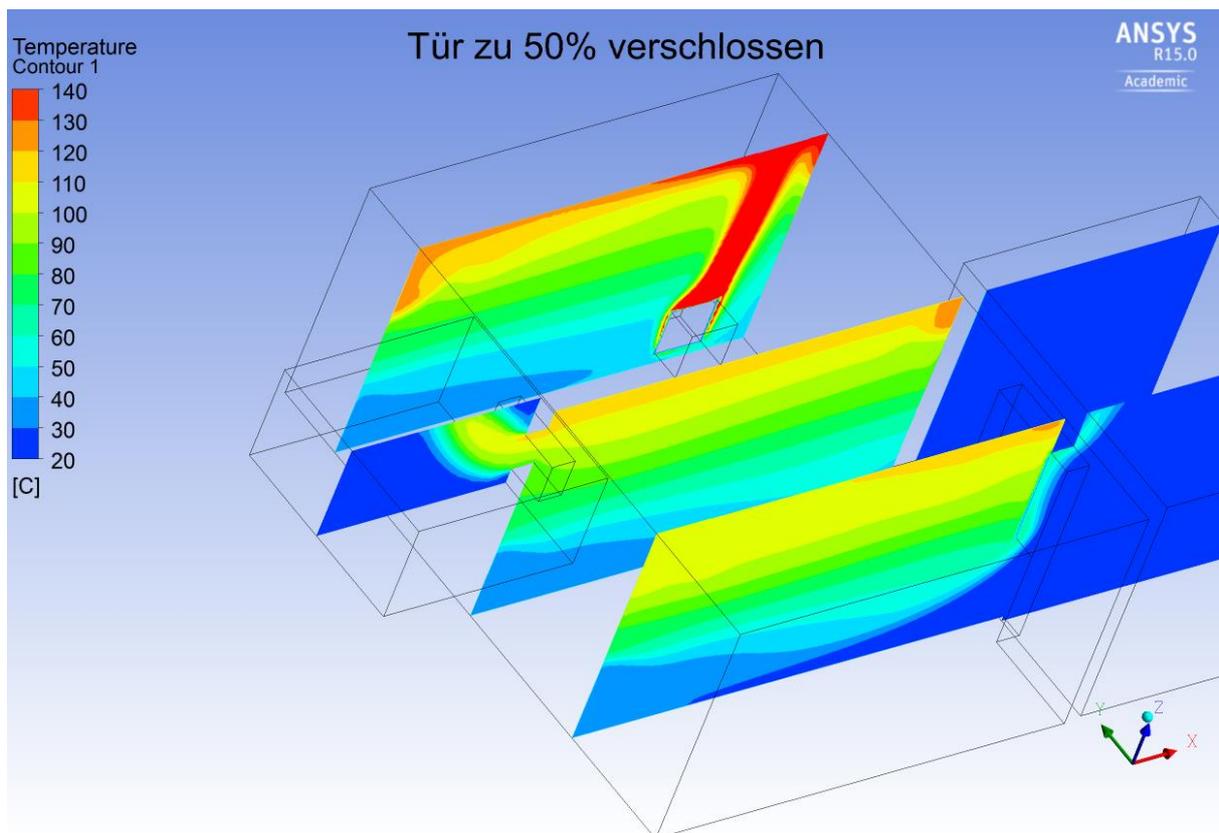


Abbildung 37: Längsschnitte der Temperaturverteilung

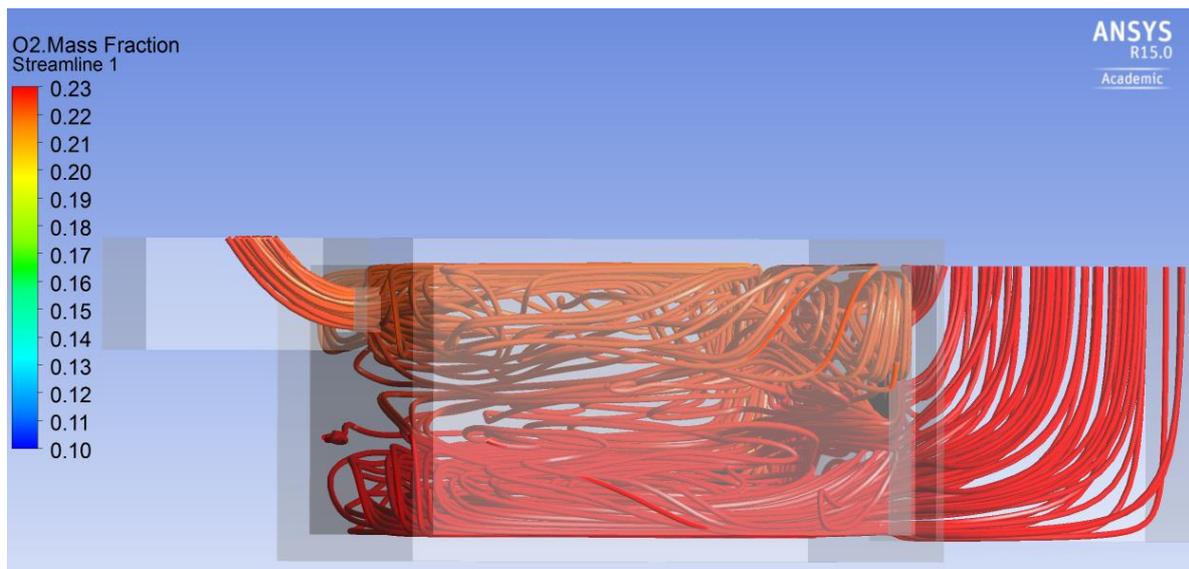


Abbildung 38: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien

Ist nur die obere Hälfte der Tür verschlossen strömt ein kleiner Anteil des Abgases durch die Tür. Durch das Oberlicht strömt keine Frischluft mehr ein. Die Temperaturen am Boden bleiben auf Dauer sehr niedrig.

3.5.2. Tür zu 75% verschlossen und Fenster offen

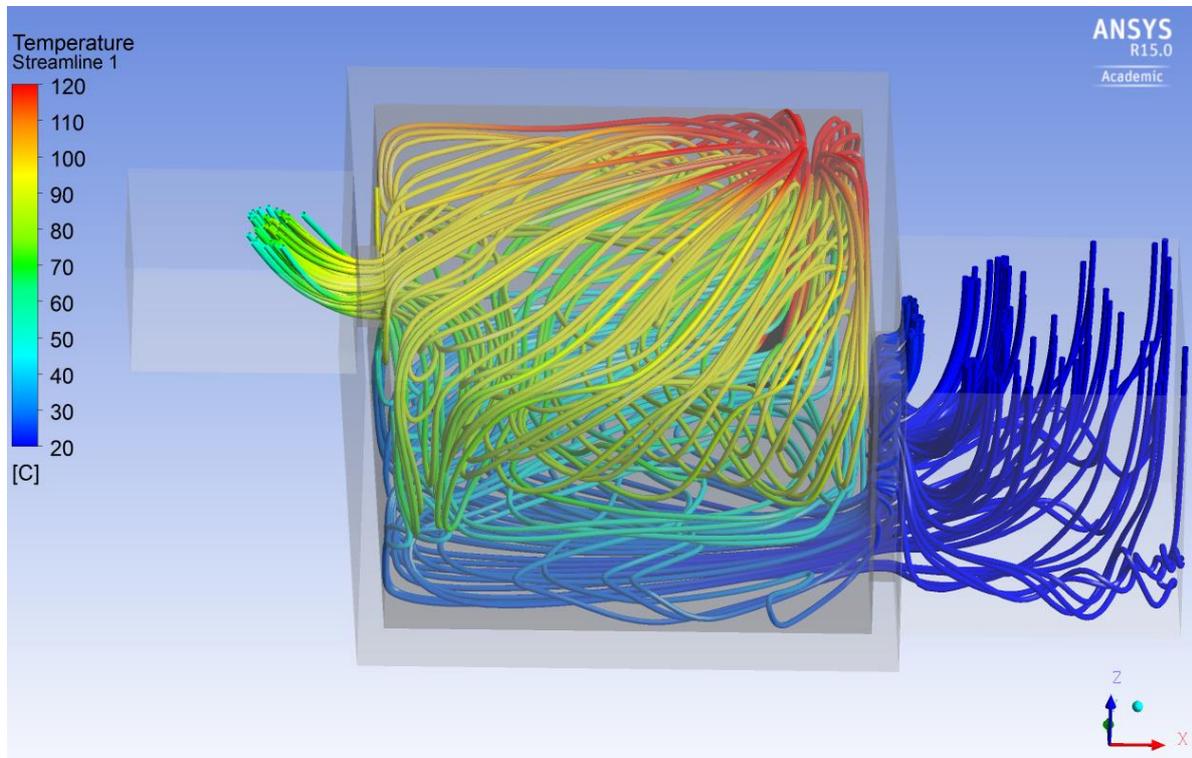


Abbildung 39: Temperaturgefärbte Stromlinien. Luft strömt zur Tür ein und das Abgas strömt ausschließlich durch das Oberlicht ins Freie

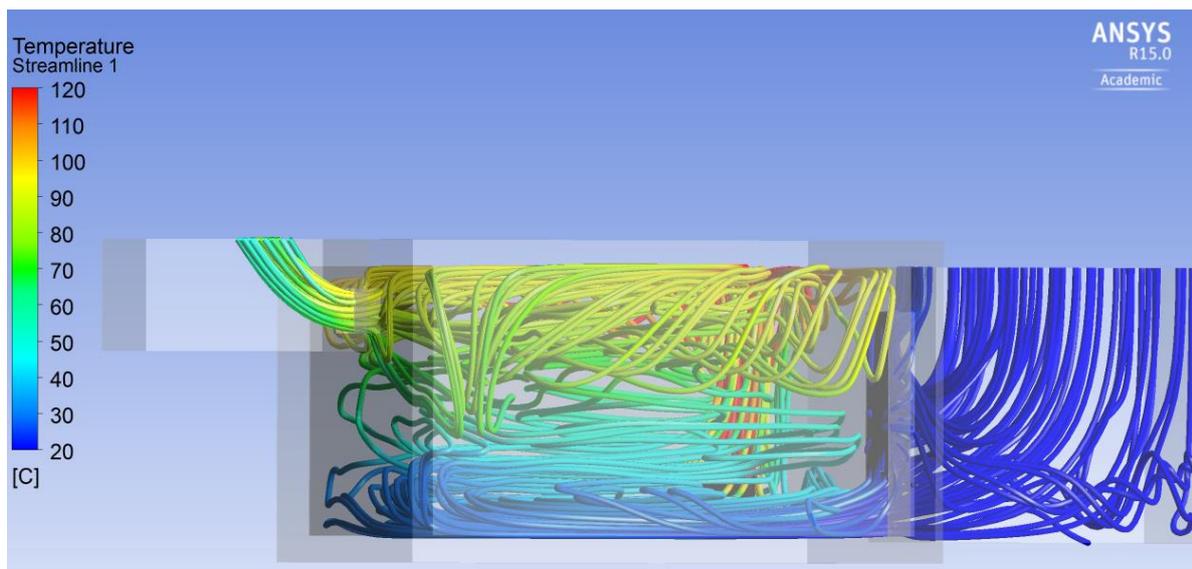


Abbildung 40. Wie Abb. 39 aber andere Ansicht

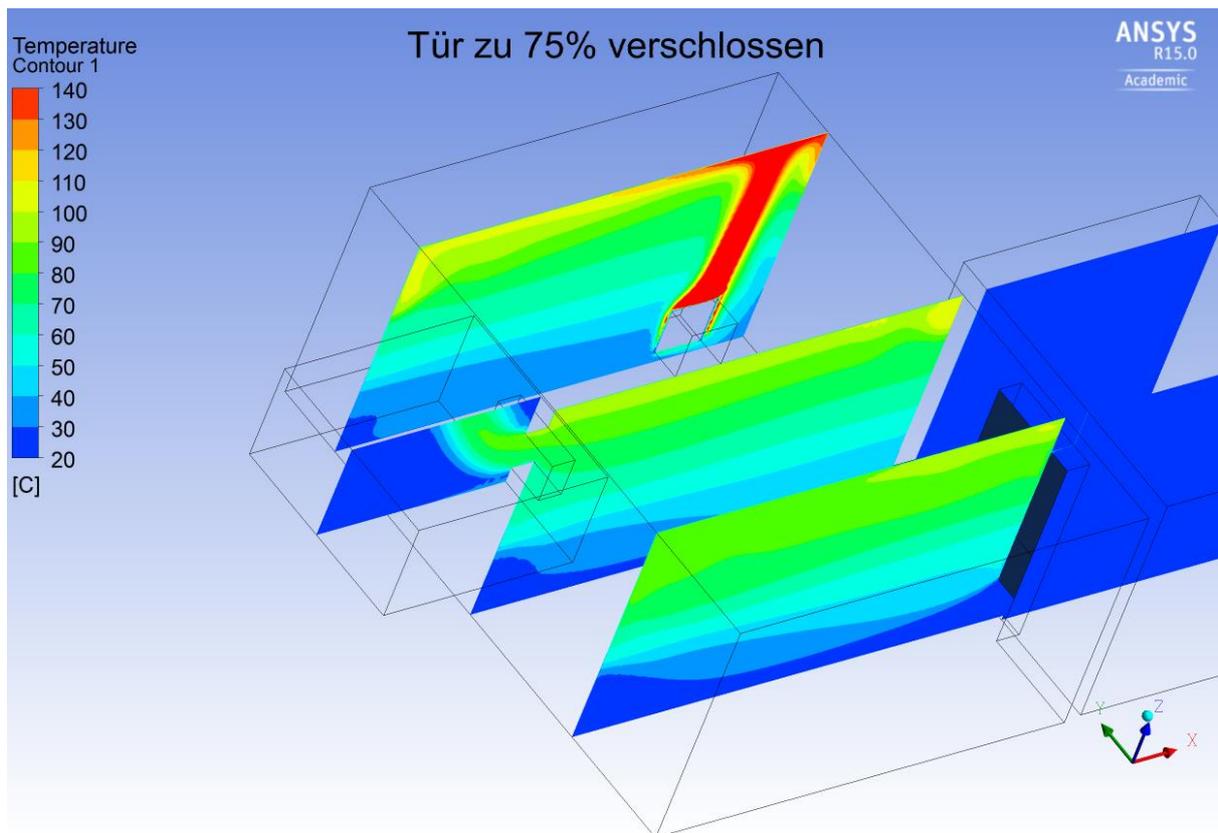


Abbildung 41: Längsschnitte der Temperaturverteilung

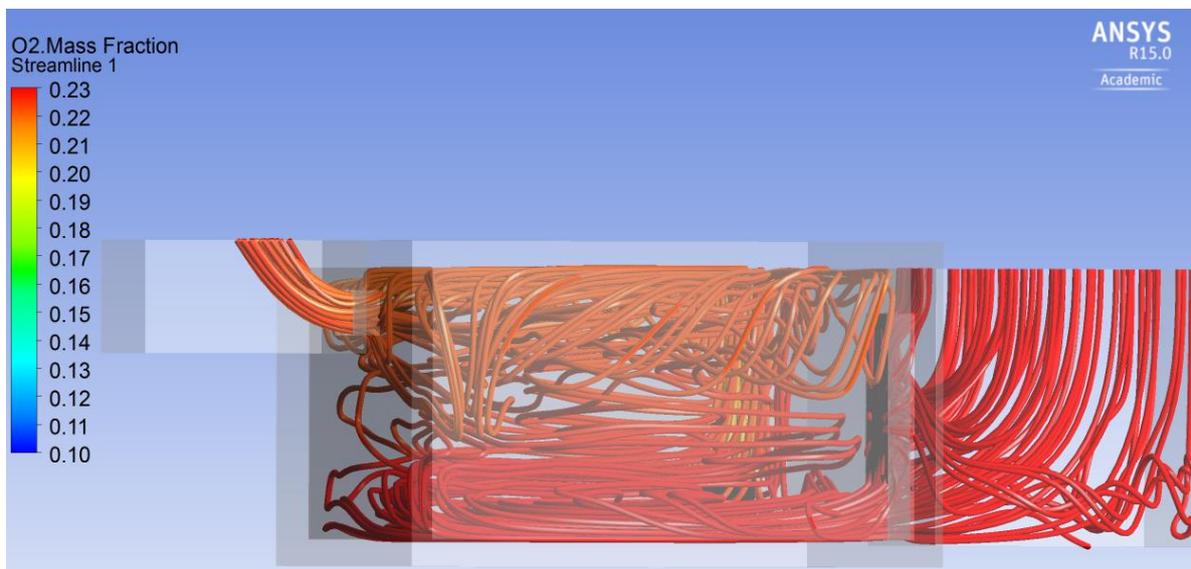


Abbildung 42: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien zum Zeitpunkt $t=30\text{min}$

Ähnlich wie bei 50% Verschluss, aber jetzt strömt das Abgas ausschließlich zum Oberlicht aus.

3.5.3. Tür zu 50% verschlossen und Fenster geschlossen

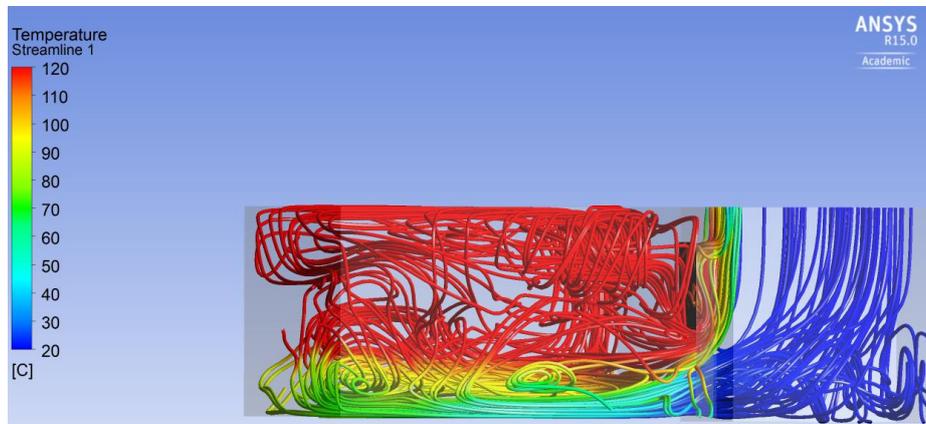


Abbildung 43: Temperaturgefärbte Stromlinien. Luft strömt zur Tür ein, Abgas aus.

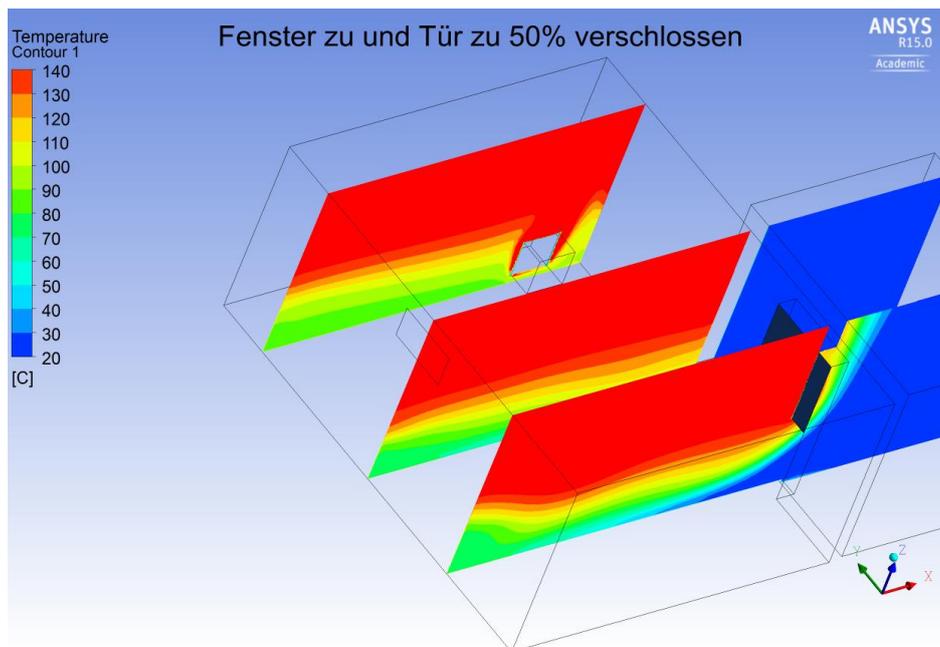


Abbildung 44: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Raum.

Fazit

Was einströmt muss auch wieder ausströmen: Soll durch einen teilweisen Verschluss der Tür verhindert werden, dass Rauch austritt, muss eine Öffnung im Brandraum vorhanden sein, durch die das Abgas ausströmen kann. Diese Öffnung muss im Raum höher sein als die Höhe der Unterkante des Verschlusses.

4. Temperaturen in der Wand

Bei einem moderaten 50kW - Brand heizt sich die Innenseite der 240mm dicken Betondecke unmittelbar über der Brandquelle nach einer halben Stunde auf knapp 90°C auf. Auf der Außenseite und auf dem Boden des darüberliegenden Raumes ist keine Temperaturerhöhung zu messen.

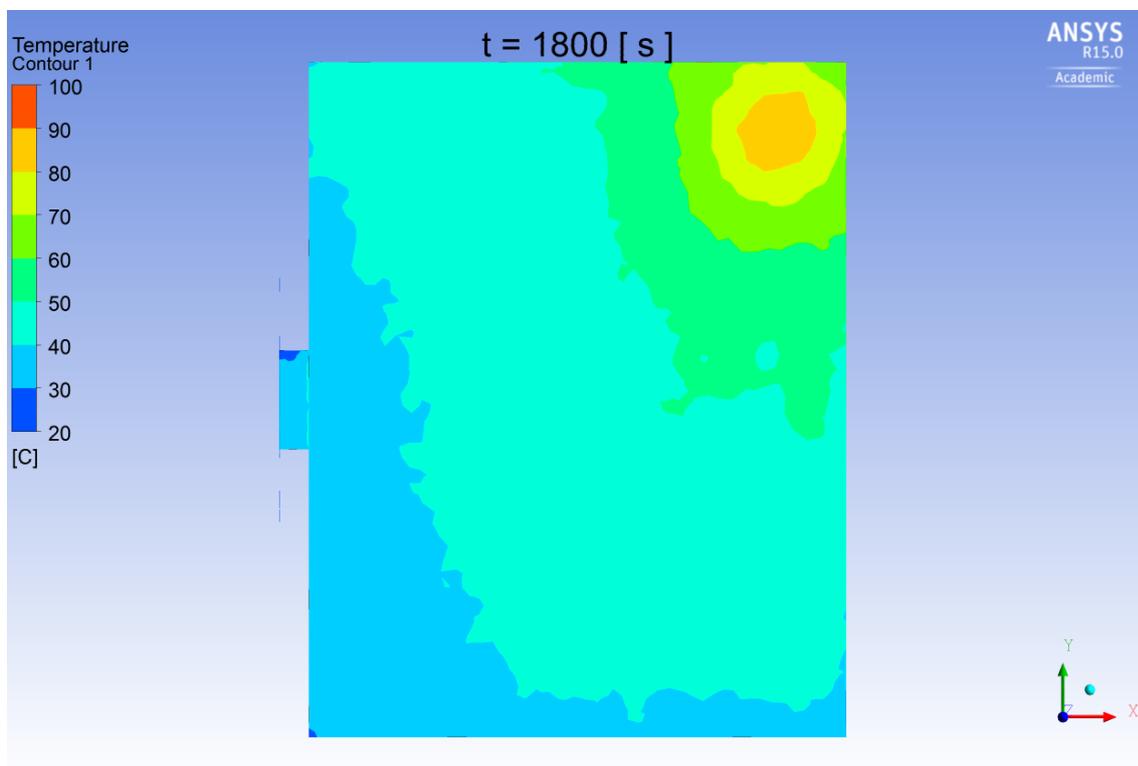


Abbildung 45: Temperatur auf der Innenseite der Decke nach 30min,

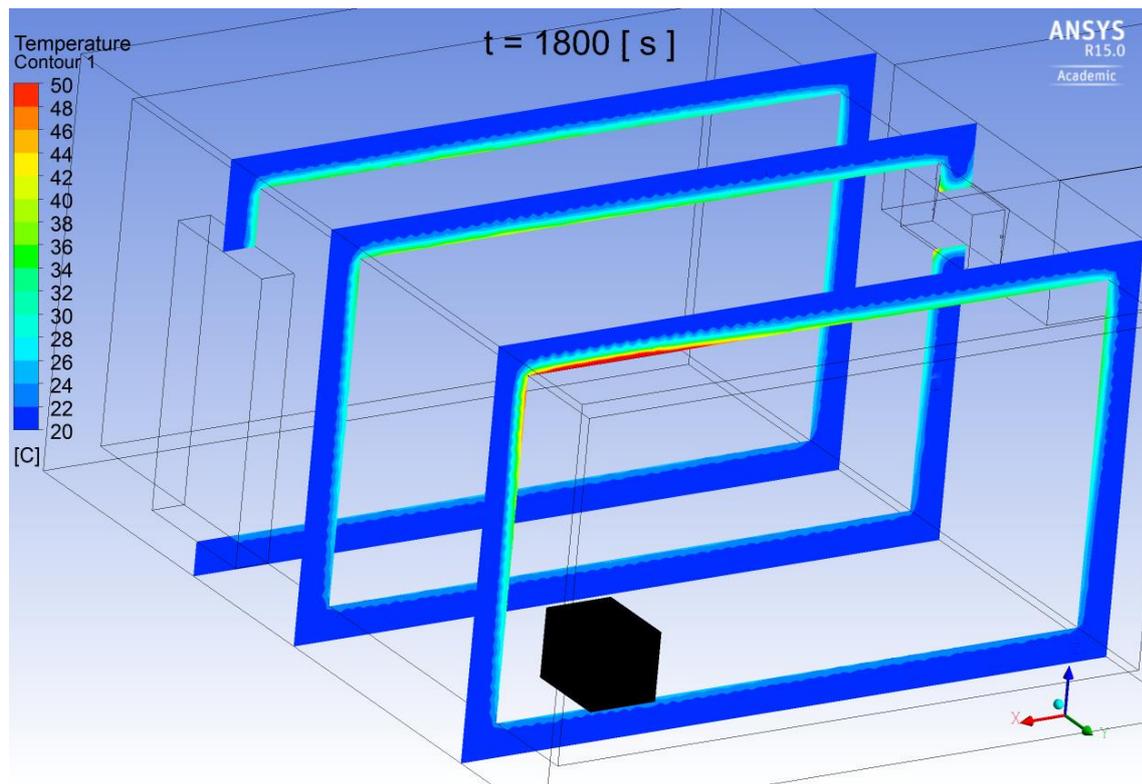


Abbildung 46: Längsschnitte der Temperaturverteilung im Beton

Aufgrund der geringen Temperaturleitfähigkeit (s. Anhang 9.2) von Beton (und auch von Mauerwerk wie Ziegelsteinen oder Poroton) ist es ausgeschlossen, dass innerhalb von weniger als 1-2 Stunden nach Brandbeginn von außen z. B. mit Hilfe einer Wärmebildkamera der Brandherd lokalisiert werden kann.

Da ein Kellerraum nur schwer zugänglich ist, wäre es eine mögliche alternative Vorgehensweise zum Innenangriff, wenn mit Hilfe z.B. einer Wärmebildkamera im Raum drüber am Boden der Brandherd genau lokalisiert werden könnte und an der wärmsten Stelle (genau über dem Brandherd) ein Loch gebohrt und eine Löschlanze eingeführt würde. Selbst bei einem starken Brand dauert es allerdings mindestens eine Stunde, bis eine Temperaturerhöhung am (blanken) Boden im Raum oberhalb des Brandraumes zu erkennen ist. Unabhängig von der nicht unbedingt zu erwartenden Bereitschaft der Wohnungsbesitzer, sich den Bodenbelag zwecks schnellerer Detektierung des Brandherdes entfernen zu lassen, sind die langen (Warte-)Zeiten bis zur erkennbaren Temperaturerhöhung inakzeptabel.

4.1. Maximale HRR bei offenem Fenster

Um die maximale dauerhafte Brandstärke aus der Frischluftzufuhr abzuschätzen werden stationäre, d.h. zeitlich konstante Berechnungen mit unterschiedlicher Methanfreisetzungsraten durchgeführt.

Bei den Berechnungen werden 1 / 2 / 5 und 10gr/s Methan freigesetzt, entsprechend einer maximalen HRR von 50 / 100 / 250 und 500kW. Als äußere Randbedingungen werden bei den Wänden Wärmeübergangskoeffizienten von $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ und eine Umgebungstemperatur von 20°C angesetzt. Die Simulation von large eddies ist bei stationären Berechnungen nicht mehr möglich, stattdessen wird das k- ϵ -Turbulenzmodell verwendet. Die sonstigen Randbedingungen, Materialdaten und Verbrennungsmodelle bleiben gleich.

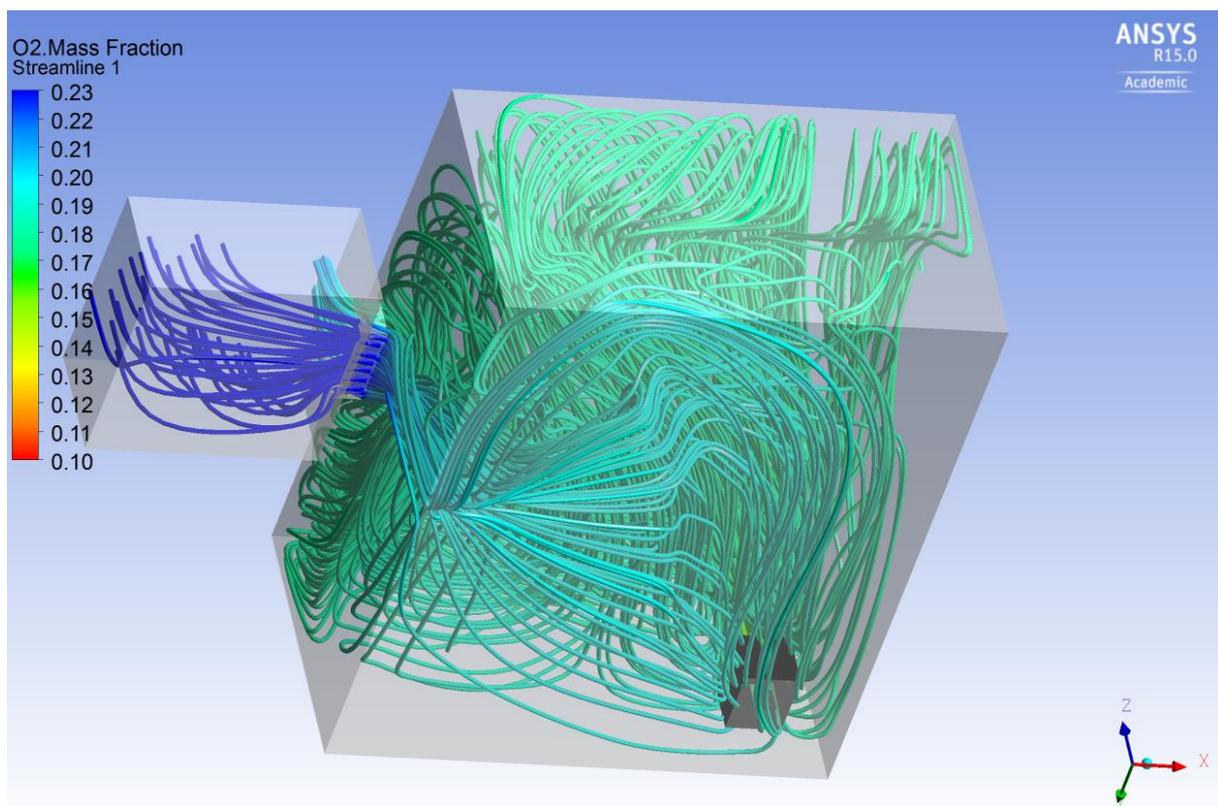


Abbildung 47: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien. HRR 50KW

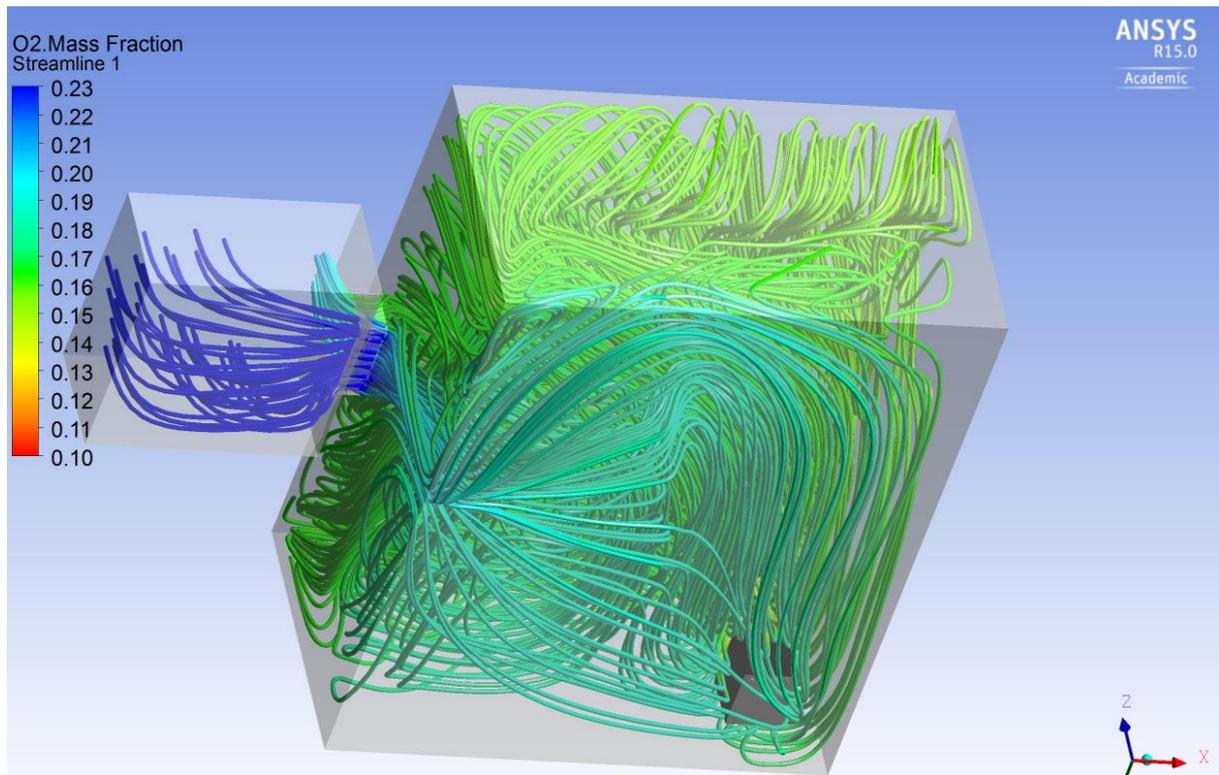


Abbildung 48: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 100kW

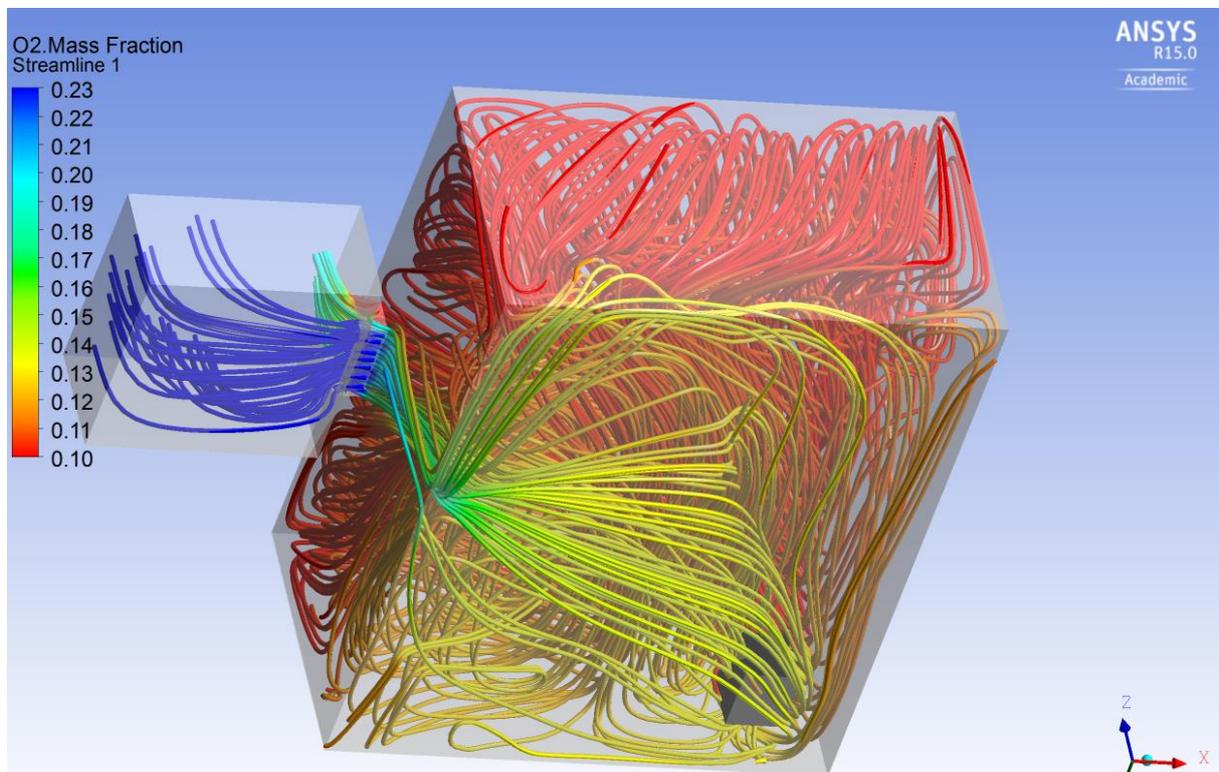


Abbildung 49: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 250kW

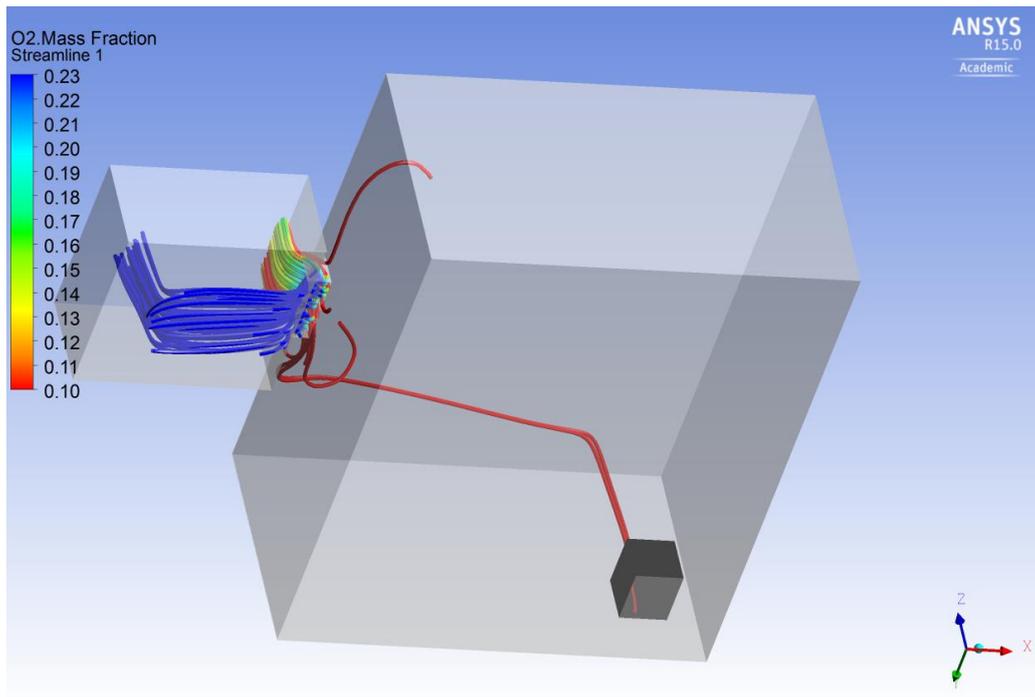


Abbildung 50: Sauerstoffkonzentrationsgefärbte Stromlinien bei HRR 500kW

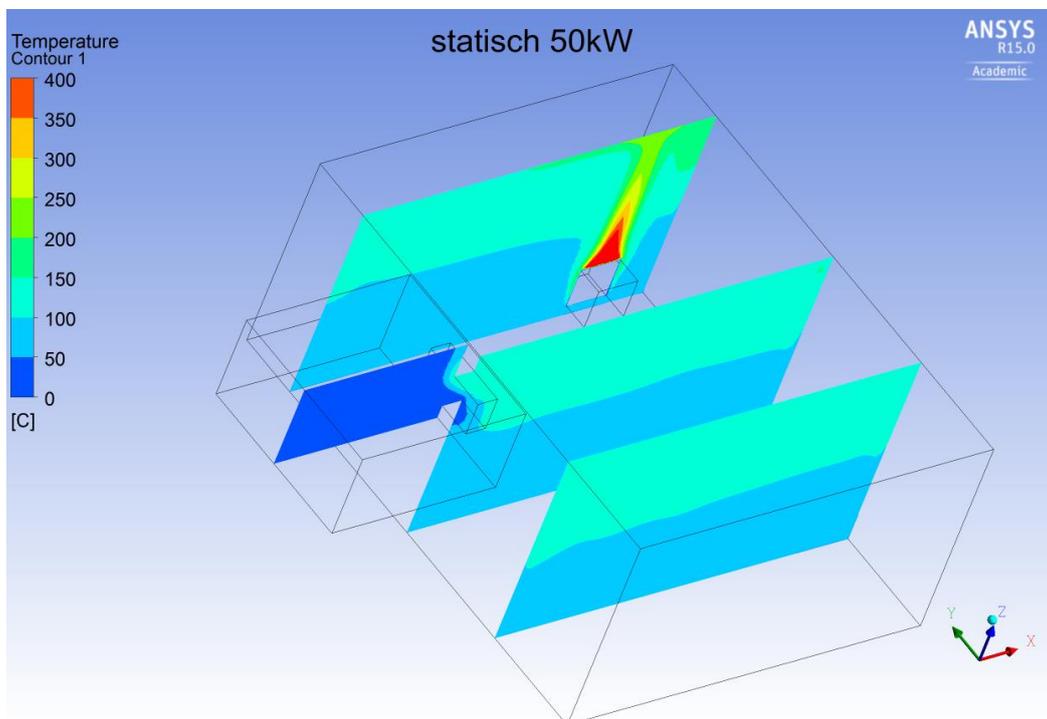


Abbildung 51: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 50kW

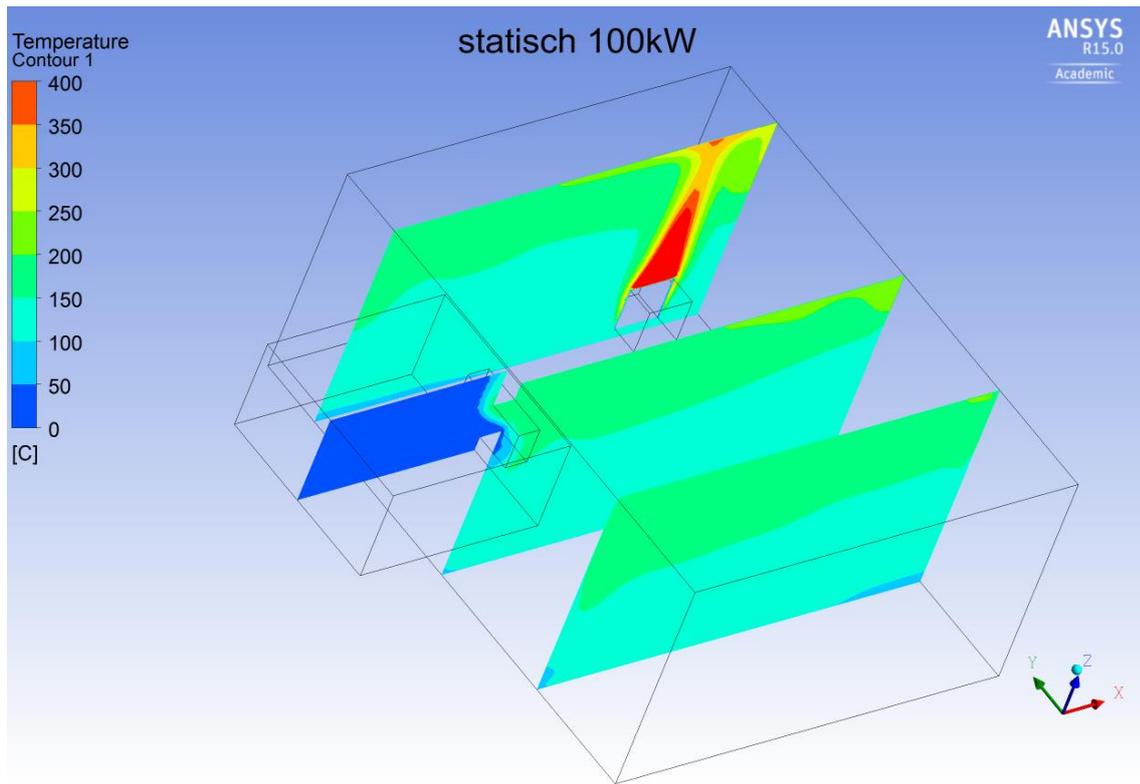


Abbildung 52: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 100kW

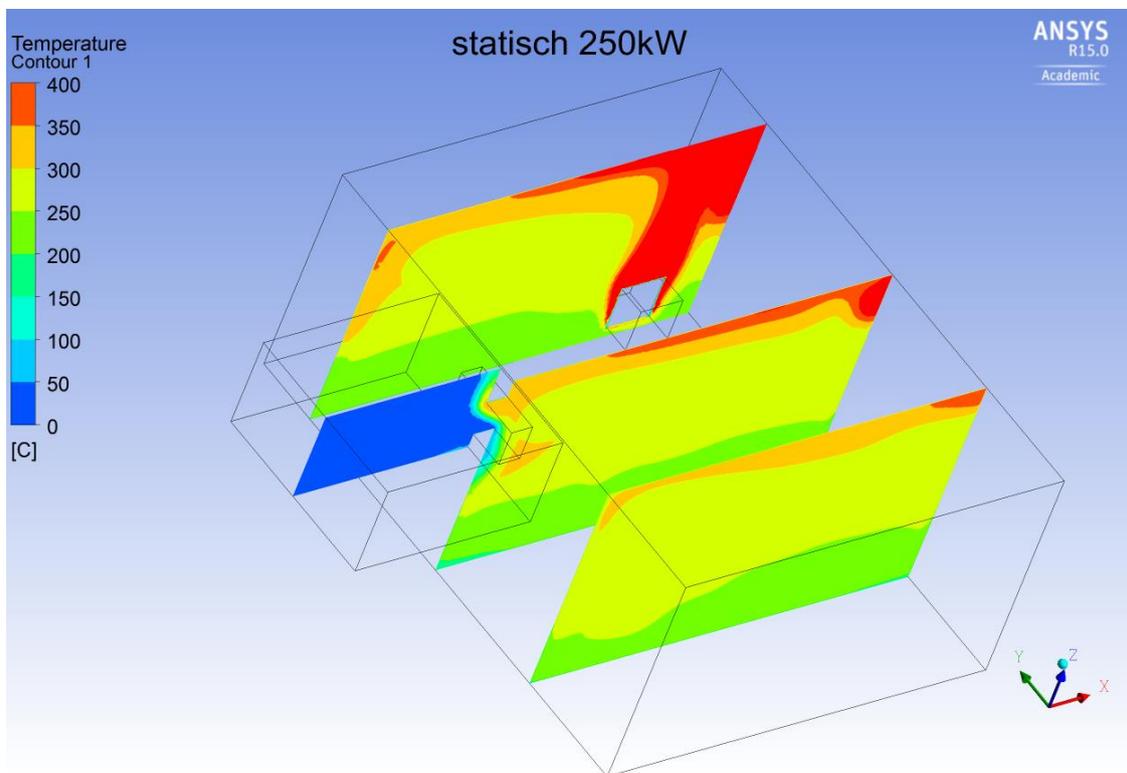


Abbildung 53: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR 250kW

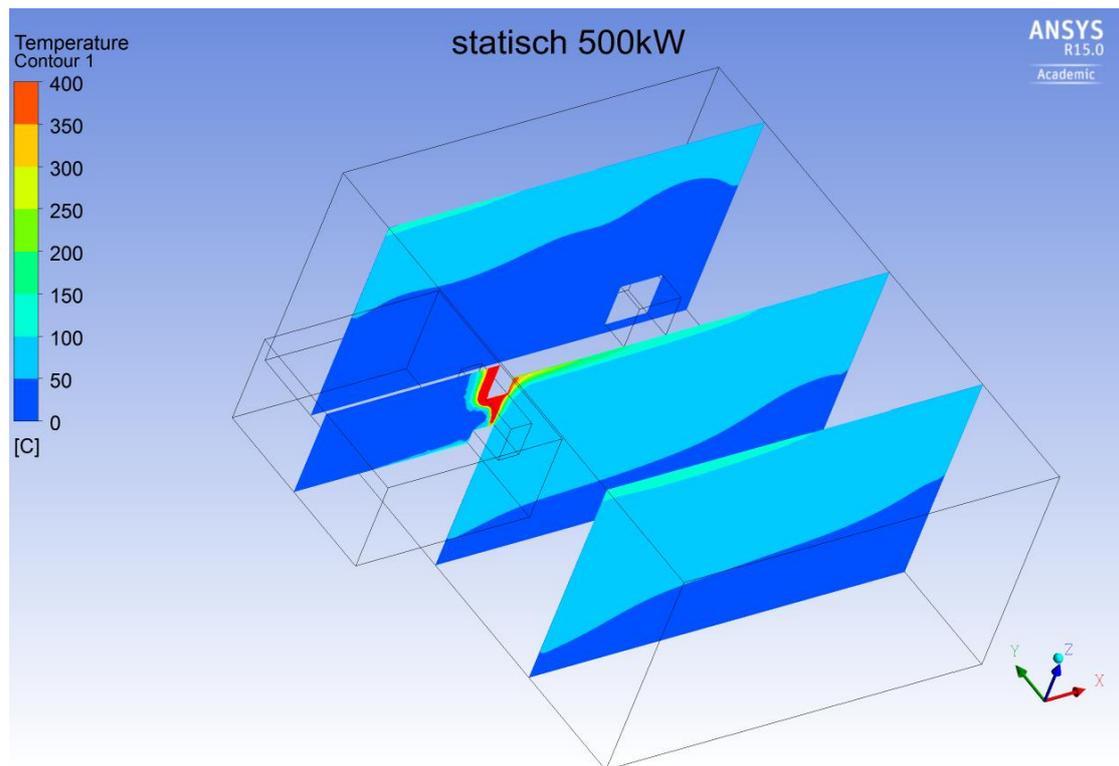


Abbildung 54: Längsschnitte der Temperaturverteilung bei HRR von max. 500kW.

Es tritt rund 25 Liter Methan pro Sekunde (10gr mit 500°C) aus. Da weniger als 25 Liter Luft pro Sekunde durch das Oberlicht einströmen ist der Raum praktisch nur mit Methan gefüllt das sich bei Austritt durch das Fenster entzündet. Dieser Fall ist so in der Realität nicht zu erwarten, da das Methan zuerst den im Raum zur Verfügung stehenden Sauerstoff zur Verbrennung nutzen würde. Nach ca. 6 min wäre der Sauerstoff verbraucht und somit würde sich auch wegen abnehmender Temperatur der Pyrolyseprozess bzw. das Ausgasen des Brandguts verringern. Danach würde es mehrere Tage dauern, bis das Methan den Raum komplett gefüllt hat und alle Bestandteile des Abgases verdrängt hätte.

Fazit

Durch das geöffnete Oberlicht kann ein Brand mit einer Stärke von mindestens 250kW und höchstens 500kW mit Verbrennungsluft versorgt werden. Dies entspricht etwa einer zugeführten Luftmenge von 70 – 140 Liter pro Sekunde bei Standardmosphärenbedingungen.

4.2. Statische Druckverteilungen

Im Folgenden werden die Druckverteilungen gezeigt. Es handelt sich hierbei um die statischen Drücke und zwar in Relation zum äußeren Luftdruck bei atmosphärischen Standardbedingungen. Im Innern des Raumes nimmt der absolute Druck mit der Höhe ab, der relative Druck aber zu. Die neutrale Ebene ist die Höhe, wo der relative Druck gleich Null ist. Bei dem geöffneten Oberlicht und der geringen Brandstärke liegt die neutrale Ebene etwa in Mitte des Fensters. In der oberen Hälfte strömt es aus dem Raum aus, in der unteren strömt von außen Luft ein. Je höher die Druckdifferenzen, desto schneller ist die Strömung. Die Druckdifferenzen steigen mit der Temperatur: Ein starker Brand mit hohen Abgastemperaturen verursacht einen stärkeren Luftaustausch an einer Öffnung als ein schwächerer und weniger heißer Brand.

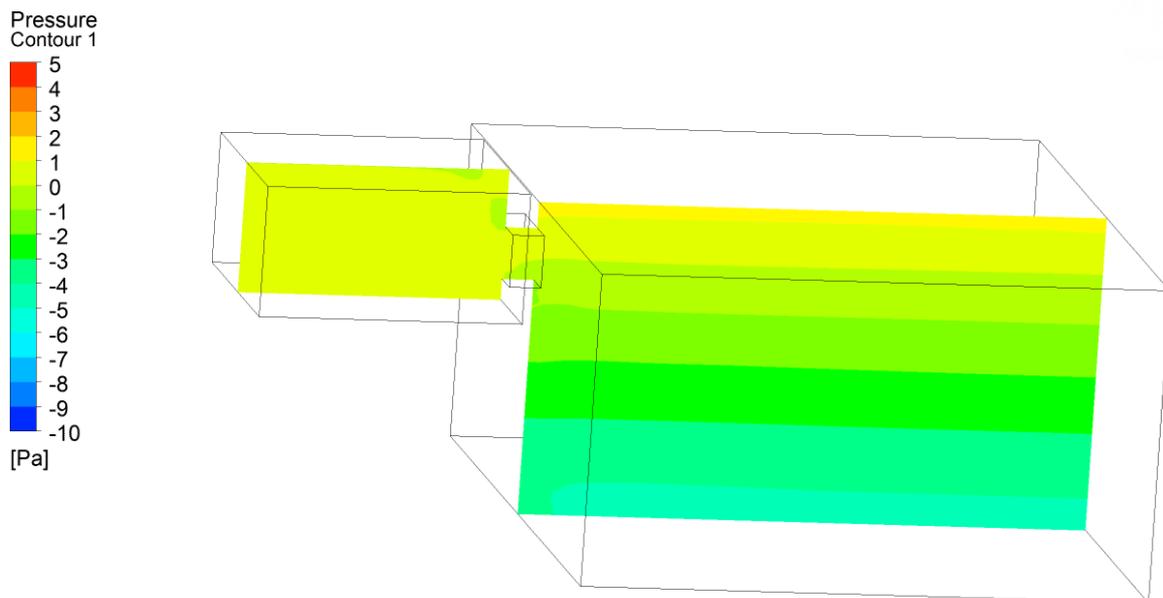


Abbildung 55: Druckverteilung bei $HRR = 50kW$

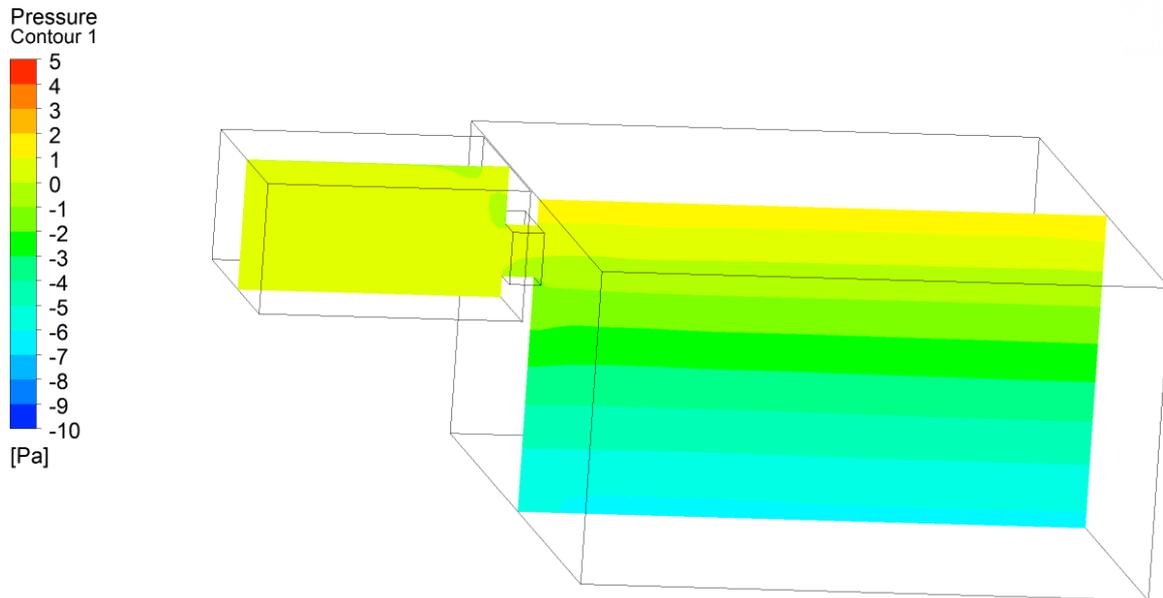


Abbildung 56: Druckverteilung bei $HRR = 100kW$

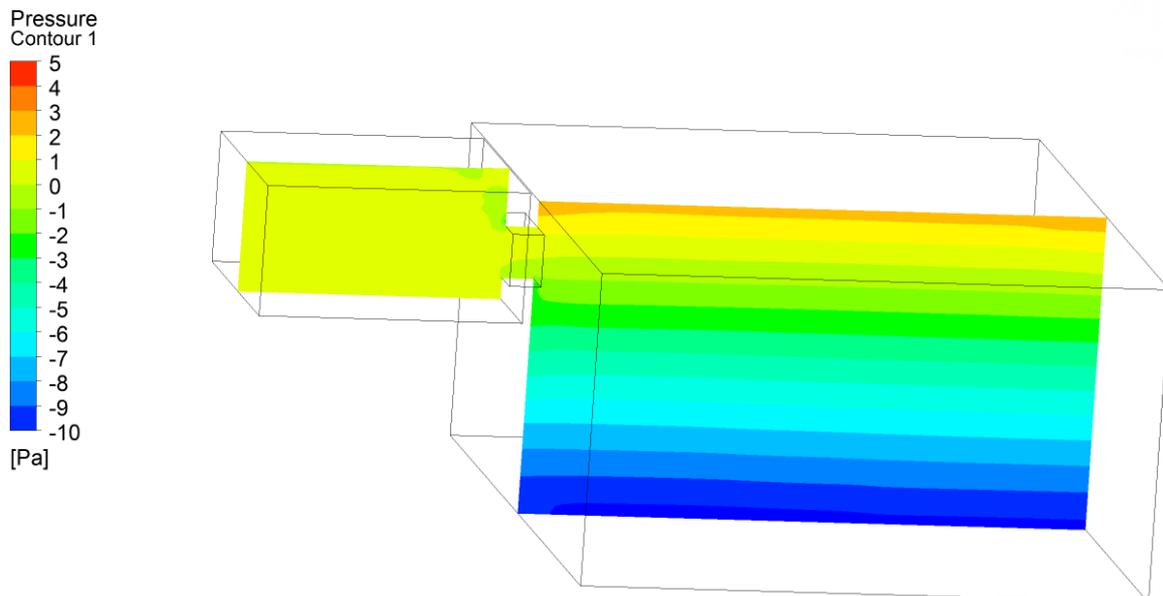


Abbildung 57: Druckverteilung bei $HRR = 250kW$

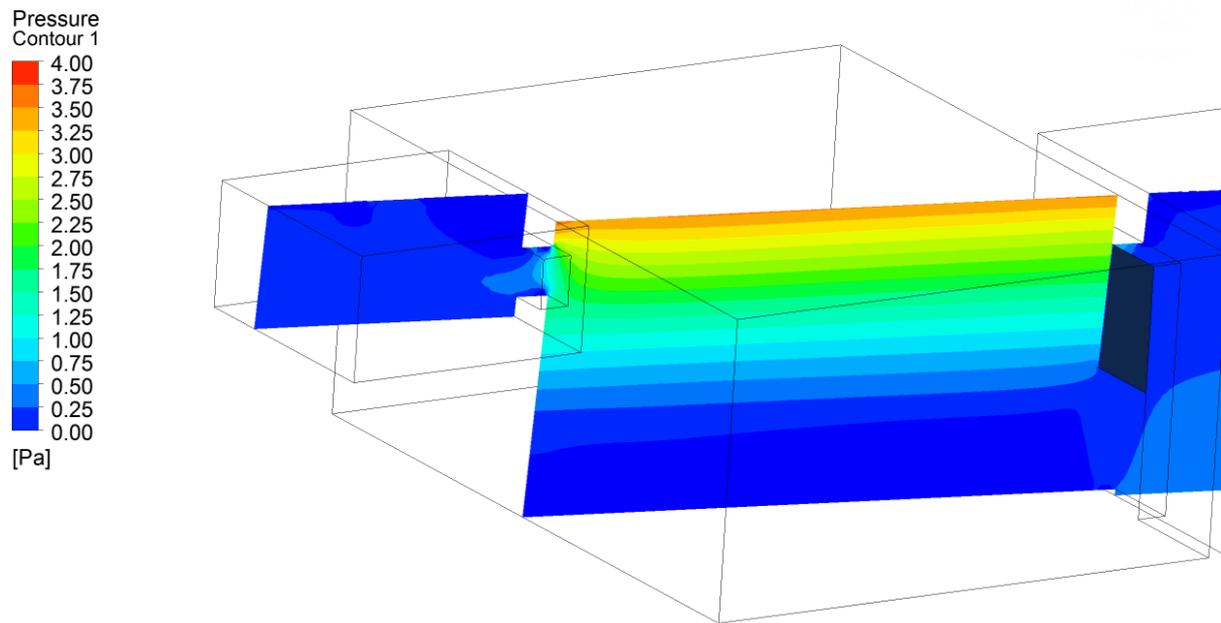


Abbildung 58: Zum Vergleich die Druckverteilung bei 50% verschlossener Tür und geöffnetem Oberlicht

4.3. Wärmeeintrag in die Wände

Hier wird die Bilanz erstellt, wie sich die bei der Verbrennung entstehende Wärme ausbreitet.

4.3.1. Bei konstant 50kW und unterschiedlichen Zu- und Abluftöffnungen

Zuluftöffnungen	Spalt offen	Fenster offen	Tür offen	Fenster und Tür offen
Wärmestrom in kW	48	45	28	24

Ist nur das Oberlicht ganz oder teilweise offen, strömen über 90% der Wärme in die Wände und Decke. Bei geöffneter Tür sind es nur noch rund die Hälfte.

4.3.2. Bei geöffnetem Oberlicht und unterschiedlichen HRR

HRR in kW	50	100	250	500
Wärmestrom in kW	46	80	202	(27)

Solange die Wärmefreisetzungsrate im Raum aufgrund genügender Frischluftzufuhr möglich ist, strömt mindestens 80% der Wärme in Wände und Decken.

5. Pulsieren bei stark unterventiliertem Brand

Bei dieser Simulation wird zu Beginn $t=0s$ der Raum mit $500^{\circ}C$ heißem Methan gefüllt, die Wände aber haben zu Beginn $20^{\circ}C$. Weiter wird kontinuierlich $1gr/s$ Methan (entsprechend max. HRR $50kW$) eingebracht.

Beim Pulsieren strömt durch das Oberlicht Frischluft ein und das brennbare Gas entzündet sich. Dadurch wird Wärme frei, das Gasvolumen im Raum dehnt sich aus und drückt das Abgas durch die Öffnung ins Freie. Unmittelbar danach kühlt das Gas an den Wänden ab und es strömt wieder Frischluft ein.

Eine pulsierendere Rauchgasströmung aus einer Fensteröffnung ist ein sicheres Anzeichen für einen unterventilierten Brand. Da in einem Raum zu Beginn eines Brandes ein gewisser Sauerstoffvorrat vorhanden ist, kann ebenfalls aus der pulsierenden Rauchgasströmung abgeleitet werden, dass der Brand schon längere Zeit vorherrschte. Weiterhin kann daraus mit hoher Wahrscheinlichkeit geschlossen werden, dass es keine zweite Öffnung im Raum mit Verbindung zur Außenatmosphäre (Umgebungsluft) gibt, denn sonst würde sich eine konstante Luftströmung („Durchzug“) etablieren.

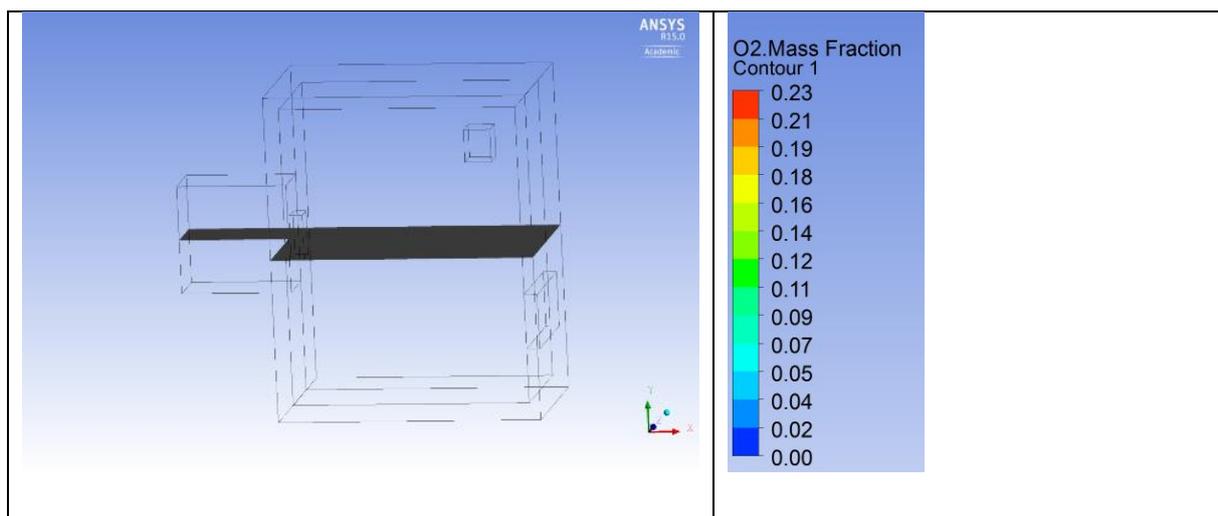
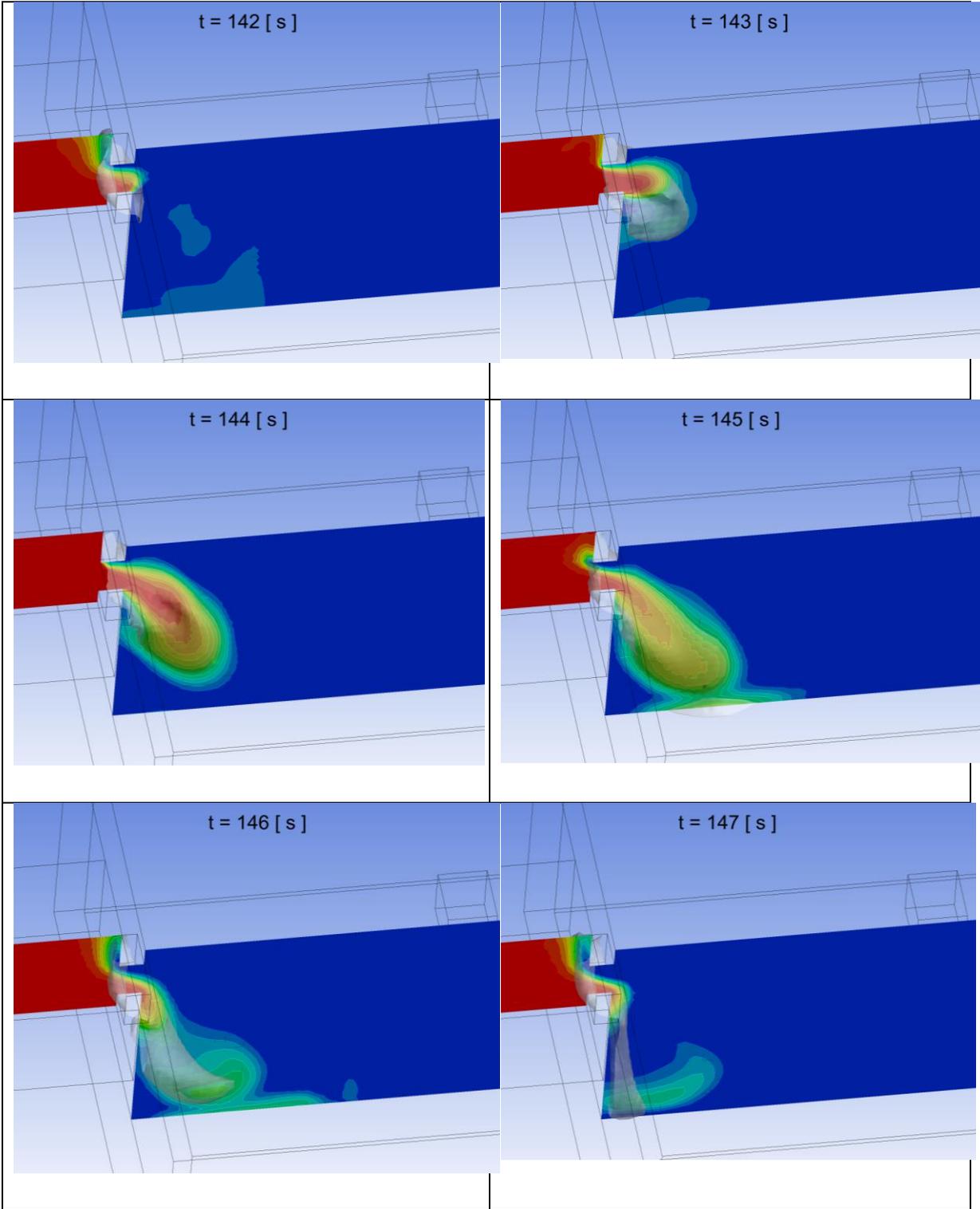


Abbildung 59: Schnittebene (links) und Skala der Sauerstoffkonzentration für die folgenden Abbildungen



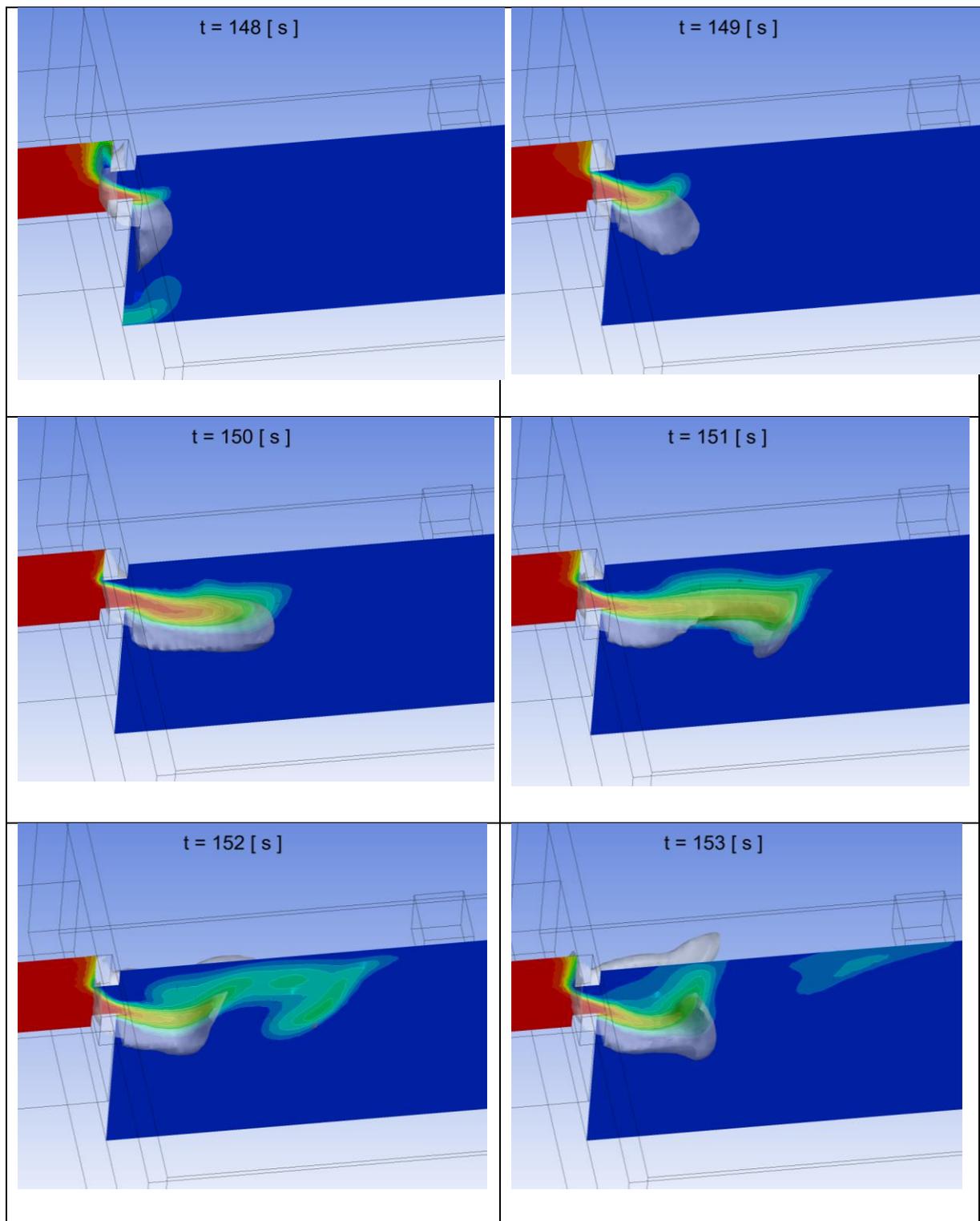


Abbildung 60: Zeitliche Abfolge im Abstand von je 1s des Einströmens von Frischluft.

6. Backdraft (Rauchgasexplosion)

Eine Rauchgasexplosion (genauer: Rauchgasdeflagration) oder Backdraft kann sich ereignen, wenn in einem geschlossenen Raum ein Brand erlischt, weil zu wenig Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht und die Pyrolyseprozesse aufgrund noch vorherrschender hoher Temperaturen weiter ablaufen, so dass sich der Raum mit brennbaren Gasen füllt. Durch Frischluftzufuhr durch Öffnen der Tür oder eines Fensters entzünden sich die brennbaren Gase, sei es weil die Temperatur hoch genug (oberhalb der Zündtemperatur) ist oder weil noch ein kleiner Brandherd als Zündquelle dient.

Zusammensetzung von Pyrolysegas bei der Vergasung von Holz

	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂₊	N ₂
Vol %	6-19 (12,5)	9-21 (16,3)	11-19 (13,5)	3-7 (4,4)	0,5-2 (1,2)	42-60 (52)
Heizwert* in MJ / kg	120	10.1	-	50	ca. 48	-

Zusammensetzung und Heizwert des trockenen Produktgases aus der atmosphärischen Vergasung holzartiger Biomasse mit Luft bzw. mit Dampf/Sauerstoff [4], [5]. Mittelwerte in Klammern.

Zusammensetzung des Pyrolysegases bei der CFD Simulation

	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂₊	N ₂
Masse %	-	15	21	5*	-	49

Heizwert entspricht der Summe von H₂, C₂₊ und CH₄. Rest 10% H₂O bei der CFD Berechnung

An den Raum ist ein 10m langer Flur angeschlossen. Zum Zeitpunkt t=0s wird die Tür schlagartig geöffnet (Im CFD Modell wird sie nicht bewegt, sondern sie „verschwindet“ instantan ohne eine Luftbewegung zu initiieren). Temperatur im Raum konstant 600°C; Zusammensetzung der Pyrolysegase s. Tabelle

Zeitlicher Temperaturverlauf beim backdraft

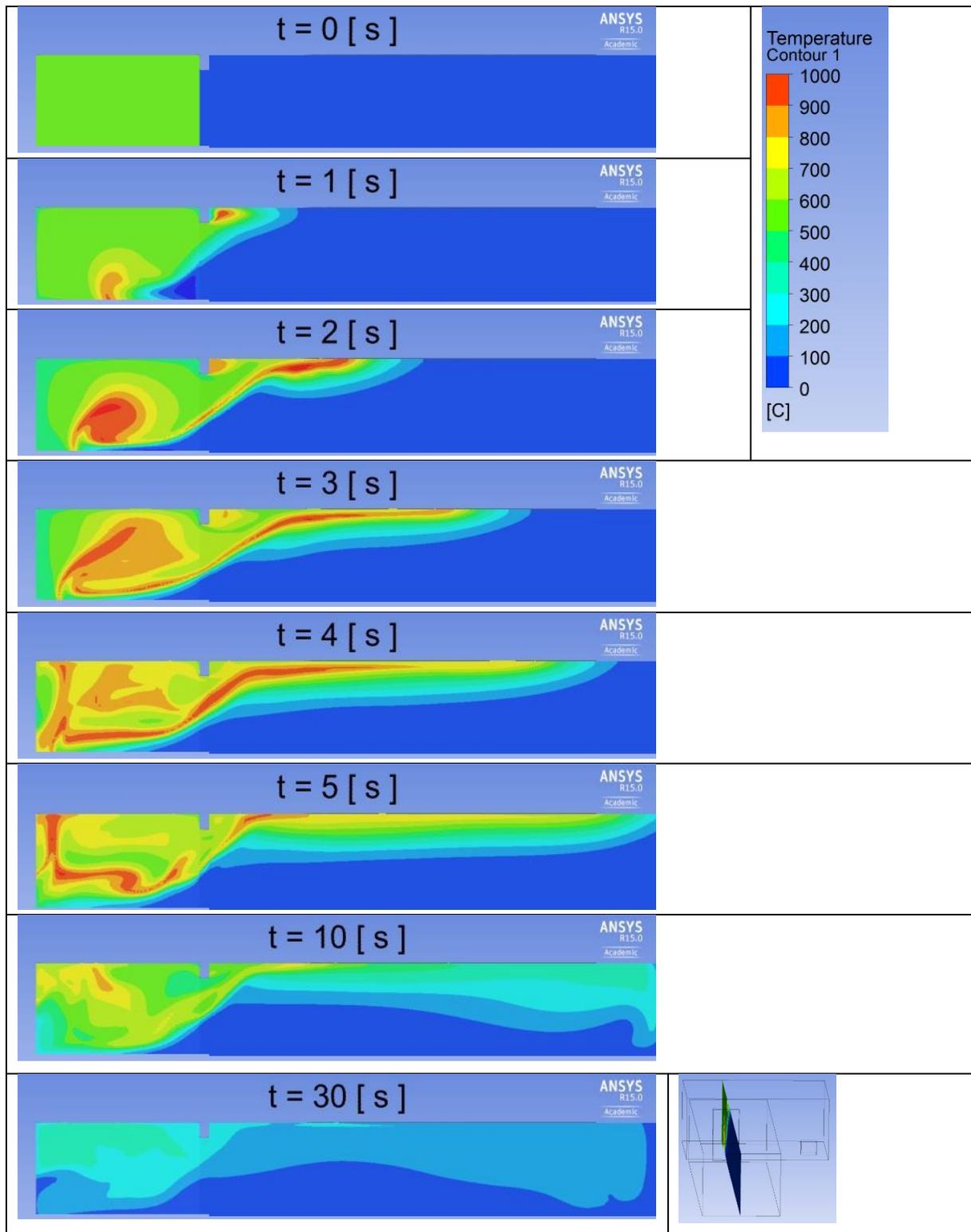


Abbildung 61: Zeitlicher Temperaturverlauf beim backdraft

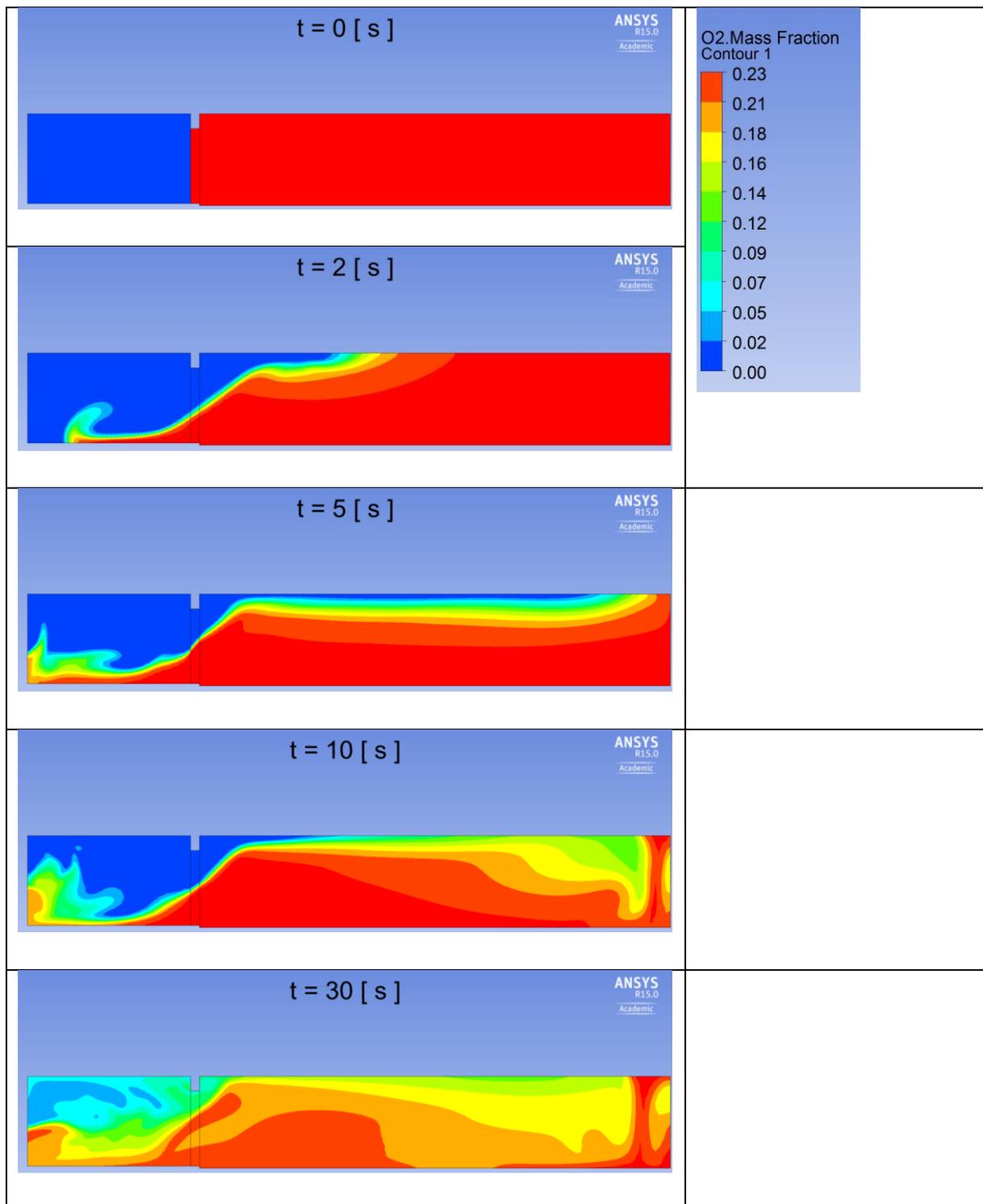


Abbildung 62: Zeitlicher Verlauf der Sauerstoffkonzentration

Unmittelbar nach Öffnen der Tür fließt am Boden Frischluft in den Raum und brennbare Gase strömen oben aus dem Raum. Die Flammenfront läuft entlang der Decke im Flur und erreicht nach 5s ein Ausdehnung von 10m,entsprechend einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von 2ms^{-1} . Die Temperaturen erreichen in der Simulation 1000°C .

Es sei hier nochmals daraufhingewiesen, dass bei der Simulation Annahmen zugrunde liegen und Vereinfachungen unumgänglich sind:

Es ist unwahrscheinlich, dass bei einem realen Backdraft die Temperatur im Raum homogen bei 600°C liegt, ebenso ist die Zusammensetzung der brennbaren Gase sicherlich nicht identisch. Unabhängig davon wird aber das Strömungsmuster qualitativ ähnlich sein. Unten strömt Luft rein und entlang der Decke strömt und verbrennt das Pyrolysegas. Der üblichen taktischen Anweisung für die Feuerwehrangehörigen, beim Öffnen der Tür am Boden zu bleiben, ist nichts hinzuzufügen.

Wärmefreisetzungsraten nach Ort und Zeit

Zeit in s	1	2	3	4	5	10	20	30
HRR (in MW) im Raum	1,8	2,6	2,7	2,5	2,2	1,9	0,6	0
HRR (in MW) im Flur	0,8	2,2	2,3	2,0	1,4	0,4	0,2	0
HRR (in MW) gesamt	2,6	4,8	5	4,5	3,6	2,3	0,8	0

Bereits nach 2 Sekunden erreicht die Wärmefreisetzungsrates knapp 5 MW, davon gut die Hälfte im Raum und knapp die Hälfte im Flur. Bei einem Backdraft ist mit einer Brandstärke von deutlich über einem MW im Bereich außerhalb der Tür zu rechnen. Nach ca. 10s schwächt sich der Brand im Flur stark ab und nach einer halben Minute ist sowohl im Flur als auch im Raum der Verbrennungsprozess praktisch beendet.

Ein Backdraft ist somit ein rasch und heftig ablaufender Prozess.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Beuth-Kommentare Baulicher Brandschutz im Industriebau. Beuth Verlag GmbH 3. Auflage **2003**

- [2] <http://wind-data.ch/tools/>

- [3] WESTBROOK, Ch.K. ; DRYER, F.L.: Simplified Reaction Mechanisms for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames. In: Combustion Science and Technology 27 (**1981**), Nr. 1-2, S. 31-43

- [4] Hofbauer, H.; Kaltschmitt, M.: Vergasung. In: Energie aus Biomasse , Springer **2001**, ISBN 3.540-64853-4, S. 427–472

- [5] Bajus, M: Pyrolysis of wooden material, Petroleum and Coal 52 (3), **2010**, S. 207-214

8. Zusammenfassung

Im ersten Teil werden einfache Formeln gezeigt, wie die Stärke und Dauer von ventilationsgesteuerten Bränden aus der Verbrennungsluftzufuhr bzw. –vorrat abgeschätzt werden können.

Im zweiten Teil werden Strömungs- und Temperaturverteilungen in einem Raum bei verschiedenen Zu- und Abluftbedingungen mittels dreidimensionaler Strömungssimulation (CFD, Ansys CFX) anschaulich dargestellt. Es wird z. B. gezeigt, dass durch ein 800mm x 400mm großes Oberlicht genug Verbrennungsluft für einen 250kW starken Brand dauerhaft einströmen kann.

Eine Bilanz der Wärmeströme zeigt, dass über 80% der bei moderaten Bränden bis 250kW entstehenden Wärme in die Wände strömt und nur ein geringer Anteil mit dem Abgas nach außen strömt.

Die Funktionsweise und Voraussetzungen für das Funktionieren eines Verschlusses an einer Tür zum Brandraum werden aufgezeigt.

Das Pulsieren bei stark unterventilierten Bränden wird erläutert.

Ein Backdraft, der sich in einen angrenzenden 10m langen Flur ausbreitet, wird simuliert und die zeitliche Temperaturverteilung im Flur und im Raum dargestellt. Das Ergebnis der Simulation zeigt in Übereinstimmung mit realen Ereignissen, dass ein Backdraft ein rasch verlaufender Prozess mit hohen Temperaturen bis 1000°C ist.

9. ANHANG

9.1. Vernetzung

Bei der Vernetzung, d. h. der räumlichen Diskretisierung, muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit der Simulationsergebnisse und der Rechenzeit eingegangen werden.

Bei den hier gezeigten Berechnungen war von Interesse

1. Bestimmung der Frischluftzufuhr
2. Wärmeeintrag in die Wand
3. Rechenzeit jeweils max. 3 Wochen auf leistungsstarker Workstation (Xeon Prozessor E5-1660 v3 mit 3GHz, 32GB Speicher. Ermöglicht die parallele Bearbeitung auf bis zu 8 Kernen

Die Vernetzung erfolgt mit ICEM Tetra mit Prismen an der Wand mit 3mm Höhe in der ersten und 6mm in der zweiten Schicht. Die Tetraeder weisen eine maximale Kantenlänge von 100mm auf. Im Bereich der Zuluftöffnungen ist das (nicht strukturierte) Gitter verfeinert.

9.2. CFD Software

Am KIT und der Forschungsstelle für Brandschutztechnik steht Ansys CFX zur Verfügung. Zum Zeitpunkt der Simulationsberechnungen 2016 und Anfang 2017 stand die Version R 15.0 zur Verfügung.

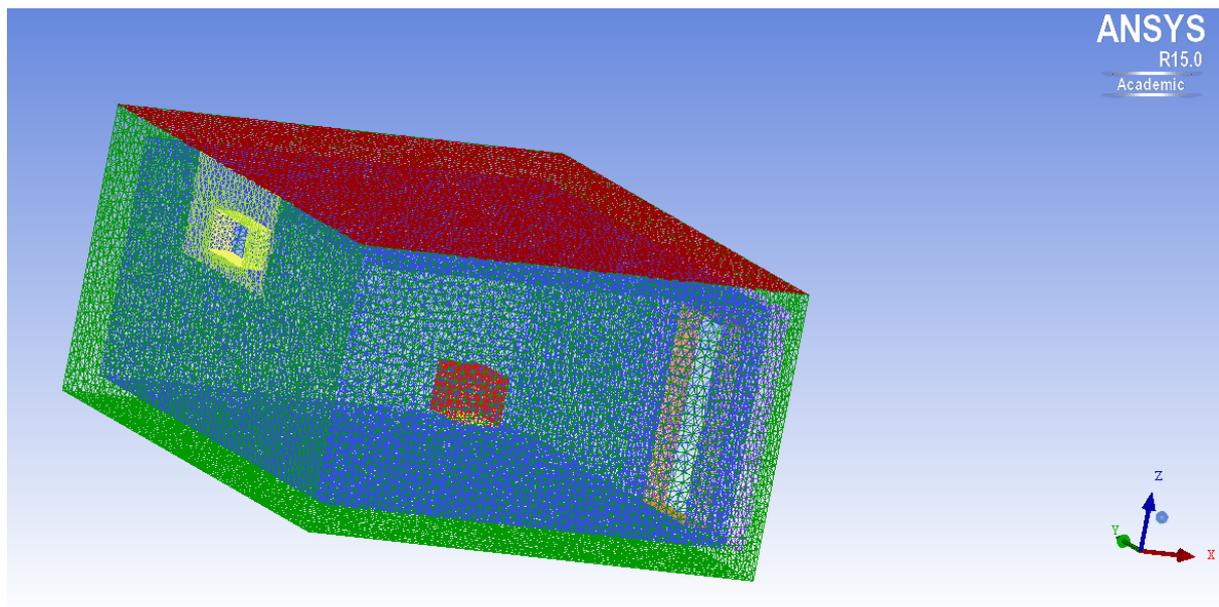


Abbildung 63: Ausschnitt des Gitters.

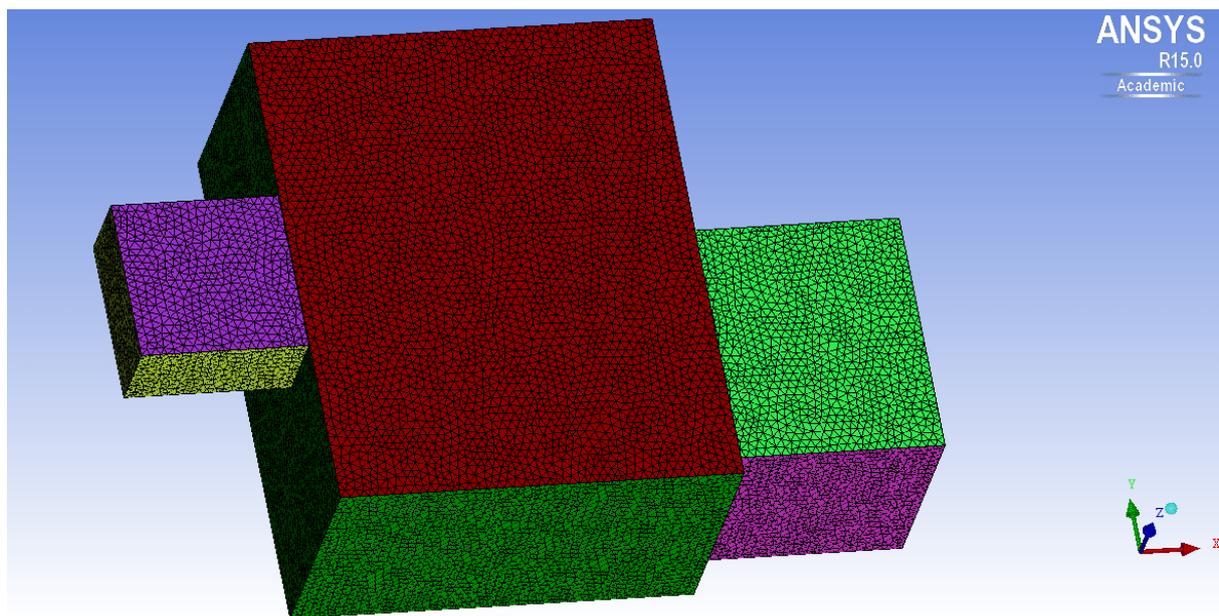


Abbildung 64: Draufsicht auf das Gitter mit den beiden Extrusionen rechts für die Tür und links für das Fenster

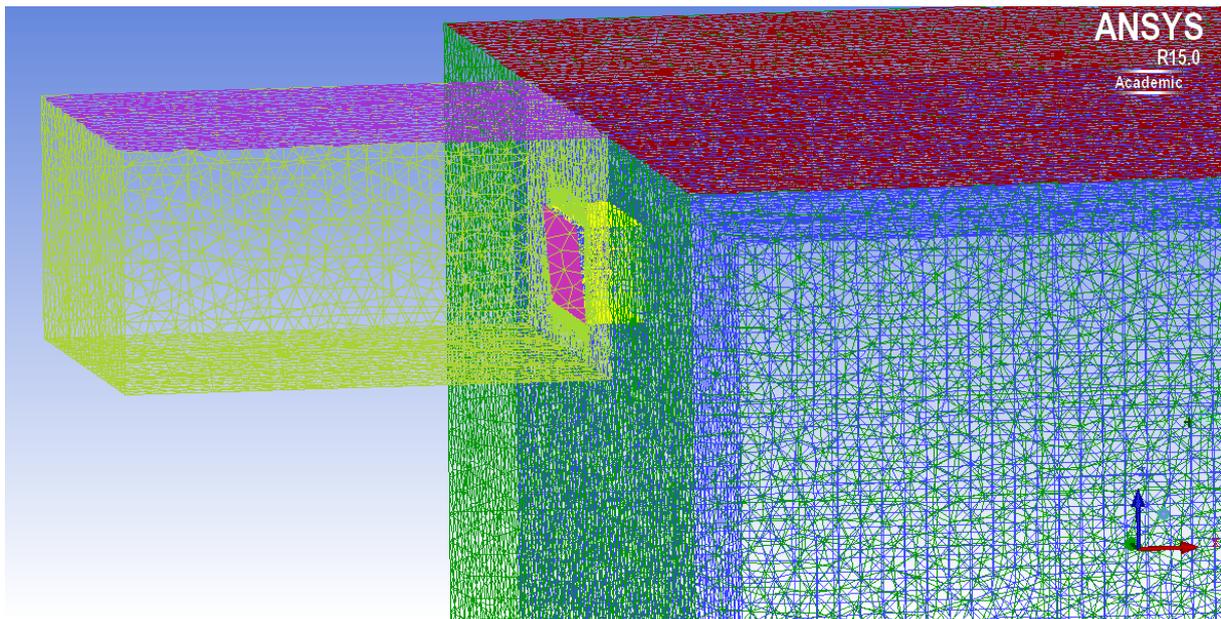


Abbildung 65: Gitter mit dem gekippten Fenster (violett). Die Spaltbreite beträgt oben 35mm

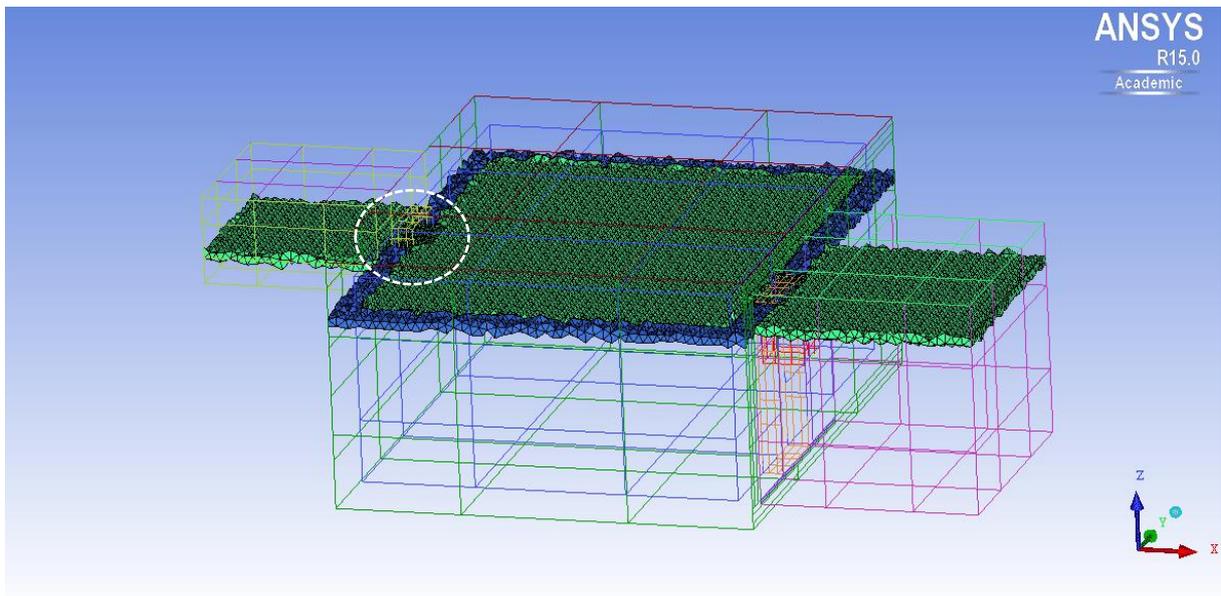


Abbildung 66: Schnitt durch das Volumengitter. Im Kreis markierter Bereich s. nächste Abbildung

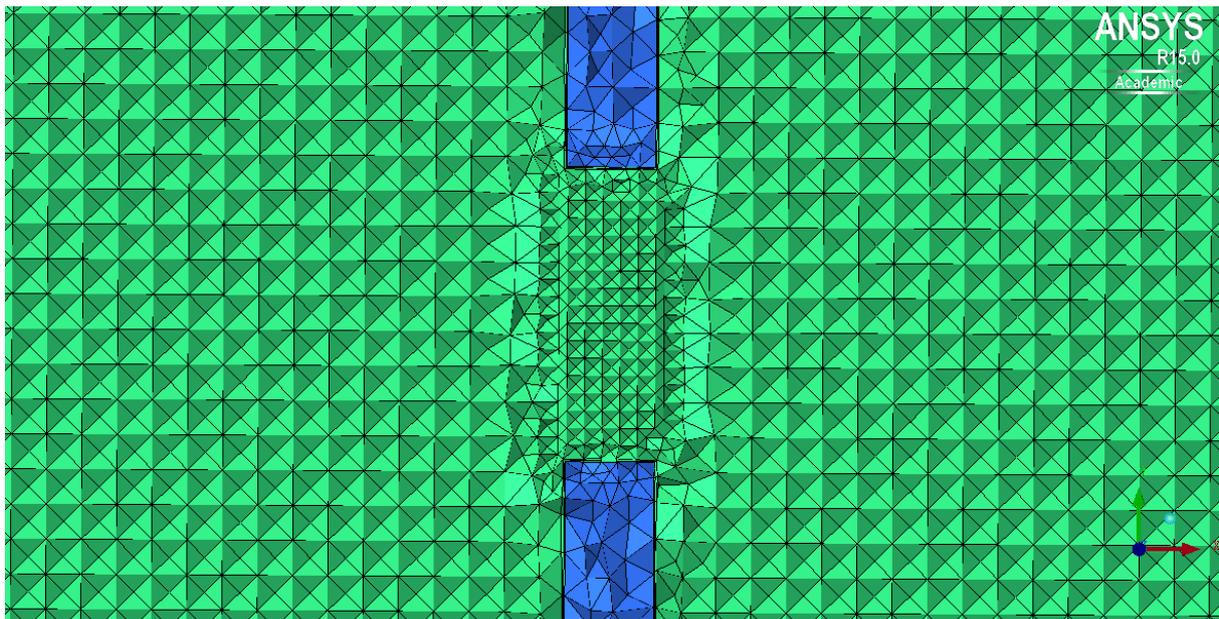


Abbildung 67: Ausschnitt des Gitters im Bereich des Fensters.

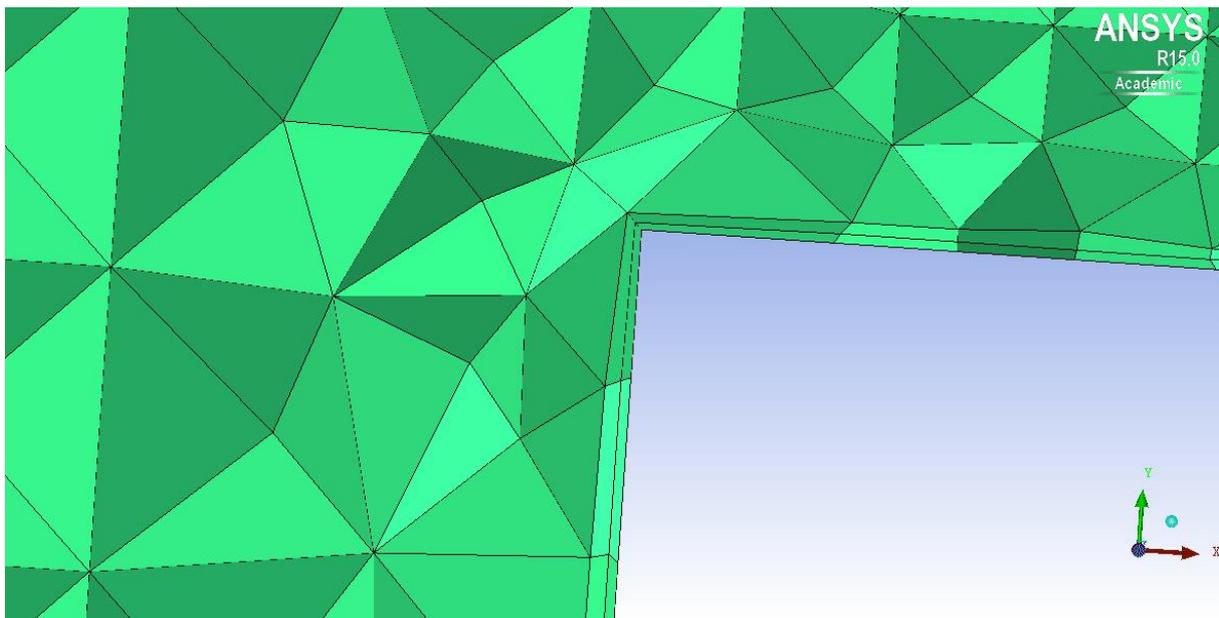


Abbildung 68: Detailansicht der Prismenschicht. Erste Zellhöhe 3mm, zweite ca. 6mm

9.3. Temperaturleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit a ist eine Materialeigenschaft, welche die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Temperatur im Material beschreibt. Sie hängt von der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ , der Dichte ρ und der spez. Wärmekapazität c ab.

$$a = \lambda / (\rho * c)$$

Aus einer hohen Temperaturleitfähigkeit kann nicht auf eine hohe Wärmeleitfähigkeit (oder umgekehrt) geschlossen werden. Wasser z. B. hat zwar eine rund 20 mal höhere Wärmeleitfähigkeit wie Luft ($\lambda=0.55\text{W/mK}$ vs. 0.026 bei 0°C) aber eine rund 800 mal höhere Dichte und eine 4,2 mal höhere Wärmekapazität. Daher verlaufen Temperaturänderungen im Wasser rund 160 mal langsamer als in Luft.

Hinweis

Die bisher veröffentlichten Forschungsberichte können auf den Homepages der

**Forschungsstelle für Brandschutztechnik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)**

<http://www.ffb.kit.edu>

und des

Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.idf.sachsen-anhalt.de/start-idf/>

eingesehen werden.