

FH MÜNSTER
University of Applied Sciences

Effizienzuntersuchun- gen am Torluftschleier- system ProtecTor, der Fa. Kampmann

Gutachten auf der Basis von
messtechnischen Untersuchungen
und numerischen Berechnungen

Prof. Dr.-Ing. Bernd Boiting
Steinfurt, den 02.07.2018

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung -----	3
2. Torluftschleieranlagen -----	4
2.1 Grundlagen für eine korrekte Auslegung von Torluftschleieranlagen	4
2.2 Das ProtecTor System	6
3. Messtechnische Untersuchungen -----	7
3.1 Versuchsaufbau	7
3.2 Messwerte	7
4. CFD-Untersuchungen -----	9
4.1 Randbedingungen	9
4.2 Diskretisierung des Strömungsgebietes	9
4.3 Simulationsergebnisse	11
4.3.1 Ungeschütztes offenes Tor	11
4.3.2 Torluftschleiergerät mit einem Luftschleier (Single)	12
4.3.3 ProtecTor-System mit doppeltem Luftschleiersystem	13
5. Effizienzsteigerungen durch Einsatz des ProtecTor-Systems -----	14
6. Zusammenfassung -----	16

1. Zielsetzung

Ziel der hier beschriebenen durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen soll die Beurteilung des ProtecTor-Systems der Fa. Kampmann gegenüber konventionellen Torluftschleiergeräten sein. Basis der Beurteilung sind Messdaten aus früheren durchgeführten Untersuchungen im F&E-Center der Fa. Kampmann und zusätzlich durchgeführte CFD-Simulationsberechnungen.

In den Untersuchungen soll zunächst ermittelt werden, ob die untersuchten Systeme eine grundsätzliche Funktion zur thermischen Abschirmung besitzen. Dazu sollen auch die Grundlagen aufgezeigt werden, auf deren Basis eine korrekte Auslegung erfolgen soll. Da nur die Grundprinzipien aufgezeigt werden wird bereits einleitend auf die Vielzahl der theoretischen Arbeiten an der Fachhochschule Münster sowie auf die niederländische ISSO publicatie 110 Luchtgordijnen verwiesen, wenn der detaillierte Planungsprozess von Interesse ist.

Eine Effizienzbeurteilung soll nicht auf der Basis eines Vergleichs zwischen ungeschützter Toröffnung und geschützter erfolgen. Hierzu wurden bereits hinreichend Untersuchungen gemacht, die aufzeigen, dass Torluftschleiersysteme ein grundsätzlich geeignetes Mittel sind, wenn Toröffnungen auch bei ungünstigen Witterungsverhältnis ständig geöffnet sein müssen.

Vielmehr sollen Tor-, bzw. Türluftschleiersysteme vergleichend beurteilt werden. Hierbei wird der Fokus auf Single-Jet- (Standard) und Dual-Jet-Systeme gelegt. Ein Dual-Jet-System ist z. B. das hier untersuchte ProtecTor-System der Fa. Kampmann. Untersuchungsziel in diesem Gutachten ist die Bestimmung der Heizleistungen der Systeme, die nicht der Beheizung des Raumes zugeführt werden, sondern in die Umgebung als Verlust abgegeben werden.

2. Torluftschleieranlagen

2.1 Grundlagen für eine korrekte Auslegung von Torluftschleieranlagen

Torluftschleieranlagen werden eingesetzt, um Raumbereiche gegenüber der Außenumgebung abzuschotten, wenn diese über große Außenöffnungen permanent zugänglich gemacht werden sollen, oder im industriellen Bereich, wenn unterschiedlich temperierte Bereiche, trotz permanent geöffneter Verbindungstüren effizient getrennt werden sollen.

Da diese Systeme trotz der hohen Einsparpotentiale einen großen Energiebedarf haben, ist eine korrekte Planung und Funktionsweise die Voraussetzung für einen effizienten Betrieb. Dabei sind die Geräte im Hinblick auf ihre Austrittsgeschwindigkeiten, Volumenströme und Zulufttemperaturen optimal auszulegen.

Wissenschaftliche Untersuchungen haben gezeigt, dass weniger die Ausblasform eines Torluftschleiergeräts über die erreichbare Abschirmwirkung entscheidet, als die erreichbaren Ausblasgeschwindigkeiten.

Viele an der Fachhochschule Münster durchgeführte theoretische Untersuchungen bestätigen den Zusammenhang zwischen der Impulsänderung eines umgelenkten Luftschleiers und der Druckkraft auf eine Öffnung, durch Wind und Temperaturunterschiede:

$$\Delta p \cdot A_{Tor} = \rho \cdot A_{Schleier} \cdot c^2$$

Formel 1: Druckkraft auf ein geöffnetes Tor, sowie Gegenkraft des Luftschleiers

mit:

Δp : Gesamtdruck auf die Öffnung, aufgrund von Windlast und Temperaturgradient in Pa

A_{Tor} : Fläche der Toröffnung in m^2

$A_{Schleier}$: Fläche der Austrittsöffnung des Luftschleiers in m^2

ρ : Dichte der Luft im Luftschleier in kg/m^3

c : Austrittsgeschwindigkeit des Luftschleiers in m/s

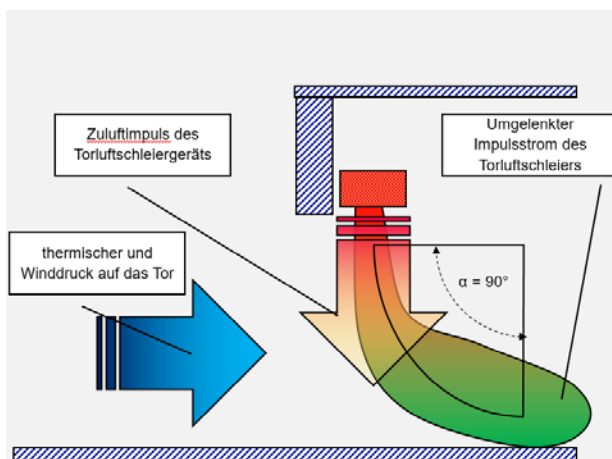


Abbildung 1: Abschottungskraft eines Luftschleiers, Aufgrund der Impulsänderung des Luftschleiers. Schematische Darstellung

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Zusammenhang bei der Umlenkung des Zuluftschleiers auf. Entspricht die Kraft, die für eine exakte Umlenkung des Luftschleiers auf der Kreisbahn mit dem Radius=Türöffnungshöhe benötigt wird, der Druckkraft auf die Öffnung, gilt diese als hinreichend abgeschottet.

Die Druckkraft auf die Tür-, bzw. Toröffnung setzt sich aus der Druckkraft des Windes auf die Öffnung und dem aus dem Temperaturunterschied resultierende Dichteunterschied zusammen.

Die Druckkraft aufgrund des Windes ergibt sich aus:

$$\Delta p_w = c_p \cdot \frac{\rho_w}{2} \cdot c_w^2$$

**Formel 2: Dynamischer Druck des Windes auf ein Tor,
unter Berücksichtigung der Anströmungsverhältnisse**

mit:

Δp_w : Druck auf die abzuschirmende Öffnung aufgrund des Windes in Pa

c_p : Koeffizient aufgrund der Anströmungsverhältnisse, dimensionslos

ρ_w : Dichte der Außenluft in kg/m³

c_w : Windgeschwindigkeit in m/s

Der Dichteunterschied zwischen dem abzuschirmenden Bereich und der äußeren Umgebung führt zu folgendem zusätzlichen Druck auf die Öffnung:

$$\Delta p_{thermisch} = g \cdot h_{Tor} \cdot \rho_A \cdot \left(1 - \frac{T_A}{T_i}\right)$$

**Formel 3: Druck auf den Querschnitt eines geöffneten Tores, aufgrund
der Temperaturunterschiede zwischen Außen- und Innenseite**

mit:

$\Delta p_{thermisch}$: Druck auf die abzuschirmende Öffnung aufgrund des Dichteunterschieds in Pa

g : Erdbeschleunigung: 9.81 m/s²

h_{Tor} : Höhe des geöffneten Tores in m

ρ_A : Dichte der Außenluft in kg/m³

T_i : Rauminnentemperatur in K

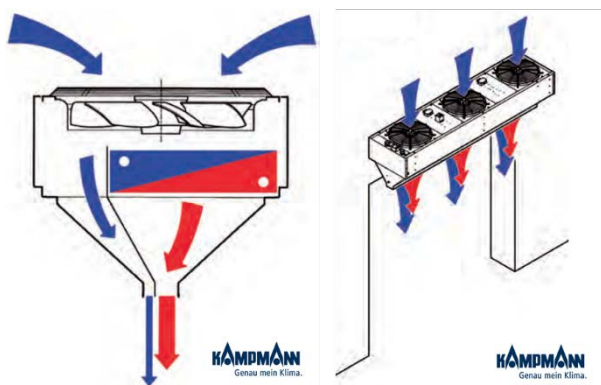
T_A : Außentemperatur in K

Im weiteren Verlauf dieses Gutachtens zur Effizienz des ProtecTor Systems wurde eine Druckkraft auf ein geöffnetes Tor nur aufgrund des Temperaturunterschiedes definiert. Einerseits ändert sich die Windrichtung und der Betrag dynamisch, andererseits sind die Einbausituationen so beliebig, dass kein typischer c_p -Wert angenommen werden kann. In diesem Gutachten wird die Raumlufttemperatur des abgeschirmten Bereiches auf 20°C (293.15 K) und die Umgebungstemperatur auf 0°C (273.15 K) gelegt.

2.2 Das ProtecTor System

Im Gegensatz zu herkömmlichen Torluftschleiersystemen erzeugt das ProtecTor-System zwei parallele, ebene Freistrahlen. Diese besitzen einen unterschiedlichen Impuls und eine unterschiedliche Temperatur.

Dabei ist der, der Außenumgebung zugewandte ebene Freistrahle deutlich kühler, da er nicht über den integrierten Wärmeübertrager geführt wird.



Idee dabei ist, neben einer effektiven Abschottung des geöffneten Tores, die Minimierung der thermischen Verluste an die Umgebung.

Der aufeinander abgestimmte Strömungsweg über den integrierten Wärmeübertrager und dem Weg an ihm vorbei, führt neben einer unterschiedlichen Temperierung dabei auch zu einer unterschiedlichen Austrittsgeschwindigkeit und Massenstromverteilung.

Abbildung 2: ProtecTor-System der Fa. Kampmann

3. Messtechnische Untersuchungen

3.1 Versuchsaufbau



Im F&E-Centrum der Fa. Kampmann wurde ein Seriengerät des Typs ProtecTor installiert und vermessen. Dabei stand nicht die thermische Abschirmwirkung im Fokus der Untersuchung, sondern die Ermittlung der Austrittsgeschwindigkeiten in den beiden Austrittsbereichen des Systems.

Es wurde manuell über den jeweiligen Austrittsflächen die mittlere Austrittsgeschwindigkeit ermittelt.

Das System kann in 5 Betriebsstufen betrieben werden. Hier wurden die Stufen 1, 3 und 5 vermessen.

Da für eine strömungstechnische Untersuchung mittels CFD eben diese Randbedingungen von Relevanz sind, wurden die so ermittelten Daten direkt als Boundary-Conditions in die Simulation übernommen.



Die nebenstehenden Bilder sind dem Untersuchungsbericht vom 18.02.2014, ProtecTor Typ: 402076 entnommen.

Abbildung 3: Versuchsaufbau im F&E-Centrum der Fa. Kampmann, sowie Darstellung der Austrittsebene, in der vermessen wurde.

3.2 Messwerte

Die Messwerte wurden von Hand mit einem Anemometer erfasst und gemittelt. Dabei muss bemerkt werden, dass die Austrittsgeschwindigkeiten sowohl einer zeitlichen, wie auch räumliche Schwankung unterliegen. Die im ProtecTor-System integrierten Gebläse prägen dem Luftstrom innerhalb des Gerätes eine spezifische Verteilung auf. Diese vergleichmäßig sich in Strömungsrichtung des Luftschleiers, besitzt aber zu Beginn eine ungleichmäßige Verteilung. Insofern sind die hier aufgeführten Messwerte als Orientierungsgrößen zu verstehen, die aber in den Größenordnungen der Planungsgrundlage für solche Systeme entsprechen.

Messpunkt	1	2	3	4	Mittel
<i>Stufe 1</i>					
Vorschleier	12,6	12,2	12,9	15,2	13,2
Warmluftschleier	3,7	3,9	3,8	3,7	3,8
<i>Stufe 3</i>					
Vorschleier	18,4	14,5	17,1	20,8	17,7
Warmluftschleier	5,5	6,4	6,1	6,1	6,0
<i>Stufe 5</i>					
Vorschleier	24,3	20,3	22,1	24,2	22,7
Warmluftschleier	6,5	8,1	7,6	7,7	7,5

Tabelle 1: Messwerte aus F&E-Bericht ProtecTor

Warm- und Kaltluftschleier wurden einzeln, aber im selben Betriebspunkt vermessen. Um der räumlichen Verteilung Rechnung zu tragen, wurde an verteilten Messpunkten gemessen. Die Messwerte wurden mittig im Kernbereich des Luftschleiers aufgenommen.

Das System mit einer Gesamtbreite von 4 m wurde in den Betriebsstufen 1, 3 und 5 vermessen.

4. CFD-Untersuchungen

4.1 Randbedingungen

Wie im Kapitel: 2.1 Grundlagen einer korrekten Auslegung von Torluftschleieranlagen ausgeführt, wird der Gesamtdruck in den Simulationsberechnungen auf das offene Tor, ausschließlich durch Temperaturdifferenzen und damit Dichteunterschiede gebildet. Entsprechend Formel 3 ergibt sich bei einem Temperaturunterschied von ca. 20 K und einer Torhöhe von ca. 4 m ein Druck auf das geöffnete Tor zwischen 3 und 4 Pa. Daraus lässt sich ein Volumenstrom zur Abschottung von ca. 20.000 m³/h ableiten, wenn das Tor 4 m hoch und 4 m breit ist. Da dies ungefähr den Randbedingungen der messtechnischen Untersuchungen des ProtecTor-Systems im F&E-Zentrum der Fa. Kampmann entspricht (Betriebsstufe 5), wurden diese Volumenstromvorgaben auch in der CFD-Berechnung umgesetzt.

Da speziell die zusätzlich Effizienzen bzw. Energieeinspareffekte durch den Impulsstarken und isotherm Vorschleier von Interesse sind, wurde der Volumenstrom einmal durch eine herkömmliche singuläre Öffnung (Versuchsreihe: Single) und durch eine entsprechend der konstruktiven Ausführung des ProtecTor-Systems gebildete duale Schlitzreihe eingebracht (Versuchsreihe: ProtecTor)

Die Zulufttemperaturen wurden entsprechend der Gesamtleistung ebenfalls angepasst: Single: 28,75°C, ProtecTor: 20°C bzw. 35°C.

4.2 Diskretisierung des Strömungsgebietes

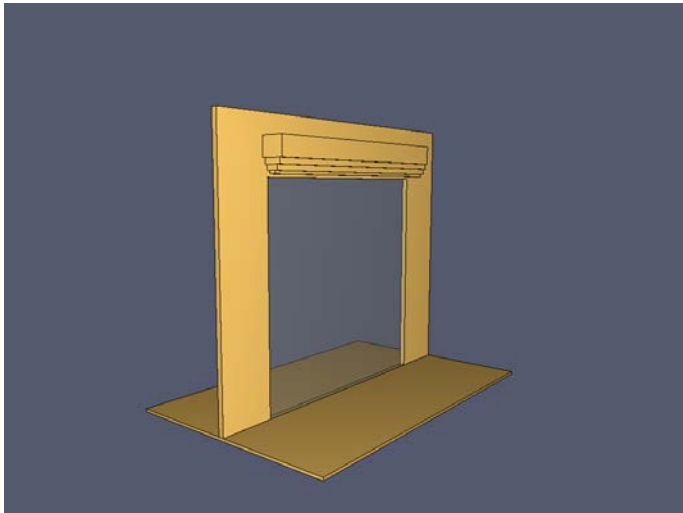


Abbildung 4 zeigt die Geometrie des Case-Files. Unmittelbar oberhalb einer 4 m breiten und 5 m hohen Toröffnung, ist ein ProtecTor-System installiert.

Auf der Außenseite befindet sich Umgebungsluft bei 0°C. Auf der Innenseite ist der Raum auf konstant 20°C beheizt.

Zum Zeitpunkt $t=0$ Sekunden wird das Tor geöffnet und der Torluftschleier in Betrieb genommen (Single, oder ProtecTor)

Abbildung 4: CFD-Case ProtecTor, Geometrie

Um die Strömungsvorgänge zu veranschaulichen wurde dynamisch instationär gerechnet. Um die dabei entstehenden hohen Berechnungszeiten zu reduzieren, wurde das Strömungsgebiet in unterschiedliche Berechnungsnetze diskretisiert. Abbildung 5 links zeigt die entsprechenden Meshes, um auf mehreren Prozessoren rechnen zu können (hier 5 Meshes, bzw. Netze). Die Realzeit wurde auf 20 Sekunden gesetzt. Wie den Ergebnissen der instationären Berechnungen zu entnehmen sind,

stellen sich aufgrund der hohen Austrittsgeschwindigkeiten in allen untersuchten Fällen, bereits nach 10 Sekunden stationäre Strömungsverhältnisse ein.

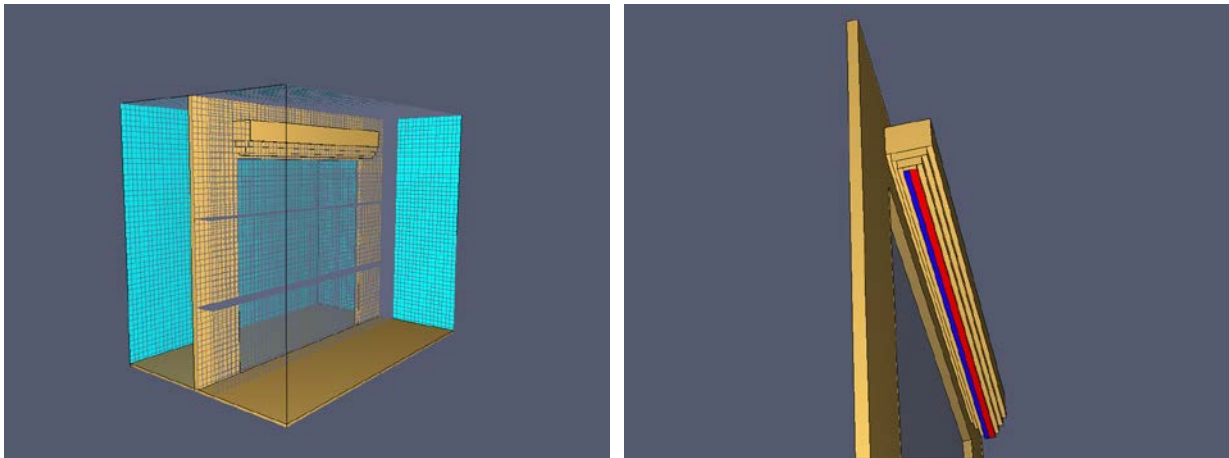


Abbildung 5: Diskretisierung des Strömungsgebietes (links), Aufteilung der Austrittsöffnungen (rechts)

Abbildung 5 rechts zeigt die Ausbildung der Austrittsöffnung des ProtecTor-Systems. Im Fall Single wurden beide Austrittsschlitze homogen und identisch belastet. Im Fall ProtecTor ist der nach außen gewandte Teil isotherm und mit hohen Geschwindigkeiten entsprechend der Untersuchungen aus dem Kampmann-Labor belastet. Der Innenliegende Schlitz entsprechend langsamer und mit höheren Temperaturen.

Die Berechnungszeiträume lagen je nach Case-File zwischen 4 und 8 Stunden.

4.3 Simulationsergebnisse

4.3.1 Ungeschütztes offenes Tor

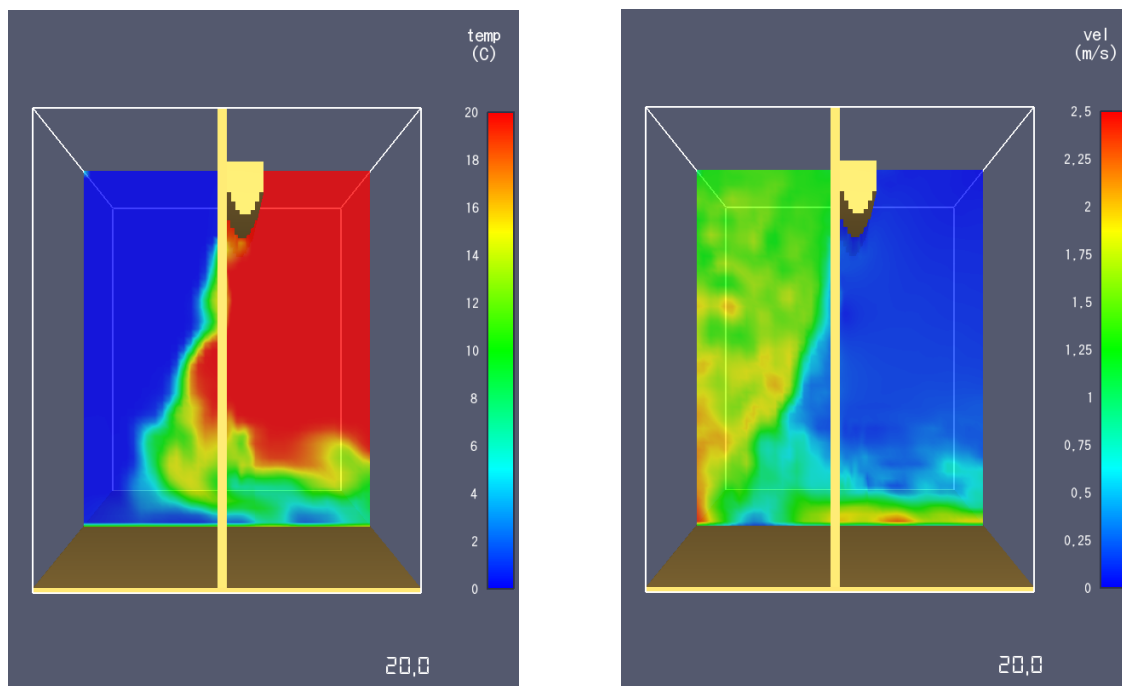


Abbildung 6: Temperaturfeld (links) und Geschwindigkeitsfeld (rechts) auf der Raumachse, bei fehlendem, bzw. ausgeschaltetem Torluftschleiergerät, nach 20 Sekunden.

Die Abbildung 6 zeigt Temperaturen (links) und Geschwindigkeiten (rechts) bei einem ungeschützten, geöffneten Tor. Da in der Simulation der rechts liegende Raum keine Begrenzung besitzt, kommt es zu keiner ausgeprägten Austritts- bzw. Rezirkulationsströmung im oberen Torbereich. Im Bodenbereich ist zu erkennen, dass die $\sim 0^{\circ}\text{C}$ kalte Außenluft mit bis zu 2.5 m/s in den Raum eindringt. Dadurch treten sehr hohe Wärmeverluste und Zugserscheinungen im Aufenthaltsbereich ein.

4.3.2 Torluftschleiergerät mit einem Luftschleier (Single)

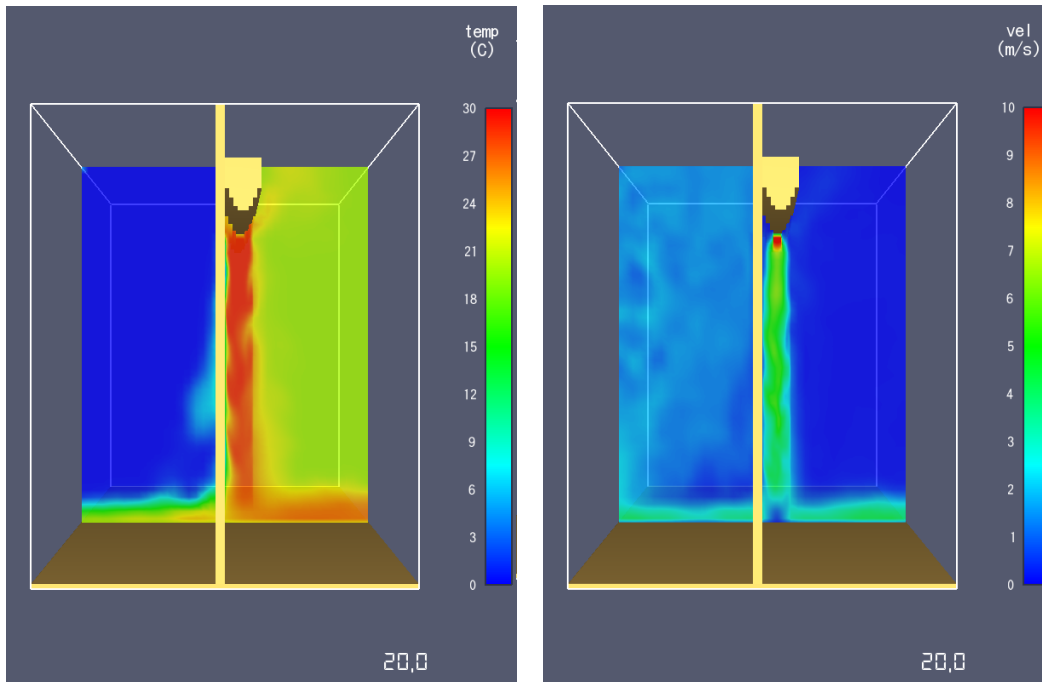


Abbildung 7: Temperaturfeld (links) und Geschwindigkeitsfeld (rechts) auf der Raumachse, bei eingeschaltetem Torluftschleiergerät, mit nur einem homogenen Schleier (Single), nach 20 Sekunden

Abbildung 7 zeigt das Strömungsfeld bei Einsatz eines üblichen Torluftschleiergeräts, mit nur einem Luftschleier-Strahl.

Wie zu erwarten, wird der Eingangsbereich komplett thermisch abgeschirmt und gegenüber dem Außenbereich abgegrenzt. Die Raumlufttemperaturen bleiben bei 20°C und im Bodenbereich tritt keine kalte Außenluft ein, sondern warme Luft aus dem Torluftschleier, die zu einer Erwärmung und damit zusätzlicher Abdeckung der Heizlast des Innenraums führt.

Die faktisch nicht auftretenden Windlasten, die in der Regel den Druck auf das Tor wesentlich erhöhen, lassen den Luftschlier senkrecht bis in den Bodenbereich strömen. Die Dichteunterschiede der Außen- zur Innenraumluft erreichen keine, bzw. eine nur sehr kleine Um- bzw. Ablenkung des Warmluftschleiers.

Im Bodenbereich außen vor dem Tor sind große Warmluftmengen zu erkennen, die mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Außenbereich abströmen. Dies sind offensichtliche Verluste, die dem Innenraum als Heizleistung verloren gehen.

4.3.3 ProtecTor-System mit doppeltem Luftschleiersystem

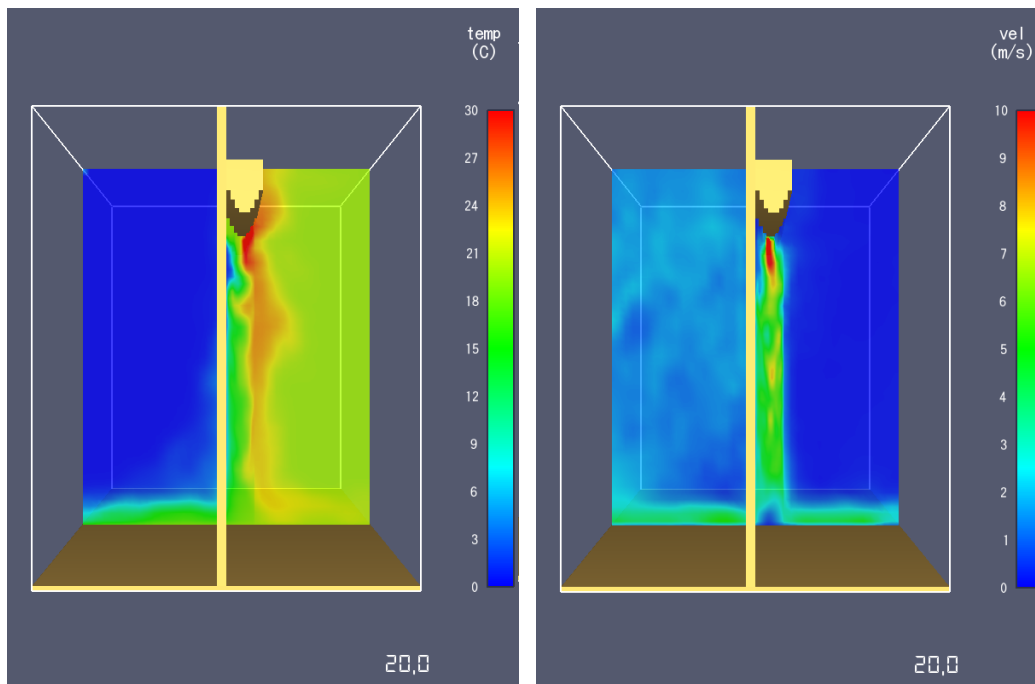


Abbildung 8: Temperaturfeld (links) und Geschwindigkeitsfeld (rechts) auf Raumachse, bei eingeschaltetem Torluftschleiergerät: ProtecTor

Abbildung 8 zeigt das sich einstellende Strömungsfeld bei Einsatz des ProtecTor-Systems. Ein isothermer Außenschleier ($v=23$ m/s) wird parallel zu einem innenliegenden Warmluftschleier ($v=7.5$ m/s) betrieben. Dabei stellt sich ein gegenüber der äußeren Umgebung, trotz Induktion des flankierenden Warmluftschleiers, kühlerer Außenschleier ein.

Zwei direkte positive Folgen dieses Verfahrens sind in den Strömungsdarstellungen zu erkennen. Erstens wird ein größerer Teil der dem Torluftschleiergerät zugeführten Wärmestroms dem Innenraum zur Beheizung zugeführt.

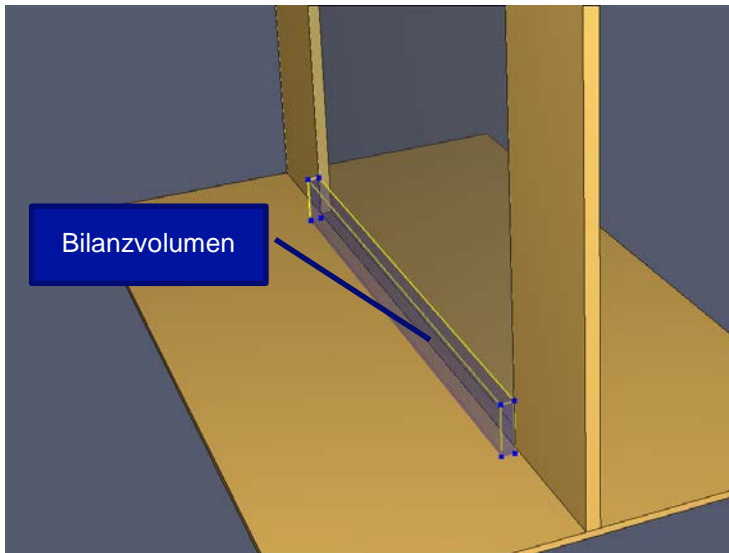
Zweitens gelangt nach der Umlenkung eines Teilvolumenstroms des Torluftschleiers ein deutlich geringerer Wärmestrom in den Außenbereich, als bei herkömmlichen Systemen. Das reduziert die Wärmeverluste an die Außenumgebung erheblich.

Ein weiterer, hier nicht weiter untersuchter Effekt des flankierenden langsameren Warmluftschleiers, dürfte der positive Einfluss auf die Geschwindigkeitsabnahme des deutlich schnelleren Außenschleiers sein. Der Außenschleier verteilt seinen Impuls offensichtlich langsamer auf induzierte Luftmassen und erreicht somit über einen längeren Strömungsweg höhere mittlere Strömungsgeschwindigkeiten.

5. Effizienzsteigerungen durch Einsatz des ProtecTor-Systems

Offensichtlich wird bei Tor- und Türluftschleiergeräten der im Bodenbereich umgelenkte Massenstrom sowohl in Teilen in den Innenraumbereich umgelenkt, als auch in den Außenbereich.

Während der dem Innenraumbereich zugeführte Massenstrom aufgrund der Vorwärmung im Tor bzw. Türluftschleier zur Unterstützung der Beheizung führt, geht der dem Außenbereich zuströmende Massen- und damit Wärmestrom verloren.



In vielen Fällen ersetzt das Tor- und Türluftschleiergerät die Beheizung des Raumes, wenn dieser aufgrund seiner Abmessungen und Nutzung überschaubare Größenordnungen besitzt. Geht nun ein erheblicher Anteil der dem Torluftschleiergerät zugeführten Wärme nach außen verloren, fehlt dieser Anteil bei der Beheizung.

Zur Analyse dieses Verlustes wurde in das Strömungsfeld ein Bilanzvolumen eingeführt.

Abbildung 9: Bilanzgebiet zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeiten und Temperaturen, die zu Verlustleistungen führen.

Wenn in diesem Bilanzgebiet über den gesamten instationären Berechnungsverlauf kontinuierlich die Berechnungsergebnisse zwischengespeichert und über alle Volumenzellen des Bilanzgebietes gemittelt werden, ergibt sich folgendes Ergebnis:

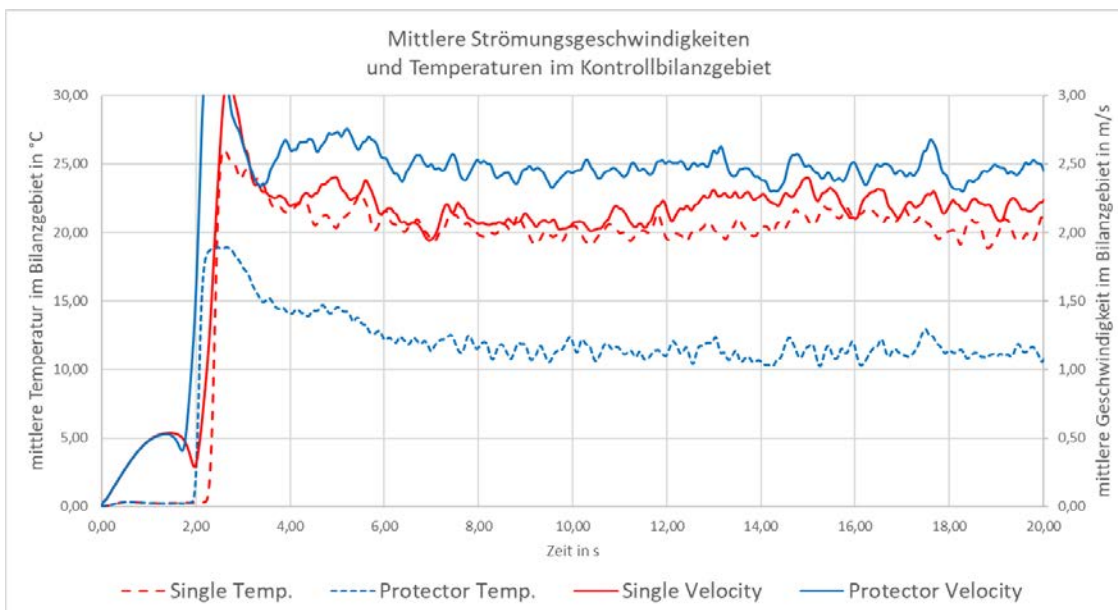


Diagramm 1: Darstellung der gemittelten Messwerte im Bilanzgebiet, über die gesamte Berechnungszeit.

Das Kontrollvolumen hat eine in Richtung der Strömung wirksame Öffnungsfläche von 1.6 m².

Werden die aus der Simulation mittleren Werte angesetzt, können Verlustleistungen der unterschiedlichen Torluftschleiersysteme bestimmt und ins Verhältnis gesetzt werden. Als Bezugstemperatur wurde die Außentemperatur angesetzt.

Allgemein gilt somit für die Verlustleistung, bezogen auf die Außentemperatur:

$$\dot{Q} = A \cdot c_{Schleier} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (\bar{T} - T_a)$$

Formel 4: Theoretische Verlustleistung durch nach außen abströmende Warmluft

Mit:

\dot{Q} : Verlustwärmestrom in kW

A: Fläche, die von der austretenden Warmluft nach außen durchströmt wird in m².

$c_{Schleier}$: mittlere Strömungsgeschwindigkeit der nach außen abströmenden Luft im Kontrollvolumen in m/s

ρ : Dichte der nach außen abströmenden Warmluft in kg/m³

c_p : spezifische Wärmekapazität der nach außen abströmenden Luft in kJ/kgK

ρ : Dichte der nach außen abströmenden Warmluft in kg/m³

\bar{T} : mittlere Lufttemperatur im Kontrollvolumen in K

T_a : Außenlufttemperatur in K

Bildet man zur Ermittlung des Einspareffektes: $1 - \frac{\dot{Q}_{Protector}}{\dot{Q}_{Single}}$, ergibt sich eine Einsparung durch den Einsatz des ProtecTor-Systems gegenüber einem Single-Jet-System von ca. 40%.

6. Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung war die Effizienzbeurteilung eines Dual-Jet-Systems (ProtecTor, Fa Kampmann) im Vergleich zu Single-Jet-Systemen (Standard Tor- und Türluftschleiergeräte) unter gegebenen Randbedingungen.

Die Beurteilung erfolgte auf der Basis von Messuntersuchungen an einem ProtecTor-System und verschiedenen CFD-Simulationsberechnungen. Die CFD Simulationsberechnungen wurden mit Randbedingungen aus den messtechnischen Untersuchungen parametrisiert.

Eine nur schlecht zu spezifizierende Windlast wurde vernachlässigt. Dafür wurde eine für den thermischen Druck auf die Öffnung relevante Temperaturdifferenz, zwischen Außen und Innen, von 20 K gewählt.

Korrekt ausgelegte Luftschleiersysteme zeigen für den hier erprobten Fall: 4m x 4m Toröffnung, eine gute Funktionsweise. Allerdings zeigen alle Systeme bei Erreichen des Bodens eine Aufteilung in zwei Luft- bzw. Massenströme. Dabei ist der nach außen abströmende warme Luftmassenstrom als Verlust zu bewerten.

In den Simulationsberechnungen konnte dieser Luftmassenstrom für Single- und Dual-Jet-Systeme bilanziert werden. Wenn wie im Fall des ProtecTor-Systems der Fa. Kampmann der nach außenliegende Luftstrahl isotherm zur Raumluft ist und deutlich schneller als der parallel nach innen ausgebildete Luftschleier ist, konnte eine Verlustreduzierung von 40% gegenüber herkömmlichen Single-Jet-Systemen aufgezeigt werden.

Es ist zu berücksichtigen, dass tatsächliche Einspar- und Effizienzeffekte von den Betriebs- und thermischen Randbedingungen beeinflusst werden.

Steinfurt, den 02.07.2018



Prof. Dr.-Ing. Bernd Boiting