

BRANDSCHUTZ FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE

Überdruckbelüftung von Treppenträumen durch die Feuerwehr

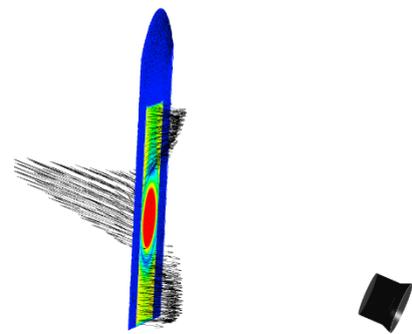
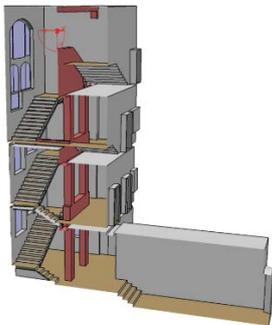
Einsatzmöglichkeiten und Grenzen tragbarer Belüftungsgeräte

von

F. Schoeps, J. Saelens, D. Schelb,

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik



212

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER LÄNDER,
ARBEITSKREIS V, AUSSCHUSS FÜR FEUERWEHR-ANGELEGENHEITEN,
KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder,
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz
und Zivile Verteidigung**

Forschungsbericht Nr. 212

Überdruckbelüftung von Treppenträumen durch die Feuerwehr

Einsatzmöglichkeiten und Grenzen tragbarer Belüftungsgeräte

von

B. Sc. Florian Schoeps

Joost Saelens

Dr. rer.-nat. Dietmar Schelb

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Forschungsstelle für Brandschutztechnik

Karlsruhe

Dezember 2021

in überarbeiteter Fassung vom 25.2.2022

Berichtskennblatt

Nummer des Berichtes: <p style="text-align: center;">212</p>	Titel des Berichtes: <p style="text-align: center;">Überdruckbelüftung von Treppenträumen durch die Feuerwehr</p> <p style="text-align: center;">Einsatzmöglichkeiten und Grenzen tragbarer Belüftungsgeräte</p>	ISSN: <p style="text-align: center;">0170-0060</p>	
Autoren: Dr. rer.-nat. Dietmar Schelb, KIT B. Sc. Florian Schoeps, seit 4/2021 in Ausbildung zum gD der BF Joost Saelens, Student an der HFU Furtwangen	durchführende Institution: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Forschungsstelle für Brandschutztechnik Hertzstrasse 16, D-76187 Karlsruhe		
Nummer des Auftrages: <p style="text-align: center;">FA. Nr. 241 (2/2018)</p>	Auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –Senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Abschlussdatum: <p style="text-align: center;">Dezember 2021</p>			
Seitenzahl: 111	Abbildungen: 91	Tabellen: 19	Literaturverweise: 27
Kurzfassung: In einem viergeschossigen Treppenraum wurden Realversuche zur Ermittlung des Überdrucks mit tragbaren Lüftern durchgeführt. Hierbei wurden die Zuluftöffnung, sowie Abstand und Winkel des Lüfters variiert. Dieselbe Geometrie des Treppenraumes wurde für anschließende Strömungssimulationen verwendet, bei denen die Zu- und Abluftöffnungen sowie der Abstand und Winkel des Lüfters variiert wurde.			
Schlagwörter: Tragbarer Lüfter, Injektor-, Überdrucklüfter, Differenzdruck, Taktische Ventilation, CFD, Strömungssimulation			

Titelbild: CAD-Modell (li), Versuchsaufbau (mitte), Strömungsfeld (re)

Bemerkung zu den vorliegenden Untersuchungen

**Jede Nennung kommerzieller Produkte geschieht nur zu Informationszwecken.
Damit ist keine Empfehlung oder Bewertung des genannten Produkts durch die
Forschungsstelle für Brandschutztechnik am Karlsruher Institut für
Technologie verbunden.**

Inhaltsverzeichnis

Berichtskennblatt.....	3
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis.....	11
1. Einleitung	12
2. Taktische Ventilation	13
2.1 Rauchfreihaltung	14
2.2 Entrauchung.....	15
3. Grundlagen der Ventilation	17
Natürliche und maschinelle Ventilation	17
3.1 Maschinelle Ventilation mit Abluftöffnung	17
3.2 Maschinelle Ventilation ohne Abluftöffnung.....	18
3.3 Natürliche Ventilation	19
3.3.1 Einfluss von Wind	19
3.3.2. Zuluftöffnung	19
3.3.3.Abluftöffnung	19
4. Übersicht über die Lüftervarianten der Feuerwehr.....	21
4.1 Antriebsarten	21
4.1.3 Elektromotor akkubetrieben	22
4.1.4 Hydraulischer Antrieb (Wasserturbine)	23
4.2 Injektor- und Überdrucklüfter	24
5. Positionierung von Lüftern / Abstand zur Zuluftöffnung.....	26
6. Methodik der experimentellen Versuche.....	27
6.1. Vorversuche „Strömungsgeschwindigkeit“.....	28
6.1.1. Akkulüfter	29
6.1.2. Kabelgebundener Elektrolüfter 230V.....	30
6.1.3. Messtechnik.....	31
6.1.3.1 Messgerät Trotec TA 400.....	32

6.1.3.2 Flügelradanemometer Höntzsch Instruments μ P-Flowtherm.....	33
6.1.4 Messung Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter.....	34
6.1.5 Messungen Strömungsgeschwindigkeit: Kabelgebundener 230V-Elektrolüfter.....	39
6.1.6 Messung der Strömungsgeschwindigkeit bei den Realversuchen.....	44
6.1.7 Zusammenfassung der Versuche zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit.....	45
6.2 Vorversuche „Druck“.....	47
6.2.1 Messtechnik.....	47
6.2.2 Vorversuche zur Auswahl der geeigneten Meßtechnik.....	49
6.2.3 Vorversuche bei kleinem Raumvolumen (Container).....	55
6.2.4 Vorversuche Werkstatt (mittleres Volumen).....	56
6.2.5 Vorversuche Werkstatt #1 (mittleres Volumen).....	57
6.2.6 Vorversuche Werkstatt #2.....	59
6.3 Zusammenfassung der Vorversuche „Druck“.....	62
7. Realversuche.....	63
7.1 Der Treppenraum.....	63
7.2 Messtechnik.....	65
7.3 Positionierung des Lüfters.....	65
7.4 Versuchsbedingungen und Ergebnisse.....	67
7.4.1 Versuche mit vollflächig geöffneter Tür.....	68
7.4.2 Versuche mit zur Hälfte abgedeckter Tür.....	69
7.4.3 Versuche mit kleineren Zuluftöffnungen.....	70
7.4.4 Versuche mit einer aufgesetzten Lutte.....	72
7.5 Zusammenfassung der Realversuche.....	73
7.6 Fazit.....	75
8. CFD-Simulation.....	76
8.1. Großes Volumen mit LES – Turbulenzmodell vs. kleines Volumen und k- ϵ	76
8.2 Geometrie.....	80
8.3 Simulationsergebnisse.....	84

8.3.1. Tür offen, keine Abluftöffnung (Fenster zu).....	85
8.3.2 Tür offen, Fenster geöffnet, Winkel Lüfter 0°	88
8.3.3 Tür halb verschlossen.....	92
8.3.4 Tür halb verschlossen, Lüfterabstand 5m und geringe Anstellwinkeländerungen.....	96
8.4 Zusammenfassung der Simulationen.....	100
8.4.1 Erreichbare Druckerhöhung unter praktikablen Bedingungen.....	100
8.4.2 Erreichbare Druckerhöhung - unter Laborbedingungen.....	101
8.4.3 Volumenstrom bei geöffnetem Fenster	101
9. Allgemeines.....	103
9.1 Ist der Überdruck bei der taktischen Ventilation gefährlich?	103
9.2 In welcher Zeit stellt sich der Überdruck ein	103
9.4 Überdruck bei Brand in Wohnung	104
9.5 Kennlinie Ventilator	105
9.6 Erreichbarer Überdruck in undichten Raum	106
9.7 Winddruck	106
9.8 Zwei Ventilatoren gleichzeitig für Überdruckbelüftung	106
9.9 Druckschwankungen in offenem / geschlossenem Raum beim der Ventilation	107
10. Zusammenfassung.....	108
Literaturverzeichnis.....	110

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Übersicht über die Möglichkeiten der Feuerwehr
- Abb. 2: Mobiler Großventilator der Branddirektion Frankfurt am Main
- Abb. 3: Lüfter mit Verbrennungsmotor
- Abb. 4: Belüftung von Kanalanlagen
- Abb. 5: Wasserbetriebener Lüfter
- Abb. 6: Injektorlüfter mit geringer Strahlaufweitung
- Abb. 7: Überdrucklüfter mit hoher Strahlaufweitung
- Abb. 8: Akkulüfter
- Abb. 9: Kabelgebundener 230V-Lüfter
- Abb. 10: Staudruckanemometern und Flügelrad-Anemometer
- Abb. 11: Seitenansicht Messstelle
- Abb. 12: Skizze Grundriss & Versuchsaufbau
- Abb. 13: Versuchsaufbau
- Abb. 14: Schematischer Aufbau einer Prandtlsonde
- Abb. 15: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter. Entfernung zur Messstelle 0,5m
- Abb. 16: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter. Entfernung zur Messstelle 1m
- Abb. 17: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter. Entfernung zur Messstelle 2m
- Abb. 18: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter. Entfernung zur Messstelle 3m
- Abb. 19: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter. Entfernung zur Messstelle 0,5m
- Abb. 20: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter. Entfernung zur Messstelle 1m
- Abb. 21: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter. Entfernung zur Messstelle 2m
- Abb. 22: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter. Entfernung zur Messstelle 3m
- Abb. 23: CAD Darstellung Messpunkt
- Abb. 24: Foto Messpunkt
- Abb. 25: Container für Druckmessung
- Abb. 26: Positionierung Lüfter vor Container für Druckmessung
- Abb. 27: Skizze des Aufbaus zur Druckmessung im kleinen Volumen
- Abb. 28: Druckverlauf bei Tür geöffnet / halb verschlossen
- Abb. 29: Druckverlauf bei Tür geöffnet / halb verschlossen
- Abb. 30: Gegengerichtete Strömung an der Tür
- Abb. 31: Nach außen gewölbte Türabdeckung Container
- Abb. 32: Nach außen gewölbte Türabdeckung Werkstatt
- Abb. 33: Vergleich 1 m, 2 m, 3 m. 4,8 m
- Abb. 34: Aufbau Druckversuche Werkstatt
- Abb. 35: Akkulüfter im Abstand von 2m vor vollflächig geöffneter Zuluftöffnung
- Abb. 36: Akkulüfter im Abstand von 2m vor halb verschlossener Zuluftöffnung

Abb. 37: Drücke bei Akkulüfter mit 2m Abstand
Abb. 38: 230V-Lüfter vor vollflächig geöffneter Zuluftöffnung
Abb. 39: 230V-Lüfter im Abstand von 2m vor halb verschlossener Zuluft
Abb. 40: Drücke bei 230V-Lüfter mit 2m Abstand
Abb. 41: Elektrolüfter 1 m, 2 m, 3 m, 5 m vollflächig geöffnet
Abb. 42: Elektrolüfter 1,2,3,5 m obere Türhälfte geschlossen
Abb. 43: Vergleich der Öffnungszustände und Entfernungen
Abb. 44: Vorderansicht Treppenraum
Abb. 45: Rückseite Treppenraum
Abb. 46: Schnitt Treppenraum
Abb. 47: Position Druckmessung im Treppenraum
Abb. 48: Lüfter vor vollflächig geöffneter Tür CAD
Abb. 49: Lüfter vor vollflächig geöffneter Tür Foto
Abb. 50: Lüfter vor teilweise abgedeckter Türöffnung CAD
Abb. 51: Lüfter vor teilweise abgedeckter Türöffnung Foto
Abb. 52: Lüfter mit Lutte CAD
Abb. 53: Lüfter mit Lutte Foto
Abb. 54: Elektrolüfter vor vollflächig geöffneter Tür
Abb. 55: Mittelwerte bei vollflächig geöffneter Tür
Abb. 56: Mittelwerte obere Türhälfte verschlossen
Abb. 57: Mittelwerte unterschiedliche Öffnungsgrößen
Abb. 58: Versuch Elektrolüfter mit aufgesetzter Lutte
Abb. 59: Versuche im Treppenraum mit Elektrolüfter
Abb. 60: Geometrie des Treppenraumes
Abb. 61: Geschwindigkeitsfeld im Türquerschnitt
Abb. 62: Zeitlicher Verlauf (in Sekunden) des relativen Druckes
Abb. 63.: Zeitlicher Verlauf (in Sekunden) des relativen Druckes
Abb. 64: Der Lüfter vor der Eingangstür zum Treppenraum
Abb. 65: Ventilator mit Gehäuse
Abb. 66: Lokale Densities bei halb verschlossener Tür
Abb. 67: Schnitt durch das Netz bei halb verschlossener Tür
Abb. 68: Vergrößerung aus Abb. 66
Abb. 69: Längsschnitt der (mittleren skalaren) Geschwindigkeit im Bereich des Lüfters
Abb. 70: Schnitt der vektoriiellen Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 71: Abstand (hier 2m)
Abb. 72: Das Gitter mit der kleinen und großen Fensteröffnung
Abb. 73: Schnittebene längs
Abb. 74: Skala

Abb. 75: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 76: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 77: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 78: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 79: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 80: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 81: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 82: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 83: Schnitte der Geschwindigkeitsverteilung
Abb. 84: Blende 350mm und 700mm bei 5m und 3 Grad
Abb. 85: Blende 350mm oben, 700mm unten
Abb. 86: Erreichbare Drücke in Abhängigkeit vom Abstand bei offener und halbverschlossener Tür
Abb. 87: Erreichbare Drücke in Abhängigkeit vom Öffnungsquerschnitt
Abb. 88: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand bei offener Tür
Abb. 89: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand bei halb verschlossener Tür
Abb. 90: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand
Abb. 91: Kennlinie Ventilator

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Abluftöffnungen. Größenempfehlungen aus der Literatur
- Tab. 2: Empfehlungen aus der Literatur: Abstand zur Zuluftöffnung (Tür)
- Tab. 3: Daten Akkulüfter nach Herstellerangaben
- Tab. 4: Daten kabelgebundener 230V-Lüfter nach Herstellerangaben
- Tab. 5: Technische Daten Trotec TA400
- Tab. 6: Übersichtstabelle Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter
- Tab. 7: Übersichtstabelle Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter
- Tab. 8: Übersichtstabelle Vergleich Akku- vs. 230V Lüfter
- Tab. 9: Ergebnisse Messung der Strömungsgeschwindigkeit beim Realversuch
- Tab. 10: Vergleich Standardabweichungen der Messgeräte Akkulüfter
- Tab. 11: Technische Daten Micromanometer FCO 14
- Tab. 12: Technische Daten Trotec TA400
- Tab. 13: Vergleich Messergebnisse Trotec TA400 vs. Micromanometer
- Tab. 14: Mittelwerte des Drucks bei verschiedenen Öffnungsgrößen
- Tab. 15: Übersicht Mittelwerte der Druckmessungen in [Pa]. 230V-Lüfter
- Tab. 16: Erreichbare Differenzdrücke bei Abständen zw. 0 und 7m
- Tab. 17: Erreichbare Differenzdrücke und Volumenströme bei Abständen zw. 0 und 7m
- Tab. 18: Erreichbare Differenzdrücke und Volumenströme bei Abständen zw. 0 und 6m.
- Tab. 19: Drücke und Volumenströme bei unterschiedlichen Anstellwinkeln

1. Einleitung

Mittels Überdruckbelüftung soll im Brandfall in Gebäuden mit Treppenträumen verhindert werden, dass Rauch in den Treppenraum eindringt oder, falls der Treppenraum bereits verrauchte ist, soll durch das Einblasen von Frischluft dieser wieder rauchfrei gestaltet werden.

Für beide Einsatzfälle werden tragbare Lüfter der Feuerwehr eingesetzt.

Von der FFB wurden Realversuche unter idealisierten Bedingungen in einem Treppenraum eines vierstöckigen Gebäudes sowie Strömungssimulationsberechnungen durchgeführt, um den Einfluss der Positionierung des Lüfters sowie der Größe der Flächen für das Ein- und Ausströmen zu untersuchen.

Die Versuche und Simulationsberechnungen ergänzen die Datensätze aus in der Literatur verfügbaren Messungen und sie sollen es ermöglichen, dass grundlegende physikalische Phänomene beim Einsatz eines Lüfters aus einer zusätzlichen Sichtweise beleuchtet werden.

Tragbare Geräte sind geeignet, ausreichend hohe Differenzdrücke zu erzeugen und weisen hinsichtlich ihrer Positionierung vor einer Zuluftöffnung einen weiten Toleranzbereich auf, in welchem sie ihre Funktion gut genug erfüllen. Voraussetzung für eine korrekte Positionierung und auch Gestaltung der Zuluftöffnung ist, dass die Anwender mit den verwendeten Lüftern vertraut sind.

In den Kapiteln 2 bis 5 wird der heute verfügbare Stand des Wissens und Empfehlungen bei der Taktischen Belüftung wiedergegeben. Es zeigt sich, dass es durchaus unterschiedliche Empfehlungen gibt und oft sind es Erkenntnisse, die aus der praktischen Einsatzerfahrung gewonnen wurden.

Die an der FFB durchgeführten praktischen Versuche und Simulationen fanden teilweise unter idealen Versuchsbedingungen (Laborbedingungen) statt. So waren die Räumlichkeiten, in welcher der Überdruck erzeugt wurde, abgedichtet, um Einflüsse durch Leckagen zu minimieren.

Der Anwender kann diesem Bericht Hinweise entnehmen, wie er mit einem Lüfter einen möglichst hohen Überdruck in einem Raum sowie einen möglichst hohen Volumenstrom bei vorhandener Abluftöffnung zur Entrauchung erreichen kann.

Im Einsatzfall kann jedoch ein zu hoher Druck für den Einsatzzweck nachteilig sein. Insbesondere ist zu beachten, dass Rauch, der trotz Überdruckbelüftung in den Raum eingedrungen ist, in unverrauchte Räume eingedrückt werden kann. Wichtig ist, dass der Anwender vor Ort entscheidet und während des Einsatzes immer wieder überprüft, ob der Zweck des Belüftens erreicht wird und welche damit verbundenen unerwünschten Nebeneffekte auftreten.

2. Taktische Ventilation

Bei Bränden kommt es in der Regel zur Entstehung von erheblichen Mengen an Brandrauch. Während des Brandeinsatzes gilt heute als maßgebliches Ziele vieler Feuerwehren (Pulm 2018, S. 24–36; Müller 2016, S. 1). Flucht- und Rettungswege der möglicherweise im Gebäude verbliebenen oder aktuell flüchtenden Personen rauchfrei zu halten, sowie Schäden durch die Ausbreitung von Brandrauch möglichst gering zu halten.

Vor nicht allzu langer Zeit war lediglich das erfolgreiche Ablöschen eines Brandes maßgeblich für den Erfolg einer Feuerwehr im Brandeinsatz. Weniger wichtig war dabei, dass zu dieser Zeit nach der Arbeit der Feuerwehr angrenzend an den Brandraum auch noch andere Bereiche einer Nutzungseinheit oder beispielsweise gar ganze Treppenräume einen erheblichen Schaden durch ausgebreiteten Brandrauch erfahren haben, sowie Menschen in nicht betroffenen Wohnungen durch ausgebreiteten Rauch gefährdet wurden. Das erfolgreiche Ablöschen und unmittelbare Menschenrettung waren das Ziel.

So wurden Löschangriffe durchgeführt, die der herkömmlichen Vorgehensweise entsprechen:

Über den Treppenraum und die Wohnungsabschlusstür erfolgt die Vornahme eines Strahlrohrs zur bis dahin geschlossenen Tür des Brandraums. Szenario: Es herrscht bis zu diesem Zeitpunkt ein rauchfreier Zustand in der gesamten Wohnung und im Treppenraum mit Ausnahme des Brandraums. Personen, die sich in nicht vom Brand betroffenen Wohnungen aufhalten, können in Ihren Wohnungen verbleiben. Mit dem Öffnen der Türe zum Brandraum durch den vorgehenden Trupp kommt es jedoch zur Ausbreitung des Brandrauchs und einer Änderung der Gesamtsituation (Pulm 2018, S. 106–108). Die Feuerwehr hat selbst im Rahmen ihrer Arbeit zur Ausbreitung des Schadens beigetragen und möglicherweise Menschen in anderen Gebäudeteilen durch Rauchausbreitung gefährdet. Während zuvor ein einziges Zimmer einen Schaden erlitten hat und sich Rauch nur in einem einzigen Raum aufhielt, ist nun die gesamte Nutzungseinheit oder darüber hinaus der Treppenraum bis zu einer Sanierung für Bewohner oder Arbeitnehmer nicht nutzbar (Pulm 2018, S. 100–102).

Heute setzen immer mehr Feuerwehren unterschiedliche Taktiken und die zu deren Umsetzung notwendigen neuen technischen Geräte ein, um genau solche Szenarien zu verhindern. Rauchschäden sollen so gering wie möglich bleiben und Flucht- und Rettungswege insbesondere der Treppenraum als baulicher Rettungsweg sollen von Rauch freigehalten werden (z.B. Reick, 2007) . Neben mobilen Belüftungsgeräten mit unterschiedlichen Laufrädern und Antriebsmaschinen, kommen dabei auch Entwicklungen wie der mobile Rauchverschluss und Lutten (eine luftdichte Röhre zur gezielten Belüftung) zum Einsatz um Gebäudeabschnitte von Rauch zu befreien oder diesen davon fernzuhalten.

Neben den Schäden durch Brandrauch an Bauwerken ergeben sich während Brandeinsätzen für Einsatzkräfte der Feuerwehr durch Brandrauch folgende Gefährdungen:

- Thermische und -daraus folgend- körperliche Belastung der im Innenangriff eingesetzten Trupps

- Sichteinschränkung der im Innenangriff eingesetzten Trupps und -daraus folgend- schlechtere Orientierung und schlechte Wahrnehmung von Gefahrenquellen
- Auftreten von Rauchphänomenen wie Rauchgasexplosion (*engl. Backdraft*) und Rauchdurchzündung (*engl. Rollover*)
- Verlängerung von Rettungswegen durch Rauchausbreitung und damit Steigerung der Rettungszeit in Fall von Atemschutzunfällen
- Auftreten von Atemgiften

Unter dem Vorhandensein dieser Gefährdungen und der dadurch herrschenden Bedingungen arbeitet die Feuerwehr im Brandeinsatz. Von Seiten der Feuerwehr besteht daher neben der Aufgabe der Eingrenzung des Sachschadens durch Brandrauch auch das Ziel, die Arbeitsbedingungen der im Innenangriff tätigen Einsatzkräfte zu verbessern und deren Vorgehen so sicher wie möglich zu gestalten. So ergeben sich aus Sicht der Feuerwehr folgende Ziele einer Belüftung:

- Sicherheit: Vermeidung von Rauchgasexplosion oder -durchzündung
- Abführen von Brandrauch mit seinen Bestandteilen: Atemgifte sowie brennbare, korrosive und toxische Gase, Partikel und Aerosole
- Rauchfreihaltung bzw. -ableitung von Flucht-, Rettungs- und Angriffswegen für Betroffene und Einsatzkräfte
- Temperaturabnahme im Brandobjekt durch Abführen von heißem Brandrauch zur Minimierung der körperlichen Belastung der Einsatzkräfte und Reduzierung der Wärmebeaufschlagung von Bauteilen
- Verbesserung der Sichtverhältnisse für eine bessere Orientierung und dadurch schnellere Vorgehensweise von Einsatzkräften
- Schutz von nicht verrauchten Bereichen und damit die Eindämmung des Sachschadens

2.1 Rauchfreihaltung

Ist das Ziel der Belüftungsmaßnahmen das Erhalten eines vorgefundenen rauchfreien Zustands in Gebäudeabschnitten, wie beispielsweise eines Treppenraums, so kann von Rauchfreihaltung gesprochen werden. Mit mobilen Belüftungsgeräten kann analog zu einem Sicherheitstreppe mit einer Rauchdifferenzdruckanlage (RDA) ein Überdruck (genauer: positiver Differenzdruck) in dem von Rauch freizuhaltenen Bereich geschaffen werden. Wird in dem von Rauch freizuhaltenen Raum eine Öffnung zum Beispiel durch das Öffnen der zum Brandraum führenden Tür geschaffen, so strömt die Luft aus dem Raum mit Überdruck aus und kann so das Einströmen von Brandrauch verhindern (Thönißen 2019, S. 151).

Eine Abluftöffnung in den an den Treppenraum angrenzenden verrauchten Flur oder Wohnbereich ist für die erfolgreiche Durchführung wie auch bei einer RDA notwendig (Cimolino et al. 2012, S. 69; Thönißen 2019, S. 151; Norm DIN EN 12101-6, 10, 17). Daher sollten so wenig wie möglich Öffnungen vorhanden sein, d.h. im von Rauch freizuhaltenen Bereich sollten Fenstern und Türen geschlossen werden.

Anm. der Verfasser: Wenn eine Tür zum Brandraum geöffnet wird, dann strömt auch bei Überdruckbelüftung Rauch in den Treppenraum, denn nach Öffnen der Tür zum Brandraum findet praktisch sofort ein Druckausgleich statt, d.h. im Brandraum herrscht dann der gleiche Überdruck, so dass zwischen Treppenraum und Brandraum keine Druckdifferenz mehr vorhanden ist.

Auch ein Löschangriff bei dem mit der Luftströmung vorgegangen wird, ist eine Maßnahme zur Rauchfreihaltung. Vor dem Betreten des Brandraums zur Durchführung der Brandbekämpfung wird von außen am Brandraum eine Abluftöffnung geschaffen und ein mobiles Belüftungsgerät an der Hausabschlusstür in Stellung gebracht und in Betrieb genommen. Nun kann der in den Brandraum vorgehende Trupp mit dem Luftstrom vorgehen und der Rauch wird sofort abgeführt, ohne dass dieser im großen Maß nicht verrauchte Bereiche, wie beispielsweise einen Flur oder Treppenraum mit Brandrauch beaufschlagt (Pulm 2018, S. 122–124). Zur Optimierung der Rauchfreihaltung führen Feuerwehren neben mobilen Belüftungsgeräten so genannte mobile Rauchverschlüsse mit. Diese werden als Vorhang mittels eines in der Breite anpassungsfähigen Rahmens und einer Spannstange in eine Tür eingespannt. Ihr Einbau führt zum rauchdichten Verschließen des oberen Teils der Tür und trägt so, aufgrund der kleineren Öffnungsfläche, maßgeblich zur Verbesserung einer Rauchfreihaltung im Treppenraum.

2.2 Entrauchung

Man spricht von Entrauchung, wenn die Belüftungsmaßnahme mit mobilen Belüftungsgeräten zum Zweck hat, Brandrauch aus Gebäudeabschnitten oder einzelnen Räumen abzuführen. Ziel ist es dabei eine gezielte Strömung zu erzeugen und Brandrauch aus einzelnen Räumen auf festgelegten Strömungswegen ins Freie abzuführen. Prinzipiell lässt sich das Vorgehen bei der Entrauchung in vier Schritte aufteilen.

1. Festlegen und/oder Schaffen einer Abluftöffnung von Innen oder Außen
2. Festlegen einer Zuluftöffnung und Platzieren eines Belüftungsgeräts
3. Schaffen eines möglichst störungsarmen Strömungswegs von Zuluft- zu Abluftöffnung durch Schließen von Türen, Fenstern und Toren und eventuell Offenhalten von selbstschließenden Türen
4. Inbetriebnahme des Belüftungsgeräts

In der Regel werden dazu mobile Belüftungsgeräte durch die Feuerwehr vor Hauseingangstüren im Freien platziert. Die Entrauchung von einem Treppenraum erfolgt dann zum Beispiel mit dem Schaffen einer Abluftöffnung am höchstgelegenen Fenster des Treppenraums und dem Verschließen der Türöffnung zum Brandraum (z.B. Müller 2016, Müller, Reick 2011).

Ist ein fensterloser oder gefangener Raum mit Rauch gefüllt, so bietet sich alternativ die Anwendung einer Unterdruckbelüftung an. Das Belüftungsgerät wird dazu gewendet, sodass nun Luft „angesogen“ wird. Mit Hilfe von an den Lüfter angeschlossenen Lutten kann dann beispielsweise der Rauch durch rauchfreie Räumlichkeiten hindurch ins Freie geleitet werden ohne diese zu beschädigen (Cimolino et al. 2012, S. 106–108).

3. Grundlagen der Ventilation

Natürliche und maschinelle Ventilation

Zur Umsetzung dieser Ziele stehen der Feuerwehr die folgenden Maßnahmen zur Durchführung einer taktischen Ventilation zur Verfügung.

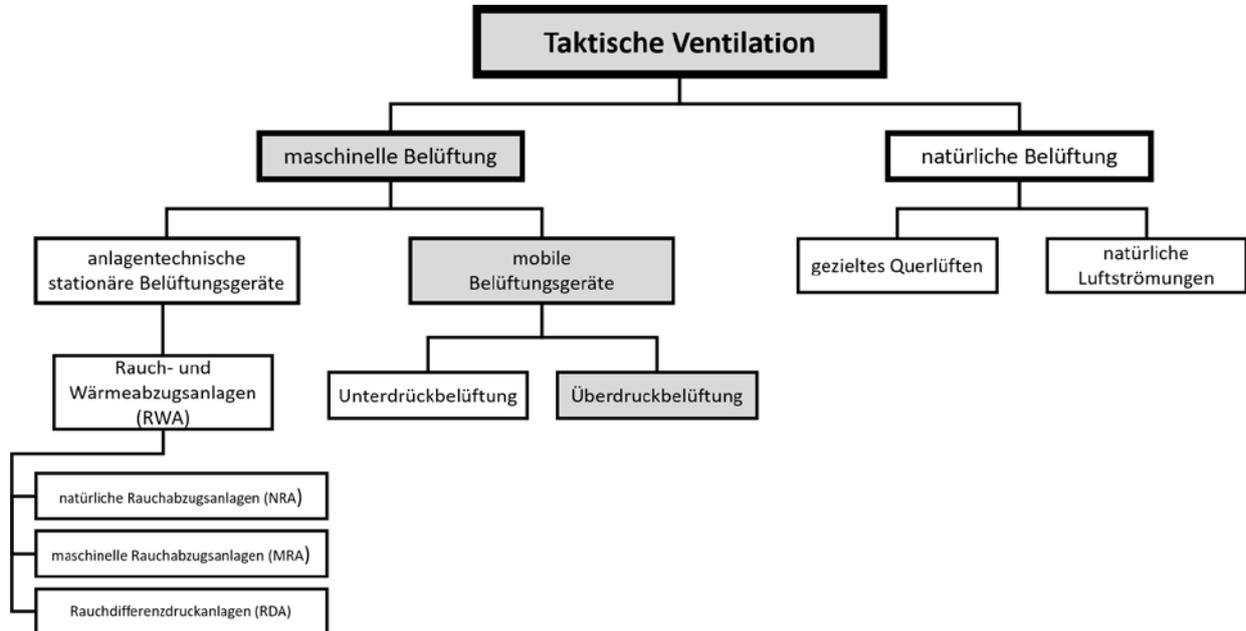


Abb. 1: Übersicht über die Möglichkeiten der Feuerwehr zur Durchführung einer taktischen Ventilation

In dem vorliegenden Bericht wird ausschließlich der auf Abb. in grau hinterlegte Bereich näher betrachtet.

3.1 Maschinelle Ventilation mit Abluftöffnung

Im Rahmen der maschinellen Ventilation führen Feuerwehren auf einem Teil ihrer genormten Löschfahrzeuge mobile Belüftungsgeräte mit (Norm DIN 14530-1 bis 27). Dabei kommen Geräte mit Verbrennungs- und Elektromotoren sowie mit hydraulischen Antrieben zur Anwendung (Cimolino et al. 2012, S. 77–83). Diese können aus den Geräteräumen der Fahrzeuge von Hand entnommen werden und an ihrer vorgesehenen Position platziert werden. Darüber hinaus verfügen Feuerwehren über mobile Großventilatoren. Diese sind auf Abrollbehältern, Anhängern, ferngesteuerten Kettenfahrzeugen oder Nutzfahrzeugfahrgestellen aufgebaut (Cimolino et al. 2012, S. 77).



Abb. 2: Mobiler Großventilator der Branddirektion Frankfurt am Main im nach hinten abgekippten Betriebszustand mit angeschlossener Lutte

Eine weitere Möglichkeit der maschinellen Einsatzstellenbelüftung besteht in der Nutzung von fest verbauten anlagentechnischen Belüftungsgeräten, welche im Rahmen des vorbeugenden Brandschutzes in Gebäuden verbaut werden. Solche Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) können durch die Feuerwehr genutzt werden, wenn sie nicht ohnehin automatisch beispielsweise durch eine Brandfallsteuerung aktiviert werden.

3.2 Maschinelle Ventilation ohne Abluftöffnung

Der Einsatz eines Überdrucklüfters, ohne dass eine Abluftöffnung vorhanden ist, ist nur in nicht vom Brand betroffenen Bereichen sinnvoll. Hier soll durch den erzeugten Überdruck das Eindringen von Brandrauch verhindert werden (Schmidt 2014, S. 41). Als denkbares Einsatzszenario sei hier exemplarisch ein Brand in einer Tiefgarage mit angrenzendem Wohnhaus genannt. Um das Treppenraum rauchfrei zu halten kann durch das obengenannte Vorgehen in diesem ein Überdruck erzeugt werden. Der Angriffsweg darf in diesem Fall nicht durch das Treppenraum führen, die Tür zur Tiefgarage muss geschlossen sein.

Anm. der Verfasser: Es muss zwingend beachtet werden, dass Brandrauch der in diesen Bereich eindringt nicht kontrolliert abgeführt wird und durch den Überdruck in vom Brand nicht betroffene Bereiche gedrückt werden kann. Die Anwendung dieser Taktik ist daher genau abzuwägen.

3.3 Natürliche Ventilation

Alternativ kann im Rahmen einer natürlichen Belüftung eine Einsatzstellenbelüftung durch Öffnen von Fenstern und Türen durchgeführt werden. Dabei werden natürliche Strömungen genutzt.

3.3.1 Einfluss von Wind

Bei der taktischen Ventilation kann Wind sowohl nützlich als auch schädlich sein. Aus diesem Grund sind vor dem Lüftereinsatz die Windverhältnisse an der Einsatzstelle zu klären. Soweit möglich sollte der Wind für die Ventilation genutzt werden. Die Zuluftöffnung sollte sich auf der dem Wind zugewandten Seite des Gebäudes befinden. Die lokalen vorherrschenden Windbedingungen müssen dabei beachtet werden. Da bereits relativ niedrige Windgeschwindigkeiten von 25km/h beim direkten Auftreffen auf die Abluftöffnung den Erfolg der Belüftungsmaßnahmen zunichtemachen können, sollte sich die Abluftöffnung soweit möglich immer auf der windabgewandten Seite des Gebäudes befinden. Ist die Windgeschwindigkeit an der Abluftöffnung zu hoch, kann durch diese keine Luft/Rauchgase entweichen. In diesem Fall besteht die Gefahr einer unkontrollierten Brandausbreitung. Abhilfe kann in diesem Fall ein leistungsstärkerer Lüfter, die Verwendung eines mobilen Rauchverschlusses an der Zuluftöffnung oder unter Umständen eine Verkleinerung der Abluftöffnung schaffen (Schmidt 2014, 14, 15; Müller 2016, S. 17). Der Einfluss von Wind muss insbesondere bei der Belüftung von höherliegenden Stockwerken und bei freistehenden Gebäuden beachtet werden (Müller 2016, S. 17).

3.3.2. Zuluftöffnung

Durch die Zuluftöffnung strömt die Luft in das Gebäude. Als Zuluftöffnungen werden üblicherweise Türen oder Tore verwendet. Da der Luftkegel des Überdrucklüfters die gesamte Öffnung abdecken soll, sollte diese in Abhängigkeit zum verwendeten Lüfter nicht zu groß gewählt werden. In der Literatur findet sich die Angabe, dass bei der Verwendung eines Lüfters eine Größe von 3 m x 3 m das Maximum darstellt. (Schmidt 2014, S. 23) Teilweise kann die Größe der Zuluftöffnung, durch die Verwendung von mobilen Rauchverschlüssen oder durch das partielle Schließen eines Tores angepasst werden. Es liegt auf der Hand, dass die optimale Größe der Zuluftöffnung von der Anzahl und Art der verwendeten Lüfter abhängt.

3.3.3.Abluftöffnung

Für den Erfolg der Belüftungsmaßnahmen spielt die Größe und Position der Abluftöffnung eine maßgebliche Rolle. In der Literatur finden sich zur Positionierung der Abluftöffnung folgende Hinweise (Fabian Müller 2016, 16,17; Schmidt 2014, S. 42):

- Abluftöffnung so nah wie möglich am Brandherd
- Bei Entrauchung eines Treppenraumes nach Möglichkeit das oberste Fenster als Abluftöffnung wählen

- Gefahr der Brandausbreitung über den Abluftstrom / die Abluftöffnung beachten
- Der Einfluss von Wind muss beachtet werden
- Die Abluftöffnung darf niemals zum Betreten des Gebäudes genutzt werden
- Kein Aufenthalt zwischen Brandherd und Abluftöffnung

Für die optimale Größe werden jedoch unterschiedliche Empfehlungen gegeben. Die untenstehende Tabelle listet einige Angaben aus der Literatur auf.

Empfohlene Größen der Abluftöffnung					
Fachbuch Einsatzpraxis Taktische Ventilation	LFS Baden- Württemberg	Veröffentlichung Brandschutz – Deutsche Feuerwehr- Zeitung	Die Roten Hefte 203 Überdruck belüftung	Zeitschrift Brandwacht	Veröffentlichung Brandschutz – Deutsche Feuerwehr-Zeitung
So groß wie möglich	Verhältnis Abluft- zu Zuluftöffnung 1:1	Ideal: drei- bis vierfache Größe der Zuluftöffnung Aber: Maximal achtfache Größe der Zuluftöffnung	Je nach Lüfterleistung und Anzahl $\frac{3}{4}$ bis $1 \frac{3}{4}$ Größe der Zuluftöffnung	So groß wie möglich	So viele Abluftöffnungen wie möglich

Tab. 1: Abluftöffnungen. Größenempfehlungen aus der Literatur (nach (Cimolino et al. 2012, S. 46; Müller 2016, S. 16–17; Drebinski 2014; Schmidt 2014, 35,36; Benedikt Mattern 2018; Lambert et al. 2016)

Welche Größe für die Abluftöffnung zu wählen ist, hängt letztendlich vom Ziel der Taktischen Ventilation ab. Mit steigender Größe der Abluftöffnung nimmt bis zu einem gewissen Punkt auch der Volumenstrom, welcher das Gebäude verlässt zu. Der relative Überdruck im Gebäude sinkt jedoch (Reick 2015, S. 21). Ist das Ziel die Rauchfreihaltung, so sollte folglich eine kleinere Abluftöffnung geschaffen werden. Soll ein verrauchter Bereich entrauchet werden empfiehlt sich eher eine große Abluftöffnung. Es ist jedoch zu beachten, dass mit steigender Größe der Abluftöffnung deren Anfälligkeit für Wind zunimmt und das gesamte Strömungssystem schwieriger zu kontrollieren wird (Reick 2015, S. 21).

Wird die Abluftöffnung zu klein gewählt, kann Rauch beispielsweise durch Türritzen in bisher unbetroffene Bereich gedrückt werden (Schmidt 2014, S. 37)^

4. Übersicht über die Lüftervarianten der Feuerwehr

4.1 Antriebsarten

Lüfter für die Feuerwehr sind mit unterschiedlichen Antrieben ausgestattet. Aktuell werden Lüfter mit Verbrennungsmotor, Elektromotor und mit hydraulischem Antrieb auf dem Markt angeboten. Nachfolgend werden die genannten Antriebsarten und deren Vor- und Nachteile vorgestellt.

4.1.1 Verbrennungsmotor

Die wohl verbreitetste Antriebsart für Lüfter der Feuerwehr sind Verbrennungsmotoren. Üblicherweise werden Viertakt-Motoren mit Leistungen zwischen 2 PS und 16 PS verwendet. (Großlüfter ausgenommen). Da Lüfter mit Verbrennungsmotor auf keine weitere Infrastruktur (Kabel, Schlauch) angewiesen sind, lassen sie sich schnell und flexibel aufstellen sowie neu positionieren. Der Lärmpegel dieser Antriebsart ist im Vergleich zu elektronischen- oder hydraulischen Antriebsarten jedoch um ein vielfaches höher. Der größte Nachteil von Verbrennungsmotoren sind jedoch die Abgase, welche direkt am Lüfter emittiert werden und in das belüftete Gebäude gelangen können (Cimolino et al. 2012, 78).



Abb. 3: Lüfter mit Verbrennungsmotor (BIG Fire & Ventilation 2020)

4.1.2 Elektromotor 230/400V kabelgebunden

Neben Verbrennungsmotoren werden auch Elektromotoren als Antrieb für Lüfter verwendet. Die Leistungen dieser Elektromotoren liegen üblicherweise zwischen 1,1 kW und 2,2 kW. Die Energieversorgung der Elektromotoren erfolgt zumeist über Kabelleitungen die an eine Stromquelle (üblicherweise Feuerwehr-Stromerzeuger) angeschlossen werden.

4.1.3 Elektromotor akkubetrieben

Neben kabelgebundenen Elektrolüftern sind seit kurzer Zeit auch akkubetriebene Ventilatoren auf dem Markt zu finden. Akkubetriebenen Elektrolüfter weisen Leistungen im Bereich von 0,6 kW bis 1,25 kW auf. Die Laufzeit liegt dabei bei Vollast zwischen 20 min und 60 min. Im Gegensatz zu Lüftern mit Verbrennungsmotoren werden Lüfter mit Elektromotor auch in explosionsgeschützten Ausführungen angeboten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Ex-Schutz i.d.R. nur für Motor, Kabel etc. gilt. Betriebsbedingt können durch angesaugte Materialien dennoch Funken entstehen. Vor allem der emissionsfreie Betrieb ist bei Elektrolüftern von Vorteil. So können durch das Fehlen von Abgasen (am Lüfter) diese Modelle auch in Gebäuden eingesetzt werden (Cimolino et al. 2012, S. 80). Wie auf Abb. zu sehen, ist darüber hinaus i.d.R. der Einsatz in allen Positionen möglich. Dadurch sind Elektrolüfter beispielsweise auch zur Belüftung von Kanalanlagen geeignet.



Abb. 4: Belüftung von Kanalanlagen (www.lueftertraining.de 2020)

Nachteile von Elektrolüftern ergeben sich hauptsächlich durch die Stromversorgung. So können, sofern keine Anlaufstrombegrenzer eingesetzt werden, Sicherungen durch die hohen Ströme beim Anlaufen der Elektromotoren auslösen. Da abgesehen von akkubetriebenen Lüfter eine externe Stromquelle erforderlich ist, ergeben sich Nachteile vor allem durch die benötigten Kabelleitungen. Für die Verlegung der Kabel vor der Inbetriebnahme wird zusätzlich Zeit benötigt. Außerdem können elektrische Gefahren entstehen z.B. durch scharfe Kanten, Glassplitter etc. (Cimolino et al. 2012, S. 80).

Bei akkubetriebenen Elektrolüftern sind hingegen die Laufzeit und die Leistung die limitierenden Faktoren.

4.1.4 Hydraulischer Antrieb (Wasserturbine)

Eine weitere Antriebsart ist der hydraulische Antrieb mit einer Wasserturbine. Dabei wird der Lüfter mit Hilfe des Wasserdrucks betrieben. Der erforderliche Druck kann mit der Tragkraftspritze oder besser mit der Feuerlöschkreiselpumpe des Fahrzeuges aufgebaut werden. Am Lüfter werden zwei Schläuche (Vorlauf und Rücklauf) angeschlossen.



Abb. 5: Wasserbetriebener Lüfter (Freiwillige Feuerwehr Tuttlingen: Überdrucklüfter 2020)

Durch die benötigte Wasserversorgung zumeist (B-Schläuche) dauern Aufbau und Stellungswechsel bei wasserbetriebenen Lüftern vergleichsweise lange. Außerdem wird eine Feuerlöschkreiselpumpe gebunden. Für die Aufstellung in verrauchter Umgebung (z.B. vor der Abluftöffnung) sind wasserbetriebene Lüfter aufgrund ihrer Sauerstoffunabhängigkeit und Robustheit (sowohl Antrieb als auch Energieversorgung) gut geeignet (Cimolino et al. 2012, 82, 83). Modell und herstellerabhängig können sie in explosionsgefährdeter Umgebung eingesetzt werden. Analog zum Elektrolüfter treten darüber hinaus keine schädlichen Emissionen am Lüfter selbst auf.

4.2 Injektor- und Überdrucklüfter

Belüftungsgeräte der Feuerwehr können in Injektor- und in Überdrucklüfter unterteilt werden. Der Injektorlüfter erzeugt einen konzentrierten Luftstrahl mit vergleichsweise hoher Strömungsgeschwindigkeit und geringer Strahlaufweitung. Vor der Zuluftöffnung soll so, gemäß Injektor-Prinzip, weitere Luft mitgerissen werden. Die Leistung des Lüfters soll dadurch erhöht werden (Reick 2015, S. 29 - 31).



Abb. 6: Injektorlüfter mit geringer Strahlaufweitung (Reick, 2015)

Im Gegensatz zum Injektorlüfter ist der Überdrucklüfter so aufgebaut, dass die Energie eher in Druck anstelle von Strömungsgeschwindigkeit freigesetzt wird. Vor dem Lüfter bildet sich ein öffnender Kegel aus, d.h. der Strahl hat eine hohe Aufweitung. Mit diesem sollte die gesamte Zuluftöffnung abgedeckt werden (Reick 2015, S. 33).



Abb. 7: Überdrucklüfter mit hoher Strahlaufweitung (Reick, 2015)

Ungeachtet der aufgezeigten Unterschiede ist es fraglich, inwieweit die Vorteile des Injektorlüfters in der Praxis zum Tragen kommen. Besteht ein großer Gegendruck beispielsweise durch eine kleine Abluftöffnung oder trifft der Luftstrahl mit seiner hohen Geschwindigkeit rechtwinklig auf Hindernisse, so sinkt die Effektivität des Injektorlüfters (Reick 2015, 32,33). Reick schreibt in *Die roten Hefte Ausbildung kompakt, Mobiler Rauchverschluss*: „Aufgrund der immer unterschiedlichen baulichen Geometrie in Gebäuden ist das klassische Wirkprinzip eines Überdrucklüfters daher im

Feuerwehreinsatz in aller Regel einfacher, wirkungsvoller und sicherer anzuwenden“ (Reick 2015, S. 33). Die Landesfeuerweherschule Baden-Württemberg vertritt in der Veröffentlichung “Hinweise zur Ventilation bei Brandeinsätzen“ die Annahme, dass sich bei der überwiegenden Zahl der Wohngebäude aufgrund der vorhandenen Randbedingungen ein ähnliches Verhalten bei beiden Lüfbertypen zeigen wird. Bei speziellen Gebäudegeometrien können jedoch beide Lüfbertypen Vorteile mit sich bringen (Müller 2016, S. 2).

5. Positionierung von Lüftern / Abstand zur Zuluftöffnung

Der Abstand zwischen Lüfter und Zuluftöffnung hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Effektivität der Belüftungsmaßnahmen. Der Luftstrom breitet sich kegelförmig in Strömungsrichtung aus, wobei der Öffnungswinkel des Kegels bei Injektorlüftern kleiner ist, so dass diese daher in größerem Abstand als Überdrucklüfter positioniert werden sollten. Ziel ist es die gesamte Zuluftöffnung mit diesem Luftkegel abzudecken. Wird der Lüfter zu nah an der Zuluftöffnung platziert, deckt der Luftkegel nicht die gesamte Fläche der Zuluftöffnung ab. In vereinfachten Bildern ausgedrückt: Da das System (z.B. Treppenraum) in diesem Fall gegenüber der Umgebung nicht "abgeschlossen" ist, kann an den freien Stellen der durch den Lüfter aufgebaute (relative) Überdruck entweichen. Es kommt zu einer gegengerichteten Strömung an der Zuluftöffnung. Wird der Abstand zwischen Lüfter und Zuluftöffnung jedoch zu groß gewählt, trifft ein unnötig großer Anteil des Luftkegels die Wände im Umfeld der Tür wodurch sich die Effizienz der Belüftung verringert. Auch die Strömungsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung ab. In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur optimalen Entfernung zwischen Lüfter und Zuluftöffnung. Eine Auswahl wird in Tabelle 2 dargestellt.

	Empfohlener Abstand zwischen Lüfter und Zuluftöffnung			
Technologie	Fachbuch Einsatzpraxis	Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg	Veröffentlichung Brandschutz Zeitschrift	Die Roten Hefte Überdruckbelüftung
Propeller (=Überdruckbelüfter)	1,5 m – 2 m	Abstand zwischen Belüftungsgerät und Zuluftöffnung sollte der Höhe der Zuluftöffnung entsprechen. (normale Eingangstür ca. 2 m)	1 m (1,5 m – 2 m)*	Abstand zwischen Belüftungsgerät und Zuluftöffnung sollte der Diagonalen der Zuluftöffnung entsprechen (normale Eingangstür ca. 2 m)
Turbinen (=Injektorlüfter)	2,5 m – 3 m		1 m (1,5 m – 2 m)*	
(Herstellerbegriff** für eine Lüfterbauart)	2 m – 6 m		2 m – 2,5 m	
*Aus einsatztaktischen Gründen empfohlene Entfernung (Nutzung als Eingang / Ausgang)				
**Anm. des Verfassers. Die herstellereigene Bezeichnung soll hier nicht genannt werden				

Tab. 2: Empfehlungen aus der Literatur: Abstand zur Zuluftöffnung (Tür) (nach (Cimolino et al. 2012; Fabian Müller 2016; Mark Drebinski 2014; Schmidt 2014)

Anm. der Verf.: Offensichtlich hat hier der Anwender die Qual der Wahl. Im folgenden Teil des Berichts soll der Anwender Entscheidungshilfen für die Wahl der Lüfterposition finden.

6. Methodik der experimentellen Versuche

Durch Versuche, die an der Forschungsstelle für Brandschutzforschung durchgeführt werden, soll ein grundlegendes Verständnis für die Überdruckbelüftung geschaffen werden. Außerdem sollen Angaben aus der Literatur über den Einfluss des Abstands zwischen Lüfter und Zuluftöffnung auf die Wirksamkeit von Belüftungsmaßnahmen experimentell überprüft werden.

Dafür wird der Differenzdruck bei verschiedenen Konfigurationen (Entfernung zwischen Zuluftöffnung und Lüfter, Größe der Zuluftöffnung und die Verwendung einer Lutte) experimentell ermittelt. Durch Messung und Vergleich der Differenzdrücke soll die Effektivität der Überdruckbelüftung quantifiziert werden. Die Messungen werden in, geschlossenen Räumen (bzw. Volumen) mit einer einzigen Zuluftöffnung durchgeführt. Es ist zu beachten, dass die absolut gemessenen Drücke bei dieser Arbeit nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Druckdifferenzen sind hier maßgeblich.

Vorversuche zur Vermessung der Strömungsgeschwindigkeit

Für die Durchführung der Strömungssimulation werden die Strömungsgeschwindigkeiten zweier Lüfter in unterschiedlichen Entfernungen gemessen, um die Randbedingungen zu ermitteln. Für die Messung werden zwei unterschiedliche Messgeräte verwendet.

Vorversuche zur Messung der Druckdifferenzen

Bei diesen Vorversuchen werden zwei unterschiedliche Lüftermodelle nacheinander in verschiedenen Entfernungen vor definierten Volumen unterschiedlicher Größen platziert. Es wird erwartet, dass der Druck im Inneren der Volumen von der Entfernung abhängt und ein Maximum bei einer bestimmten Entfernung aufweist. Außerdem soll der Einfluss der Öffnungsgröße auf die Überdruckventilation, betrachtet werden. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse soll so ermöglicht werden.

Durchführung Versuch im Treppenraum

Nach den Vorversuchen sollen Versuche in einem deutlich größeren Volumen (Treppenraum) durchgeführt werden. Die Versuche folgen der gleichen Systematik wie die Vorversuche. Zusätzlich soll jedoch noch ein Versuch mit einer Lutte zwischen Lüfter und Zuluftöffnung durchgeführt werden. Durch die Lutte wird ein nahezu abgeschlossenes Volumen geschaffen in dem deutlich höhere Drücke bei gleicher Lüfterleistung erwartet werden.

6.1. Vorversuche „Strömungsgeschwindigkeit“

Versuchsaufbau (Vorversuche) Strömungsgeschwindigkeit.

Messung Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Entfernung

Im Rahmen der Vorversuche werden zunächst die Strömungsgeschwindigkeit des Luftstroms in Abhängigkeit zur Entfernung zwischen Messstelle und Lüfter messtechnisch erfasst.

Die Vorversuche dienten in erster Linie dazu, sich mit der Messtechnik vertraut zu machen, da für die Realversuche im Bürogebäude nur ein einziger Messtag zur Verfügung stand.

Bei den nachfolgenden Realversuchen wird die Strömungsgeschwindigkeit ebenfalls gemessen und die Ergebnisse in diesem Kapitel vorgestellt. Die Messergebnisse werden benötigt, um die Randbedingungen bei der Strömungssimulation zu definieren.

6.1.1. Akkulüfter



Abb. 8: Akkulüfter (LEADER GmbH o.J.)

In der untenstehende Tabelle 2 sind die Daten des Lüfters nach Herstellerangaben aufgelistet. Um eine gleichmäßige Lüfterleistung bei allen Versuchen zu gewährleisten wurde der Lüfter über die externe Stromversorgung betrieben. Den Herstellerangaben entsprechend ist die Lüfterleistung im Akkubetrieb 8% geringer.

Luftleistung im Freien	28.050 m ³ /h (25.700 m ³ /h Akkubetrieb)
Luftleistung ÜDB nach AMCA ¹	17.700 m ³ /h (16.200 m ³ /h Akkubetrieb)
Motor	600 W mit Variator
Durchmesser Lüfterrad	420 mm

¹ [ANSI/AMCA Standard 240: Laboratory Methods of Testing Positive Pressure Ventilators for Aerodynamic Performance Rating](#)

Tab. 3: Daten Akkulüfter nach Herstellerangaben (LEADER GmbH 2019a)

6.1.2. Kabelgebundener Elektrolüfter 230V



Abb. 9: Kabelgebundener 230V-Lüfter. (LEADER GmbH o.J.)

Luftleistung im Freien	48.0000 m ³ /h
Luftleistung ÜDB nach AMCA ¹	27.140 m ³ /h
Motor	2,2 kW
Durchmesser Lüferrad	420 mm
¹ ANSI/AMCA Standard 240: Laboratory Methods of Testing Positive Pressure Ventilators for Aerodynamic Performance Rating	

Tab. 4: Daten kabelgebundener 230V-Lüfter nach Herstellerangaben (LEADER GmbH 2019b)

6.1.3. Messtechnik

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit werden die oben genannten Lüfter innerhalb eines Gebäudes aufgestellt und betrieben. Vor dem Lüfter, horizontal und vertikal zentriert, befindet sich die Messstelle. Diese besteht aus den unten beschriebenen zwei Messgeräten die in gleicher Höhe und gleicher Entfernung zum Lüfter im 90° Winkel zu diesem ausgerichtet an einem Laborstativ befestigt sind (Abb. 10, 11).



Abb. 10: Staudruckanemometern und Flügelrad-Anemometer



Abb. 11: Seitenansicht Messstelle Strömungsgeschwindigkeit

Abb. 12 und 13 zeigen den Versuchsaufbau. Die in Abb. 12 oben zu sehende Tür ist bei den Versuchen geschlossen. Bei der unteren Tür, die als Abluftöffnung dient, sind beide Flügel geöffnet.

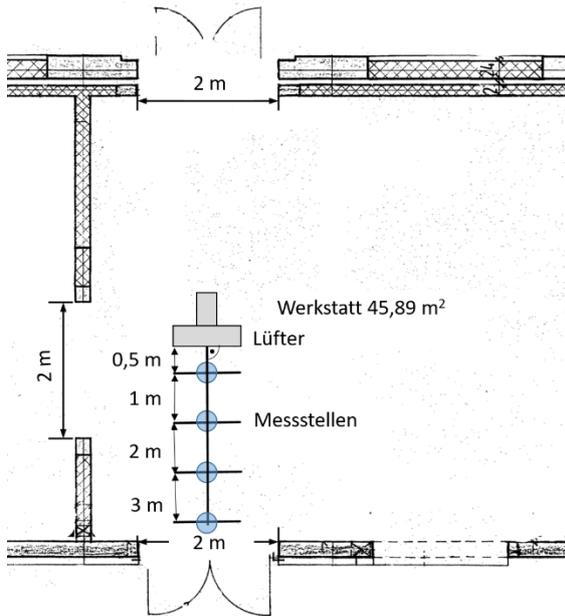


Abb. 12: Skizze Grundriss & Versuchsaufbau Bestimmung Strömungsgeschwindigkeit



Abb. 13: Versuchsaufbau Bestimmung Strömungsgeschwindigkeit

6.1.3.1 Messgerät Trotec TA 400

Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit kommt unter anderem das Staudruck-Anemometer TA 400 der Firma Trotec zum Einsatz. Das Staudruck-Anemometer verwendet dafür eine Prandtlsonde.

Zur Durchführung einer Messung wird die Prandtlsonde im Luftstrom platziert und die Rohröffnung des Pitotrohrs der Strömungsrichtung entgegengesetzt ausgerichtet. Von essentieller Bedeutung ist dabei die Ausrichtung der Rohröffnung. Die Rohröffnung sollte nicht mehr als 10° in Bezug auf den Luftstrom geneigt sein (Trotec ohne Datum). Im Idealfall beträgt dieser Winkel 0° , sodass die Strömung parallel zur Röhre verläuft und frontal auf die Rohröffnung trifft. Die seitlichen Öffnungen zur Messung des statischen Drucks liegen dann rechtwinklig zur Strömungsrichtung.

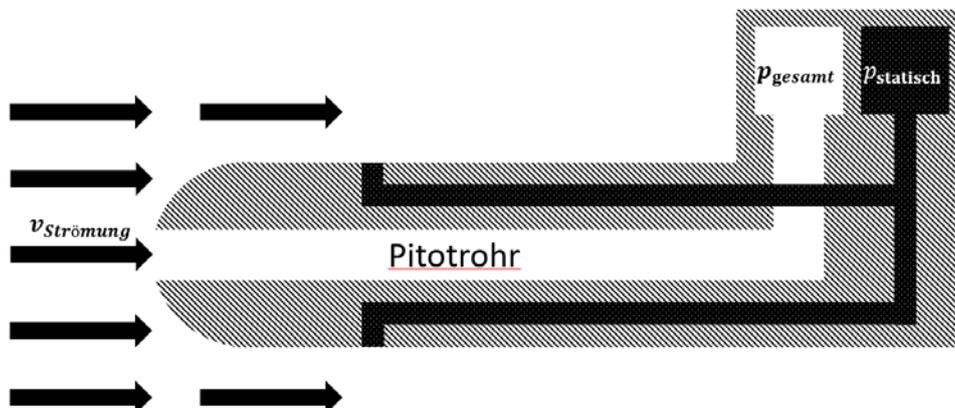


Abb. 14: Schematischer Aufbau einer Prandtlsonde, eigene Darstellung.

Mittels Drucksensoren kann das Messgerät zunächst den Gesamtdruck [p_{ges}] sowie den statischen Druck [p_{stat}] bestimmen. Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit [$v_{Strömung}$] verwendet das an die Prandtlsonde angeschlossene Messgerät die Bernoulli-Gleichung, wonach die Summe aus statischem und dynamischem Druck [$p_{dynamisch}$] den Gesamtdruck ergibt. Daraus lässt sich der vorliegende dynamische Druck und folglich unter Zuhilfenahme der Stoffdichte [ρ] des strömenden Mediums die Strömungsgeschwindigkeit bestimmen.

$$p_{dynamisch} = p_{gesamt} - p_{statisch}$$

$$p_{dynamisch} = \frac{\rho}{2} \times v_{Strömung}^2$$

$$v_{Strömung} = \sqrt{\frac{2(p_{gesamt} - p_{statisch})}{\rho}}$$

Das Trotec TA400 wird auch für die Messung des Differenzdrucks verwendet.

Luftgeschwindigkeit	
Messbereich	1 m/s bis 80 m/s
Auflösung	0,01 m/s
Genauigkeit	m/s: $\pm 2,5 \%$ bei 10 m/s ¹
Luftdruck	
Druckbereich	0 bis 5000 Pa
Messbereich	5000 Pa
Auflösung	1 Pa
Genauigkeit	$\pm 0,3 \%$ bei +25 °C
¹ Genauigkeit ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit und der Größe des Luftkanals	

Tab. 5: Technische Daten Trotec TA400 nach (Trotec o. J.)

6.1.3.2 Flügelradanemometer Höntzsch Instruments μ P-Flowtherm

Für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit wurde das μ P-Flowtherm U135 mit dem Flowtherm-Sensor mn 404167 T 140 °C der Firma Höntzsch Instruments verwendet. Es handelt sich um ein Flügelradanemometer. Die Drehzahlen des Propellers werden gemessen und die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit wird daraus abgeleitet.

6.1.4 Messung Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter

Die Strömungsgeschwindigkeiten wurden bei allen 3 Leistungsstufen des Akkulüfters ermittelt.

Die folgenden 4 Diagramme zeigen die Ergebnisse bei Entfernungen von 0,5m, 1m, 2m und 3m zwischen Lüfter und Messstelle. Die grünen Linien markieren im Diagramm jeweils die Mittelwerte.

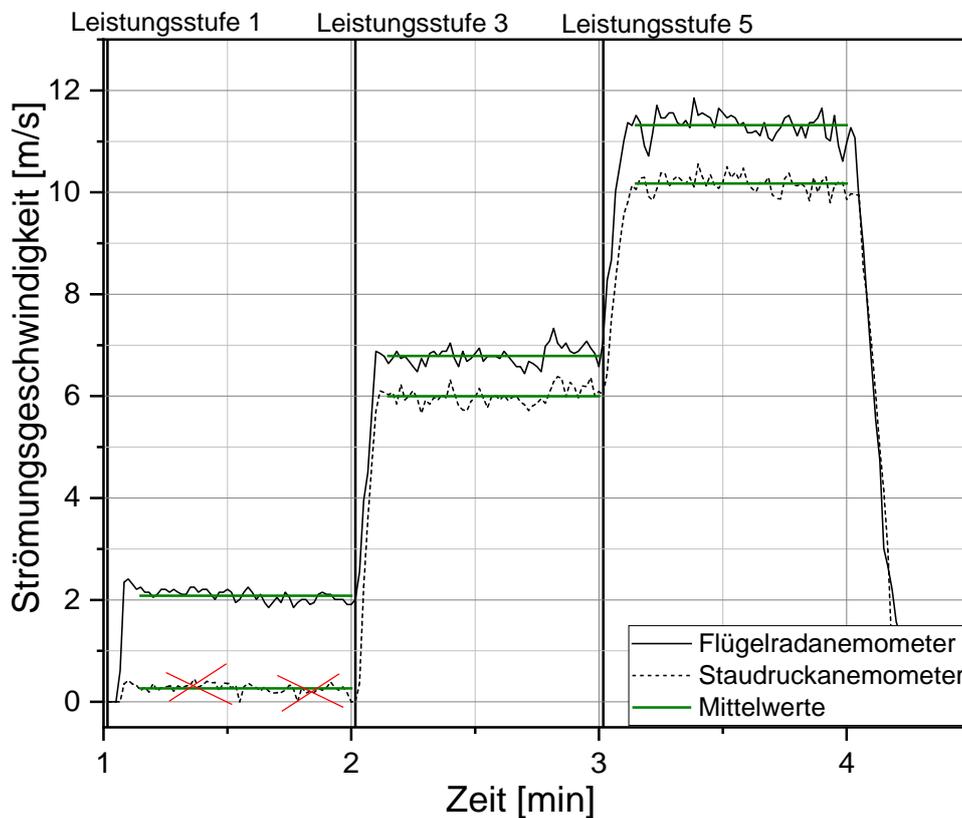


Abb: 15: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter Entfernung zur Messstelle **0,5m**. Messung mit dem Staudruckanemometer bei Leistungsstufe 1 nicht sinnvoll.

Bei eingestellter Leistungsstufe 1 wurde unter den genannten Bedingungen mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 0,26 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,09 m/s. Diese Werte sind unterhalb des vom Hersteller angegebenen Messbereichs und werden lediglich der Vollständigkeit wegen mit abgebildet. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 2,08 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,11 m/s.

Bei der Leistungsstufe 2 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 6,00 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,17 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 6,79 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,18 m/s.

Bei der Leistungsstufe 3 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 10,17 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,18 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 11,32 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,25 m/s.

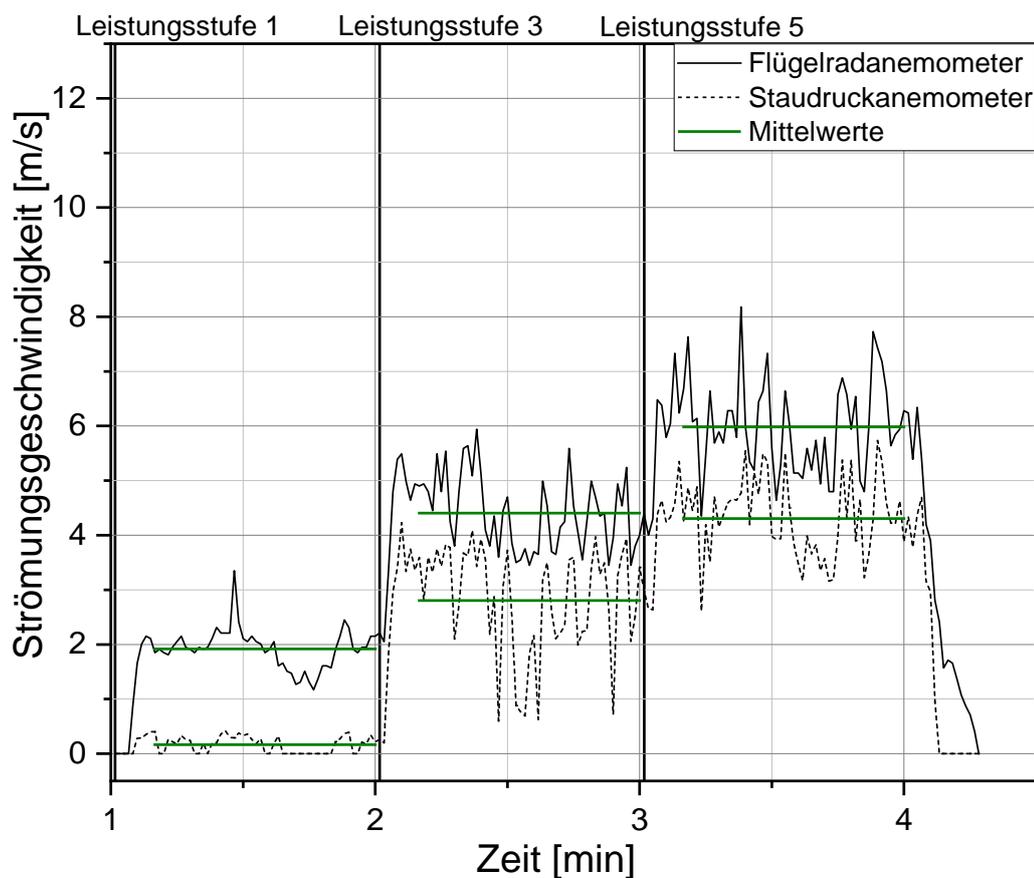


Abb. 16: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter Entfernung zur Messstelle **1m**

Bei eingestellter Leistungsstufe 1 wurde unter den genannten Bedingungen mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 0,16 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,15 m/s. Diese Werte sind unterhalb des vom Hersteller angegebenen Messbereichs und können daher nicht als repräsentativ angesehen werden. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 1,92 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,36 m/s.

Bei der Leistungsstufe 2 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 2,81 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,99 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 4,41 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,68 m/s.

Bei der Leistungsstufe 3 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 4,31 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,73 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 5,98 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,86 m/s.

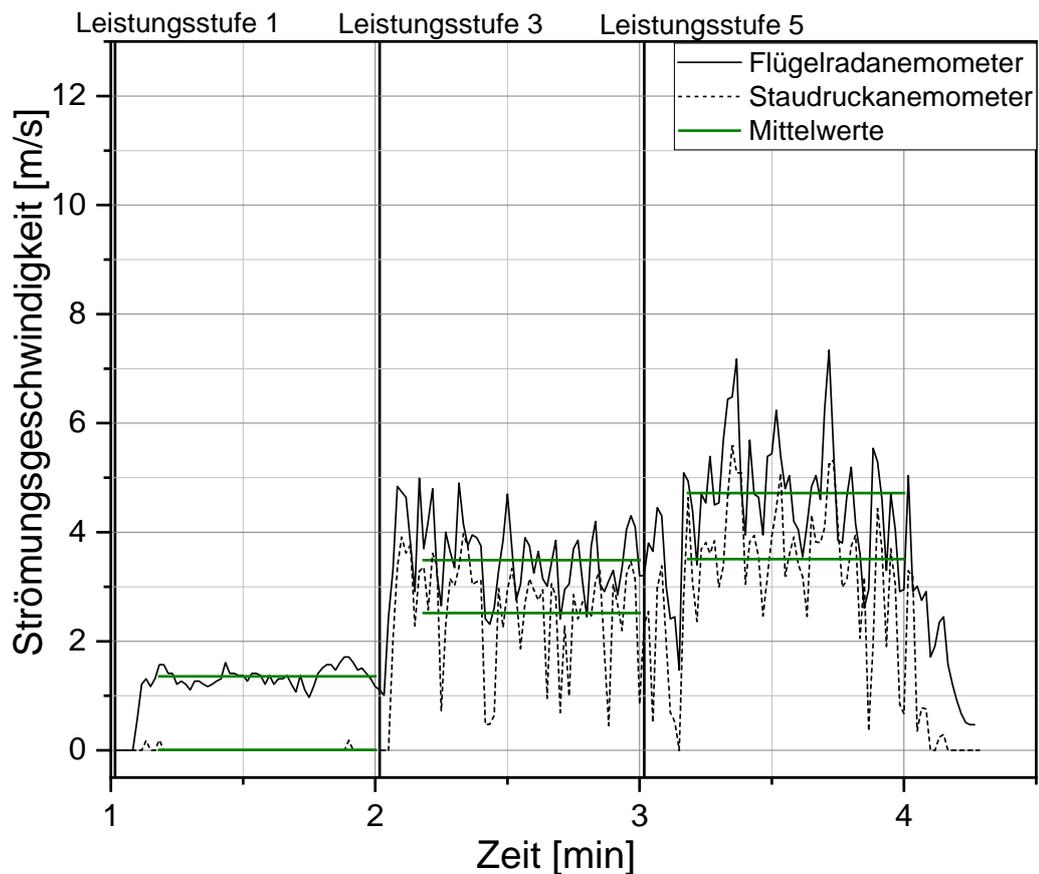


Abb. 17: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter Entfernung zur Messstelle **2m**

Bei eingestellter Leistungsstufe 1 wurde unter den genannten Bedingungen mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 0,01 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,04 m/s. Diese Werte sind unterhalb des vom Hersteller angegebenen Messbereichs und können daher nicht als repräsentativ angesehen werden. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 1,36 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,17 m/s.

Bei der Leistungsstufe 2 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 2,52 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,96 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 3,49 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,62 m/s.

Bei der Leistungsstufe 3 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 3,51 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 1,13 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 4,72 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 1,06 m/s.

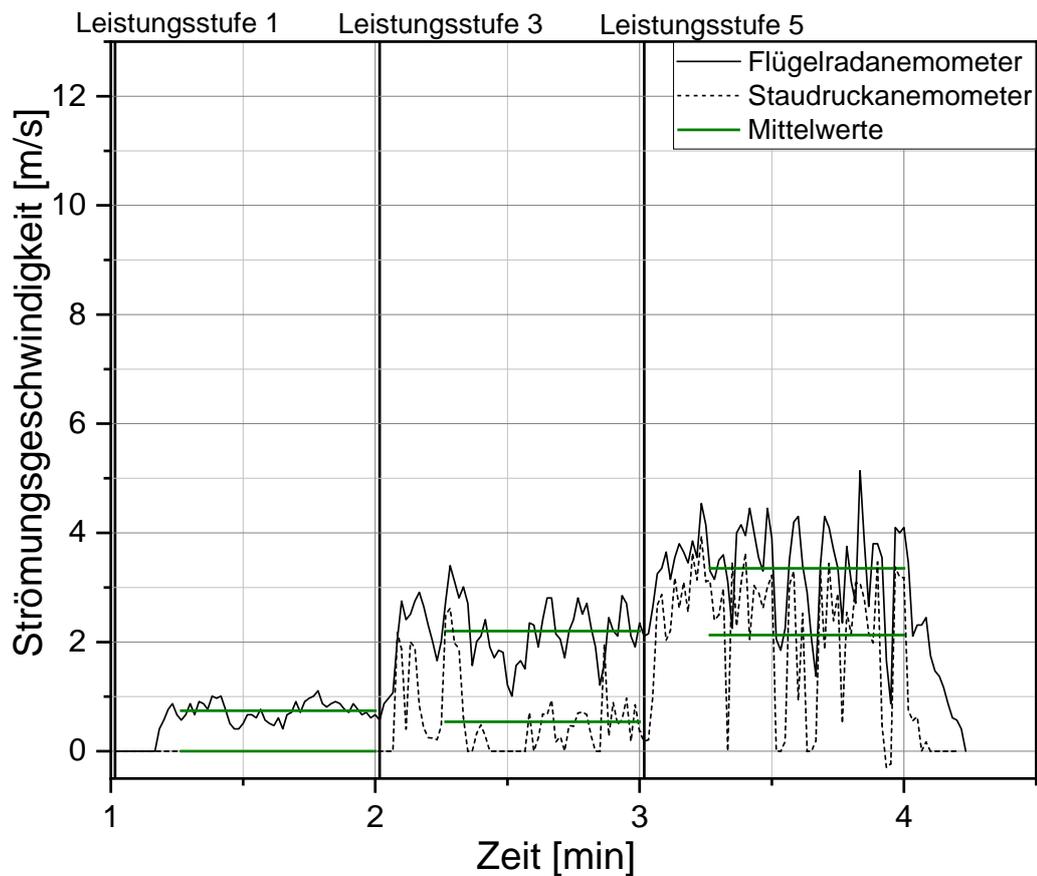


Abb. 18: Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter Entfernung zur Messstelle **3m**

Bei eingestellter Leistungsstufe 1 wurde unter den genannten Bedingungen mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 0 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0 m/s. Diese Werte sind unterhalb des vom Hersteller angegebenen Messbereichs und können daher nicht als repräsentativ angesehen werden. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 0,74 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,18 m/s.

Bei der Leistungsstufe 2 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 0,54 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,67 m/s. Diese Werte sind unterhalb des vom Hersteller angegebenen Messbereichs und können daher nicht als repräsentativ angesehen werden. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 2,20 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,54 m/s.

Bei der Leistungsstufe 3 wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 2,13 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 1,29 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 3,35 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,91 m/s.

Die Schwankungen geben nicht notwendigerweise die realen zeitlichen turbulenten Schwankungen wieder, da die Messung langsamer ist als die Schwankung.

In der nachfolgenden Tabelle 6 werden die ermittelten Werte des Akkulüfters miteinander verglichen.

	Entfernung	Staudruckanemometer		Flügelradanemometer	
		Mittelwert [m/s]	Standardabweichung [m/s]	Mittelwert [m/s]	Standardabweichung [m/s]
Leistungsstufe 1	0,5 m	0,26 ¹	-	2,08	0,11
	1 m	0,16 ¹	-	1,92	0,36
	2 m	0,01 ¹	-	1,36	0,17
	3 m	0 ¹	-	0,74	0,18
Leistungsstufe 2	0,5 m	6,00	0,17	6,79	0,18
	1 m	2,81	0,99	4,41	0,68
	2 m	2,52	0,96	3,49	0,62
	3 m	0,54 ¹	0,67	2,20	0,54
Leistungsstufe 3	0,5 m	10,17	0,18	11,32	0,25
	1 m	4,31	0,73	5,98	0,86
	2 m	3,51	1,13	4,72	1,06
	3 m	2,13	1,29	3,35	0,91

¹ Unterhalb des angegebenen Messbereichs

Tab. 6: Übersichtstabelle Strömungsgeschwindigkeit Akkulüfter. Mittelwerte und Standardabweichung

6.1.5 Messungen Strömungsgeschwindigkeit: Kabelgebundener 230V-Elektrolüfter

Die Versuche mit dem Elektrolüfter wurden bei maximaler Lüfterleistung durchgeführt.

Die folgenden 4 Diagramme zeigen die Messungen bei Entfernungen von 0,5m, 1m, 2m und 3m zwischen Lüfter und Messstelle. Die grünen Linien markieren im Diagramm jeweils die Mittelwerte.

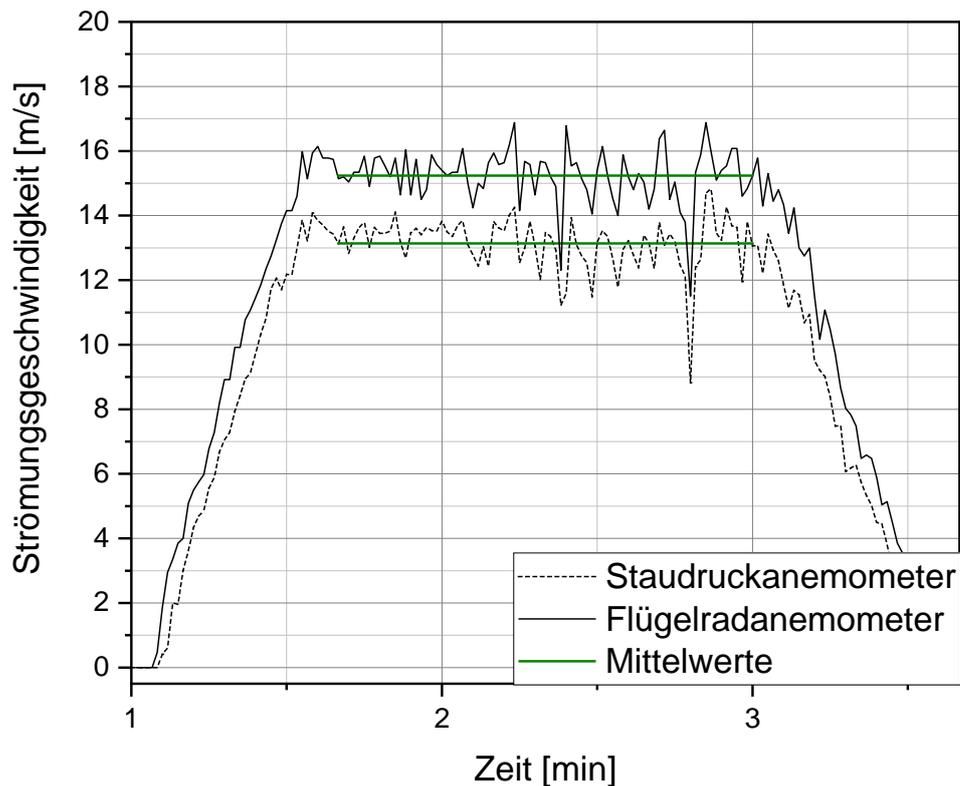


Abb.19: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter Entfernung zur Messstelle **0,5m**

Unter diesen Bedingungen wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 13,14 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,83 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter den gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 15,24 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,85 m/s.

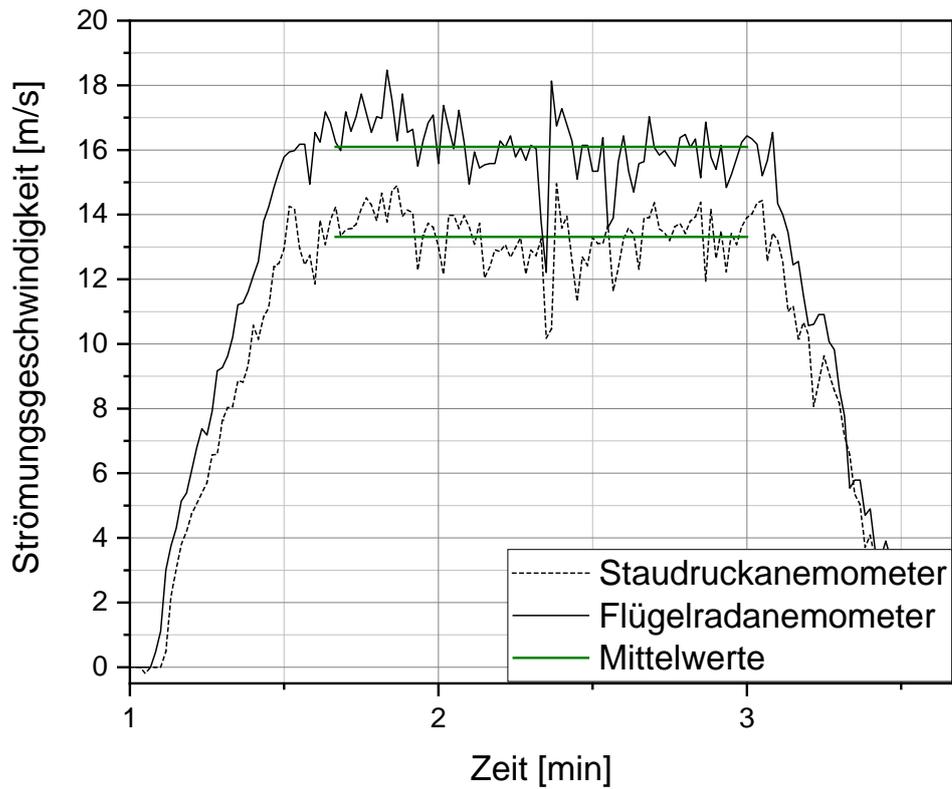


Abb. 20: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter Entfernung zur Messstelle **1m**

Unter diesen Bedingungen wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 13,31 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 0,89 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter den gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 16,10 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 0,98 m/s.

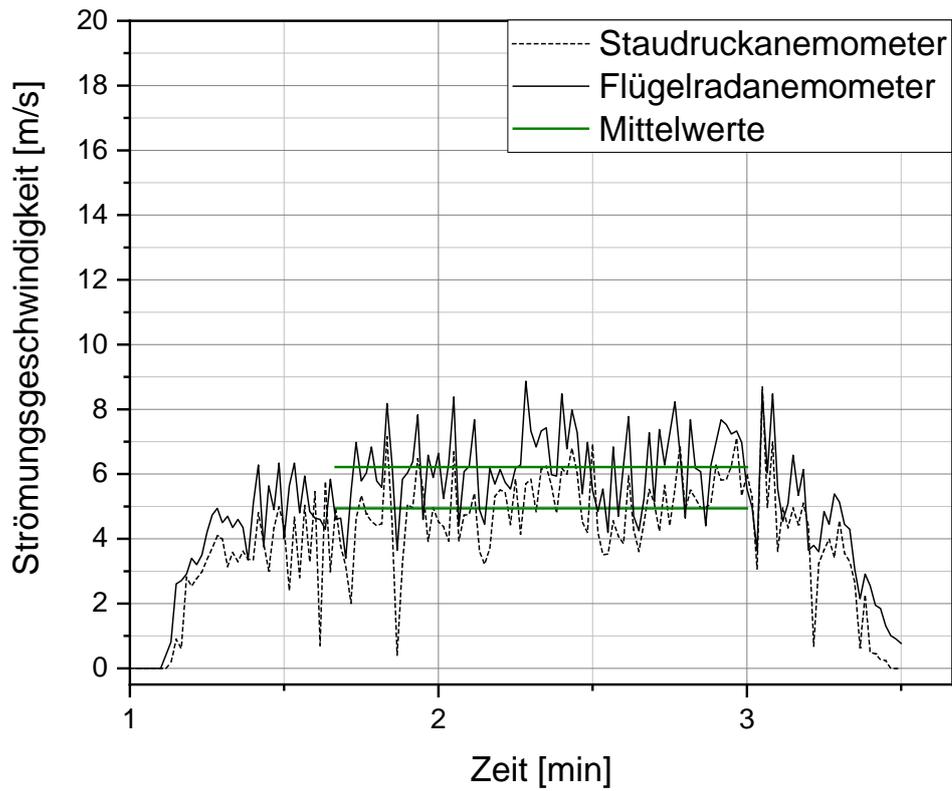


Abb. 21: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter Entfernung zur Messstelle **2m**

Unter diesen Bedingungen wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 4,94 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 1,15 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter den gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 6,22 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 1,20 m/s.

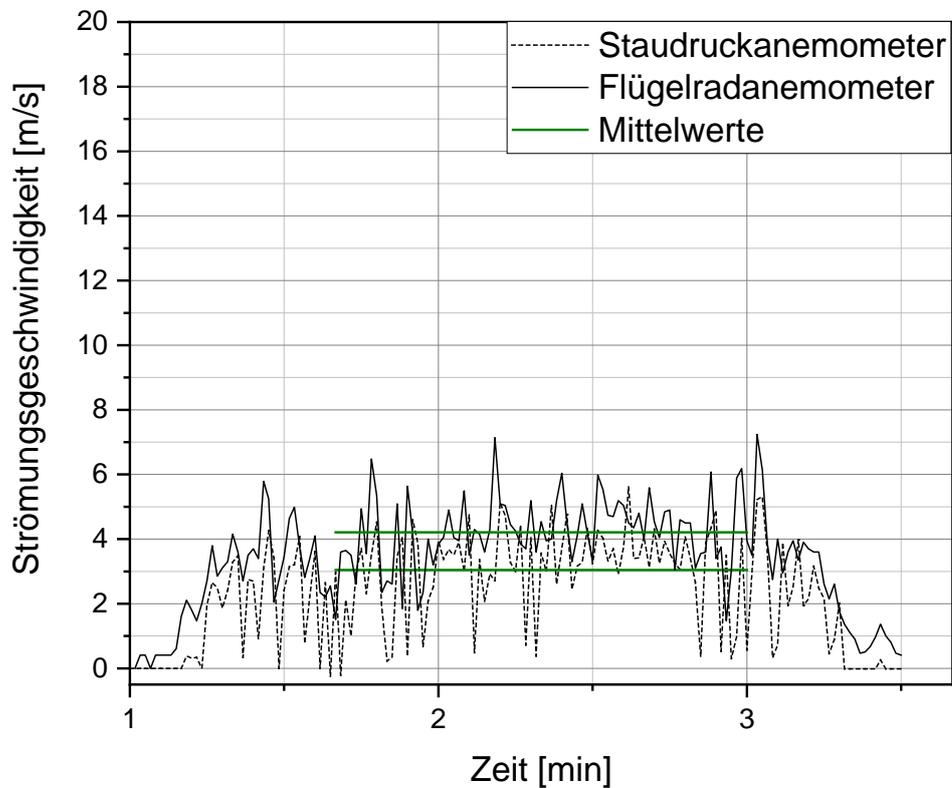


Abb. 22: Strömungsgeschwindigkeit Elektrolüfter. Entfernung zur Messstelle **3m**

Unter diesen Bedingungen wurde mit dem Staudruckanemometer ein Mittelwert von 3,05 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug 1,39 m/s. Mit dem Flügelradanemometer wurde unter den gleichen Bedingungen ein Mittelwert von 4,21 m/s ermittelt. Die Standardabweichung betrug hierbei 1,13 m/s.

Entfernung	Staudruckanemometer		Flügelradanemometer	
	Mittelwert [m/s]	Standardabweichung [m/s]	Mittelwert [m/s]	Standardabweichung [m/s]
0,5 m	13,14	0,83	15,24	0,85
1 m	13,31	0,89	16,10	0,98
2 m	4,94	1,15	6,22	1,20
3 m	3,05	1,39	4,21	1,13

Tab. 7: Übersichtstabelle Strömungsgeschwindigkeiten 230V-Elektrolüfter.

Mit zunehmender Entfernung nimmt auch die Standardabweichung zu. Grund hierfür ist die Turbulenz der Strömung. Im Randbereich des Luftstrahls herrschen hohe Geschwindigkeitsgradienten vor, so dass sich hier großskalige Wirbel mit entsprechend hohen Schwabkungen ausbilden können.

Entfernung	Staudruckanemometer		Flügelradanemometer	
	Akkulüfter	230V Lüfter	Akkulüfter	230V Lüfter
0,5 m	10,17	13,14	11,32	15,24
1 m	4,31	13,31	5,98	16,10
2 m	3,51	4,94	4,72	6,22
3 m	2,13	3,05	3,35	4,21

Tab. 8: Übersichtstabelle Vergleich Akku- vs. 230V Lüfter. **Strömungsgeschwindigkeiten in ms^{-1} .**

Der Akkulüfter auf Stufe 3, also max. Leistung (ca. 600W) vs. 2,2kW beim 230V-Lüfter

Aufgrund der höheren Motorleistung bei (annähernd) gleicher Geometrie sind beim 230V-Lüfter die Strömungsgeschwindigkeiten höher.

6.1.6 Messung der Strömungsgeschwindigkeit bei den Realversuchen

Auch bei den Realversuchen wird die Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Bei diesen Versuchen befindet sich die Messstelle 0,5 m vor der Türöffnung. Die Messstelle befindet sich horizontal auf der Position der Achse des Lüfters ca. 10 cm über der Achse (42 cm Durchmesser Lüfter). Der Lüfter ist horizontal ausgerichtet, der Abstand zur Türöffnung wird variiert. Hinter der Tür befindet sich der Treppenraum (geschlossenes Volumen).

Die Strömungsgeschwindigkeit wird mit dem oben beschriebenen Staudruckanemometer und dem ebenfalls bereits beschriebenen Flügelradanemometer gemessen. Die Werte werden händisch dokumentiert und dienen der Orientierung. Bei der Messung fiel auf, dass die Werte stark schwankten.

Entfernung [m]	Staudruckanemometer [m/s]	Flügelradanemometer [m/s]
0,5	13,5 ± 1 (13,14)	9,5 ± 1 (15,24)
1	13 - 16,3 (13,31)	14,5 ± 2 (16,10)
1,5	12,5 - 14,5	12 - 14
2	10,6 – 12,6 (4,94)	9 – 12,8 (6,22)
2,5	8 – 11,7	5,5 - 11
3	7,5 - 10 (3,05)	6 - 10 (4,21)

Tab. 9: Ergebnisse Messung der Strömungsgeschwindigkeit beim Realversuch (in Klammern die Werte bei den Vorversuchen). Die Position der Messsonden ist nicht mehr mittig in der Längsachse, sondern 100mm in der Vertikalen nach oben versetzt.

6.1.7 Zusammenfassung der Versuche zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit

Ziel der Versuche war es, die Strömungsgeschwindigkeiten zweier Lüfter in unterschiedlichen Entfernungen zwischen Messstelle und Lüfter für die Simulation zu erfassen. Außerdem wurden die Ergebnisse zweier Messgeräte miteinander verglichen.

Die Messwerte des Staudruckanemometers lagen beim Akkulüfter bei der kleinsten Leistungsstufe 1 bei allen Entfernungen sowie bei Leistungsstufe 2 in 3 m Entfernung unterhalb des Messbereichs. Diese Messwerte werden bei der Auswertung daher nicht betrachtet.

Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten wurden bei allen Leistungsstufen und Messgeräten bei einer Entfernung von 0,5m gemessen. Die maximale mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit 11,32 m/s wurde bei der Leistungsstufe 3 mit dem Flügelradanemometer gemessen.

Die Betrachtung der Mittelwerte zeigt außerdem, dass die Mittelwerte des Flügelradanemometers durchschnittlich 1,23 m/s über denen des Staudruckanemometers liegen.

Für den vorliegenden Fall wird die Qualität des Datensatzes über die Streuung der Werte (Standardabweichung) definiert. Es wurden dafür neben den Mittelwerten auch die Standardabweichungen berechnet. Um beide Messgeräte in verschiedenen Szenarien miteinander vergleichen zu können, wurden die Mittelwerte der Standardabweichungen aller Entfernungen bei einer Leistungsstufe gebildet. Die bei der Unterschreitung des Messbereichs erhobenen Werte wurden nicht betrachtet. In Tabelle 10 werden die Mittelwerte der Standardabweichungen verglichen.

Leistungsstufe	Durchschnittliche Standardabweichung Staudruckanemometer	Durchschnittliche Standardabweichung Flügelradanemometer
1	Messbereich unterschritten	0,20 m/s
2	0,71 m/s	0,51 m/s
3 (600W)	0,83 m/s	0,77 m/s

Tab. 10: Vergleich Standardabweichungen der Messgeräte Akkulüfter

Die Ergebnisse dieser Versuche unterscheiden sich nur geringfügig.

Mit dem 230V-Elektrolüfter wurden ebenfalls Versuche nach dem gleichen Schema durchgeführt. Bei diesem Lüfter wurden alle Versuche mit maximaler Leistung durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit beiden Messgeräten die maximale Strömungsgeschwindigkeit von 13,31 m/s (Staudruckanemometer) und 16,10 m/s (Flügelradanemometer) bei 1 m Entfernung und nicht bei der kürzesten Entfernung 0,5 m gemessen wurde. Eine Erklärung dafür ist die ungünstige Positionierung der Messgeräte, nämlich in der Nähe der Rotationsachse („mittig“) des Lüfters. Die

Messgeräte befinden sich bei kürzerer Entfernung im Nabennachlauf und sind daher nicht optimal angeströmt. Bei den weiteren Messungen werden die Messsonden günstiger positioniert.

Bei diesem Versuchen lagen die Mittelwerte der Messwerte des Flügelradanemometers durchschnittlich 1,83 m/s über denen des Staudruckanemometers.

Die Qualität des Datensatzes wird auch hier über die Standardabweichung definiert.

Die durchschnittliche Standardabweichung des Staudruckanemometers betrug 1,06 m/s. Die durchschnittliche Standardabweichung des Flügelradanemometers betrug 1,04 m/s.

Der Unterschied der durchschnittlichen Standardabweichung ist hier ebenfalls minimal.

6.2 Vorversuche „Druck“

Nachdem die Strömungsgeschwindigkeiten bei den vorherigen Versuchen ermittelt wurden, wird im Anschluss die Höhe der aus der Überdruckbelüftung resultierenden Differenzdrücke experimentell bestimmt. Dafür werden vor unterschiedlichen Volumen und in unterschiedlichen Entfernungen die beiden Lüfter platziert. Außerdem wird bei einigen Versuchen die obere Türhälfte verschlossen. Mit Hilfe zweier Differenzdruckmessgeräte (Trotec TA400 & Micromanometer FCO 14) wird der Druck in den besagten Volumen sowie der Druck außerhalb der Volumen gemessen. Durch Subtraktion wird der Differenzdruck und damit die Druckerhöhung im Volumen ermittelt. Im Folgenden werden zunächst die Versuche im verhältnismäßig kleinen Volumen (Container) vorgestellt.

Relevant sind die Mittelwerte der Druckmessungen, da starke zeitliche Schwankungen auftraten. Erklärung hierzu in Kap. 8.1. Die Werte sind auf ganze Zahlen gerundet.

6.2.1 Messtechnik

In dem belüfteten Volumen befindet sich ein Messpunkt, an dessen Ort der Differenzdruck ermittelt wird. Dieser ist mit einem Schlauch entweder mit einem Trotec TA400 oder mit dem Micromanometer FCO 14 verbunden. Die Daten des Trotec TA400 werden direkt an einen PC übertragen. Die Messwerte des Micromanometers werden abgefilmt und anschließend händisch mit einer Abtastrate von 1 Hz dokumentiert.

Für die Druckmessung außerhalb des Containers wird ein weiterer Schlauch am Messgerät angeschlossen. Das Ende des Schlauchs befindet sich außerhalb des Containers in einem offenen Rohr. Durch diesen Aufbau soll der Einfluss von Strömungen minimiert werden.

Um den Differenzdruck möglichst präzise messen zu können, muss der Einfluss von Strömungen auf die Messstelle minimiert werden. Dafür wird ein Messpunkt konstruiert, der eine Außenhülle mit vielen kleinen Bohrungen besitzt. In dieser Außenhülle befindet sich ein Schlauch der ebenfalls mit vielen kleinen Löchern versehen ist. Durch diesen Aufbau sollen Strömungen so gebremst/abgelenkt werden, dass sie die Druckmessung möglichst nicht beeinflussen. Zusätzlich wird der Messpunkt an einer geeigneten Stelle mit geringer Strömungsgeschwindigkeit platziert. Für die hier im Bericht gezeigten Versuche wäre es nicht nötig gewesen, diesen doch recht hohen konstruktiven Aufwand zu betreiben, da sich der Messpunkt an einer Stelle im Raum befand, wo praktisch keine Luftströmung auftrat.



Abb. 23: CAD - Darstellung Messpunkt



Abb. 24: Foto Messpunkt

Für die Messung des Drucks wird neben dem auch für die Messung der Strömungsgeschwindigkeit verwendeten Trotec TA400 das Micromanometer FCO 14 der Firma Furness Controls verwendet. Die technischen Daten des Micromanometers sind in Tab. 11 aufgezeigt.

Messbereich	$1 \% = \pm 10 \text{ Pa}$ $10 \% = \pm 100 \text{ Pa}$ (eingestellt) $100\% = \pm 1000 \text{ Pa}$
Auflösung	1 pro 100 bei allen Messbereichen

Tab. 11: Technische Daten Micromanometer FCO 14 nach (Furness Controls Limited 2009, S. 6)

<i>Druckbereich</i>	<i>0 bis 5000 Pa</i>
<i>Messbereich</i>	<i>5000 Pa</i>
<i>Auflösung</i>	<i>1 Pa</i>
<i>Genauigkeit</i>	<i>$\pm 0,3 \%$ bei $+25 \text{ }^\circ\text{C}$</i>

Tab. 12: Technische Daten Trotec TA400 nach (Trotec)

6.2.2 Vorversuche zur Auswahl der geeigneten Meßtechnik

Im Folgenden werden die Vorversuche im kleinen Volumen vorgestellt. Gemessen und dargestellt wird der durch den Lüftereinsatz resultierende Differenzdruck.

Für die Vorversuche wird ein in der Brandversuchshalle aufgestellter Container verwendet in welchem Werkzeug und Material gelagert ist (Abb. 25, 26). Dieser hat die Abmessungen 2,9m x 2,31m x 2,4m (L x B x H). Ohne Berücksichtigung der im Container befindlichen Einbauten (Schränke und Kisten) errechnet sich daraus ein ungefähres Volumen von 15 m³.

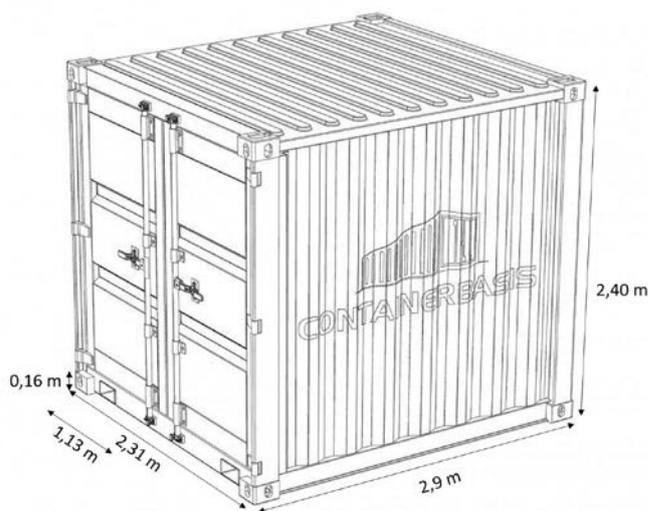


Abb. 25: Container für Druckmessung im kleinen Volumen (Containerbasis o. J.)

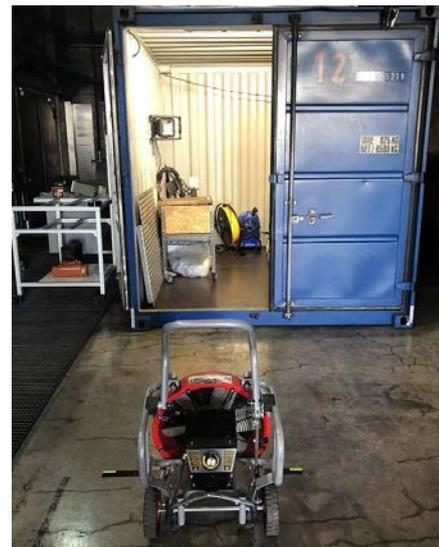


Abb. 26: Positionierung Lüfter vor Container für Druckmessung

Für die Versuche wird derselbe kabelgebundene 230V-Elektrolüfter wie bei den Vorversuchen zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten verwendet. Dieser wird bei allen Versuchen mit maximaler Leistung betrieben. Der Lüfter wird in drei verschiedenen Entfernungen (1 m, 2 m, 3 m und 4,8 m) mittig vor der Öffnung des Containers platziert. Die vom Hersteller empfohlene Entfernung vor einer Zuluftöffnung beträgt 2 m - 6 m.

Die Öffnung hat eine Breite von 1,13 m und eine Höhe von 2,3 m sie befindet sich 0,16 m über dem Bodenniveau. Der Lüfter muss also eine 16cm hohe Stufe überströmen.

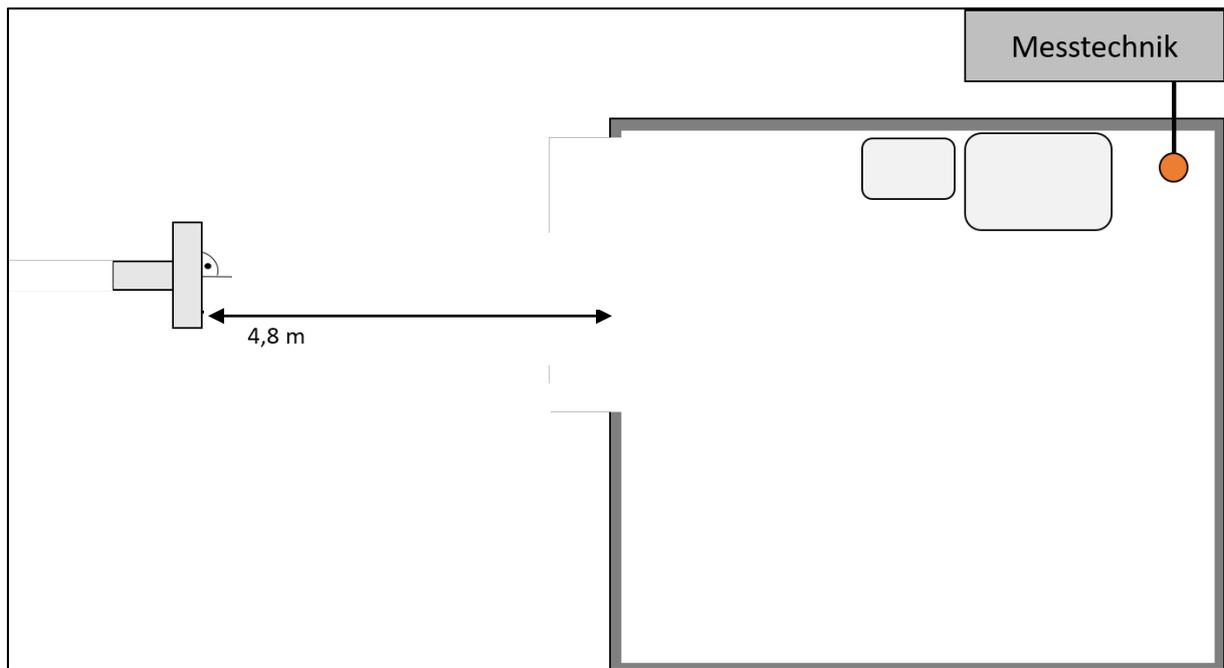


Abb. 27: Skizze des Aufbaus zur Druckmessung im kleinen Volumen (Container). Der Lüfter hat hier einen Abstand von 4,8m zur Tür, die anderen Abstände sind 3m, 2m und 1m.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Druckmessung im kleinen Volumen vorgestellt. Der Transportgriff des Lüfters wird ausgeklappt, wodurch der Lüfter leicht nach oben geneigt ist.

In einem Abstand von 2m wird der Lüfter vor der Tür positioniert. Die Tür ist einmal vollflächig geöffnet und einmal ist die obere Hälfte verschlossen. Beide Messgeräte sind nacheinander im Einsatz-

Unter diesen Versuchsbedingungen wurde bei der Messung (s. Abb. 28 auf der folgenden Seite) mit vollflächig geöffneter Tür (gepunktete Linie) ein maximaler Druck von 20 Pa gemessen. Der errechnete Mittelwert betrug bei diesem Versuch 17 Pa. Bei geschlossener oberer Türhälfte (geschlossene Linie) wurde ein Maximaldruck von 39 Pa gemessen. Der errechnete Mittelwert betrug 32 Pa. Zwischen den beiden Mittelwerten zeigt sich eine Differenz von 15 Pa.

Anschließend wurde der Versuch unter gleichen Rahmenbedingungen jedoch mit einem anderen Messgerät durchgeführt. Das Ziel dieses Wiederholungsversuchs war es, die Abweichungen zwischen den Messgeräten zu zeigen. Die Ergebnisse werden für die Auswahl des Messgeräts beim nachfolgenden Realversuch verwendet.

Unter diesen Versuchsbedingungen wurde bei der Messung mit vollflächig geöffneter Tür (gepunktete Linie) ein maximaler Druck von 18 Pa gemessen. Der errechnete Mittelwert betrug bei diesem Versuch 18 Pa. Bei geschlossener oberer Türhälfte (geschlossene Linie) wurde ein Maximaldruck von 36 Pa gemessen. Der errechnete Mittelwert betrug 34 Pa. Zwischen den beiden Mittelwerten zeigt sich eine Differenz von 16 Pa. Bei 2,46 min fiel die Messtechnik bei geschlossener oberer Türhälfte aus. Für die Mittelwertbildung wurden daher bei diesem Versuch 99 Werte statt 121 Werte herangezogen.

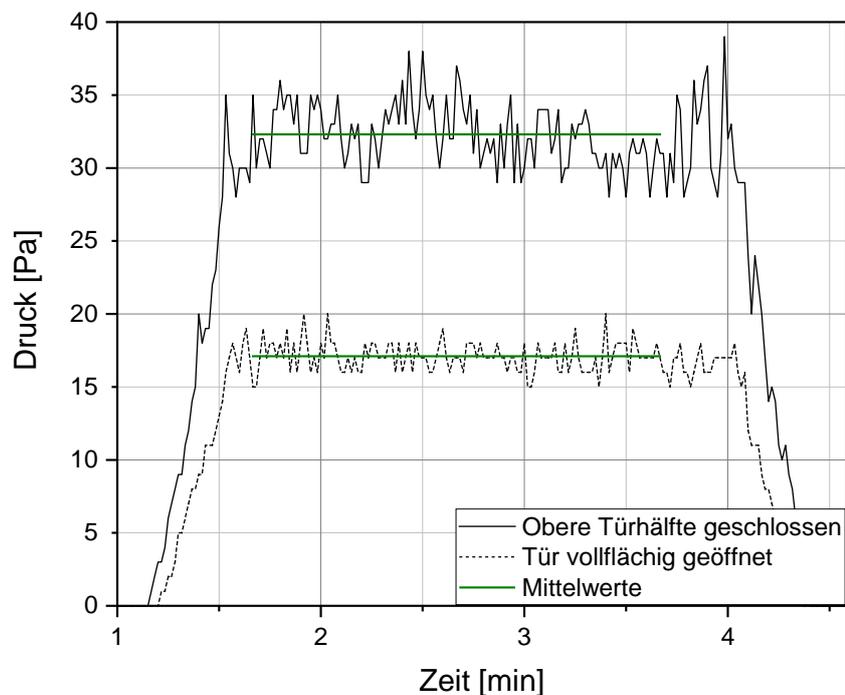


Abb. 28: Druckverlauf im Container bei Tür geöffnet / halb verschlossen. 230V-Lüfter, 2m Abstand, Messgerät: **Trotec TA400**

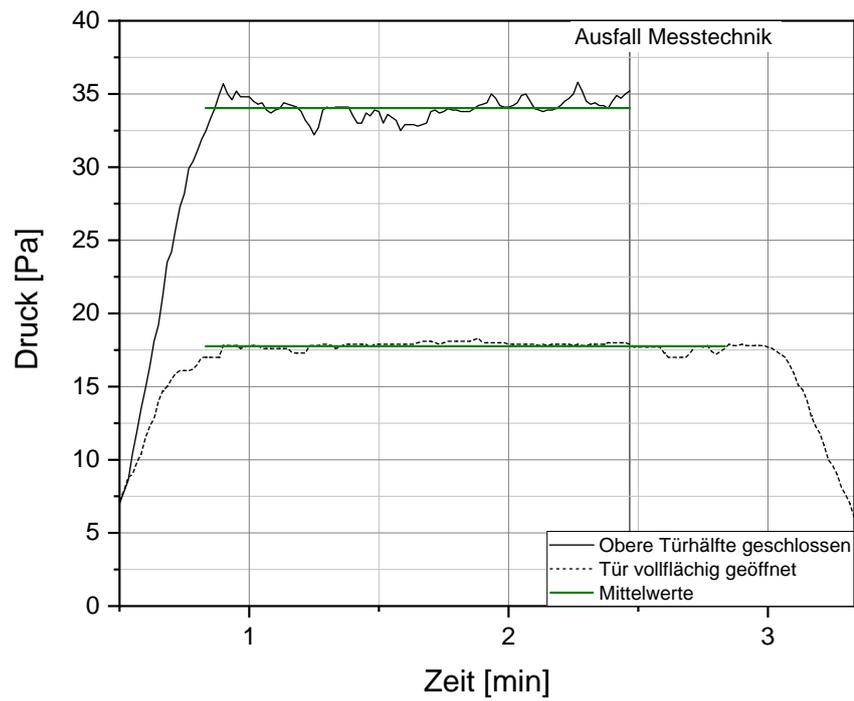


Abb. 29: Druckverlauf im Container bei Tür geöffnet / halb verschlossen. 230V-Lüfter, 2m Abstand, Messgerät: **Micromanometer FCO 14**

Beide Messungen werden in Tab. 13 verglichen. Der Mittelwert bei vollflächig geöffneter Tür ist bei der Messung mit dem Micromanometer um 1 Pa höher als bei der Messung mit dem Trotec TA400. Bei geschlossener oberer Türhälfte war der Mittelwert des Micromanometer um 2 Pa höher als bei dem Trotec TA400. Die Standardabweichung war bei beiden Szenarien bei der Messung mit dem Micromanometer geringer als bei der Messung mit dem Trotec TA400. Es ist dabei jedoch zu beachten, dass das Micromanometer über eine Dämpfung des Signals verfügt, so dass Schwankungen bei der Anzeige im Display geringer ausfallen.

Öffnungszustand Tür	Trotec TA400		Micromanometer FCO 14	
	Mittelwert [Pa]	Standardabweichung [Pa]	Mittelwert [Pa]	Standardabweichung [Pa]
Vollflächig geöffnet	17	1,03	18	0,30
Obere Türhälfte geschlossen	32	2,11	34	0,71

Tab. 13: Vergleich Messergebnisse Trotec TA400 vs. Micromanometer. Abstand des 230V-Lüfters 2m
Auf Basis dieser Ergebnisse wurde entschieden, aufgrund der einfacheren Erfassung die weiteren Versuche mit dem Trotec TA400 durchzuführen.

Auffällig ist der Unterschied zwischen vollflächig geöffneter Tür und geschlossener oberer Türhälfte. Bei gleicher Entfernung war der Druck bei geschlossener oberer Türhälfte etwa doppelt so hoch wie bei vollflächig geöffneter Tür. Eine gängige Erklärung für den höheren Druck ist, dass durch die Folie in der oberen Türhälfte das Ausströmen von Luft verhindert wird. Ohne Abdeckung bildet sich in der Zuluftöffnung eine gegengerichtete Strömung. Wie in Abb. 30 zu sehen, strömt im Bereich des Luftstromes (Lüfter) Luft in das Volumen. Im Bereich darüber, strömt die Luft wieder heraus.



Abb. 30: Gegengerichtete Strömung an der Tür (Reick, 2015)

Ist die obere Türhälfte verschlossen wird das Ausströmen der Luft eingeschränkt. Gelingt es nun, mit dem Luftstrom des Lüfters die verbleibende Öffnung abzudecken, kommt es zu einem deutlichen Druckanstieg im Volumen. In Abbildungen 32 und 33 ist anhand der Auswölbungen zu sehen, dass im Inneren ein Überdruck herrscht und dass die Folie das Ausströmen der Luft behindert.



Abb. 31: Nach außen gewölbte Türabdeckung Container



Abb. 32: Nach außen gewölbte Türabdeckung Werkstatt

Anmerkung: Natürlich wäre für die Versuche auch ein bei den Feuerwehren gebräuchlicher mobiler Rauchverschluss zur Verfügung gestanden. Da aber in den noch folgenden Versuchen auch geometrisch frei wählbare Öffnungen untersucht werden sollten, wurde Folie und viel Klebeband verwendet.

6.2.3 Vorversuche bei kleinem Raumvolumen (Container)

Der 230V-Elektrolüfter wird in vier verschiedenen Entfernungen von 1 m, 2 m, 3 m, und 4,8 m mittig vor der Eingangstür des Containers platziert und auf höchster Leistungsstufe betrieben. Die obere Türhälfte ist mit Folie verschlossen.

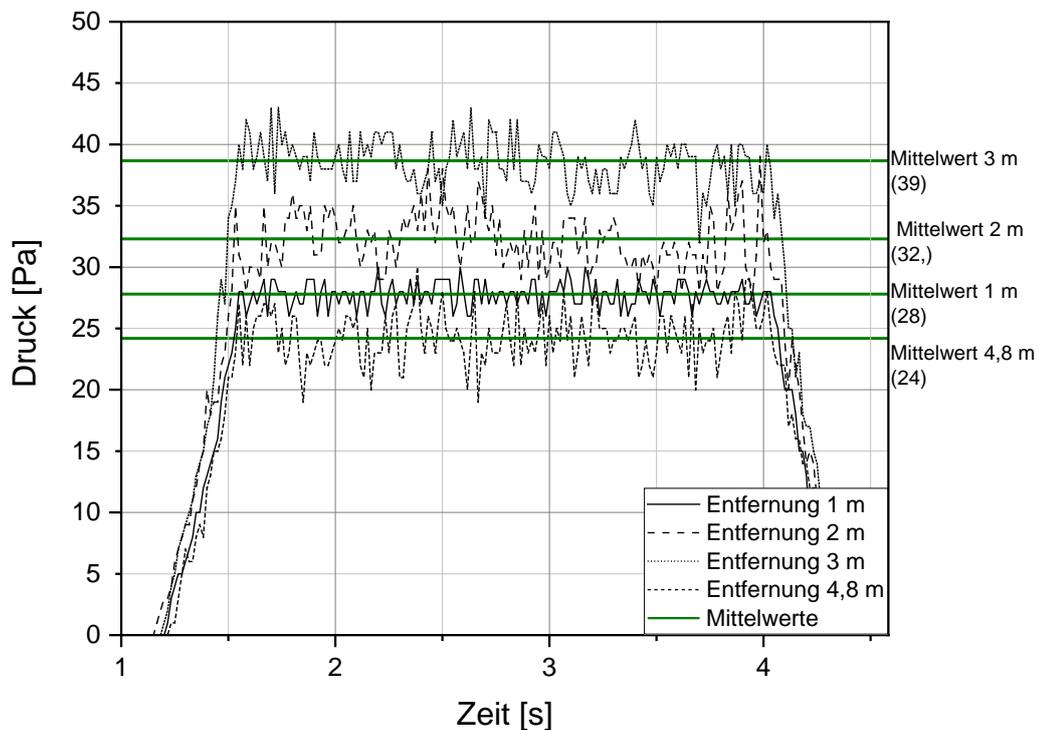


Abb. 33: Vergleich der Druckverläufe bei verschiedenen Abständen des 230V-Lüfter zur halb verschlossenen Tür. Messgerät: Trotec TA 400

Es zeigt sich, dass der Druck im Wekstattcontainer mit zunehmender Entfernung bis 3m zunimmt und bei 4,8m Entfernung wieder niedrig ist.

Die Messwerte können aufgrund der geringen Schwankung und der deutlichen Plateaubildung als valide angesehen werden. Die Versuche wurden in einer Halle durchgeführt, dadurch kann der Einfluss von Wind vernachlässigt werden. Da beim vorherigen Versuch die Drücke bei geschlossener oberer Türhälfte deutlich höher waren, wurden diese Versuche ebenfalls mit dieser Konfiguration durchgeführt.

Bei den durchgeführten Versuchen stiegen die gemessenen Drücke mit steigender Entfernung zwischen Lüfter und Zuluftöffnung bis zu einem Maximum von ca 39 Pa bei einer Entfernung von 3 m. Bei einer weiteren Vergrößerung der Entfernung auf 4,8 m sank der Druck jedoch deutlich auf den niedrigsten Wert von ca. 24 Pa.

Im Anschluss an die beschriebenen Versuche wurden zum Vergleich Versuche in einem verhältnismäßig großen Volumen durchgeführt. Es soll überprüft werden ob die Ergebnisse von den Messungen beim kleinen Volumen abweichen.

6.2.4 Vorversuche Werkstatt (mittleres Volumen)

Im Anschluss an die Versuche in dem Container wurden weitere Versuche in den Räumen einer eingerichteten Werkstatt durchgeführt. Bei diesen Versuchen sollte überprüft werden inwieweit sich die Beobachtungen von denen am kleinen Volumen unterscheiden. Außerdem sollten auch hier die Einflussfaktoren Entfernung zwischen Zuluftöffnung und Lüfter sowie die Größe der Zuluftöffnung untersucht werden.

Die Werkstatt befindet sich bei der Brandversuchshalle der FFB. Sie teilt sich in zwei Räume, die durch einen 2 m breiten, offenen Durchgang verbunden sind. Die Werkstatt verfügt über 4 Doppeltüren je 2 m breit und zwei Fenster. Alle Türen und Fenster, abgesehen von der Zuluftöffnung waren bei den Versuchen geschlossen jedoch nicht abgedichtet. An der Zuluftöffnung wurde nur ein Türflügel geöffnet. Dadurch entstand eine lichte Breite von 1 m. Die Grundfläche der Werkstatt beträgt $95,06 \text{ m}^2$ das Volumen ohne die Einbauten (Maschinen etc.) beträgt rund 300 m^3 (zum Vergleich: das Volumen des Containers beträgt 15 m^3). Der Messpunkt befindet sich im Raum neben der Zuluftöffnung. Von diesem führt ein 5 m langer Schlauch zu dem Trotec TA400 außerhalb der Werkstatt.

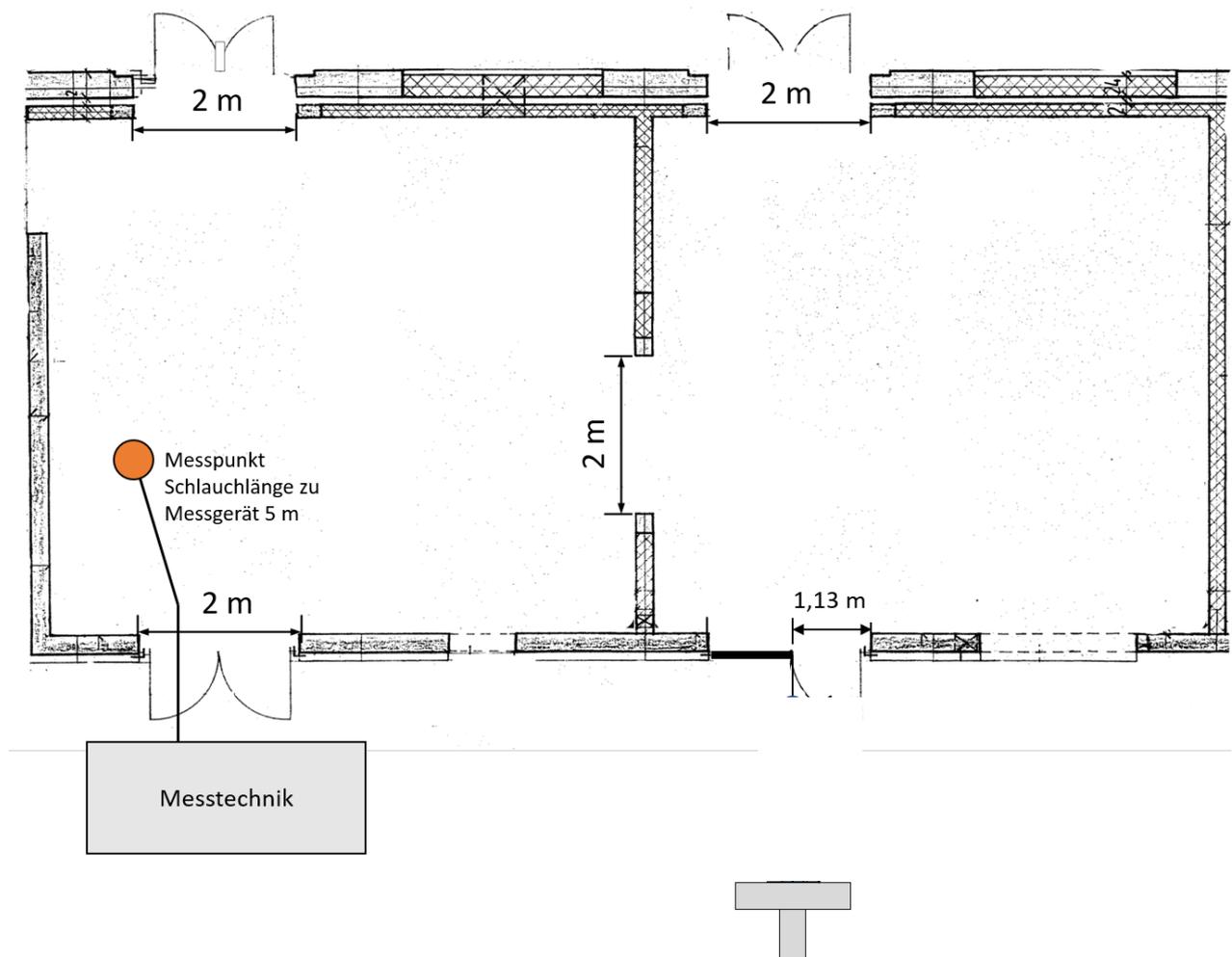


Abb. 34: Skizze für die Versuche in der Werkstatt. Alle Türen und Fenster sind geschlossen bis auf den einen offenen Türflügel als Zuluftöffnung. Der Lüfter steht beim Versuch mittig zum offenen rechten Türflügel, nicht mittig zur Tür wie in der Skizze abgebildet. Abstand Lüfter zur Tür 5 m

Der Elektro- und der Akkulüfter werden in verschiedenen Entfernungen (1 m, 2 m, 3 m und 5 m) mittig vor der Türöffnung platziert. Die optimale Entfernung beträgt nach Herstellerangaben 0,9 m – 5 m.

6.2.5 Vorversuche Werkstatt #1 (mittleres Volumen)

Der Akkulüfter und der 230V-Lüfter werden nacheinander in einer Entfernung von 2 m zentriert vor der Eingangstür der oben beschriebenen Werkstatt platziert. Um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten wird der Akkulüfter über das Hausnetz und nicht über Akku betrieben. Fenster und Türen sind, abgesehen von der Zuluftöffnung, geschlossen jedoch nicht besonders abgedichtet. Die Zuluftöffnung hat einmal vollflächig geöffnet eine Fläche von ca. $2,5\text{m}^2$ (Höhe 2,5m x Breite 1m) und einmal eine Öffnungsfläche von $1,3\text{m}^2$, wobei die obere Türhälfte mit einer Folie verschlossen ist (ähnlich zum Einsatz eines mobilen Rauchverschlusses).

Die Lüfter werden jeweils mit maximaler Leistung betrieben, d.h. 600W beim Akkulüfter und 2200W beim 230V-Lüfter.



Abb. 35: Akkulüfter im Abstand von 2m vor vollflächig geöffneter Zuluftöffnung



Abb. 36: Akkulüfter im Abstand von 2m vor halb verschlossener Zuluftöffnung

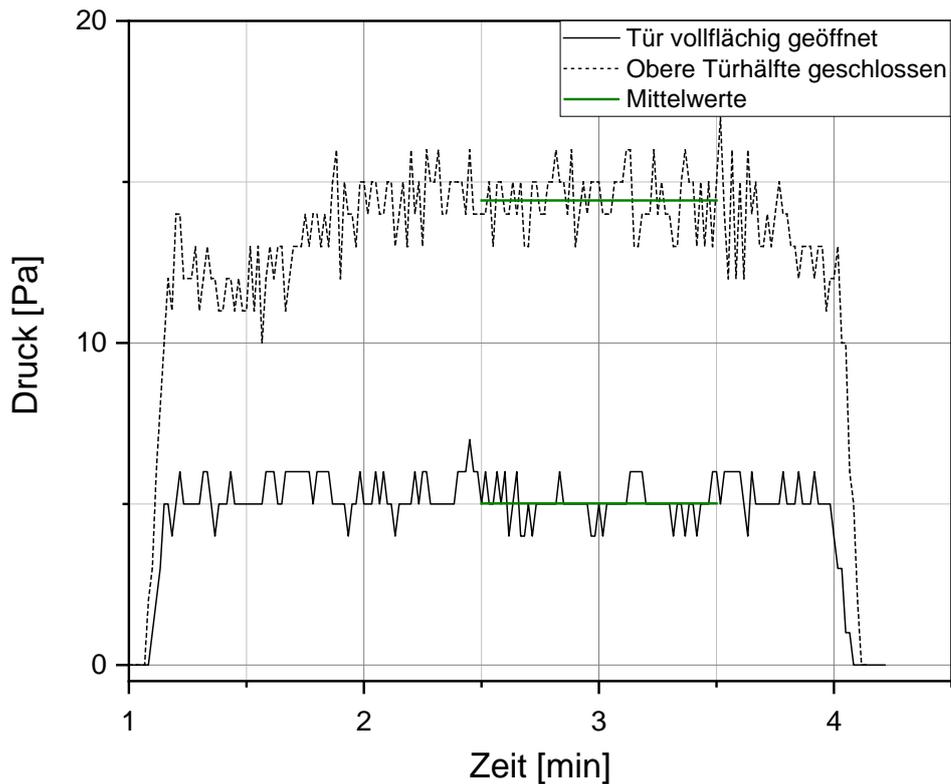


Abb. 37: Druckverläufe. Akkulüfter mit 2m Abstand.

Abb. zeigt den Verlauf der Druckmessung des ersten Versuchs. Die geschlossene Linie (schwarz) zeigt den gemessenen Differenzdruck bei vollflächig geöffneter Zuluftöffnung. Die unterbrochene Linie zeigt den gemessenen Differenzdruck, wenn die obere Hälfte der Zuluftöffnung geschlossen ist. Die grünen horizontalen Linien markieren die errechneten Mittelwerte. Bei vollständig geöffneter Zuluftöffnung liegt dieser bei 5 Pa und bei halbseitig geschlossener Zuluftöffnung bei 14 Pa.



Abb. 38: 230V-Lüfter vor vollflächig geöffneter Zuluftöffnung



Abb. 39: 230V-Lüfter im Abstand von 2m vor halb verschlossener Zuluftöffnung

Der Transportgriff des Lüfters wird ausgeklappt, wodurch der Lüfter leicht nach oben geneigt ist.

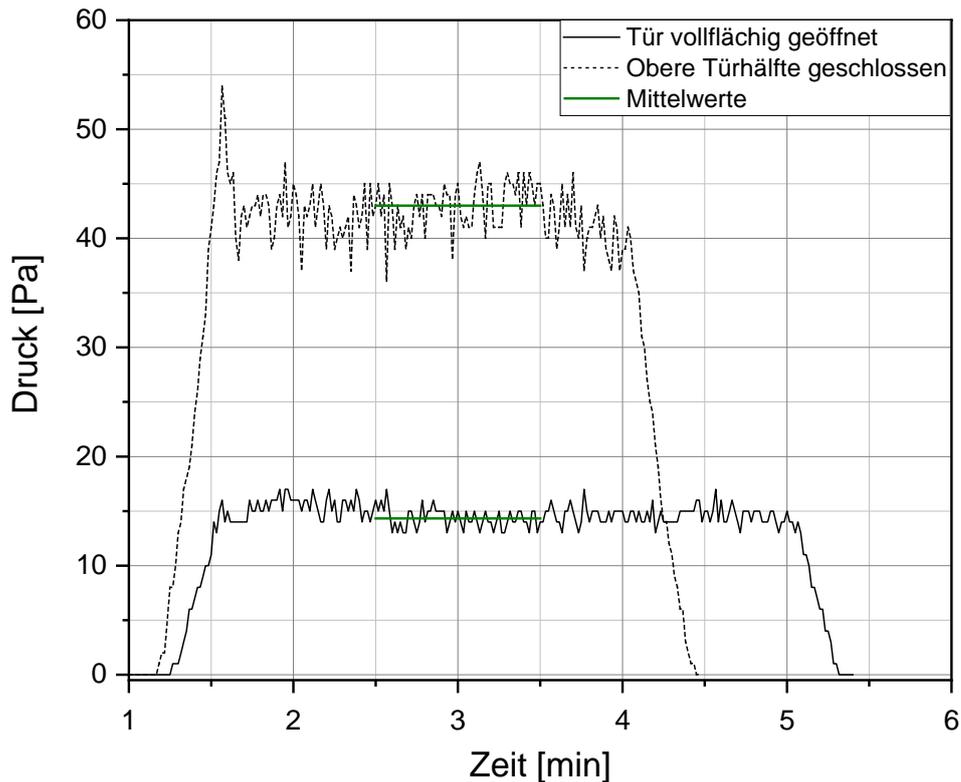


Abb. 40: Druckverläufe. 230V-Lüfter mit 2m Abstand

Bei vollständig geöffneter Zuluftöffnung liegt der Differenzdruck bei 14 Pa und bei halbseitig geschlossener Zuluftöffnung bei 43 Pa.

Der Akkulüfter bringt also lediglich ein Drittel an Druckerhöhung im Vergleich zu dem 230V-Lüfter. Die Leistung beträgt lediglich 600W, während der kabelgebundene Lüfter 2200W hat.

6.2.6 Vorversuche Werkstatt #2

Der 230V-Elektrolüfter wird jetzt in vier verschiedenen Entfernungen von 1 m, 2 m, 3 m, und 5 m zentriert vor der Eingangstür der oben beschriebenen Werkstatt platziert und auf höchster Leistungsstufe betrieben. Fenster und Türen sind wie bei den vorherigen Versuchen, abgesehen von der Zuluftöffnung, geschlossen jedoch nicht abgedichtet. Die Zuluftöffnung ist einmal wieder vollflächig geöffnet und halb verschlossen. Bei diesen Versuchen wird der Akkulüfter nicht mehr eingesetzt.

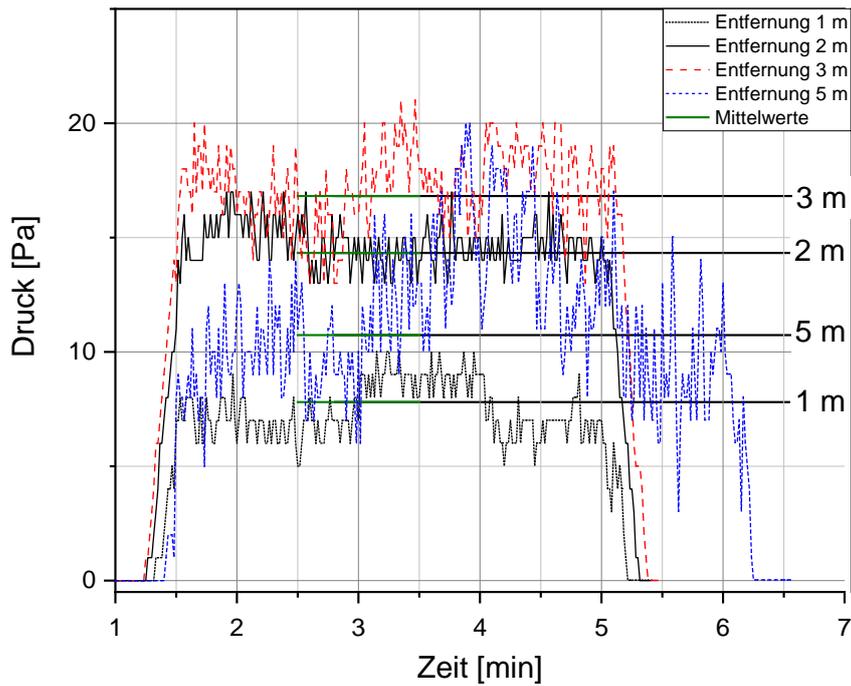


Abb. 41: Elektrolüfter im Abstand von 1 m, 2 m, 3 m und 5 m. **Tür vollflächig geöffnet**

Der höchste Differenzdruck wurde bei einer Entfernung von 3m gemessen. Mit 17 Pa ist der Mittelwert des Differenzdrucks bei einer Entfernung von 3m am höchsten. Anschließend folgten 14 Pa bei 2m, 11 Pa bei 5m und 8 Pa in einer Entfernung von 1m.

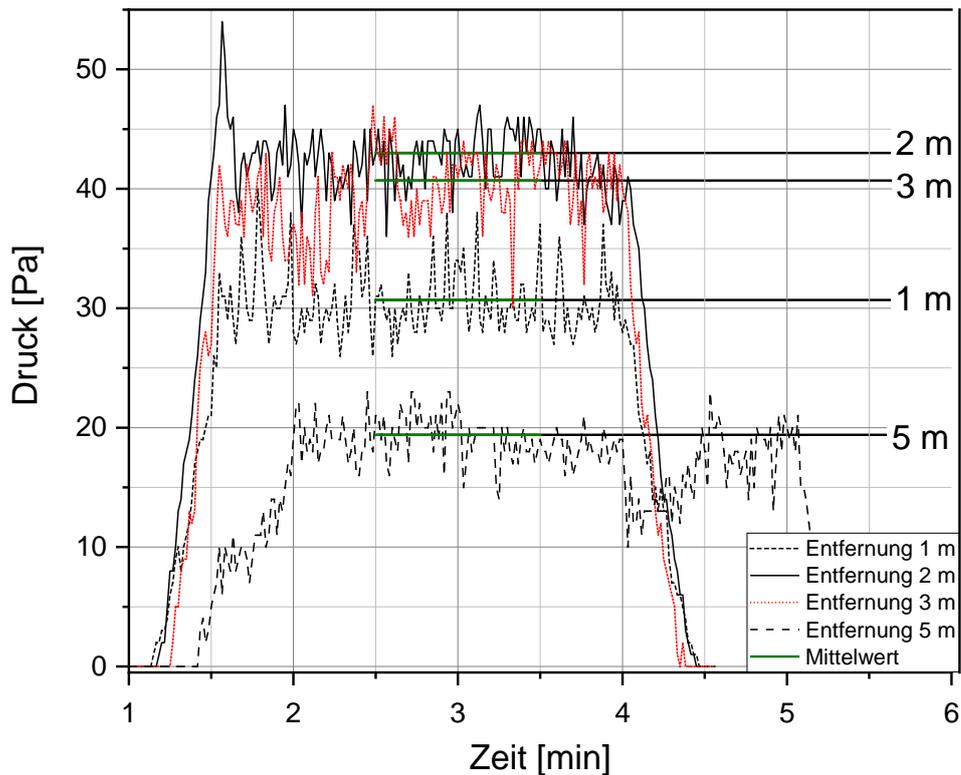


Abb. 42: 230V-Elektrolüfter im Abstand von 1 m, 2 m, 3 m und 5 m. **Obere Türhälfte geschlossen**

Mit 43 Pa ist der Mittelwert des Differenzdrucks diesmal bei einer Entfernung von 2m am höchsten. Anschließend folgten 41 Pa bei 3m, 31 Pa bei 1m und 19 Pa in einer Entfernung von 5m.

Das Diagramm zeigt, dass auch bei diesen Versuchen die gemittelten Differenzdrücke mit zur Hälfte abgedeckter Tür höher als die mit vollflächig geöffneter Tür waren. Bei diesen Versuchen stieg der Druck mit zunehmender Entfernung ebenfalls. Das Maximum wurde jedoch bereits bei einer Entfernung von 2 m erreicht. Der Unterschied zwischen zwei und drei Metern ist mit 2 Pa jedoch minimal. Nach dem Maximum im Bereich von 2-3 Metern sank der Druck bei einer Entfernung von 5 Metern ebenfalls deutlich.

6.3 Zusammenfassung der Vorversuche „Druck“

Die Ergebnisse der Vorversuche zeigen erwartungsgemäß, dass sowohl der Abstand zwischen Lüfter und Zuluftöffnung als auch die Größe der Zuluftöffnung einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der Belüftungsmaßnahmen haben. Die Größe bzw. Volumen des belüfteten Raums hingegen hat keinen signifikanten Einfluss. Hier sei jedoch betont, dass sowohl das kleine Volumen, der Container, als auch das große Volumen, die Werkstatt, nur geringe Undichtigkeiten aufweisen. Die Türen haben allesamt eine Gummidichtung - daher sind diese Ergebnisse nicht direkt auf jeden Einsatzfall übertragbar. Ein Treppenraum im Altbau hat höchstwahrscheinlich viele Spaltöffnungen in die Wohnungen aufgrund alter, verzogener Türen ohne Dichtlippen und es hat Fenster, die sicherlich auch nicht dicht sind. Hier würden sich mit zunehmender Raumgröße (durch höhere Anzahl an Etagen) auch die Anzahl und damit Gesamtgröße der undichten Stellen summieren.

Der Druck war bei den durchgeführten Versuchen mit geschlossener oberer Türhälfte bei allen Versuchen deutlich höher als bei vollflächig geöffneter Tür. Hier war der erreichte Druck um nahezu das Vierfache höher. Der geringste aber immer noch deutliche Unterscheid zeigte sich bei einer Entfernung von 5 m. Der Druck war hier um das 1,7 - fache höher. Durchschnittlich konnte bei diesen Versuchen durch die Verkleinerung der Öffnungsgröße eine Druckerhöhung um das 2,8 - fache erreicht werden.

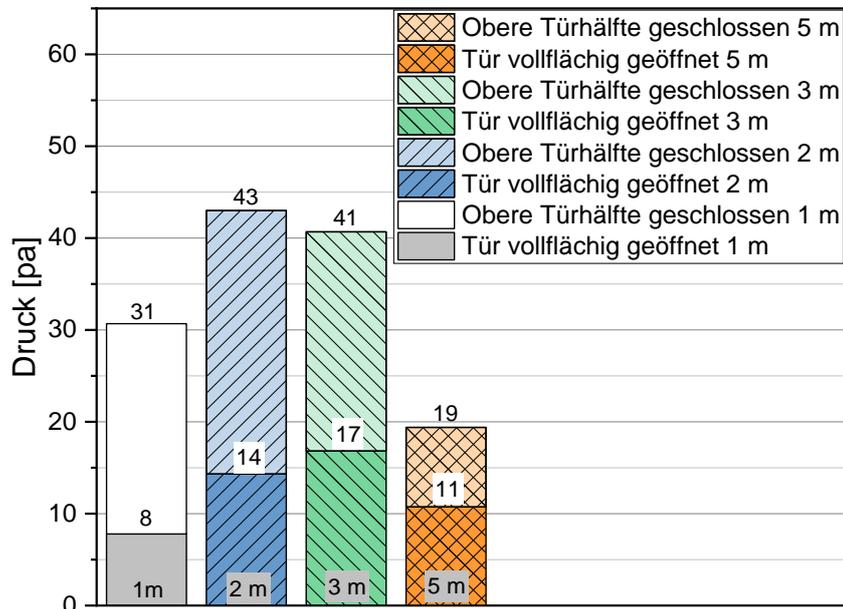


Abb. 43: Vergleich der Öffnungszustände und Entfernungen

Bei halbseitig geschlossener Zuluftöffnung änderte sich der Einfluss der Entfernung. So wurde der geringste Druck bei geschlossener Türhälfte bei 1 m und bei vollflächig geöffneter Tür bei 5 m gemessen. Im Gegensatz zu der vollflächig geöffneter Tür wurde der höchste Druck bei halbseitig geschlossener Tür bei einer Entfernung von 3 m gemessen. Die Unterschiede sind jedoch gering.

7. Realversuche

Die Vorversuche dienten dazu, sich mit der Messtechnik vertraut zu machen und insbesondere Datensätze über Druckverläufe bei unterschiedlichen Entfrenung und Zuluftöffnungen zu generieren, sodass die Ergebnisse der Realversuche auf Plausibilität hin geprüft werden können.

Bereits die Werkstatt stellt eine realistische Raumgröße dar. Im Rahmen der Realversuche soll hierzu ergänzend ein Treppenraum eines vierstöckigen Gebäudes verwendet werden. Die grundlegenden Rahmenbedingungen des Versuchsaufbaus ändern sich nicht. Es wird jedoch eine weitere Konfiguration mit Lutte zwischen Lüfter und Zuluftöffnung hinzugefügt.

7.1 Der Treppenraum

Für die Versuche wird ein viergeschossiger Treppenraum eines Bürogebäudes verwendet. Struktur und Aufbau des Treppenraumes sind den Abbildungen 45 bis 47 zu entnehmen. Sämtliche an das Treppenraum angrenzende Türen und Öffnungen werden für die Versuche abgedichtet. Lediglich die Fenster werden nicht zusätzlich abgedichtet. Das Volumen des Treppenraumes beträgt rund 670 m^3 .

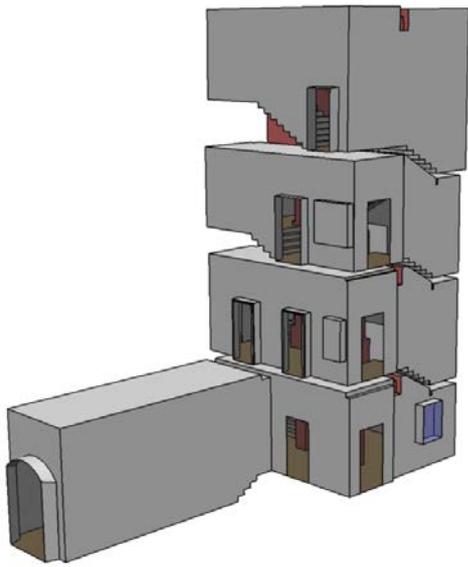


Abb. 44: Vorderansicht Treppenraum

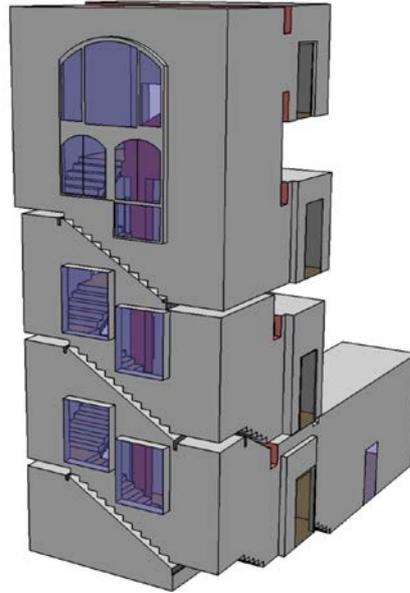


Abb. 45: Rückseite Treppenraum

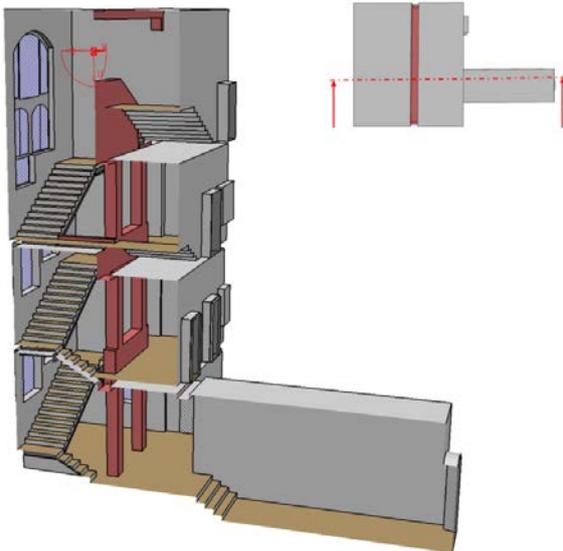


Abb. 46: Schnitt Treppenraum

Um den Lüfter ebenerdig vor dem Treppenraum platzieren zu können wird davor ein Podest mit einer Gesamtlänge von 400 cm und einer Breite von 125 cm aufgebaut. Die Maße der Eingangstür (Zuluftöffnung) sind 97,5 cm x 210 cm (B x H).

7.2 Messtechnik

Für die Druckmessung bei den Realversuchen wird das bereits beschriebene Trotec TA 400 verwendet. Die Messstelle für den Druck befindet sich auf Bodenhöhe im Erdgeschoss an einer strömungsgeschützten Ecke, ist die Position dargestellt. Die Referenzmessung erfolgt im angrenzenden Flur auf gleicher Höhe.

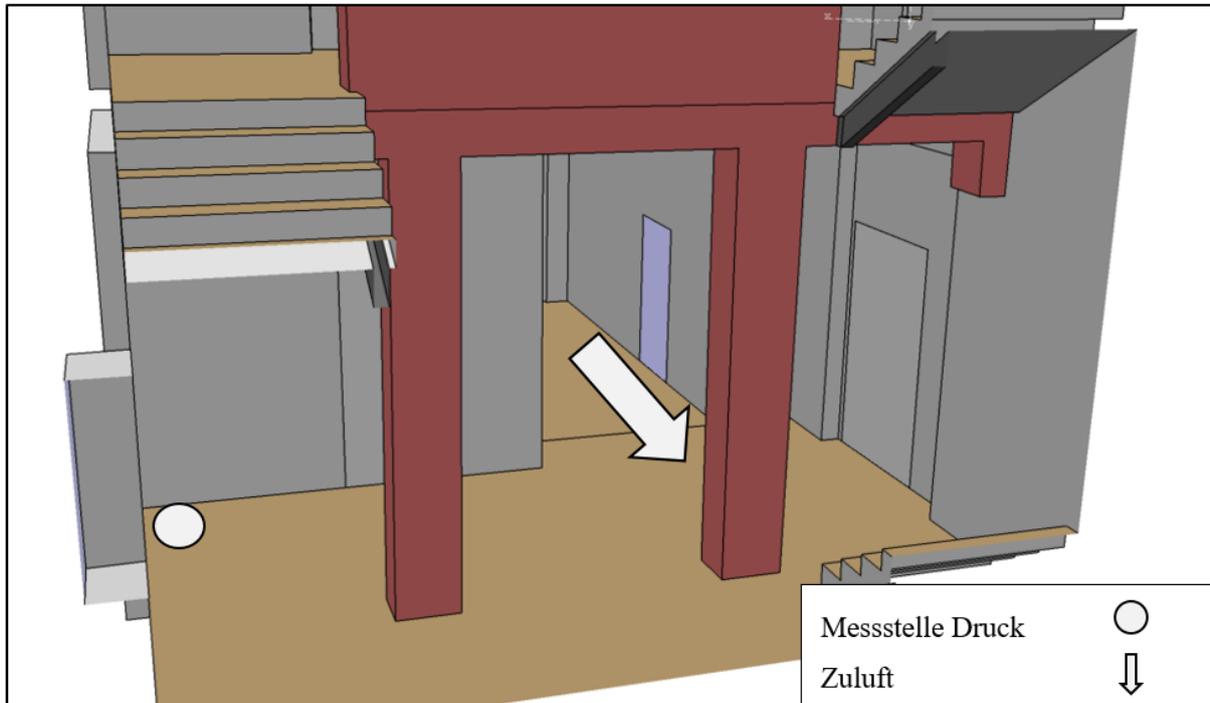


Abb. 47: Position Druckmessung im Treppenraum

7.3 Positionierung des Lüfters

Es wird derselbe kabelgebundene 230V-Lüfter wie bei den Vorversuchen verwendet.

Für die Realversuche wird er auf dem Podest mittig in unterschiedlichen Abständen vor der Eingangstür platziert. Der Transportgriff des Lüfters wird bei den Versuchen eingeklappt, wodurch der Lüfter waagrecht steht. Neben den Abständen werden auch die Größe der Zuluftöffnung und der Neigungswinkel des Lüfters verändert. Bei einem Versuch wird ein Schlauchstück (Lutte) mit dem Lüfter und dem Treppenraum verbunden. Die verschiedenen Konfigurationen sind auf den folgenden Abbildungen 48 bis 53 dargestellt.

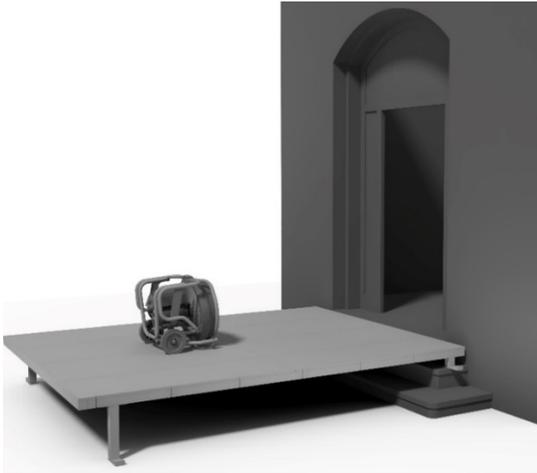


Abb. 18: Lüfter vor geöffneter Tür. CAD



Abb. 49: Lüfter vor geöffneter Tür.
(H=210cm x B=97cm)



Abb. 50: Lüfter vor teilweise abgedeckter Türöffnung CAD



Abb. 51: Lüfter vor teilweise abgedeckter Türöffnung (H=105cm x B=97cm)

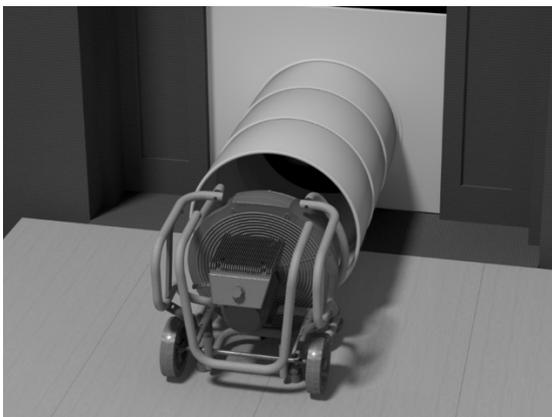


Abb. 52: Lüfter mit Lutte CAD



Abb. 53: Lüfter mit Lutte. Die Lutte hat einen runden Einlass mit ca. 500mm Durchmesser und einen quadratischen Auslass mit 1m x 1m.

7.4 Versuchsbedingungen und Ergebnisse

Bei den Versuchen wird der 230V-Elektrolüfter auf der höchsten Leistungsstufe bei 2200W betrieben. Soweit nicht anders vermerkt steht der Lüfter horizontal ohne Anstellwinkel (Bügel eingeklappt) auf dem selben Höhenniveau wie die Türschwelle.

Die Entfernungen zur Einlassöffnung (=Tür) variieren zwischen 1m und 4m in 0,5m - Schritten. Die Zuluftöffnung ist unterschiedlich verschlossen.

Für die Bewertung aller Versuche wurden wieder die Mittelwerte gebildet. Dafür wurden jeweils 61 Werte (grün markiert) im mittleren Bereich 50 sec – 110 sec der Messung verwendet.

7.4.1 Versuche mit vollflächig geöffneter Tür

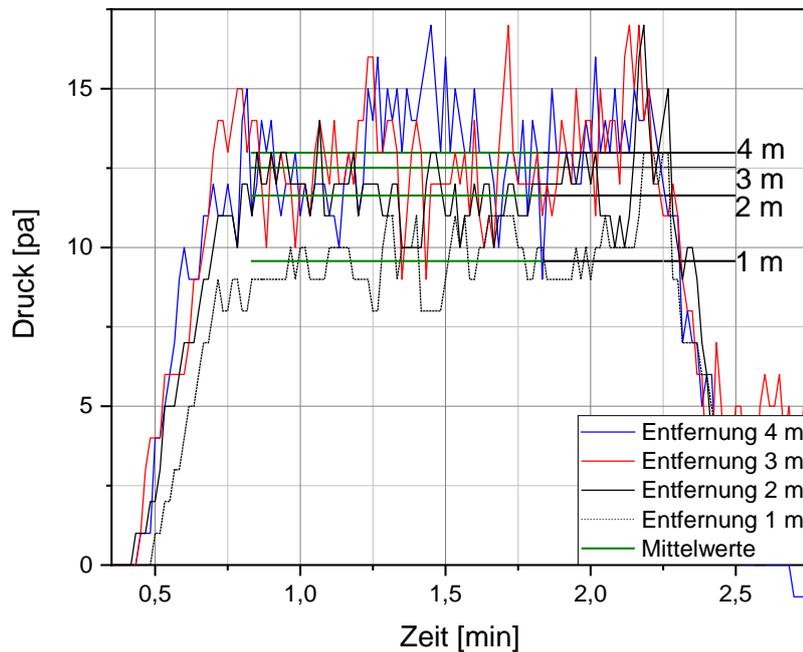


Abb. 54: Druckverläufe. Elektrolüfter vor vollflächig geöffneter Tür (B=97cm x H=105cm). Abstand 1m, 2m, 3m und 4m

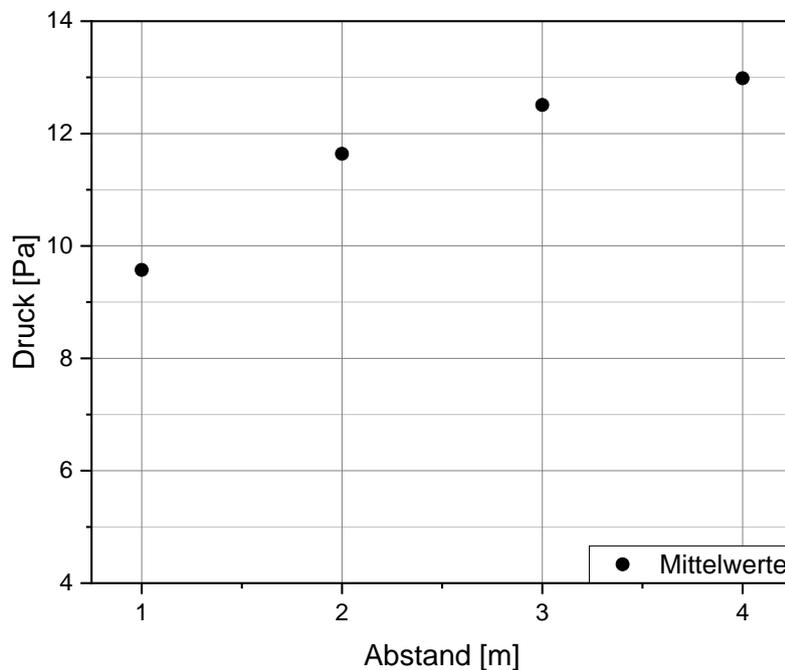


Abb. 55: Mittelwerte bei vollflächig geöffneter Tür 1 m, 2 m, 3 m, 4 m

Bei einer Entfernung von 4 m und 3 m wurde mit einem Mittelwert von 13 Pa die höchsten Drücke gemessen (4 m 13 Pa, 3 m 12,5 Pa). Danach folgte die 2 m mit einem Druck von 12 Pa. Der niedrigste Druck wurde bei einer Entfernung von 1 m mit 10 Pa gemessen.

7.4.2 Versuche mit zur Hälfte abgedeckter Tür

Bei einer Entfernung von 2,5 m wurde mit einem Mittelwert von 49 Pa der höchste Druck gemessen. Danach folgten die Entfernungen 3 m mit einem Druck von 43 Pa, 2 m mit einem Druck von 35 Pa, und 1 m mit einem Druck von 32 Pa. Es wurden außerdem weitere Versuche mit geschlossener oberer Türhälfte und um 10° nach oben geneigtem Lüfter durchgeführt. Die Mittelwerte dieser Versuche sowie die der grade beschriebenen sind auf Abb. in Abhängigkeit zur Entfernung dargestellt.

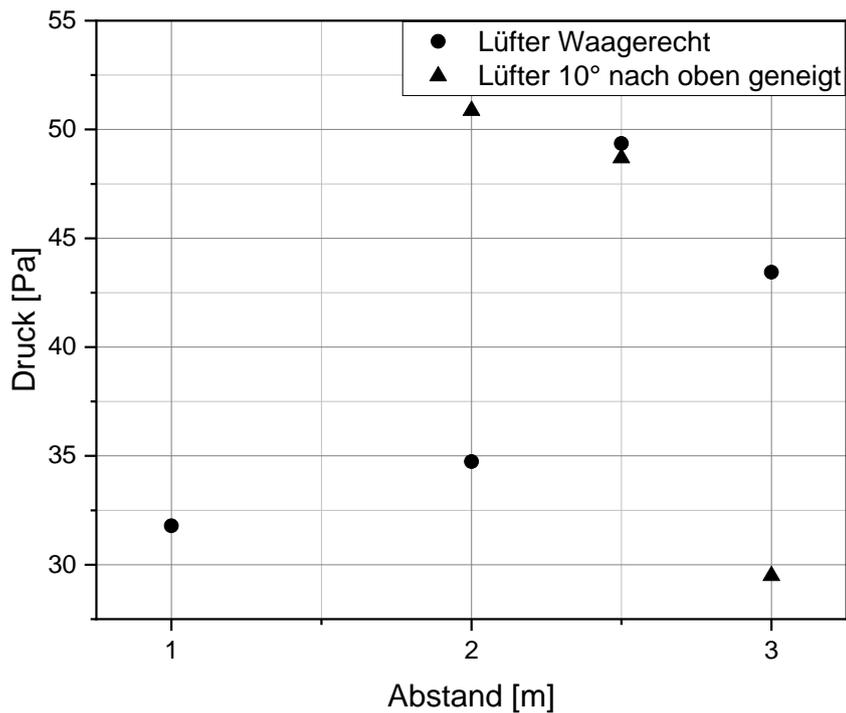


Abb. 56: Mittelwerte obere Türhälfte verschlossen ($B = 97\text{cm} \times H=105\text{cm}$). Lüfter waagrecht und 10° nach oben geneigt

Die Mittelwerte bei um 10° nach oben geneigtem Lüfter waren bei 2 m 51 Pa bei 2,5 m 49 Pa und bei 3 m 29 Pa. Die Werte waren damit, bis auf die Werte bei einem Abstand von 2 m, niedriger als bei waagerechter Ausrichtung.

7.4.3 Versuche mit kleineren Zuluftöffnungen

Der 230V-Elektrolüfter wurde wieder in vier Entfernungen (1,5 m, 2 m, 2,5 m, und 3 m) zentriert vor der Tür platziert. Zuerst war bis auf eine Höhe von 75cm der obere Teil verschlossen und danach wurde die Breite von 97cm auf 75cm verringert, indem in der Türöffnung Ziegelsteine aufeinandergestapelt wurden.

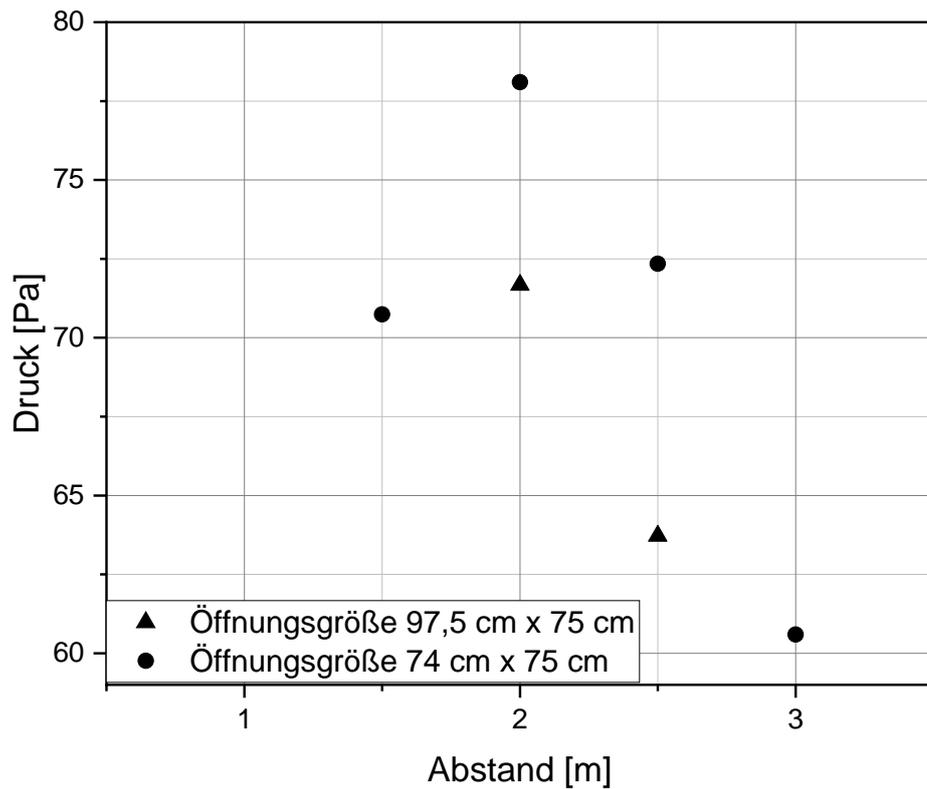


Abb. 57: Druckmittelwerte bei Öffnungsgrößen **B=97cm x H=75cm** und bei **B=74cm x H=75cm**. Abstand des 230V-Lüfters 1,5 m, 2 m, 2,5 m, und 3 m

Entfernung	Öffnungsgröße B=97,5 cm x H=75 cm	Öffnungsgröße B=74 cm x H=75 cm
	Mittelwert Druck [Pa]	
1,5 m		71
2 m	72	78
2,5 m	64	72
3 m		61

Tab. 14: Mittelwerte des Drucks bei verschiedenen Öffnungsgrößen

Der bisher gemessene höchste Druck von 78 Pa wurde bei einer Entfernung von 2 m und einer Öffnungsgröße von 74 cm x 75 cm erreicht.

7.4.4 Versuche mit einer aufgesetzten Lutte

Neben der Variation des Abstands, Neigungswinkels und der Öffnungsgröße wurde ebenfalls ein Versuch mit einem Schlauch, der direkt an den Lüfter angeschlossen und fest mit der Zuluftöffnung verbunden wurde durchgeführt. Sowohl der Anschluss am Lüfter als auch der Anschluss an der Zuluftöffnung wurden mit Klebeband abgedichtet. Die obere Türhälfte wurde ebenfalls mit einer Plane verschlossen. Der Treppenraum war bei diesem Versuch vollständig verschlossen.

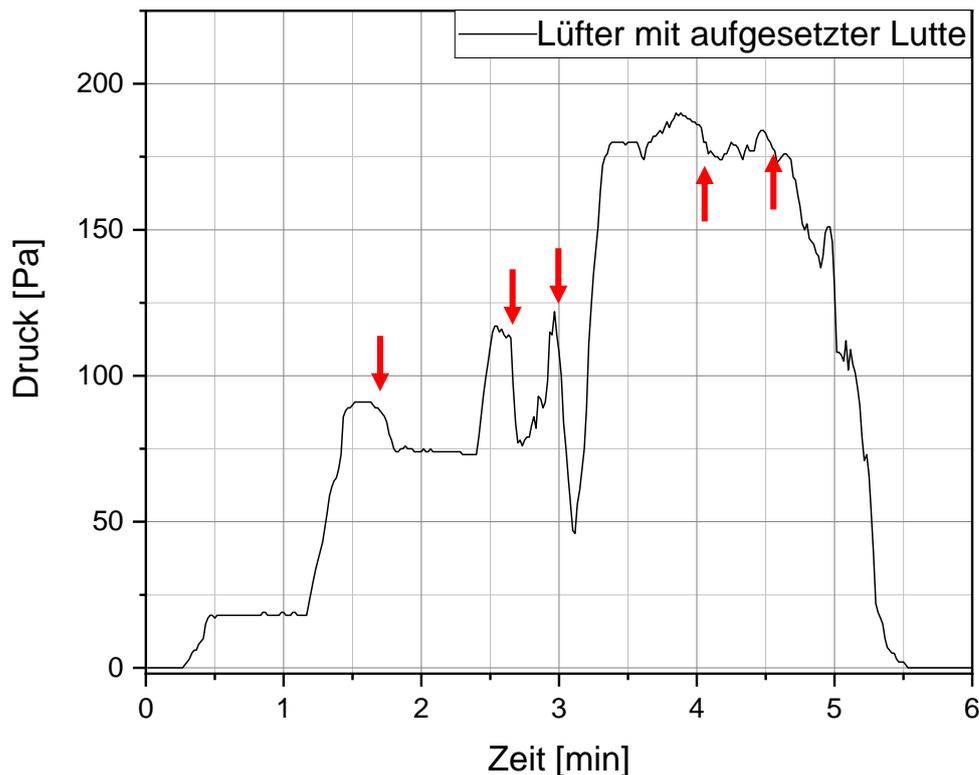


Abb. 58: Druckverlauf beim 230V-Lüfter mit aufgesetzter Lutte

Die Leistung des Lüfters wurde langsam bis zu dessen Maximum erhöht. Es traten während des Versuchs mehrere Leckagen auf (rote Pfeile), da die Folie bzw. das Klebeband stellenweise vom Türrahmen abriss (s. Abb. 53, Kap. 7.3). Die Folie konnte zwar „in Echtzeit“ wieder an dem Türrahmen mit Klebeband abgedichtet werden. So konnte ein maximaler Druck von 190 Pa erreicht werden. Danach traten allerdings mehrere Leckagen gleichzeitig auf und der Versuch wurde abgebrochen. Der maximale Druck von 190 Pa liegt 112 Pa über dem Maximalwert (Mittelwert) aller vorherigen Versuche. Es ist sicher, dass ein höherer Druck (s. Kap. 9.5) hätte erreicht werden können, wäre die Lutte (Querschnitt an der Tür ca. 1m x 1m) fest am Türrahmen fixiert gewesen. Bei 190Pa betrug die Zugkraft an der Türöffnung rund 190N (entsprechend einem Gewicht von 19kg).

7.5 Zusammenfassung der Realversuche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Vorversuche und Realversuche zusammenfassend diskutiert. Tab zeigt miteinander vergleichbare Ergebnisse aller Versuche. Die Maximalwerte sind in *fett* dargestellt. Die Mittelwerte aller Versuche liegen bei den entsprechenden Konfigurationen in einem ähnlichen Bereich. Bei geschlossener oberer Türhälfte wurde beim Container und beim Treppenraum die höchsten Differenzdrücke bei einer Entfernung von 3 m erreicht. Bei der Werkstatt bei 2 m dieser Wert unterscheidet sich jedoch nur um 2 Pa von dem bei einer Entfernung von 3 m.

Die Werte bei vollflächig offener Türöffnung liegen ebenfalls in einem ähnlichen Bereich. Das Maximum wurde in der Werkstatt bei 3 m und im Treppenraum bei 3 m und bei 4 m erreicht. Es ist dabei zu beachten, dass in einer Entfernung von 4 m in der Werkstatt nicht gemessen wurde.

Entfernung	Container	Werkstatt		Treppenraum		
	Obere Hälfte der Türöffnung verschlossen	Obere Hälfte der Türöffnung verschlossen	Türöffnung komplett geöffnet	Obere Hälfte der Türöffnung verschlossen		Türöffnung komplett geöffnet
				Anstellwinkel Lüfter 0°	Anstellwinkel Lüfter 10°	
1 m	28	31	8	32		10
2 m	32	43	14	35	51	12
3 m	39	41	17	43	29	13
4 m						13
5m	24 ¹	19	11			

¹bei Abstand 4,8 m

Tab. 15: Übersicht Mittelwerte der mittleren Differenzdruckmessungen in [Pa]. 230V-Lüfter

Die Maximalwerte bei halb verschlossener Türöffnung liegen bei 39Pa beim kleinen, 43 beim mittleren und 43Pa beim großen Volumen, jeweils zwischen 2 und 3 m Abstand.

Die Zuluftöffnungen der drei Volumen sind ähnlich in ihren Abmessungen, die Position und Leistung des 230V-Lüfters ist ebenfalls ähnlich. Der Anstellwinkel des Lüfters ist 0°, so dass sich die 16cm hohe Kante beim Container störend auswirkt. Die Ergebnisse passen zur Theorie, dass der Druck unabhängig von der Raumgröße hinter einer identischen Zuluftöffnung ist - falls der Raum dahinter jeweils dicht ist.

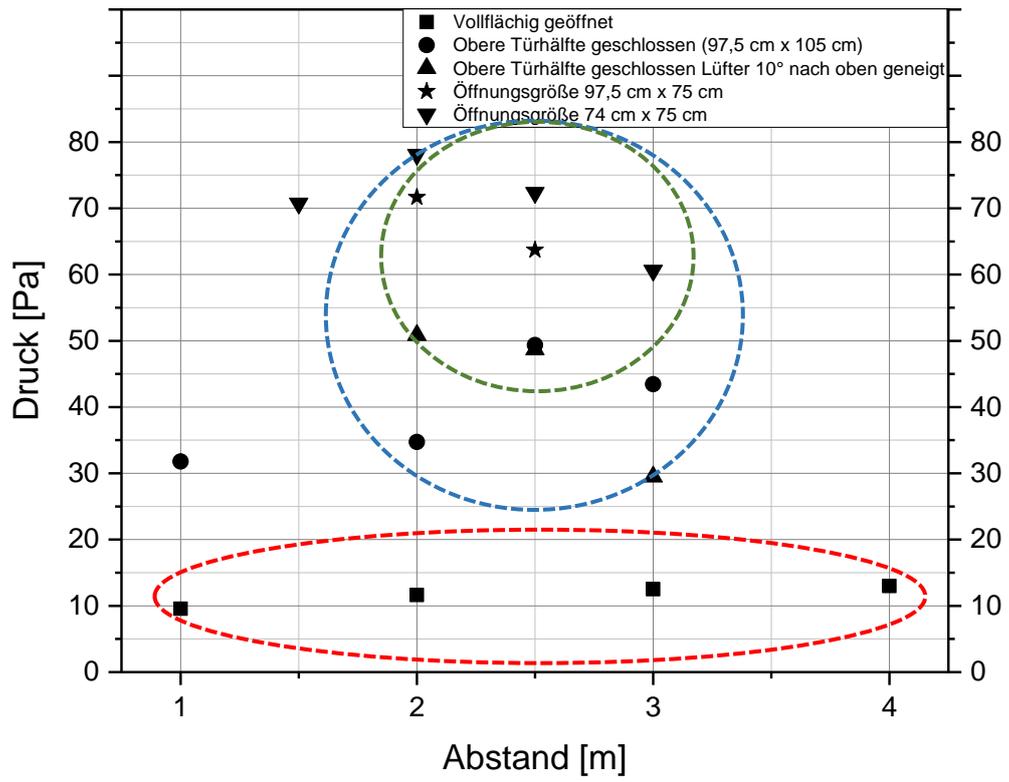


Abb. 59: Mittelwerte der Differenzdrücke im Treppenraum mit dem 230V-Lüfter bei verschiedenen Konfigurationen

7.6 Fazit

Niedrige Drücke < 15 Pa (rot umrandet) werden erreicht, wenn der Lüfter vor der vollständig geöffneten Türöffnung positioniert ist. Der Abstand spielt praktisch keine Rolle.

Mittlere bis hohe Drücke > 30 Pa (blau umrandet) werden erreicht, wenn mindestens die obere Hälfte der Türöffnung verschlossen ist und der Lüfter in einem Abstand von 2-3m positioniert ist. Der Anstellwinkel kann dabei 0° oder 10° betragen.

Hohe Drücke >50 Pa (grün umrandet) werden erreicht, wenn die obere Türöffnung bis auf eine Höhe von 75cm über dem Boden verschlossen ist und der Lüfter in einem Abstand von 2-3m positioniert ist.

Höchste Drücke > 70Pa werden erreicht, wenn die obere Türöffnung bis auf eine Höhe von 75cm über dem Boden verschlossen ist, die verbliebene Türöffnung zusätzlich in der Breite verkleinert wird und der Lüfter in einem Abstand von 2 -2,5m positioniert ist. Allerdings liegen die Drücke weniger als 10Pa über der Konfiguration, bei der lediglich obere Türöffnung bis auf eine Höhe von 75cm über dem Boden verschlossen ist

Diese Ergebnisse sind ausschließlich gültig für den Lüfertyp aus Kap 6.1.2

Bei diesem Lüfertyp (420mm mit breitem Strahl), ist ein Abstand von 2-3m und eine Tür mit oberer verschlossener Türhälfte eine gute Wahl, wenn ein möglichst hoher Differenzdruck erreicht werden soll.

In der Regel reichen 30Pa bereits aus, da der Rauch hinter einer Tür mit einem Überdruck von ca. 15Pa (s. Kap. 9.4) durch die Spalte ausströmt- vorausgesetzt, im Brandraum ist eine Öffnung nach außen hin vorhanden und der Winddruck keine Rolle spielt.

Der verwendete Akkulüfter (s. Kap. 6.1.1.) ist zum Aufbau eines Differenzdrucks (jeweils nur rund ein Drittel) nicht so wirksam, da er lediglich eine Antriebsleistung von 600W (vs. 2200W beim 230V-Lüfter) hat. Daraus sollte aber nicht geschlossen werden, dass der Akkulüfter nicht zum Entrauchen (mit Abluftöffnung) geeignet ist.

Im folgenden Teil des Berichts werden Simulationsrechnungen durchgeführt, bei denen ein Lüfter in unterschiedlichen Konfigurationen untersucht wird. Insbesondere der Anstellwinkel vor einer offenen Tür und das Entrauchen (Raum mit Abluftöffnungen) können untersucht und analysiert werden, um ein vollständiges Einsatzspektrum eines Lüfters abzudecken.

8. CFD-Simulation

Mittels numerischer Strömungssimulation (CFD, computational fluid dynamics) mit dem kommerziellen Programm Ansys CFX (Release 19.0) wurden Szenarien in Anlehnung an die experimentell durchgeführten simuliert, d.h. die Belüftung des Treppenraumes bei verschiedenen Abständen des Lüfters zur Tür und verschiedenen großen Ein- und Auslassöffnungen.

Die Realversuche wurden in einem denkmalgeschützten Gebäude, in welchem sich heute unter anderem die Büroräume der FFB befinden, durchgeführt. Das Gebäude wurde vor einigen Jahren (unabhängig von den Versuchen) komplett mittels 3D-Laserscan vermessen und die geometrischen Messdaten wurden der FFB in Form von Punktwolken zur Verfügung gestellt. Daher war es mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich, das Treppenraum in diesem hohen Detaillierungsgrad zu vernetzen, obwohl für die Simulation ein geringerer ausgereicht hätte. Es wäre ein Mehraufwand gewesen, die Punktwolkendaten und die daraus gewonnen geometrischen Berandungsflächen für die Vernetzung geometrisch zu vereinfachen bzw. zu glätten um die Vernetzung zu vereinfachen, da diese mit ICEM CFD automatisiert durchgeführt wird.

8.1. Großes Volumen mit LES – Turbulenzmodell vs. kleines Volumen und $k-\epsilon$

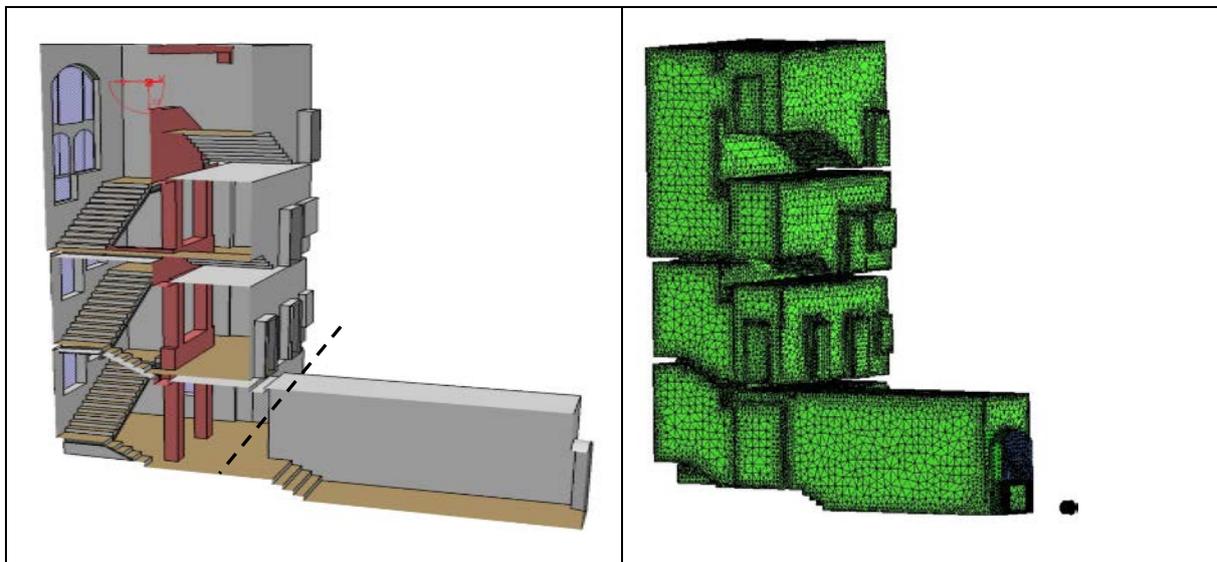


Abb. 60: Links die Geometrie des Treppenraumes, erstellt mittels Catia V5 aus Punktwolkendaten, rechts das Gitter, erstellt mit ICEM CFD. Das verkleinerte Volumen erstreckt sich bis zur gestrichelten Linie.

Sollte der Leser nicht mit CFD-Methoden vertraut sein, kann er gleich zu Kapitel 8.3 auf Seite 84 übergehen.

Zur Bewertung der Taktischen Belüftung sind zwei physikalische Größen relevant: Der Überdruck (Druckdifferenz) im belüfteten Volumen und der Volumenstrom bei vorhandener Ausströmöffnung.

Bei den Realversuchen wird der Lüfter vor die Türöffnung gestellt und die Messwerte über einen Zeitraum von typischerweise mehreren Sekunden bis etwa eine Minute aufgenommen. Insbesondere bei Räumen ohne Ausströmöffnung ist in der Nähe der Einströmöffnung ein stark turbulentes Strömungsfeld zu erkennen. Bei den Versuchen wurde z.B. die Tür dadurch halb verschlossen, dass mit einer mit Panzerband befestigten Plane die obere Türhälfte verschlossen war. Die Plane hat hin und her geschlagen, was ein sicheres Zeichen für zeitlich ändernde Drücke im Innern ist. Obwohl es sich um einen stationären Zustand handelt, sind zeitliche starke Schwankungen der Geschwindigkeit vorhanden.

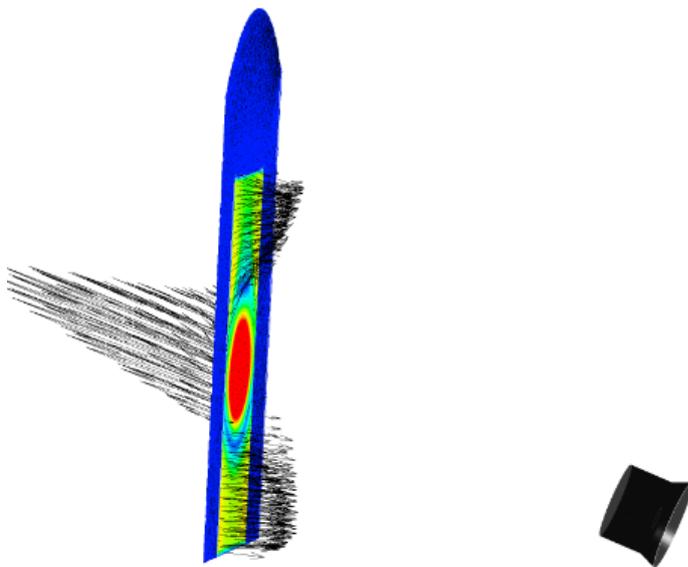


Abb. 61. Geschwindigkeitsfeld im Türquerschnitt mit geschlossenem Raum dahinter

Durch eine Öffnung, hinter der sich ein luftdichter Raum befindet, strömt im zeitlichen Mittel keine Masse ein oder aus, weil der Druck im zeitlichen Mittel konstant ist. Es gibt im Querschnitt aber Bereiche, in denen Luft einströmt (hier der rote Kreis) und Bereiche (hier ober- und unterhalb des Kreises), in denen Luft ausströmt. Die Volumina ein- und ausströmender Luft sind im Mittel gleich. Da die Strömung aber turbulent ist und große Wirbel gebildet werden, pulsiert die Strömung. Es kommt zu einem zeitlich variierenden Druck, daher die stark schwankenden Drücke bei den Vor- und Realversuchen.

Für die Wirksamkeit der taktischen Belüftung sind nur die Mittelwerte der Druckverläufe von Relevanz. Es wäre für die Durchführung der Simulationen von Vorteil, wenn die mit dem LES – Turbulenzmodell berechneten Mittelwerte der Drücke im großen Volumen, dem Treppenraum, mit den Drücken übereinstimmen, die mit dem stationären k-e Modell im verkleinerten Volumen überstimmten.

Anm.: Für die Durchführung der Simulationen war es nicht Ziel, den Lüfter, der in den praktischen Versuchen benutzt wurde, realitätsnah abzubilden. Die Ausgestaltung und der Abstand des Gitters vor

dem Laufrad haben einen erheblichen Einfluss auf Aufweitung des Strahls, sodass ein im Rahmen dieses Projektes nicht zu stehender Mehraufwand bei der Berechnung nötig gewesen wäre.

Bei der CFD Simulation wird daher zuerst eine zeitlich gemittelte stationäre Lösung unter Verwendung des Standard k- ϵ -Turbulenzmodells berechnet. Dann wird auf eine transiente Berechnung mit LES-Turbulenzmodell umgeschaltet, welche die Ergebnisse aus der stationären Berechnung als iterativen Anfangslösung nutzen. Die Berechnung einer simulierten Zeitspanne von 10 Sekunden, aus der die Mittelwerte des Druckes berechnet ermittelt werden können, dauert auf der verwendeten Workstation mit Intel Xeon Prozessor (3,6 GHz, 16 Kerne) im Parallelbetrieb mehrere Tage.

Die gleiche Berechnung stationär mit k- ϵ -Turbulenzmodell und kleinem Volumen hingegen nimmt etwa eine Stunde auf derselben Workstation in Anspruch.

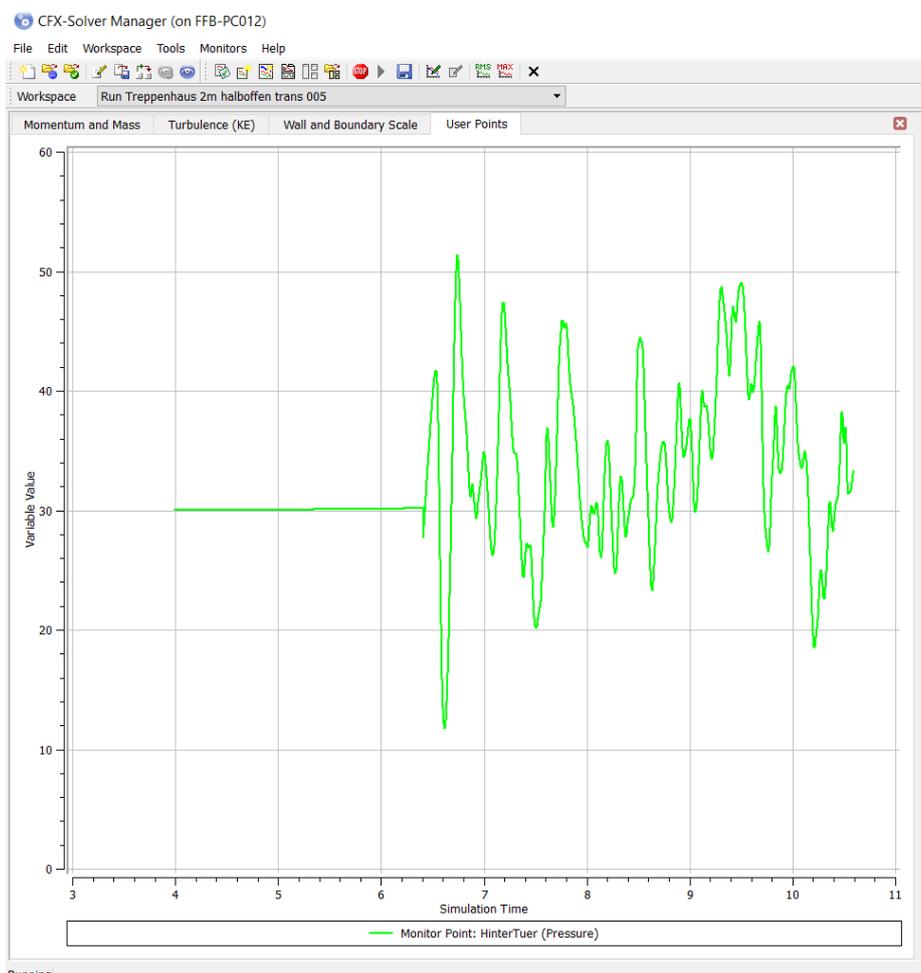


Abb. 62: Zeitlicher Verlauf (in Sekunden) des relativen Druckes (in Pascal) im Innern des kompletten Treppenraumes bei 2m Lüfterabstand vor der halbverschlossenen Tür. Die Zeit zwischen Minimum und Maximum beträgt rund eine halbe Sekunde, entsprechend einer Frequenz von 2-3 pro Sekunde.

Bei den Versuchen flatterte die Plane, welche die obere Hälfte der Tür abspernte, weil 4-6 mal pro Sekunde ein Wechsel zwischen Zug- und Druckkraft mit einer Amplitude von bis zu 30Pa auf sie einwirkte. 30 Pa entsprechen einem Gewicht von drei Kilogramm auf einem Quadratmeter verteilt.

Die transiente Berechnung beginnt mit der Anfangslösung der stationären Lösung bei $t = 6,4s$, der Zeitschritt beträgt 1 Millisekunde, so dass die max. Courant-Zahl kleiner 5 ist. Der Mittelwert beträgt 30Pa, die maximalen Schwankung beträgt ca. 20Pa.

Das Volumen des Treppenraumes beträgt $670m^3$ (vs. $110m^3$ beim verkleinerten), eine Druckänderung von 30Pa entsteht durch das Aus- bzw. Einströmen von $30Pa/100.000Pa \times 670m^3 = 200$ Litern Luft.

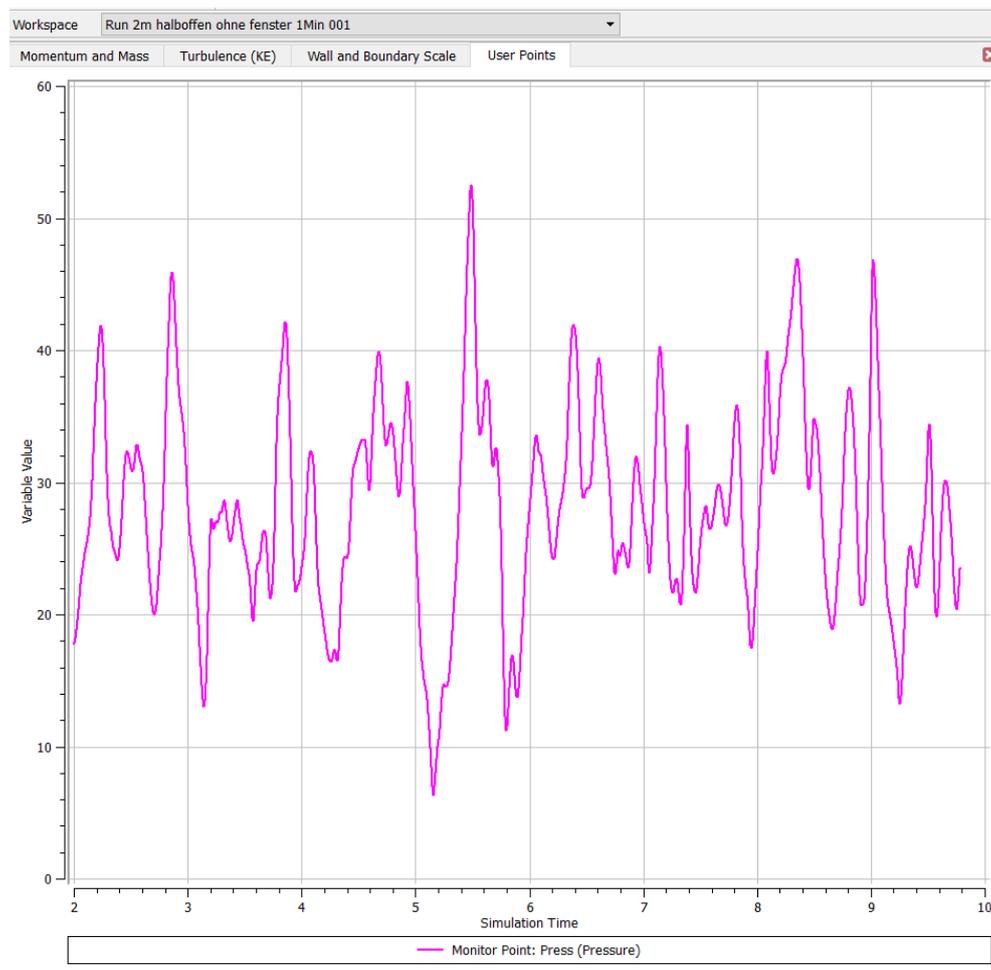


Abb. 63: Zeitlicher Verlauf (in Sekunden) des relativen Druckes (in Pascal) im Innern des verkleinerten Volumens bei 2m Lüfterabstand vor der halbverschlossenen Tür. Die Zeit zwischen Minimum und Maximum beträgt rund eine halbe Sekunde, entsprechend einer Frequenz von 2-3 pro Sekunde. Die transiente Berechnung ist ab $t = 2s$ dargestellt. Der Mittelwert beträgt ebenfalls 30Pa, die maximalen Schwankungen betragen ca. 20Pa. Der Druck bei der stationären Berechnung beträgt ebenfalls 30Pa.

Bei den Messungen zeigte sich ebenso wie bei den Simulationen, dass die Größe des Raumvolumens keinen Einfluss auf die Höhe des Überdrucks hat. Aus diesem Grund wurden die Simulationen mit einem verkleinerten Volumen hinter der Türöffnung durchgeführt – die Rechenzeiten konnten so um gut 95% reduziert werden ohne Beeinträchtigung der Güte der Simulationen. Pre- und Postprocessing sind allerdings nicht beschleunigt. Insgesamt wurden mehr als 100 Simulationsberechnungen durchgeführt.

8.2 Geometrie

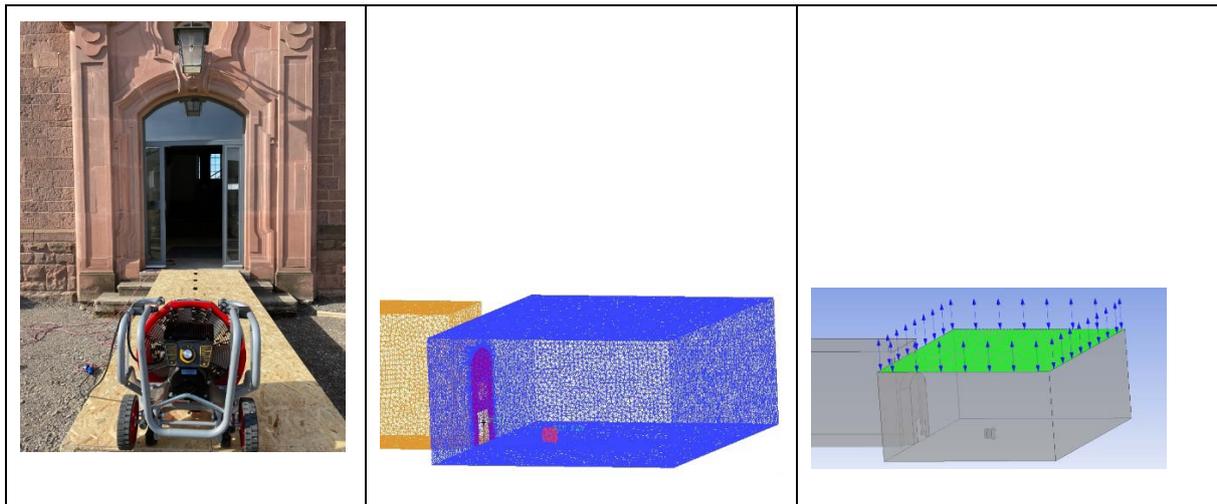


Abb. 64: Links der Lüfter vor der Eingangstür zum Treppenraum, mittig der entsprechende Ausschnitt des Gitters mit Lüfter (rot) und dem Bereich um die Tür und Lüfter (blau) und rechts die Randbedingung (*opening*) für die CFD Simulation.

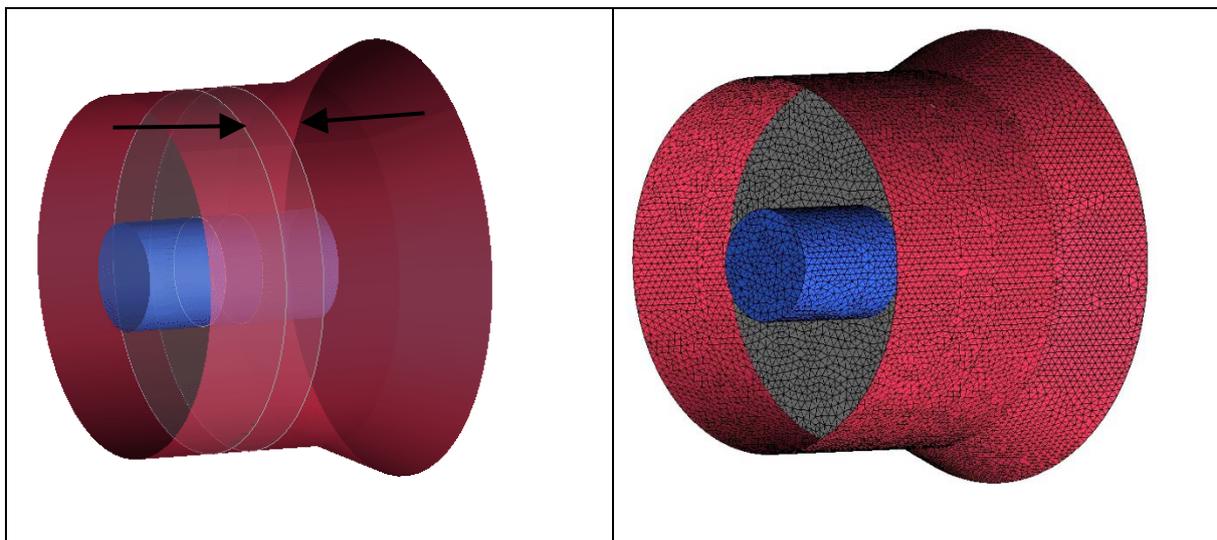


Abb. 65: Ventilator mit Gehäuse (Strömungsführung), Nabe (blau) und der Impulsquelle (Bereich zwischen den Pfeilen)

Der Lüfter wurde vereinfacht dargestellt, indem lediglich eine äußere strömungsführende Kontur abgebildet wurde. Der Austrittsdurchmesser beträgt 430mm (420mm Laufraddurchmesser plus 2x 5mm Spaltmaß zwischen Laufrad und Einhausung). Die Austrittsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass korrelierend zu den Messungen eine Geschwindigkeit von 17ms^{-1} in 1m Abstand erreicht wird. Hierzu

wurde der Bereich im Innern des Ventilators als Impulsquelle definiert, wo üblicherweise die Blätter drehen – die einströmende Luft wird beschleunigt.

Bei der Vernetzung mit Ansys ICEM CFD wurden ausschließlich Tetraeder-Zellen generiert. Die Auflösung ist in den Bereichen des Strömungsgebietes mit hohen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten hoch, d.h. insbesondere im Nahbereich des Lüfters und in der Türöffnung. Erreicht wird die lokal unterschiedliche Auflösung (bzw. Zellgröße) u.a. durch sogenannte local densities, in deren einhüllenden Bereich die maximale Zellgröße definiert wird.

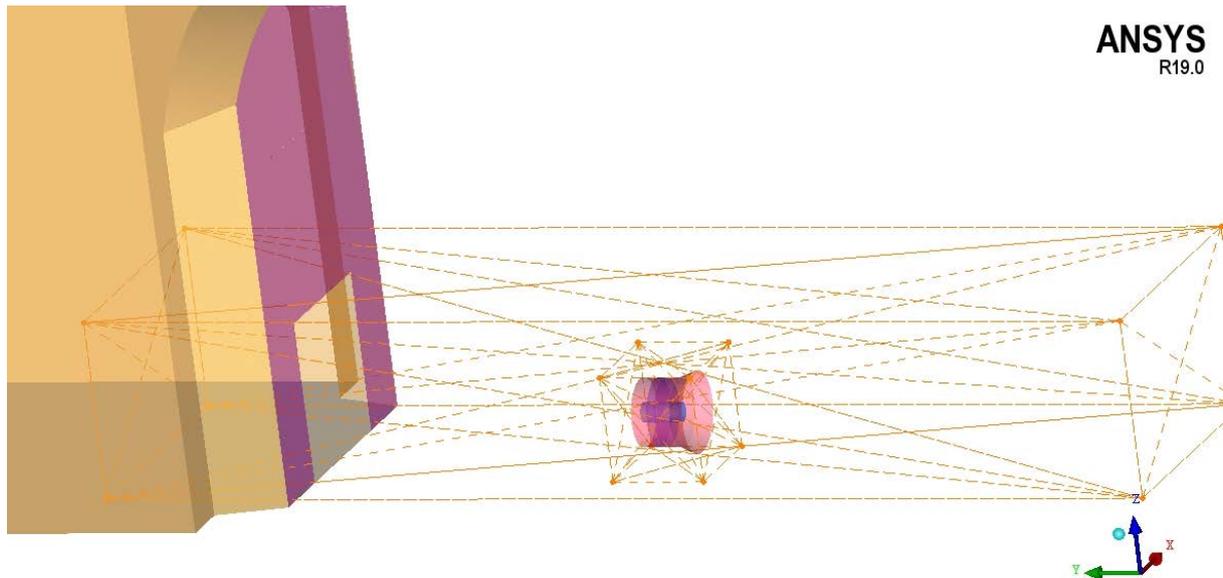


Abb. 66: Local densities bei halb verschlossener Tür. Im Bereich des Lüfters Kantenlänge max. 10mm, im Bereich des Strahls bis 40mm, sonst bis max. 150mm.

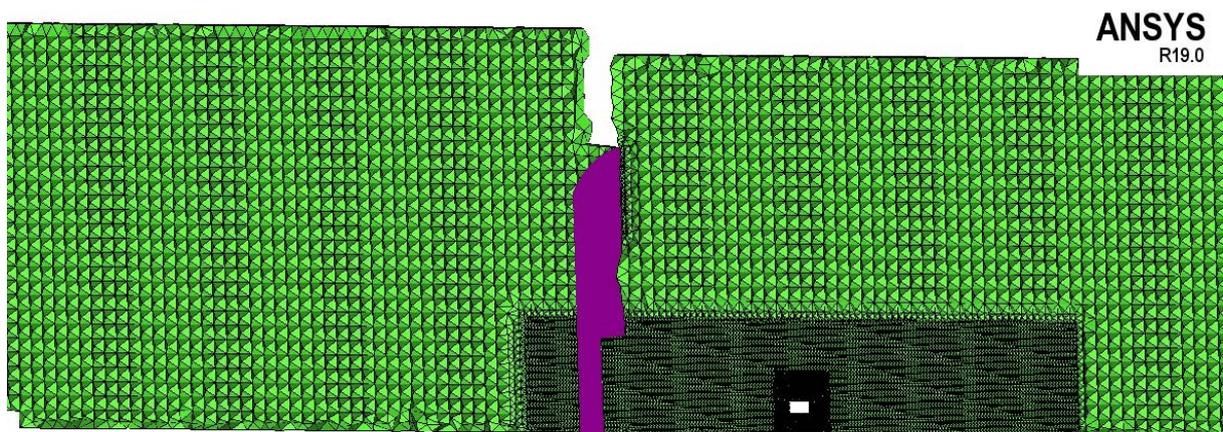


Abb. 67: Schnitt durch das Netz bei Tür mit verschlossener oberer Hälfte. Im Bereich des Lüfters Kantenlänge max. 10mm, im Bereich des Freistrahls bis 40mm, sonst bis max. 150mm.

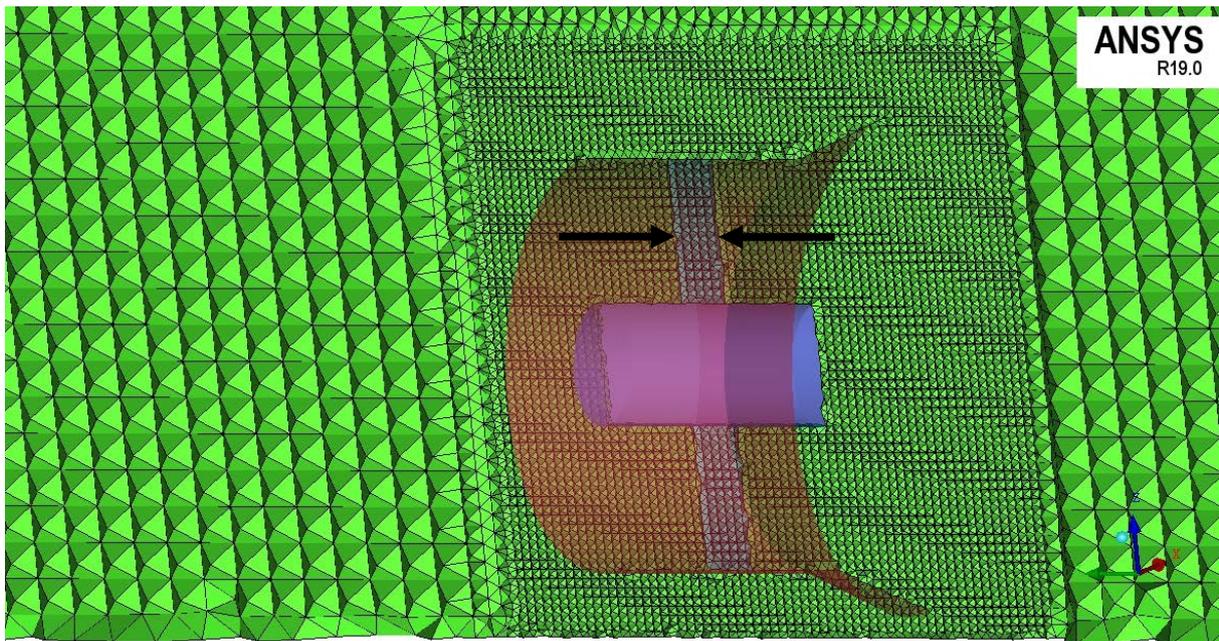


Abb. 68: Vergrößerung aus Abb.67. Zwischen den Pfeilen der Bereich, welcher als Impulsquelle definiert wurde

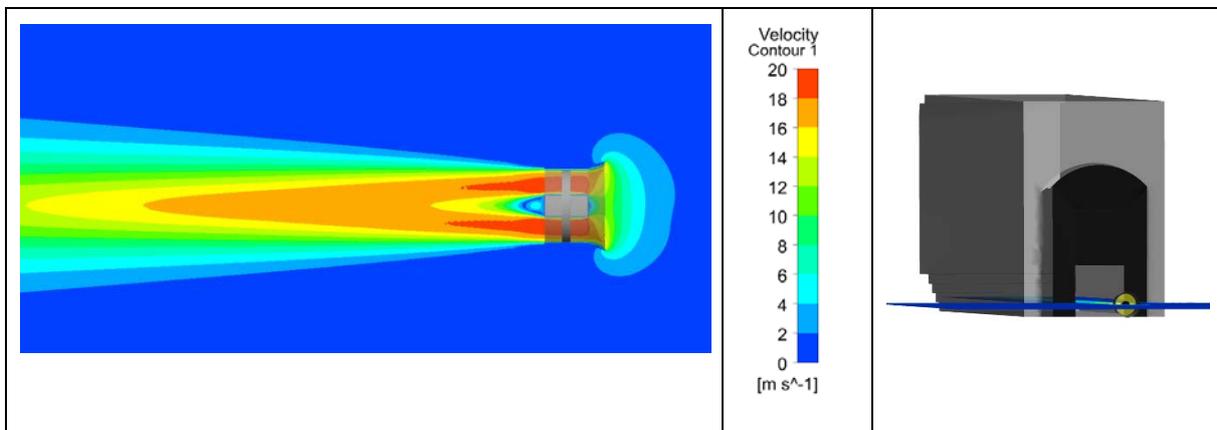


Abb. 69: Links Längsschnitt der (mittleren skalaren) Geschwindigkeit im Bereich des Lüfters. Die maximale Geschwindigkeit beträgt knapp über 20ms^{-1} . Der Nachlauf der Nabe (Strömung stark verlangsamt) wirkt sich bis in eine Entfernung von rund einem Meter aus, rechts Schnittebene

Die mittlere Austrittsgeschwindigkeit beträgt 17ms^{-1}

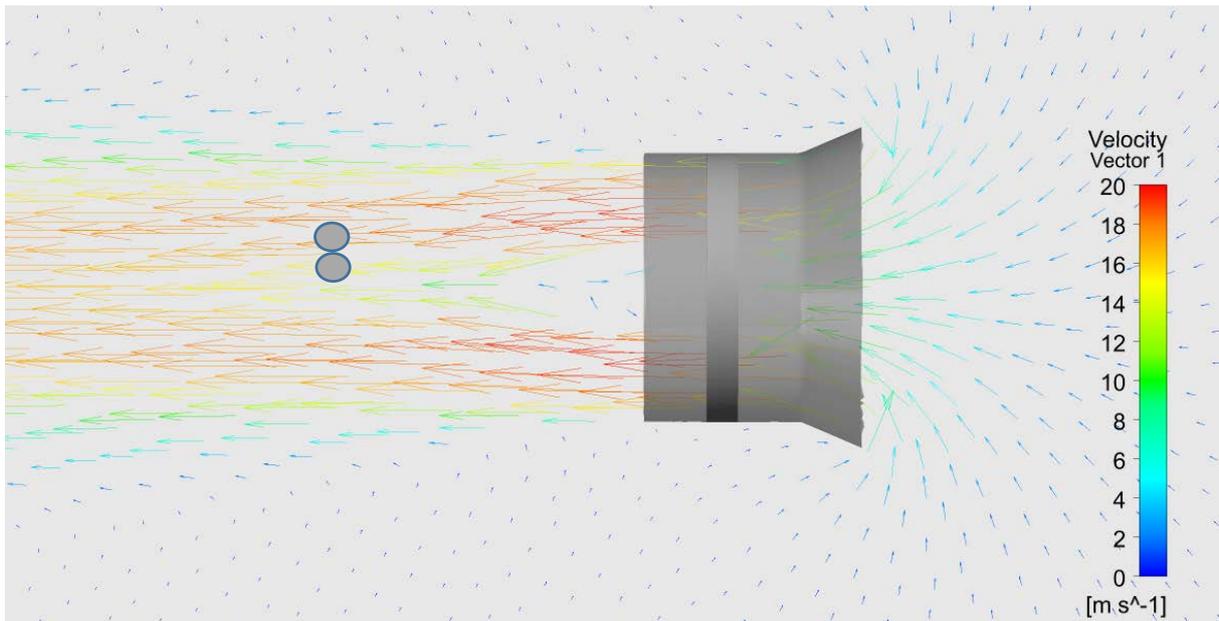


Abb. 70: Schnitt der vektoriellen Geschwindigkeitsverteilung, gleiche Schnittebene wie in Abb .69

Anm.: An den mit Kreisen markierten (ungünstigen) Stellen mit hohen Geschwindigkeitsgradienten in radialer Richtung befanden sich in den Vorversuchen die Messsonden zur Aufnahme der Strömungsgeschwindigkeit.

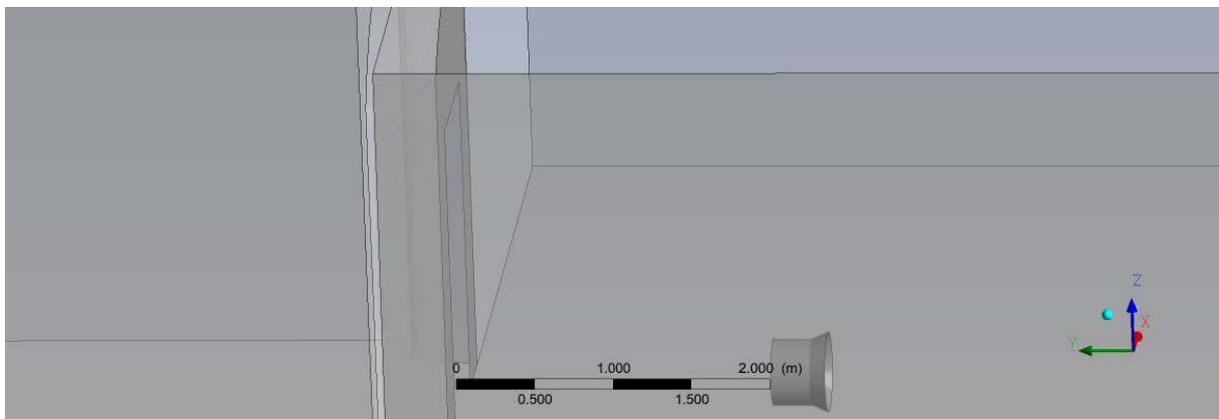


Abb. 71: Abstand Lüfter zur Zuströmöffnung (hier beispielhaft 2m). Gemessen von der Vorderkante des Lüfters bis zur Zuströmöffnung (=Tür)

Die Abstände variieren zwischen 1m und 6 oder 7m in 1m-Schritten.

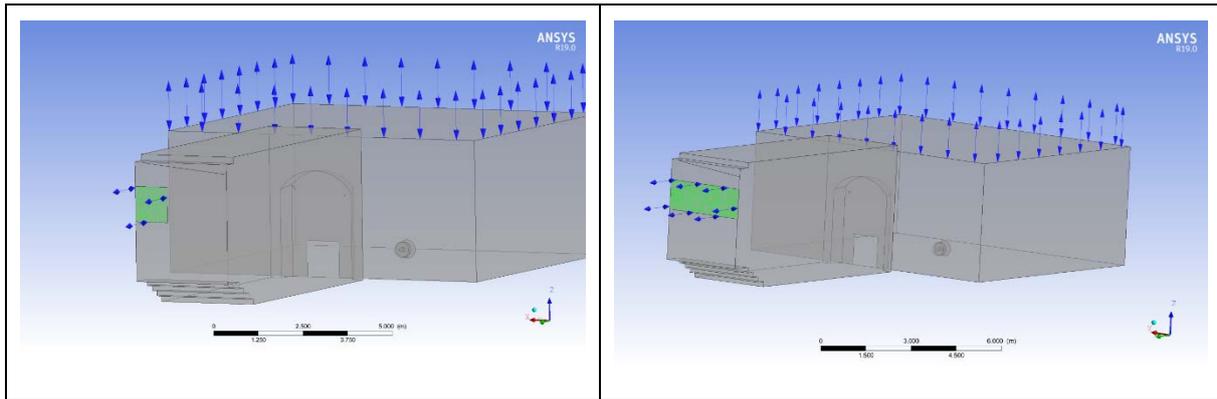


Abb. 72: Links das Gitter mit der kleinen Fensteröffnung (in grün) mit 1m^2 , rechts mit der großen Öffnung ($2,85\text{m}^2$). Die blauen Pfeile oberhalb der Geometrie kennzeichnen das opening.

8.3 Simulationsergebnisse

Im den folgenden Abbildungen werden stets die gleichen Ansichten und Schnittebenen ausgewählt.

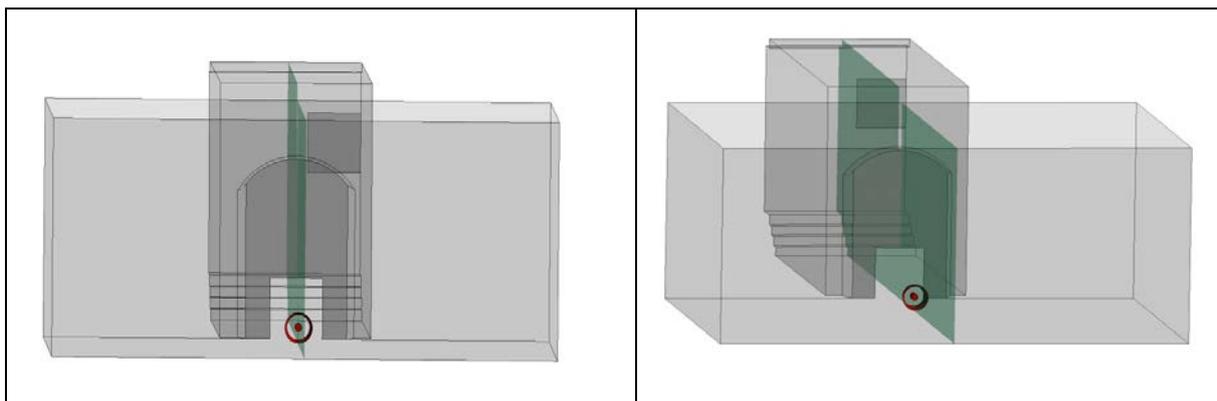


Abb. 73: Schnittebene längs

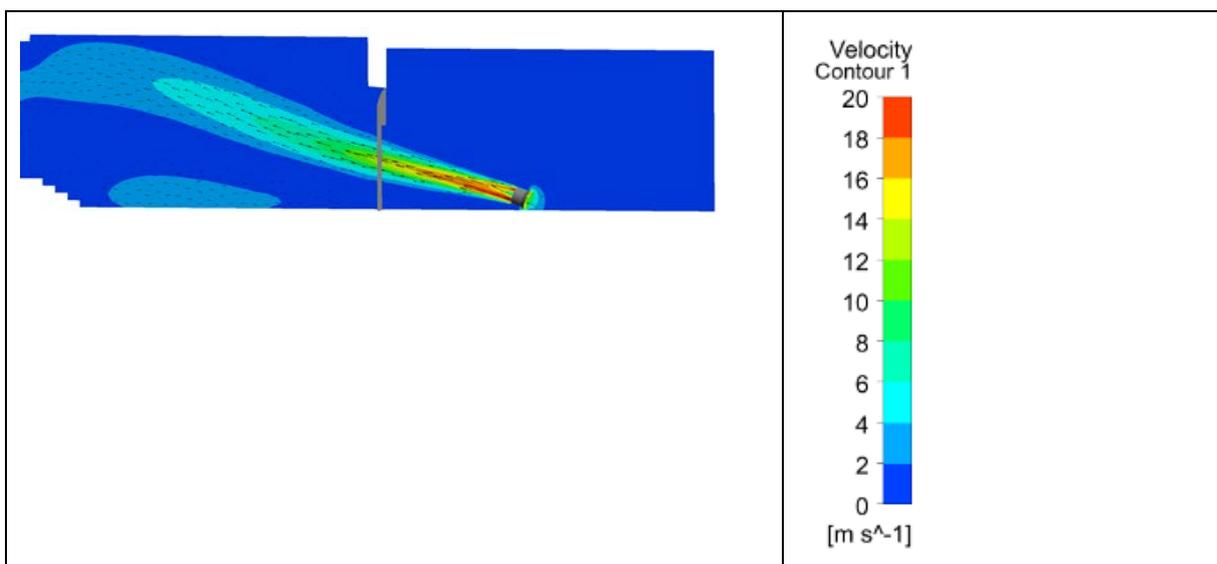


Abb. 74: Links ein beispielhafter Längsschnitt, rechts die für alle Abbildungen gültige Skala für die Geschwindigkeit.

8.3.1. Tür über die gesamte Höhe offen, keine Abluftöffnung (Fenster zu)

Anstellwinkel konstant 0Grad (s. S. xx Abb. 75)								
Entfernung in m	0	1	2	3	4	5	6	7
ΔP in Pa	2	4	4	7	7	8	12	10
Ventilator zur Mitte hin ausgerichtet, Winkel in Klammer (s. S. xx Abb. 76)								
Entfernung (Winkel) °	0 (45°)	1 (35°)	2 (25°)	3 (20°)	4 (15°)	5 (10°)	6 (5°)	-
ΔP in Pa	2	6	12	14	18	19	18	-

Tab. 16: Erreichbare Differenzdrücke bei Abständen zw. 0 und 7m

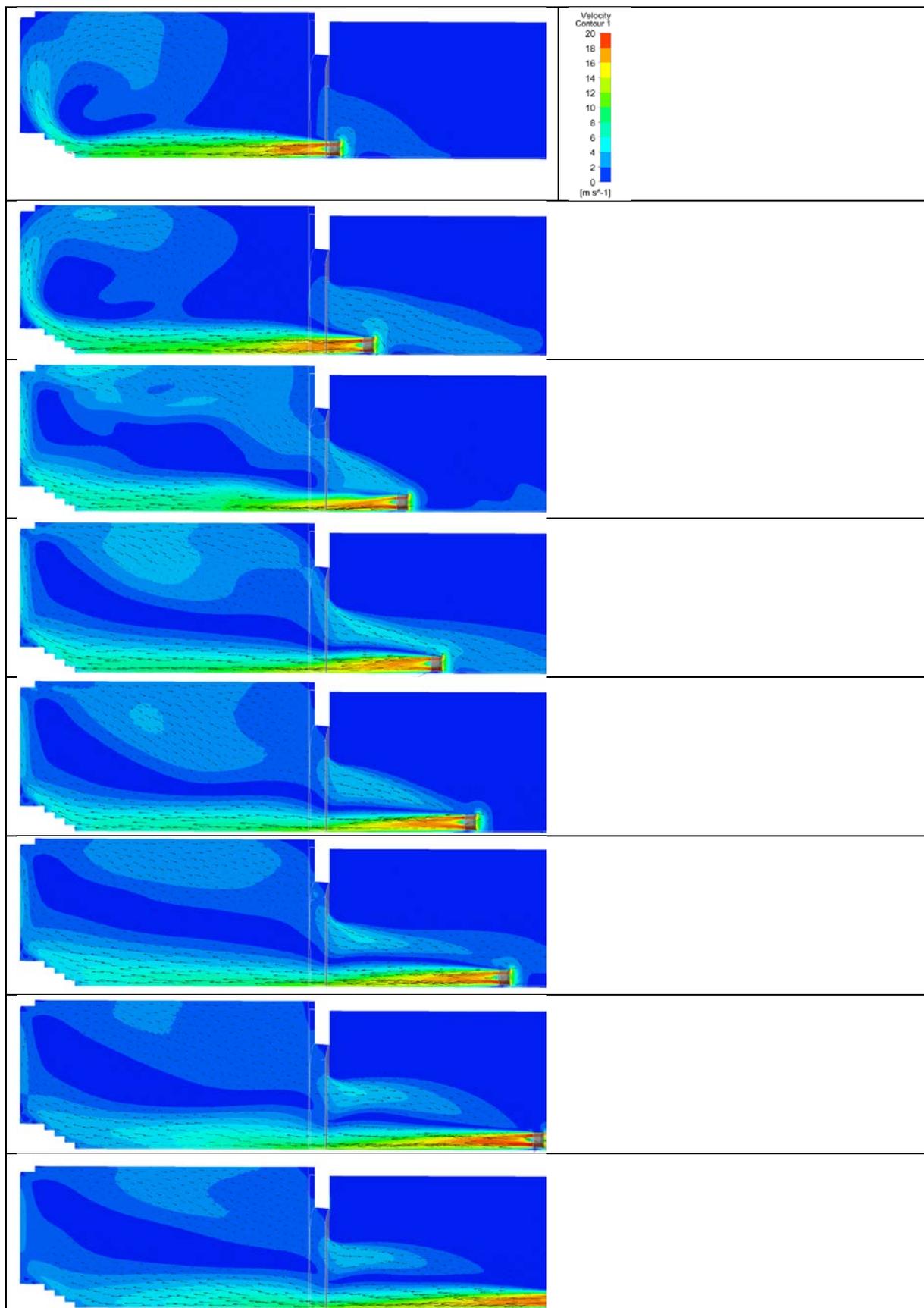


Abb. 75: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 7m (unterstes Bild).

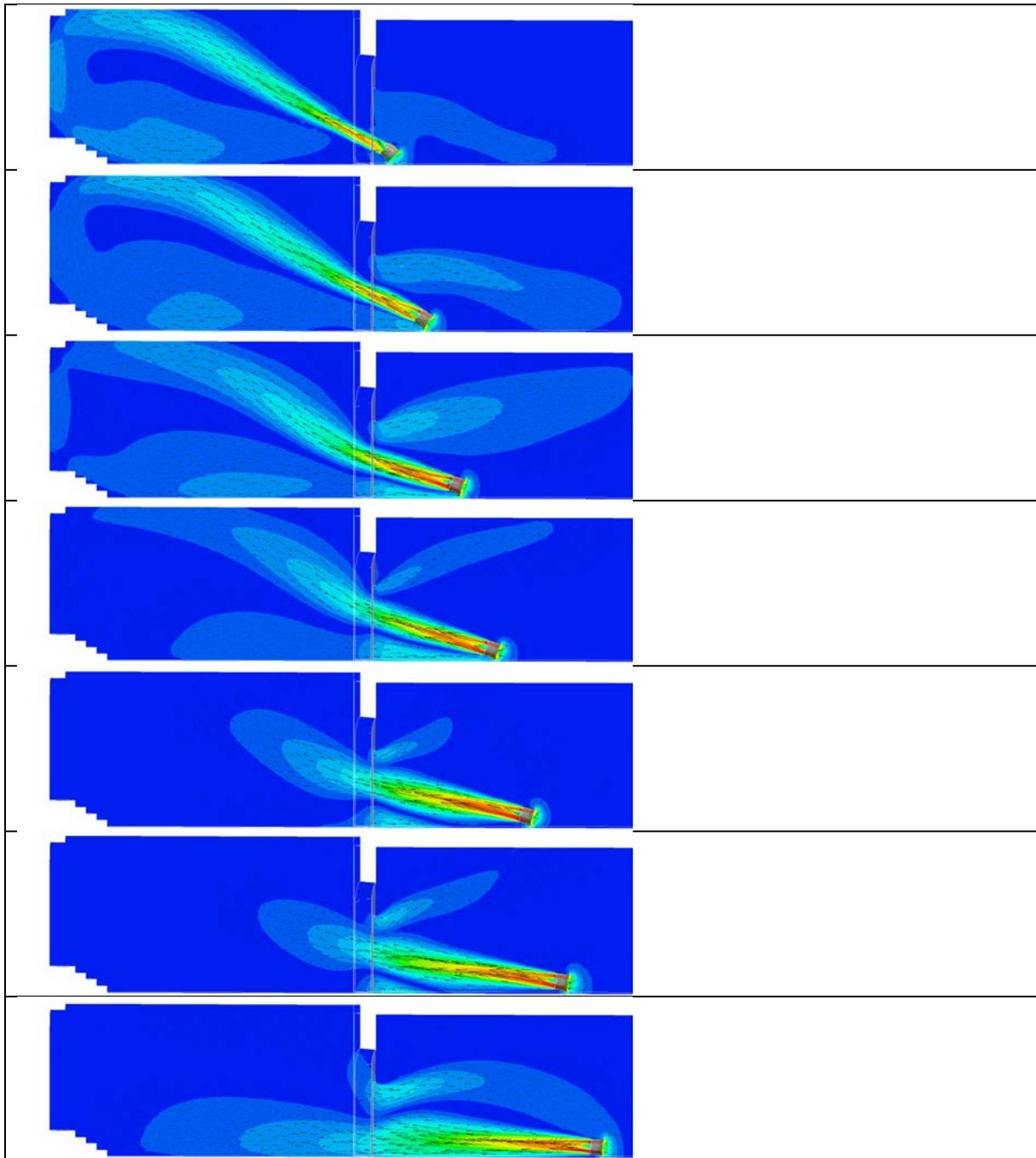


Abb. 76: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild). Der Lüfter ist so angestellt, dass er zur Mitte der Tür ausgerichtet ist.

8.3.2 Tür offen, Fenster geöffnet, Winkel Lüfter 0°

Entfernung 0-7m, Winkel 0Grad								
Entfernung in m	0	1	2	3	4	5	6	7
1m ² Fensterfläche offen (Abb. 77)								
ΔP in Pa	0	2	2	3	5	5	6	6
Volumenstrom in m ³ s-1	0,8	0,8	1,0	1,5	1,8	2,0	2,2	2,1
1m ² Fensterfläche offen, (Lüfter mit Anstellwinkel mittig ausgerichtet) (Abb 78)								
Entfernung (winkel)	0 (45°)	1 (35°)	2 (25°)	3 (20°)	4 (15°)	5 (10°)	6 (5°)	
ΔP in Pa	0	1	2	4	7	9	8	
Volumenstrom in m ³ s-1	1,5	2,0	2,5	2,8	3,3	3,4	2,9	
2,85m ² Fensterfläche offen (Lüfter mit Anstellwinkel mittig ausgerichtet) (Abb 79)								
Entfernung (winkel)	0 (45°)	1 (35°)	2 (25°)	3 (20°)	4 (15°)	5 (10°)	6 (5°)	
ΔP in Pa	-2	-2	-1	-1	0	2	2	
Volumenstrom in m ³ s-1	3,5	4.3	5.1	5.3	6.2	6.3	5.3	

Tab. 17: Erreichbare Differenzdrücke und Volumenströme bei Abständen zw. 0 und 7m. **Tür offen**

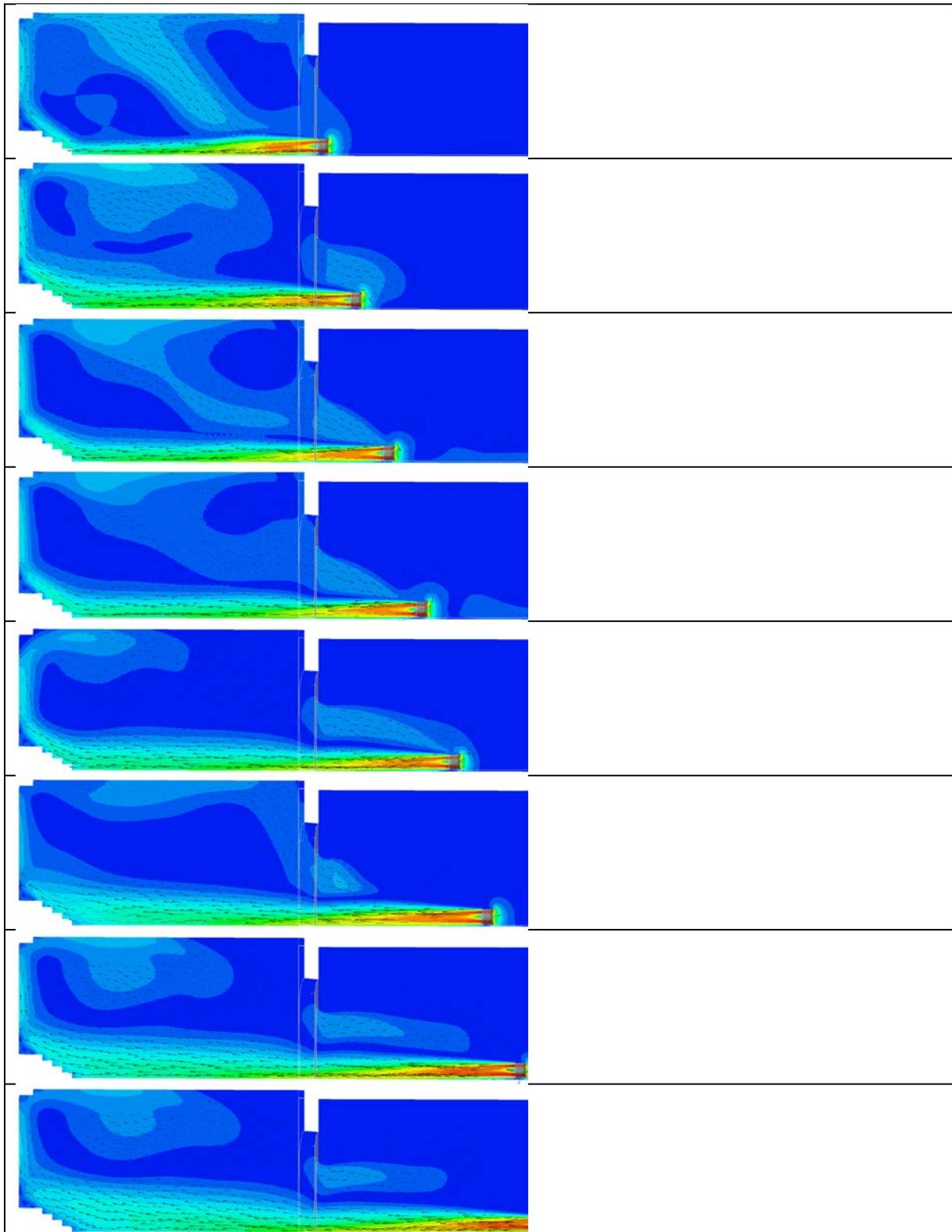


Abb. 77: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 7m (unterstes Bild). Anstellwinkel 0°. Fenster 1m² offen. An der Tür ist ein Ausströmen im oberen Bereich zu erkennen.

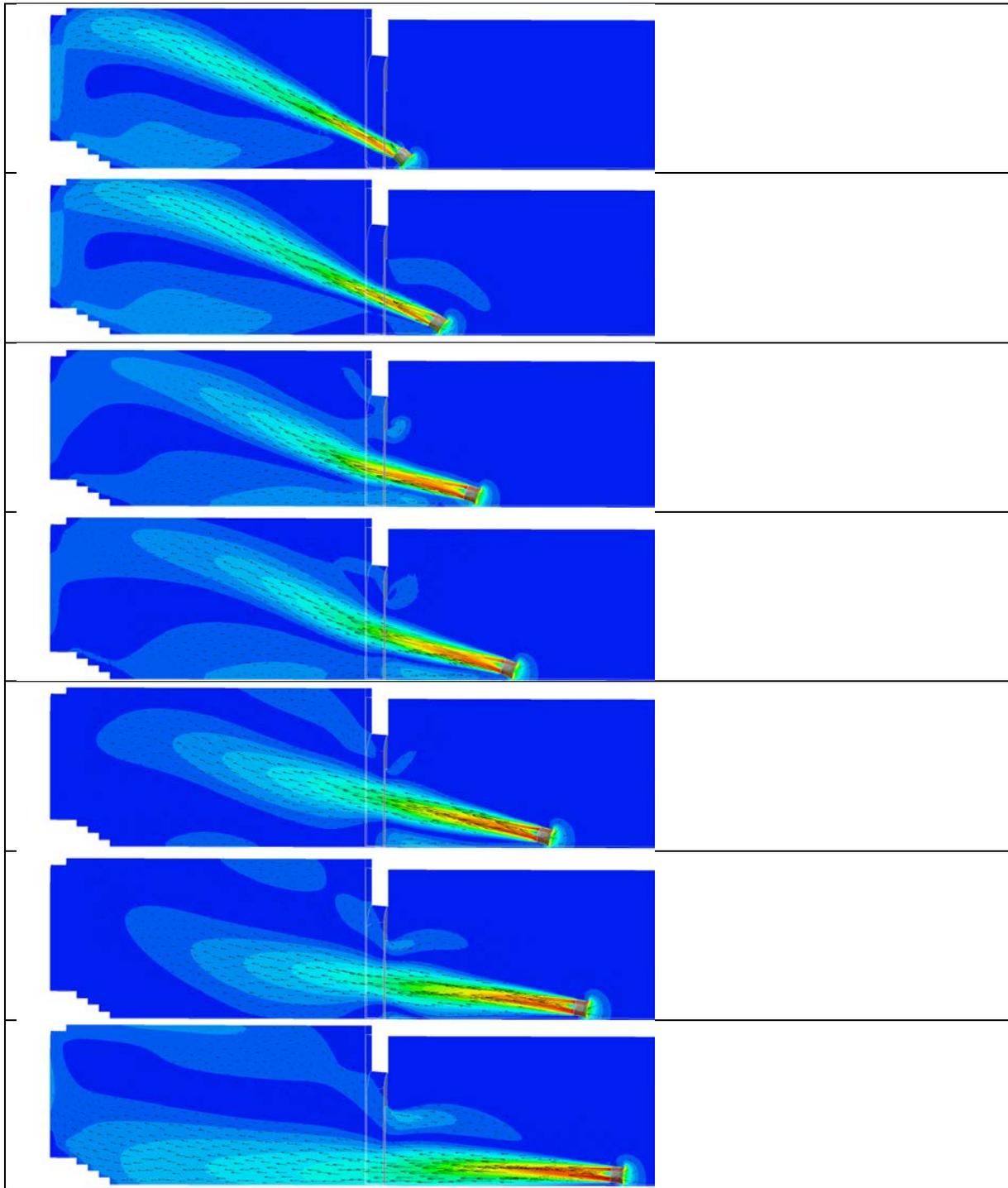


Abb. 78: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild). Der Lüfter ist zur Mitte der Tür ausgerichtet, Fenster 1m². An der Tür ist ein leichtes Ausströmen zu erkennen.

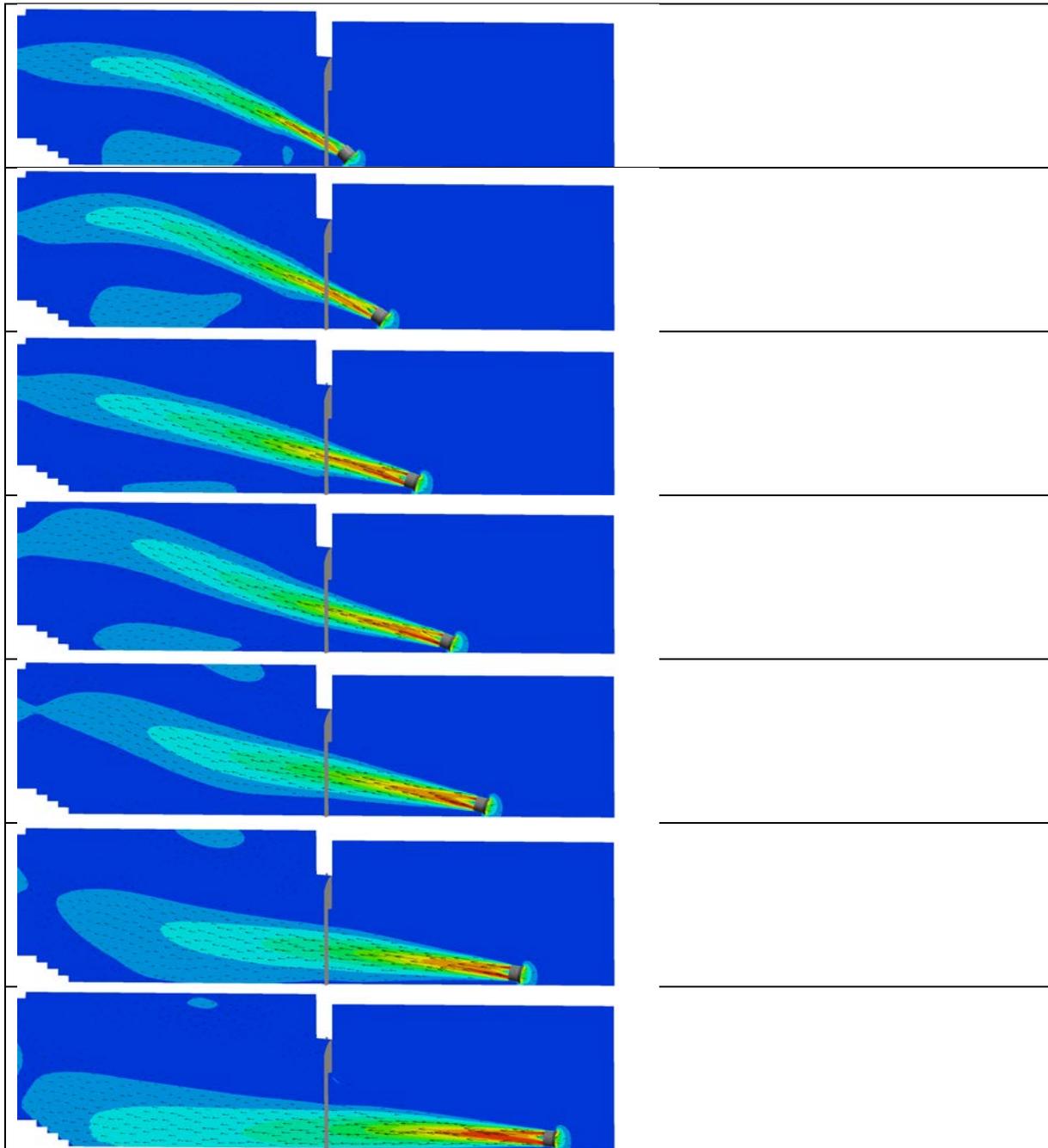


Abb. 79: Längsschnitte der Geschwindigkeitverteilung. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild). Der Lüfter ist zur Mitte der Tür ausgerichtet. Fenster $2,85\text{m}^2$. An der Tür ist ein kein Ausströmen mehr zu erkennen.

8.3.3 Obere Hälfte der Tür verschlossen

Entfernung 0-6m , Winkel 0Grad und halb verschlossene Tür							
Entfernung in m	0	1	2	3	4	5	6
Fenster geschlossen							
ΔP in Pa	7	23	30	34	34	35	35
1m ² Fensterfläche offen							
ΔP in Pa	4	5	9	11	13	13	12
Volumenstrom in m ³ s ⁻¹	1,0	2	2,5	3	3,3	3,4	3,3
2,85m ² Fensterfläche offen							
ΔP in Pa	1	2	2	3	3	4	4
Volumenstrom in m ³ s ⁻¹	1,1	2,5	3,5	4,1	4,5	4,8	5,0

Tab. 18: Erreichbare Differenzdrücke und Volumenströme bei Abständen zw. 0 und 6m. **Tür halb verschlossen**

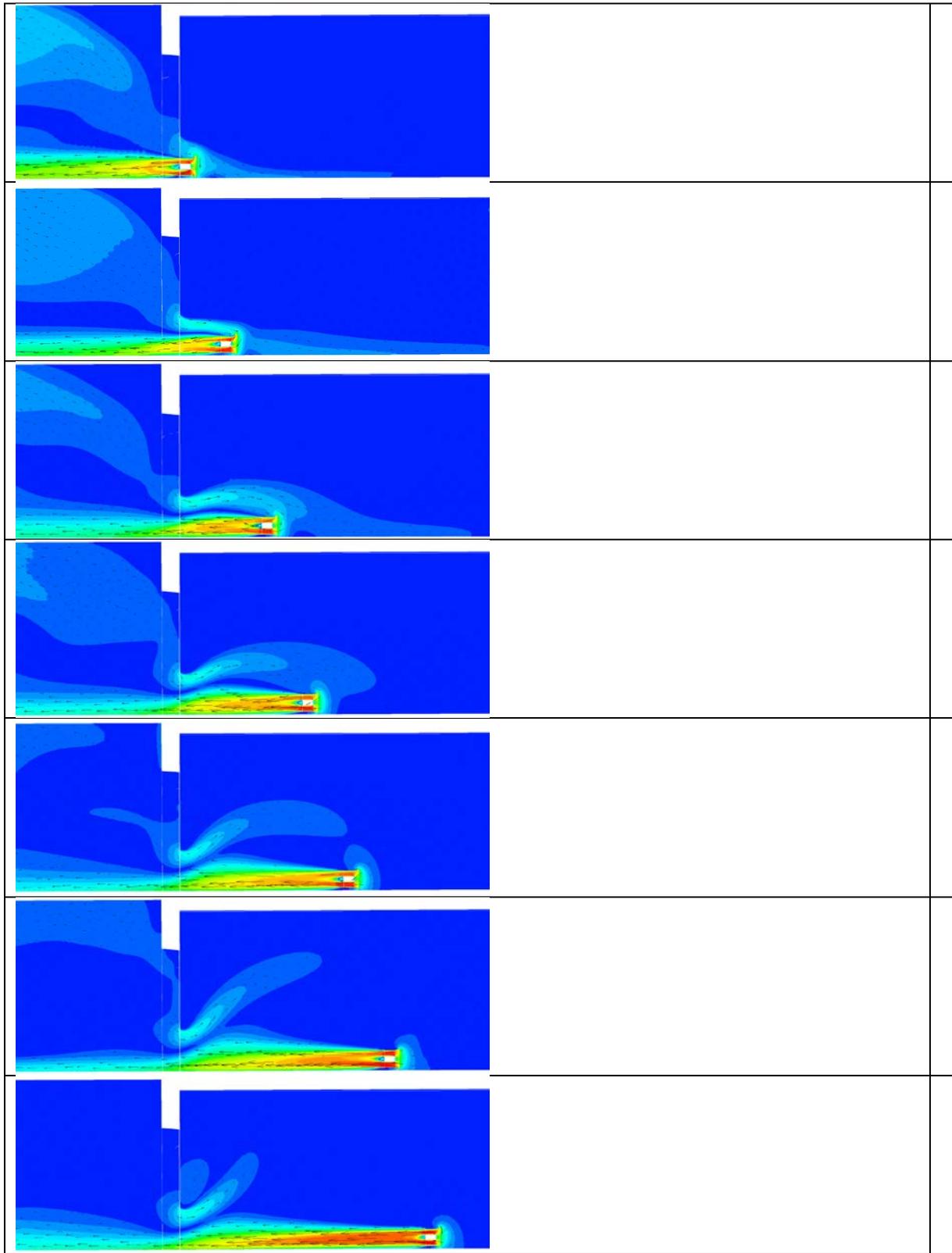


Abb. 80: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Fenster geschlossen, obere Hälfte der Tür verschlossen. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild).

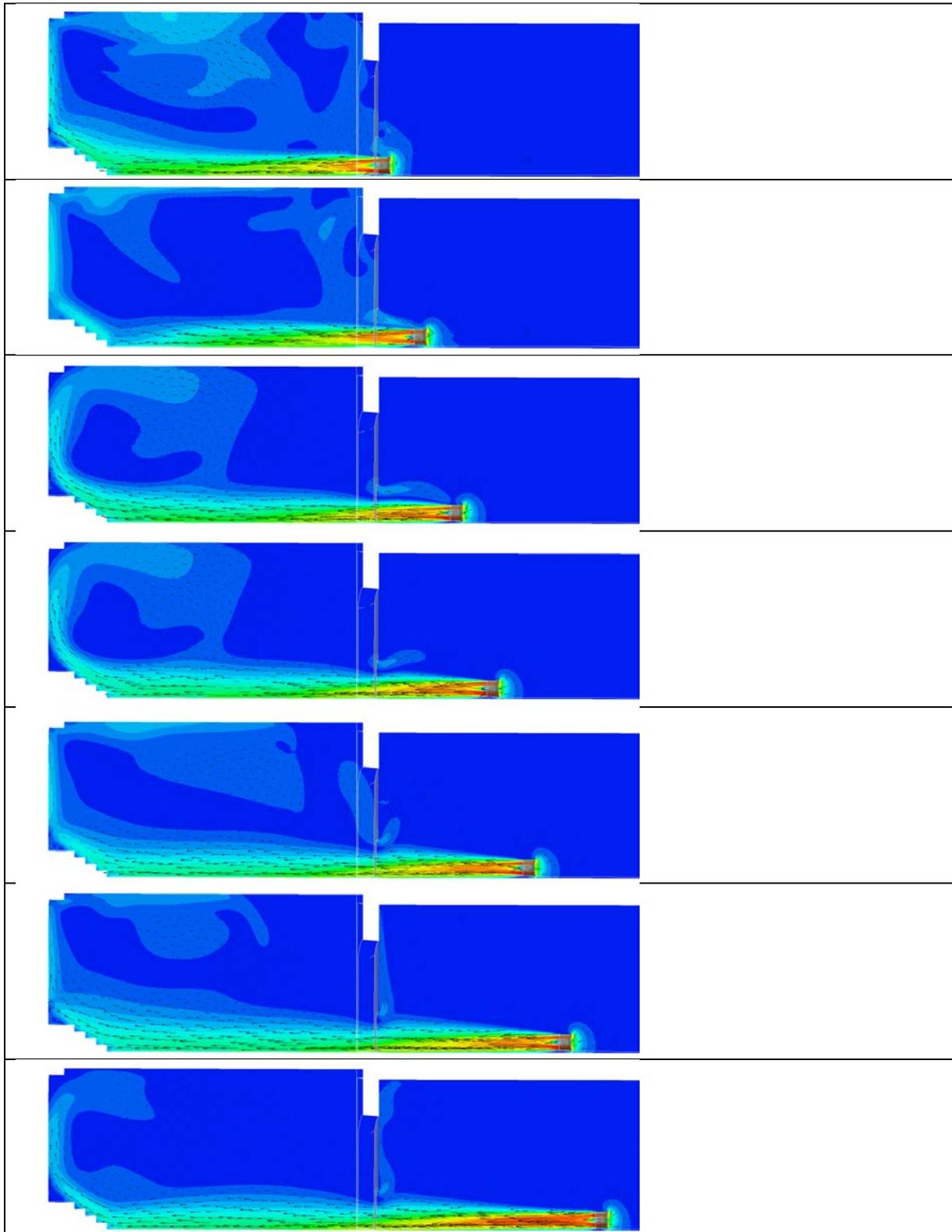


Abb. 81: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Obere Hälfte der Tür verschlossen. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild), Fenster 1m² offen.

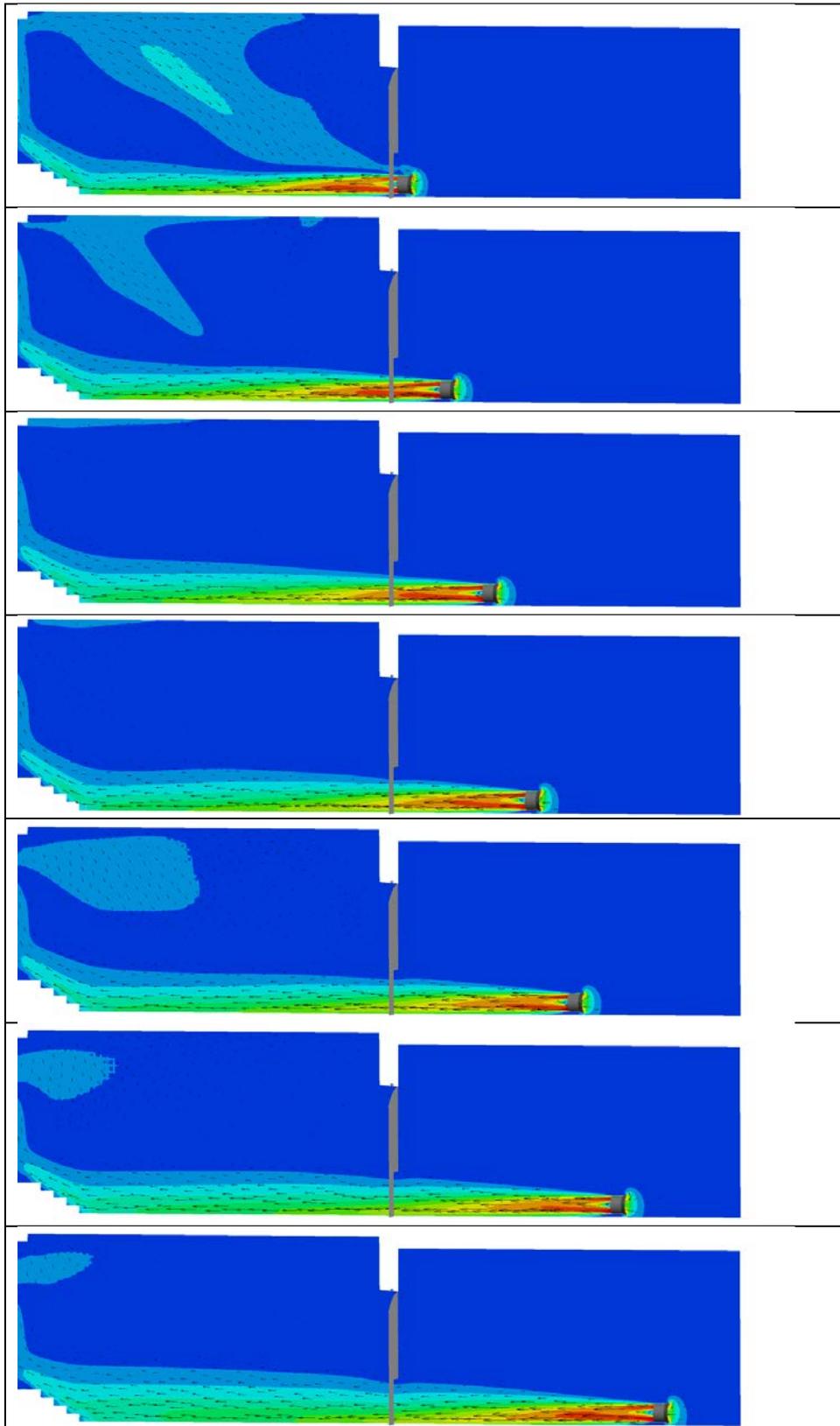


Abb. 82: Längsschnitte der Geschwindigkeitsverteilung. Obere Hälfte der Tür verschlossen. Abstand Lüfter - Tür von 0m (oberstes Bild) bis 6m (unterstes Bild) Fenster 2,85m² offen.

8.3.4 Tür halb verschlossen, Lüfterabstand 5m und geringe Anstellwinkeländerungen

Die folgenden Varianten wurden mit geringer Variation des Anstellwinkels berechnet. Bei einer Entfernung von 5m bewirkt eine Änderung des Anstellwinkels um 2° bereits einen signifikanten Druckanstieg. Es soll hier nochmals daraufhingewiesen werden, dass im Einsatz kein besonderes Augenmerk daraufgelegt werden sollte, da es praxisuntauglich ist, einen kaum sichtbaren Anstellwinkel per Augenmaß einzustellen, zumal bei der Aufstellung des Lüfters mit 0° bereits ein ausreichend hoher Druck aufgebaut wird.

Anstellwinkel Lüfter Winkel zw. 0 und 4 Grad, Entfernung 5m und obere Hälfte der Tür verschlossen (s. Abb. 82 auf der folgenden Seite)				
Winkel in °Grad	0	2	3	4
Fenster geschlossen				
ΔP in Pa	35	41	42	38
Volumenstrom in m ³ s-1	-	-	-	-
Fenster offen 1m2				
ΔP in Pa	13	15	16	17
Volumenstrom in m ³ s-1	3,4	3,8	4	4,2

Tab. 19: Drücke und Volumenströme bei unterschiedlichen Anstellwinkeln

Bei einem Winkel von 2 - 3 Grad ist der Druck mit 41 bzw. 42 Pa am höchsten. Der Volumenstrom bei geöffnetem Fenster ist bei 4 Grad am höchsten, weil der Lüfter dann genau in Richtung des offenen Fensters bläst.

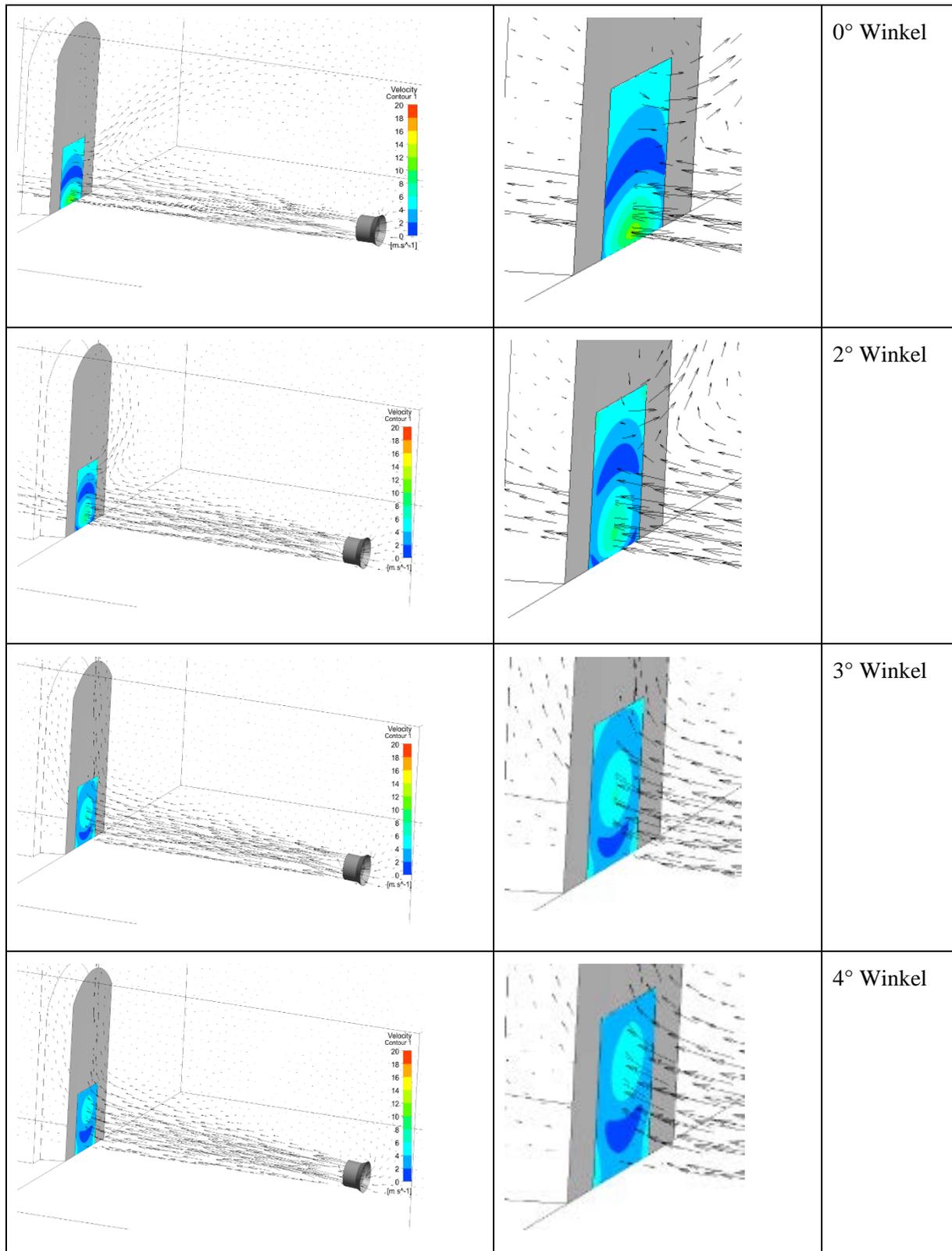


Abb. 83: Schnitte der Geschwindigkeitsverteilung in der Türebene. Die kreisrunde türkisfarbene Fläche ist der Bereich, in dem Luft einströmt. Die obere Hälfte der Tür ist verschlossen, so dass die Höhe ca. 1m und die Breite ca 1m beträgt. Der tiefblaue sichelförmige Bereich, in dem die Strömungsgeschwindigkeit sehr gering ist. Bei Anstellwinkeln von 0 und 2 Grad strömt oberhalb, bei 3 und 4 Grad unterhalb des sichelförmigen Bereichs die Luft aus.

8.3.5 Tür mit vorgesetzten Blenden mit Durchmesser 350mm und 700mm bei 5m und 3 Grad

Hier wird untersucht, wie weit der erreichbare Überdruck durch eine Blende vor der Tür erhöht werden kann. Da die Luft durch einen kreisförmigen Bereich einströmt, wird in der Simulation eine Blende vor der bereits halb verschlossenen Tür angebracht, so dass nur noch eine kreisförmige Öffnung mit 700 bzw. 350mm vorhanden ist.

Anm. der Verfasser: Es soll hier ebenfalls nochmals daraufhingewiesen werden, dass dies keine praxistaugliche Verbesserung ist und in der Berechnung vorausgesetzt wird, dass der Raum hinter der Blende luftdicht ist.

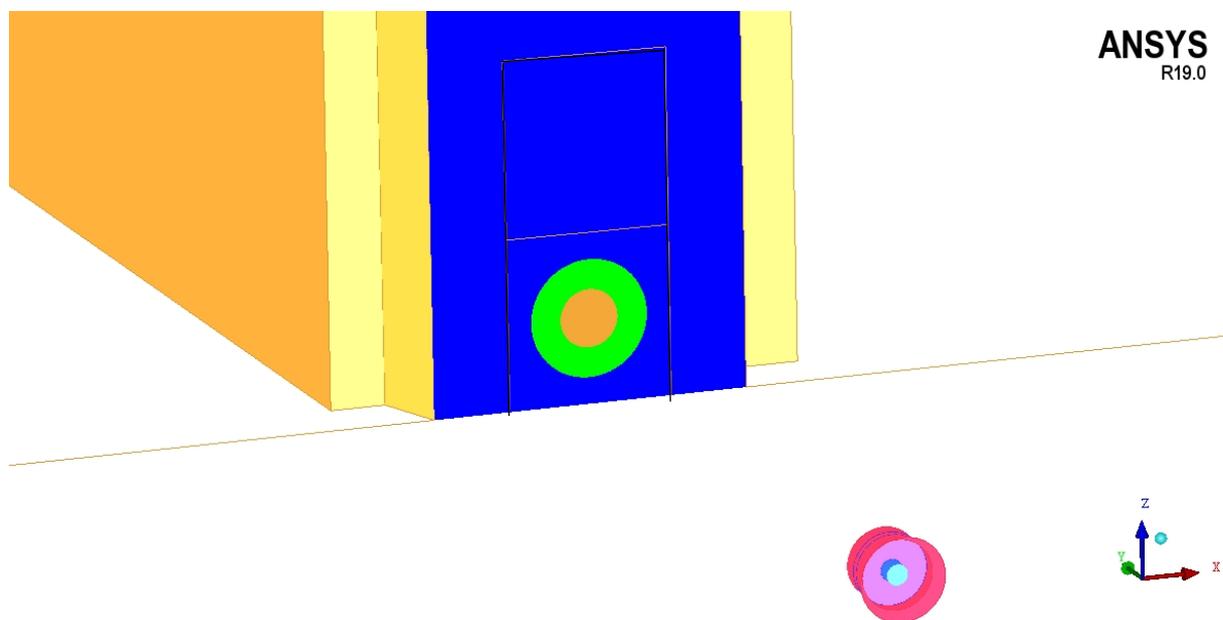


Abb. 84: Blende 350mm und 700mm bei 5m und 3 Grad

Öffnung in mm	BxH 990 x 1030	Kreis 700	Kreis 350
ΔP in Pa	42	67	69

Eine Blende mit 700mm Durchmesser statt einer Türöffnung von 1m x 1m erhöht den Überdruck von 42 auf 67Pa, eine weitere Verkleinerung der Blende auf 350mm bringt eine Erhöhung um weitere 2 Pa. In der Praxis würde jede Undichtigkeit zu einer geringeren Druckerhöhung führen.

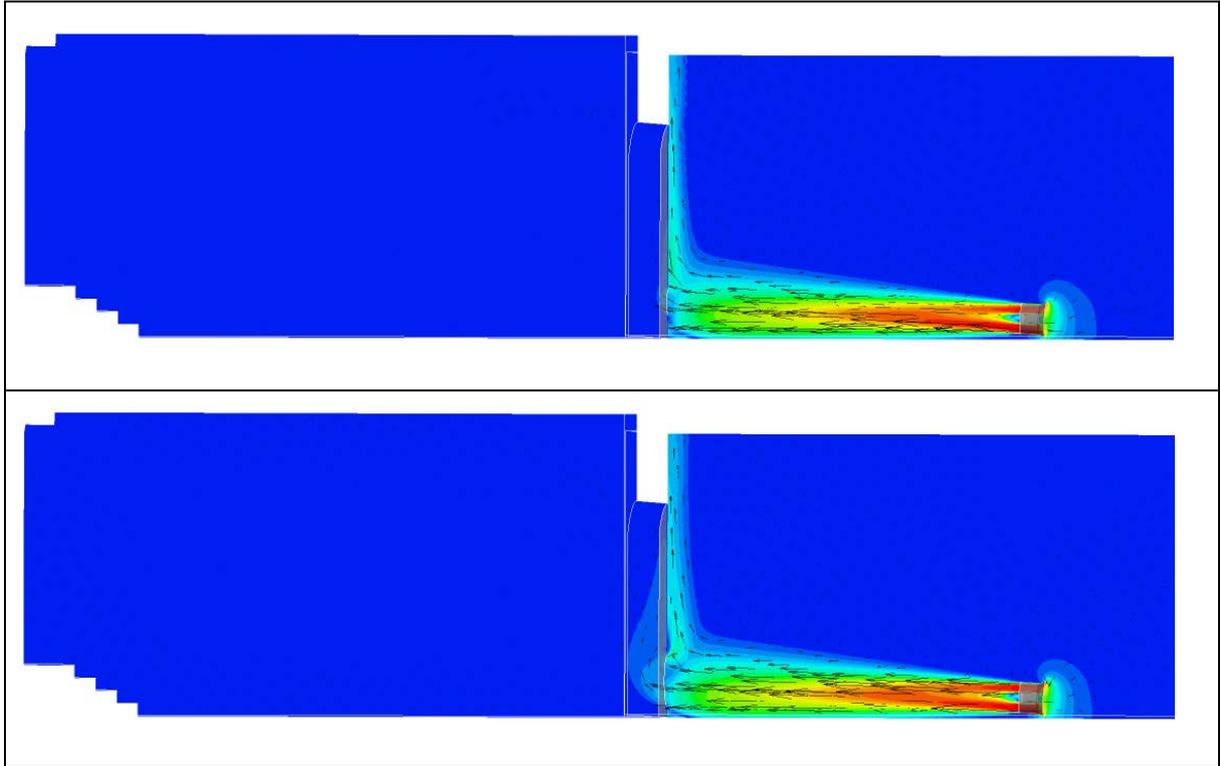


Abb. 85: Geschwindigkeitsverteilung Längsschnitt mit Blende 350mm oben und 700mm unten

8.4 Zusammenfassung der Simulationen

Sämtliche Ergebnisse der gezeigten Druck- und Volumenströme in diesem Kapitel sind mit einem simulierten Lüfter mit Freistrahл ermittelt. Dies ähnelt einem sogenannten Injektorlüfter mit gering aufgeweitetem Strahl. Die praktischen Versuche hingegen wurden mit einem Lüfter mit weit aufgefächertem Strahl, einem sogenannten Überdrucklüfter, durchgeführt. Daher sind die optimalen Abstände des Injektorlüfters in der Simulation durchweg höher als beim Überdrucklüfter.

8.4.1 Erreichbare Druckerhöhung unter praktikablen Bedingungen

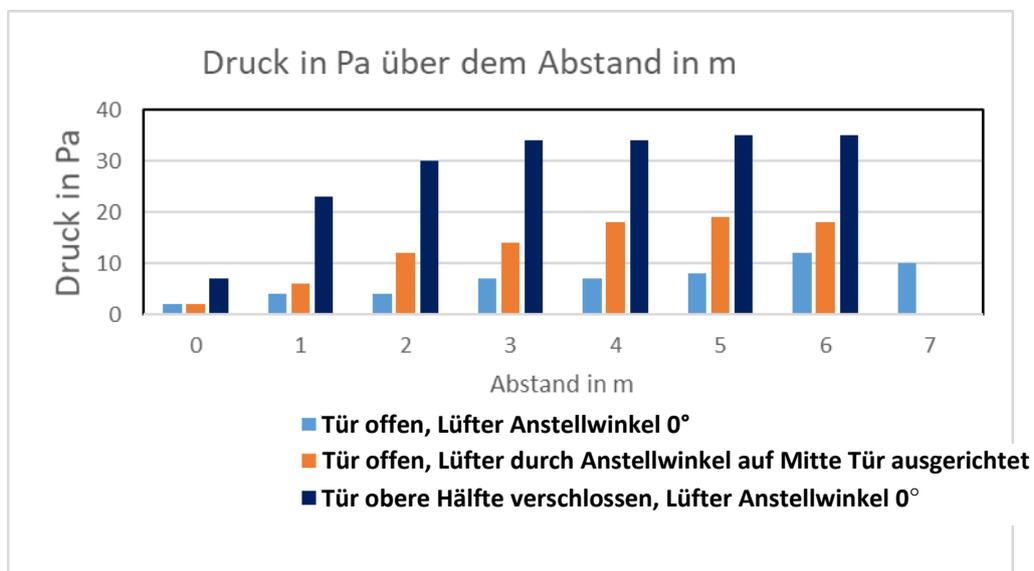


Abb. 86: Erreichbare Drücke in Abhängigkeit vom Abstand bei offener Tür und bei Tür mit verschlossener oberer Hälfte.

8.4.2 Erreichbare Druckerhöhung - unter Laborbedingungen

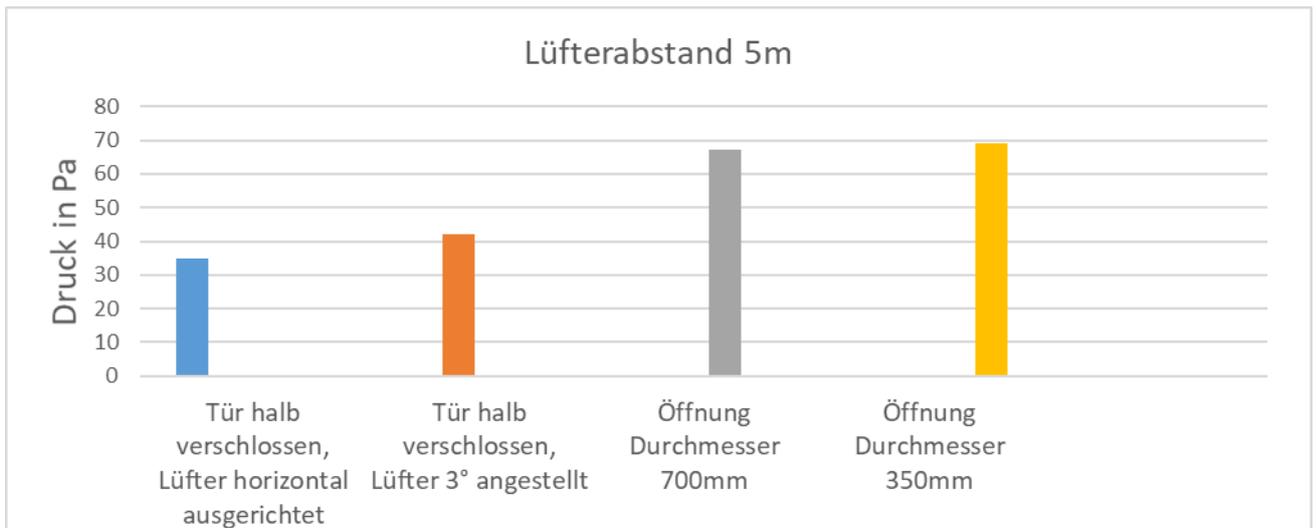


Abb. 87: Erreichbare Drücke in Abhängigkeit vom Öffnungsquerschnitt

8.4.3 Volumenstrom bei geöffnetem Fenster

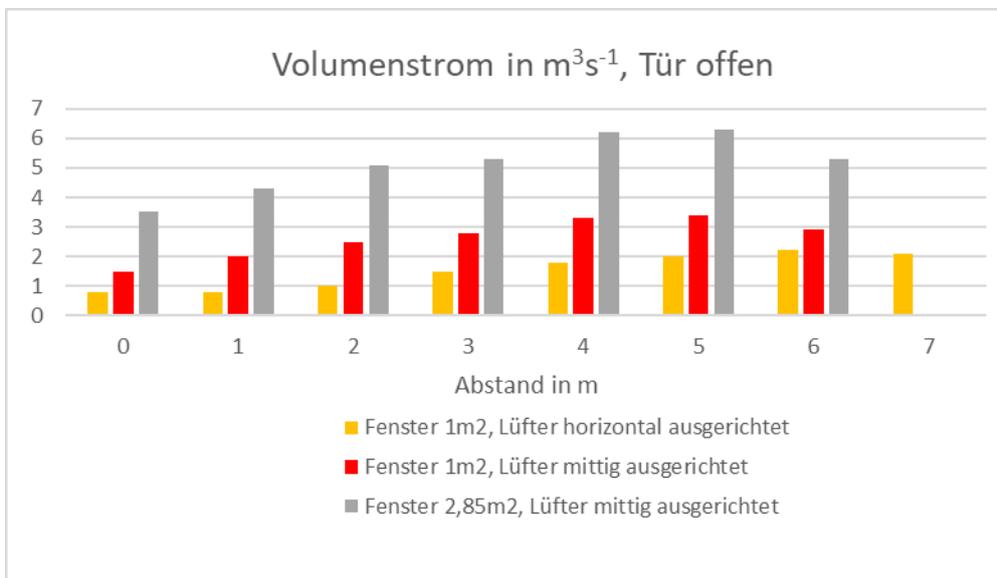


Abb. 88: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand bei offener Tür

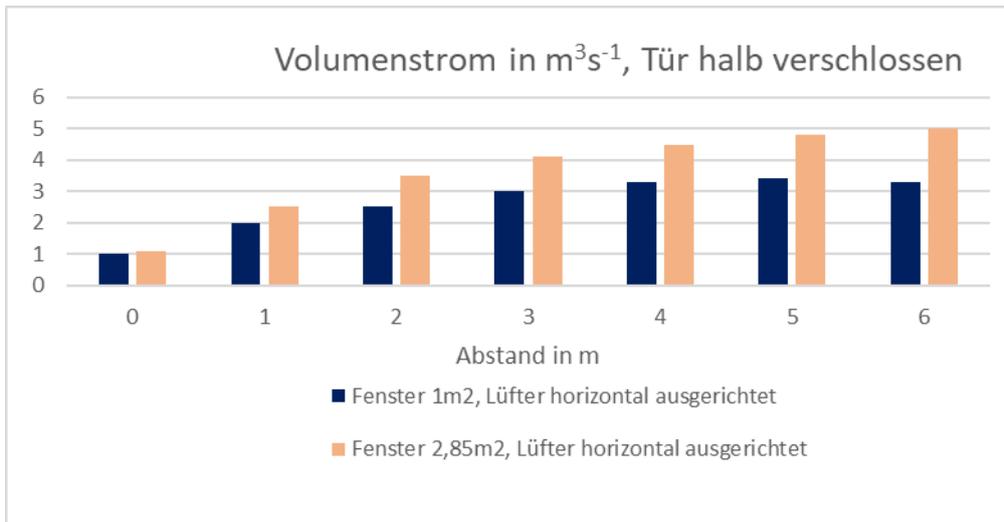


Abb. 89: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand bei halb verschlossener Tür

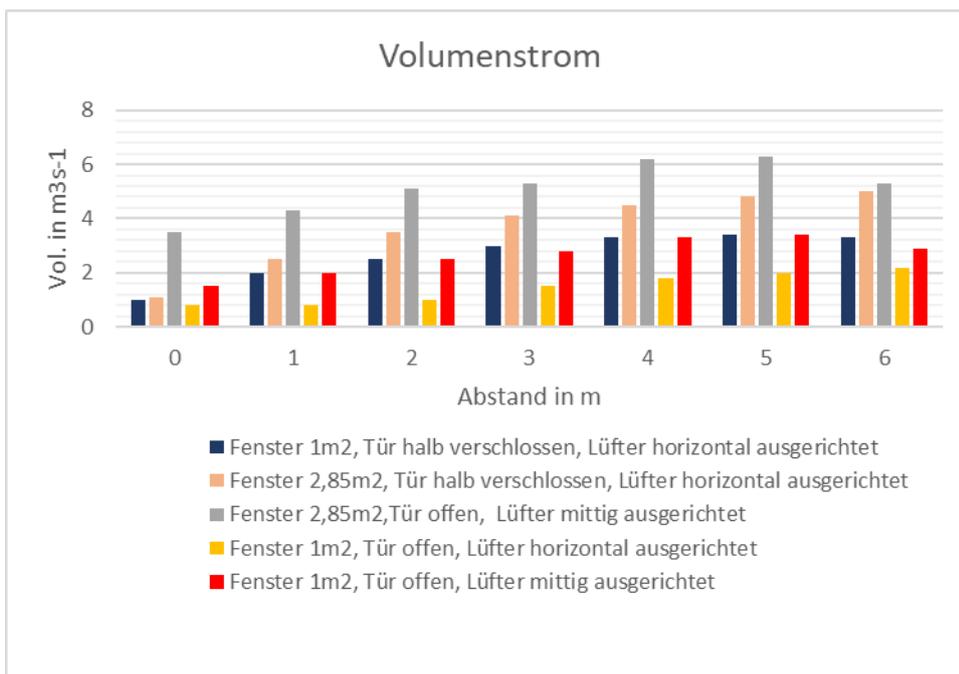


Abb. 90: Volumenströme in Abhängigkeit vom Abstand

9. Allgemeines

Grundlagen und Erklärungen zur Strömungs- und Gasdynamik sind in Lehrbüchern zu taktischer Ventilation und sehr ausführlich z.B. in Lehrbüchern der Strömungsmechanik zu finden.

Es werden daher hier nur wesentliche für den Anwendungsfall relevante Eigenschaften aufgezählt:

9.1 Ist der Überdruck bei der taktischen Ventilation für Personen gefährlich?

Bei den Messungen im experimentellen Teil betrug der Überdruck meist zwischen 20-80 Pa, bei Verwendung der Lutte 190Pa. Wäre diese nicht abgerissen, wäre der Druck sicherlich auf einige hundert Pa mehr angestiegen. Ein so hoher auch schnell einsetzender Überdruck ist völlig ungefährlich für Personen – er entspricht bei 500Pa einer Wassertiefe von 5cm oder einem Höhenunterschied in der Atmosphäre von etwa 40m.

Allerdings: Bei Drücken oberhalb 50Pa kann die Türöffnungskraft 100N überschreiten.

Anm. der Verf.: Bei den Versuchen im Treppenraum bestand die einzige Gefahr darin, dass die nur einfach verglasten denkmalgeschützten Fenster dem Druck bei angebrachter Lutte nicht hätten standhalten können.

9.2 In welcher Zeit stellt sich der Überdruck ein?

Im (dichten) Treppenraum eines Wohnblocks wird mit einem tragbaren Lüfter ein maximaler Überdruck von rund 50Pa erzeugt. Der Treppenraum ist 15m hoch und hat eine Fläche von 12m², somit beträgt das Volumen 180m³. Um einen Überdruck von 50Pa zu erzeugen, muss $50 \text{ Pa} / 101300 \text{ Pa} * 180 \text{ m}^3 = 0,09 \text{ m}^3 = 90 \text{ Liter}$ Luft eingeblasen werden. Bei einem typischen Volumenstrom von über 10.000m³/hr=3m³/s (zumindest solange kein Überdruck im Treppenraum aufgebaut ist) eines tragbaren Lüfters ist dies in wenigen Zehntelsekunden geschehen. Der Überdruck stellt sich also praktisch sofort ein! Genauso schnell ist er auch „wieder weg“, wenn eine Tür geöffnet wird.

9.3 Wieviel Luft strömt bei einer Druckdifferenz Δp durch eine Öffnung?

Der Druckverlust Δp beim Ausströmen ist proportional zum dynamischen Druck $p_{\text{dyn}} = \rho/2 v^2$ mit $\rho =$ Dichte des Gases und $v =$ Geschwindigkeit. Es gilt $\Delta p = \zeta p_{\text{dyn}}$ mit dem Druckverlustbeiwert $\zeta^1 = 1$ in für die folgenden Abschätzungen gut geeignete Näherung für Öffnungen wie Fenster oder Türspalte.

¹ $\zeta =$ Zeta. Stand heute, Dez. 2021, kennt der Leser insbesondere die griechischen Buchstaben Alpha, Delta und Omikron.

Bsp. 1: Im Raum herrscht ein Überdruck von 50Pa (=Nm⁻²), die Türspalte oben und unten haben eine offene Fläche von 2 x 0,8m x 5mm = 80cm² = 0,008m².

50Nm⁻² = 1,2 kgm⁻³ x (6,5ms⁻¹)². Die Luft strömt also mit rund 6,5ms⁻¹ aus, so dass 6,5ms⁻¹ x 0,008m² = 0,05m³s⁻¹ = 50Liter pro Sekunde ausströmen.

Bsp. 2: Im Raum herrscht ein Überdruck von 50Pa (=Nm⁻²), ein Fenster mit 0,8m² ist offen.

Es strömen 6,5ms⁻¹ x 0,8m² = 5,1m³s⁻¹ (=18.000m³/hr) aus. Ein tragbarer Lüfter bringt um die 20.000m³/hr – wenn kein Gegendruck anliegt. Daher kann in einem Raum mit geöffnetem Fenster mittels tragbaren Lüfters kein Differenzdruck in dieser Höhe erzeugt werden. Anders sieht es aus, wenn z. B. ein fahrzeuggetragener Großlüfter eingesetzt wird. Dieser erzeugt zwar auch nur maximal vielleicht 100Pa, eine Öffnung hat aber keinen nennenswerten Einfluss, da der Großlüfter leicht mehrere 100.000m³/hr nachschiebt.

9.4 Überdruck bei Brand in Wohnung

Brennt es in einer praktisch hermetisch dichten Wohnung (Passivhaus), steigt durch die Temperaturzunahme im Innern der Druck proportional zur Temperaturerhöhung. Unter Laborbedingungen könnte in einem abgedichteten Raum, der sich durch einen Brand von 20 auf 200° C aufheizt, der Druck um 0,6bar ansteigen. Das entspräche einer Kraft von 6,1Tonnen je Quadratmeter. Kein Fenster und keine Tür halten dies aus. Wenn es in einem Raum unter Realbedingungen brennt, wird es nach kurzer Zeit Öffnungen geben. Sei es, dass ein Fenster rausfliegt oder die Tür nachgibt .. Ein Entstehungsbrand in einem dichten Raum kann aber durch den dadurch bedingt langsamen Druckanstieg dazu führen, dass nach innen öffnende Türen kaum mehr zu öffnen sind.

In der Praxis wird es in der Regel so sein, dass die z.B. Türen nicht dicht sind und das expandierende Gas ausströmen kann.

Ist das Brandgeschehen soweit eingeschwungen, dass die Raumtemperatur nicht mehr zunimmt (diese kann dabei durchaus mehrere 100°C betragen) und bekommt der Brand Luft von unten durch einen Türspalt und strömt durch den oberen ab, herrscht eine Druckdifferenz von rund jeweils 10-20 Pa am unteren und am oberen Rand der Tür vor.

Unten an der Tür strömen bei 10 Pa Differenzdruck um die 10 Liter Frischluft pro Sekunde zu- genug, dass die Brandstärke um die 36kW beträgt (Faustformel: 1m³ Luft dem Brand zugeführt = 1kWh Wärmefreisetzung = 3,6MWs. → 0,01m³s⁻¹ = 0,036MW = 36kW) (Baulicher Brandschutz im Industriebau, 2003)

9.5 Kennlinie Ventilator

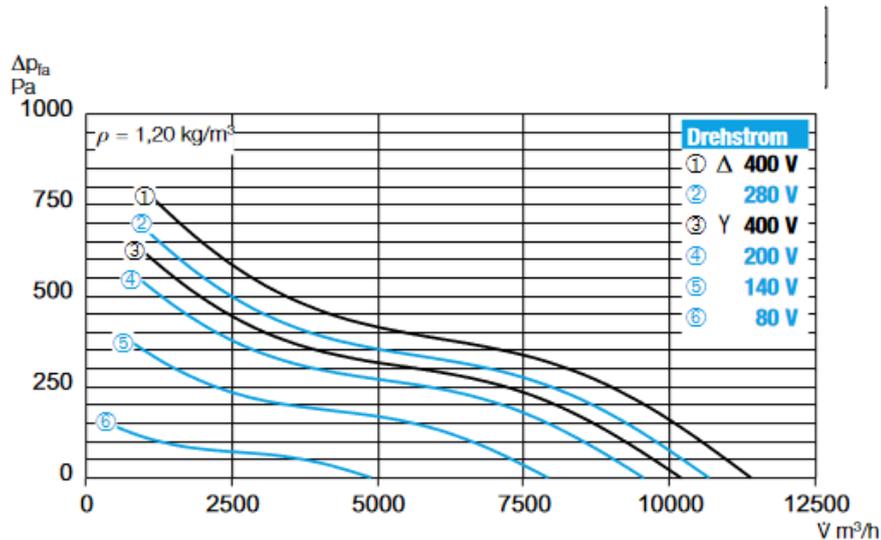


Abb. 91: Beispiel für Kennlinien eines 450mm Axialventilators in Abhängigkeit der Spannung bzw. Leistung. *Mit freundlicher Genehmigung der Helios Ventilatoren GmbH + Co KG*

Ein Ventilator wird für technische Zwecke so ausgelegt, dass er in einem geschlossenen System (z.B. einem Rohrleitungssystem mit bekanntem Druckverlust) einen bestimmten Volumenstrom generiert. In der Regel liegt der Betriebspunkt irgendwo in der Mitte, d.h. bei etwa der Hälfte des maximalen Volumenstroms und etwa der Hälfte des maximalen statischen Druckes.

Ein frei ausblasender Feuerwehlüfter arbeitet am äußersten rechten Betriebspunkt der Kennlinie mit maximalem Volumenstrom, bei der ein Freistrahls mit der höchsten Geschwindigkeit nach dem Lüfterrad (Axiallaufrad) ausströmt. Dieser maximale Volumenstrom unterscheidet sich von der Luftleistung im Freien, welche die Hersteller von Feuerwehlüftern angeben!

Bei einer Kennlinie wird der Volumenstrom ermittelt, der unmittelbar hinter dem Laufrad strömt. Er ist nicht null beim äußerst linken Betriebspunkt, weil zwischen Laufrad und Umhausung ein Spalt (i.d.R. einige Millimeter breit) vorhanden ist, durch den die geförderte Luft rückseitig ausströmt.

Die gemessene Luftleistung ist ein Wert, der sich aus dem Volumenstrom der Kennlinie plus angesaugter Luft in einer gewissen Entfernung vom Lüfter ergibt. Dass ein Freistrahls Luft ansaugt ist naturgemäß bzw. strömungstechnisch gegeben. Eine hohe Luftleistung korreliert nicht notwendigerweise mit der aerodynamischen Güte des Lüfters.

Bei den Versuchen mit der Lutte hätte bei perfekter Abdichtung der maximale statische Druck (auf der Kennlinie ganz links) erreicht werden können. Die Kennlinie des in den Versuchen eingesetzten Lüfters liegt den Verfassern nicht vor, sie dürfte aber der oben gezeigten eines 450er-Lüfters ähneln. Mit Sicherheit ist der maximal erreichbare statische Druck höher als 190 Pa, da Undichtigkeiten auftraten - bis hin zum Abriss der Lutte am Türrahmen.

9.6 Erreichbarer Überdruck in undichten Raum

Bsp. 3: In einem geschlossenen, dichten Raum soll Überdruck erzeugt werden. Hierbei ist nicht die Größe des Ventilators, sondern alleine die Strömungsgeschwindigkeit relevant. Angenommen, es wird ein Großlüfter mit 1000mm Laufraddurchmesser eingesetzt, dessen Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Laufrad 30ms^{-1} beträgt. Dann kann dieser z.B. in einem Abstand von einigen Metern vor der offenen Tür oder Fenster positioniert werden.

Ein kleiner Lüfter mit lediglich 100mm Durchmesser aber derselben Austrittsgeschwindigkeit bräuchte eine Blende vor der Öffnung mit einer Abmessung von ca. 100mm x 100mm. Der Überdruck im Innern des dichten Raumes wäre in beiden Fällen in etwa gleich hoch.

In der Praxis hängt es von Dichtigkeit ab. Ein Altbau vs. modernem Passivhaus dürfte einen erheblichen Unterschied machen.

9.7 Winddruck

Wind mit einer Stärke von 10ms^{-1} (36kmh^{-1}) kann einen Druck von 60Pa aufbauen, wenn er senkrecht auf eine Öffnung trifft. Damit kann der Winddruck höher sein als der erreichbare Überdruck mit einem Lüfter.

Bereits ab Windstärke 3 (schwacher Wind $12\text{-}19\text{kmh}^{-1}$) der Beaufortskala können bis zu 15Pa durch den Winddruck entstehen, so dass hier auf den Windeinfluss beim taktischen Belüften geachtet werden muss.

9.8 Zwei Ventilatoren gleichzeitig für Überdruckbelüftung

2 Lüfter in Reihe direkt hintereinander

Der von hinten angeblasene Lüfter dreht dann praktisch frei, d.h. er verrichtet keine Arbeit, weil Lüfter mit einer festen Drehzahl laufen. Der angeblasene Lüfter müsste höhere Drehzahlen haben.

Von diesem Vorgehen ist keine Steigerung der Wirkung zu erwarten.

2 Lüfterhintereinander, wobei der hintere Lüfter mit so hohem Anstellwinkel steht, dass er über den ersten drüberbläst.

Bei einer komplett offenen Tür mit typischerweise 2m Höhe und 1m Breite kann so ein höherer Druck erreicht werden. Der vordere Lüfter deckt die untere offene Hälfte ab, der hintere die obere Hälfte.

2 Ventilatoren neben- oder übereinander

Nebeneinanderstehende Lüfter, idealerweise beide zur Mitte der Öffnung hin ausgerichtet, können eine höhere Wirkung erreichen - allerdings sollte bei einer typischen Öffnung von 2m x 1m ein eher bescheidener Benefit erwartet werden. Bei einer breiteren Öffnung hingegen kann diese Anordnung hilfreich sein. Übereinanderstehende Lüfter können z.B. bei einer Öffnung mit H=2m, B=1m wirksam sein, Jeder Lüfter sollte dabei eine quadratische Hälfte der Öffnung anblasen.

9.9 Druckschwankungen in offenem / geschlossenem Raum

Bsp.: Ein PKW kann bei hoher Geschwindigkeit mit offenem Schiebedach oder offenem hinteren Fenster unangenehme Druckschwingungen im Innern erzeugen (sog. Schiebedachwummern). Es bilden sich im Bereich der Öffnung Wirbel, die ablösen und damit kurzzeitig einen Unterdruck erzeugen, der sogleich wieder ausgeglichen wird, bis sich der nächste Wirbel ablöst. Dasselbe spielt sich bei der Überdruckbelüftung eines geschlossenen (d.h. ohne Abluftöffnung) Raumvolumen ab. Sichtbar am Flattern eines Verschlusses (s.Abb. 31 und 32 Kap. 6.2.2)

Beim PKW kann das Schiebdachwummern verringert werden, wenn ein Fenster geöffnet wird. Dann ist das Raumvolumen (in diesem Fall der PKW Innenraum) nicht mehr geschlossen und Druckdifferenzen können sich nur noch in geringem Maß bilden. Ähnlich verhält es sich beim Belüften eines Raumes. Ist dieser geschlossen, gibt es starke Schwankungen und turbulente Ausströmung an der Öffnung. Wird z.B. ein Fenster geöffnet, strömt die Luft viel ruhiger und gleichmäßiger durch die Öffnung ein. Daran kann beim Belüften der Zustand (Abluftöffnung vorhanden ja/nein?) erkannt werden.

10. Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus Experiment und Simulation zeigen auf, dass ein möglichst hoher Differenzdruck und Volumenstrom bei Vorhandensein einer Abluftöffnung mit einem kleinen tragbaren Lüftern erzeugt werden kann, wenn einige wenige allgemeingültige Empfehlungen eingehalten werden.

Eine Einschränkung hinsichtlich der allgemeingültigen Empfehlungen besteht lediglich darin, dass bei den sogenannten Injektorlüftern mit vergleichsweise schmalen Strahl ein größerer Abstand zur Zuluftöffnung eingehalten werden muss als bei einem Lüfter mit breiterem Strahl.

- Eine annähernd quadratische Zuluftöffnung ist besser als eine Öffnung mit einem Seitenverhältnis Höhe zu Breite von typischerweise etwa 2:1, wie bei einer Tür.
- Der Lüfter sollte im Fall einer Zuluftöffnung mit nicht quadratischem Querschnitt mit einem Anstellwinkel so ausgerichtet sein, dass er mittig einströmt.
- Ist die obere Hälfte der Türöffnung verschlossen, wird der Lüfter einfach ebenerdig auf den Boden gestellt ohne Anstellwinkel.
Falls eine (Treppen-)Stufe vor der Öffnung sein sollte, ist empfohlen, den Lüfter schräg nach oben hin auszurichten, dass der Strahl über die Stufe hinweg ausgerichtet ist.
- Um in einem Raum (*unter Laborbedingungen*) einen hohen Volumenstrom zu erzeugen, sollten möglichst viele Öffnungen vorhanden sein. Die Abluftöffnung darf dabei so groß wie möglich sein. ***Im Einsatzfall ist zwingende Voraussetzung hierfür Windstille bzw. kein Windeinfluss!***
- Die Größe des Volumens hat erstmal keinen Einfluss auf den erreichbaren Überdruck, vorausgesetzt, dass es dicht ist-was in der Realität selten bis nie anzutreffen ist. Im realen Einsatz ist ein Altbau problematischer einzuschätzen als ein Neubau, da dort erwartungsgemäß mehr Spalte an den Türen und Fenstern anzutreffen sein werden, so dass Leckagen den erreichbaren Überdruck mindern.
- Der erreichbare Überdruck kann theoretisch erhöht werden, indem die Zuluftöffnung z.B durch eine Blende klein gehalten wird. Allerdings ist dies im realen Einsatz völlig impraktikabel und rechtfertigen den Mehraufwand nicht.
- Der höchste Überdruck kann theoretisch dadurch erreicht werden, indem der Lüfter mit der Zuluftöffnung dichtschießend verbunden ist (z.B. durch eine Lutte). Diese Lösung ist allerdings wenig praxistauglich.

- Welche Art von Lüfter eingesetzt wird, ist nicht entscheidend. Die Lüfter unterscheiden sich im Öffnungswinkel des Strahls. Der erreichbare Überdruck bzw Volumenstrom zur Entrauchung hängt in erster Linie von der Motorleistung ab.
- Die Anwender kommen nicht umher, sich mit dem Lüfter z.B. im Rahmen von Übungen vertraut zu machen. Insbesondere muss bekannt sein, ob der Lüfter eine geringe oder hohe Strahlaufweitung ausbildet. Je schmaler der Strahl, desto größer sollte der Abstand zur Zuluftöffnung gewählt werden.

Entscheidend ist, dass der Anwender vor Ort entscheidet und während des Einsatzes immer wieder überprüft, ob der Zweck des Belüftens erreicht wird und welche damit verbundenen unerwünschten Nebeneffekte auftreten.

Literaturverzeichnis

Baulicher Brandschutz im Industriebau, 2003. 3. Auflage Beuth Kommentare

Benedikt Mattern (2018): Belüften von Gebäuden im Brandeinsatz. In: *Brandwacht - Zeitschrift für Brand- und Katastrophenschutz* (4), S. 130–131.

Cimolino, Ulrich; Svensson, Stefan; Emrich, Christian (Hg.) (2012): Taktische Ventilation. Be- und Entlüftungssysteme im Einsatz. Heidelberg, Hamburg: Ecomed Sicherheit Verl.-Gruppe Hüthig Jehle Rehm (Einsatzpraxis).e

Containerbasis (o. J.): 8 Fuß Container. Hg. v. Elbtainer Trading GmbH. Online verfügbar unter <https://www.containerbasis.de/8-fuss-container/#>, zuletzt geprüft am 11.02.2021.

Drebinski, Mark (2014): Erkenntnisse zur Einsatzstellenbelüftung. Unterschiede bei Lüfertypen. In: *Brandschutz - Deutsche Feuerwehr-Zeitung* (9/2014), S. 661–665, zuletzt geprüft am 06.03.2020.

Fabian Müller (2016): Einsatztaktik für die Feuerwehr. Hinweise zur Ventilation bei Brandeinsätzen. Bruchsal. Online verfügbar unter https://www.lfs-bw.de/Fachthemen/Einsatztaktik-fuehrung/loescheinsatz/Documents/Hinweise_Ventilation.pdf, zuletzt geprüft am 11.12.2019.

Freiwillige Feuerwehr Tuttingen: Überdrucklüfter (2020), zuletzt aktualisiert am 03.03.2020, zuletzt geprüft am 03.03.2020.

Furness Controls Limited (2009): FCO12-14 Micromanometers. Useres Guide. 5a.

Hochleistungslüfter - BIG Fire & Ventilation (2020). Online verfügbar unter <http://big-fire.de/produkt/hochleistungsluefter/>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2020, zuletzt geprüft am 03.03.2020.

Lambert, Karel; Stiegel, Jens; Emrich, Christian (2016): Ventilation bei Brandeinsätzen. In: *Brandschutz - Deutsche Feuerwehr-Zeitung* (11/2016), S. 833–835, zuletzt geprüft am 06.03.2020.

LEADER GmbH (o.J.): Elektrolüfter. LEADER GmbH. Online verfügbar unter <https://www.leader-group.company/de>, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

LEADER GmbH (2019a): Lüfter mit Elektromotor BATfan 2. Hg. v. LEADER GmbH. Online verfügbar unter https://www.leader-group.company/sites/default/files/ic_import/product/files/FT_Batfan_2_NEO_ZCL_03.265.DE.9.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

LEADER GmbH (2019b): Lüfter mit Elektromotor ES230-ESP230-ESV230. Hg. v. LEADER GmbH. Online verfügbar unter <https://www.leader->

group.company/sites/default/files/ic_import/product/files/FT_ES230_ESP230_ESV230_ZCL03.265.D
E.9.pdf, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

Norm DIN 14530-1 bis 27, 01.11.2019: Löschfahrzeuge, zuletzt geprüft am 28.02.2020.

Mark Drebinski (2014): Erkenntnisse zur Einsatzstellenbelüftung. In: *BrandSchutz* 9/2014 (ISSN
0006-9094), S. 661–665.

Müller, F. (2011): Ventilation im Brandeinsatz, Masterarbeit 2011, FH Köln

Müller, Fabian (2016): Hinweise zur Ventilation bei Brandeinsätzen. Bruchsal, 01.09.2016. Online
verfügbar unter [https://www.lfs-bw.de/Fachthemen/Einsatztaktik-
fuehrung/loescheinsatz/Documents/Hinweise_Ventilation.pdf](https://www.lfs-bw.de/Fachthemen/Einsatztaktik-fuehrung/loescheinsatz/Documents/Hinweise_Ventilation.pdf), zuletzt geprüft am 28.02.2020.

Müller, F., Reick, M.(2011). Überdruckbelüftung im Treppenraum 12/11 Deutsche Feuerwehr-Zeitung
BrandSchutz

Müller, F., Reick, M.(2011). Versuche zur Belüftung von Brandräumen 2/12 Deutsche Feuerwehr-
Zeitung BrandSchutz

Panindre, P. et al: (2017). Positive Pressure Ventilation for fighting wind-driven high-rise fires:
Simulation-based analysis and optimization. *Fire Safety Journal* 87 (2017) 57–64

Pulm, Markus (2018): Falsche Taktik - Große Schäden. 8th ed. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

Norm DIN EN 12101-6: Rauch- und Wärmefreihaltung - Teil 6: Festlegungen für
Differenzdrucksysteme, Bausätze.

Reick, Michael (2007): Mobiler Rauchverschluss. Stuttgart: Kohlhammer

Reick, Michael (2015): Mobiler Rauchverschluss. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart:
Kohlhammer

Schmidt, Georg (2007): Überdruckbelüftung. 2 ed. Stuttgart: Kohlhammer (Die Roten Hefte :
Lehrschriften für den Feuerwehrmann, 203).

Schmidt, Georg (2014): Überdruckbelüftung. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart:
Verlag W. Kohlhammer (Rotes Heft/Ausbildung Kompakt, 203).

Thönißen, Wiebke (2019): Baukunde für die Einsatzpraxis. 1. Auflage (Übungen und Ausbildungen).

Trotec (ohne Datum): Bedienungsanleitung Staurohr-Anemometer, ohne Datum.

www.lueftertraining.de (2020): Kanalbelüftung. Hg. v. Marc Maier Consulting. Online verfügbar
unter <https://www.lueftertraining.de/en/presse-news.html>, zuletzt aktualisiert am 24.02.2020, zuletzt
geprüft am 24.02.2020.