



Fachhochschule Rosenheim
University of Applied Sciences



HOLZBAU DER ZUKUNFT

TP 18 Anwendung des vertikalen Schiebemechanismus



Dipl.-Ing. Ph. Donath
Dipl.-Ing. C. M. Bickel
Dipl.-Ing. D. Hilliges
Institut für
Entwerfen und Bautechnik
Fachgebiet Holzbau
Prof. Dipl.-Ing. H. Kaufmann
TU München

TEILPROJEKT 18

**Anwendung des vertikalen
Schiebemechanismus**



Dipl.-Ing. Ph. Donath
Dipl.-Ing. C. M. Bickel
Dipl.-Ing. D. Hilliges
Institut für
Entwerfen und Bautechnik
Fachgebiet Holzbau
Prof. Dipl.-Ing. H. Kaufmann
TU München

Inhalt	Zusammenfassung	1
	Summary	10
	1. Ziel und Verlauf des Projekts	15
	2. Bedarfsanalyse und Definition der Leistungsmerkmale	19
	2.1 Potentialabschätzung vertikaler Schiebekonfigurationen	19
	2.2 Marktrecherche und Analyse historischer Beispiele	22
	2.3 Definition der Leistungsmerkmale	23
	3. Lüftungseigenschaften Kipp- u. Vertikalschiebeelement im Vergleich	25
	3.1 Lüftungssimulationen	25
	3.1.1 Zonale thermische Simulation	26
	3.1.2 Ergebnis	34
	3.1.3 CFD Simulation (englisch: computational fluid dynamics)	35
	3.2 Experimentelle Messungen	45
	3.2.1 Versuchsaufbau	45
	4. Technische Durcharbeitung	51
	4.1 Gewichtsausgleich	52
	4.1.1 Gegenseitiger Gewichtsausgleich	52
	4.1.2 Unabhängiger Gewichtsausgleich	52
	4.2 Kopplung	54
	4.3 Handhabung	54
	4.3.1 Einhandgriffbedienung	54
	4.3.2 Alternativen zur Einhandgriffbedienung	56
	4.4 Verlauf der Dichtungsebene	56
	4.5 Betriebszustände und Bewegungsabläufe	58
	4.5.1 Betriebszustände	58
	4.5.2 Bewegungsabläufe	59
	4.5.3 Vergleich der Bewegungsabläufe	60
	4.6 Vorstufen des Prototyps	63
	4.6.1 Unabhängiger Gewichtsausgleich	63
	4.6.2 Variabler Gewichtsausgleich	70
	4.6.3 Automatik für die variable Kopplung	72
	4.7 Prototyp	73
	5. Ausblick	81
	6. Anhang	83
	Anhang zum Bericht Nr. M66 371/1, Müller-BBM GmbH, Planegg	83
	Bericht vom 12.03.2007, Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel	97
	Bericht Nr. M66 371/2, Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg	113
	Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß	133
	Prüfbericht 07/07/H06, Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding	166
	Konstruktionszeichnungen, Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding	172
	Anmerkungen zur Lüftung	180
	Fußnoten	183
	Literaturnachweis	185
	Abbildungsnachweis	186
	Bildnachweis	188
	Impressum	189

Zusammenfassung

Der Energiehaushalt von Gebäuden und das Raumklima werden maßgeblich durch die Gebäudehülle und deren Anpassbarkeit an unterschiedliche klimatische Zustände bestimmt. Die Sicherstellung verträglicher innerer Bedingungen in Verbindung mit der Notwendigkeit, dies mit einem möglichst geringen Energieverbrauch zu erreichen, stellt hohe Anforderungen an die Kontrollierbarkeit bzw. Regulierbarkeit der Wechselbeziehung zwischen Außen- und Innenklima.

Vor allem die Lüftung beinhaltet Potential zur Verbesserung der Energiebilanz und des Komforts eines Gebäudes. Heute verbreitete Öffnungsmechanismen führen in der Regel aufgrund ihrer Handhabung zu Energieverlusten und zu Einbußen des Nutzerkomforts. Eine optimierte individuelle Lüftungsmöglichkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäudehülle bildet den Ausgangspunkt für den untersuchten Ansatz: Die Anwendung des vertikalen Schiebemechanismus in Kombination mit opaken, hochwärmedämmenden Schiebeflügeln für die natürliche Lüftung.

Der vertikale Schiebemechanismus bietet für den Einsatz als Öffnungsart in Gebäudehüllen Vorteile, die in den folgenden Abbildungen dargestellt sind.

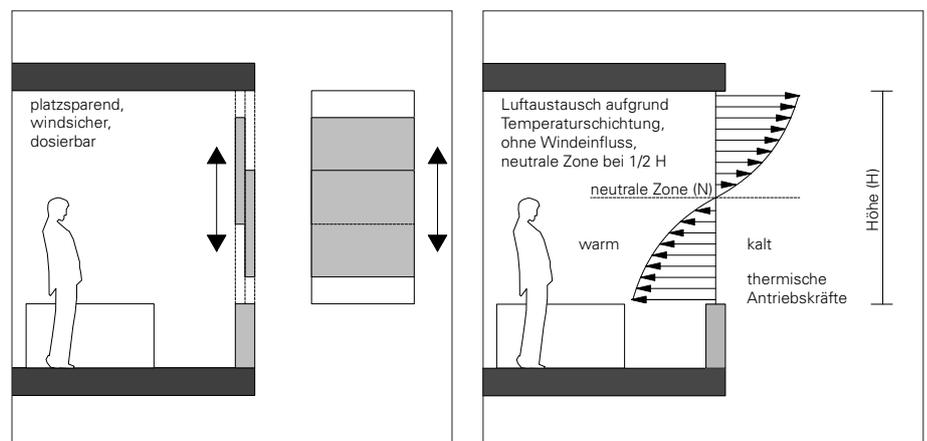


Abb. 1 Vertikaler Schiebemechanismus

Abb. 2 Grundprinzip Luftaustausch

Neben den geometrischen Vorzügen, die das Schieben in einer Ebene mit sich bringt, sind im Hinblick auf die Zielsetzung vor allem folgende Punkte relevant:

- Die vertikale Positionierbarkeit von Öffnungsquerschnitten erlaubt die Nutzung der thermischen Antriebskräfte im Rauminneren zur effizienten Unterstützung der natürlichen Lüftung [Abb. 2].
- Der Volumenstrom bei der Lüftung ist stufenlos dosierbar.
- Der Zusammenhang zwischen dem Öffnungsgrad und der Wirkung wird vom Benutzer unmittelbar visuell nachvollzogen. Das Maß der Lüftung kann daher intuitiv bedarfsgerecht eingestellt werden.

Große Scheibenformate in Verbindung mit dem höheren Flächengewicht moderner Mehrscheibenisoliervläser haben eine hohe Beanspruchung der Rahmenkonstruktion und der Beschläge von Fenstern zur Folge. Sie eignen sich somit nur bedingt für den Einsatz in beweglichen Öffnungselementen. Die traditionelle Verbindung der Funktionen Lüftung, Belichtung und Ausblick beim Fenster in geschlossenen Wandflächen ist damit in Frage gestellt.

Hochwärmedämmende Paneele als Einselemente erlauben dagegen die Konstruktion leichter Öffnungsflügel in der Fassade. Durch die Kombination mit großformatigen Festverglasungen mit hohem Wärmedurchgangswiderstand anstelle opaker Wandflächen werden die Funktionen neu zugeordnet. Mit der gezielten und wirtschaftlicheren Verwendung der Materialien kann ein Beitrag zur Verbesserung der Energie- und Stoffströme durch die Gebäudehülle geleistet werden.

Das Projekt gliedert sich in drei Tätigkeitsfelder:

Im Rahmen einer Bedarfsanalyse werden zunächst historische und aktuelle Beispiele vertikaler Schiebefenster recherchiert und hinsichtlich ihrer Handhabung und Wirkungsweise analysiert. Mit Hilfe eines schrittweisen Auswahlverfahrens wird die Leistungsfähigkeit theoretisch möglicher Konfigurationen vertikaler Schiebemechanismen untersucht und deren Potentiale abgeschätzt. Als Ergebnis der theoretischen Untersuchungen und im Hinblick auf die in der Analyse festgestellten Schwächen vorhandener Systeme

werden Leistungsmerkmale für den Bau eines verbesserten Öffnungselements definiert.

Parallel zur Arbeit an der technischen Umsetzung werden Computersimulationen durchgeführt, um die Lüftungseigenschaften des Lösungsansatzes bewerten zu können. Außerdem werden unter realen Bedingungen an einem Versuchsaufbau im Maßstab 1:1 Messungen vorgenommen.

Dem Bau eines Prototyps gehen Arbeitsmodelle voraus, an denen die technische Umsetzbarkeit in Varianten überprüft wird. Dieser Prozess findet in engem Austausch mit Kooperationspartnern aus den Bereichen Fassaden- und Maschinenbau statt.

Die Entwicklungsarbeit führt schließlich zur Erfindung eines neuartigen Öffnungsmechanismus und zum Bau eines Prototyps mit den zuvor definierten Leistungsmerkmalen. Dieser wird ersten Prüfungen und Belastungstests unterzogen.

Bedarfsanalyse und Definition der Leistungsmerkmale

In einer Voruntersuchung werden unterschiedliche Varianten von Schiebeschemata verglichen und eine Potentialabschätzung vorgenommen.

Ausgehend von den spezifischen Vorteilen des Vertikalschiebemechanismus wird für das Öffnungselement zunächst ein konkreter Anwendungsfall ermittelt. Theoretisch mögliche Schiebekonfigurationen werden dazu schrittweise eingegrenzt. Die Kriterien sind die zu erwartende Lüftungseffizienz, eine Abschätzung der Praxistauglichkeit sowie die technische Umsetzbarkeit und Bedienung. Als Synthese dieser Betrachtungen sowie der Analyse historischer Beispiele und der am Markt vorhandenen Systeme werden die maßgeblichen Leistungsmerkmale definiert.

- Doppelspaltöffnung für eine stufenlos regulierbare Dauerlüftung.
- Vollöffnung in mittlerer Höhe für die Stoßlüftung und den Ausblick.
- Manueller Antrieb mit intuitiver Bedienung.

Das zu entwickelnde Vertikalschiebeelement besteht aus zwei verschiebbaren Flügeln, die für die Doppelspaltöffnung zunächst gegenläufig gekoppelt sind. Nach Wahl des Nutzers lässt sich diese Kopplung aufheben. Dann sind die Flügel entweder gleichlaufend verschiebbar oder ein Flügel kann unabhängig vom anderen bewegt werden.

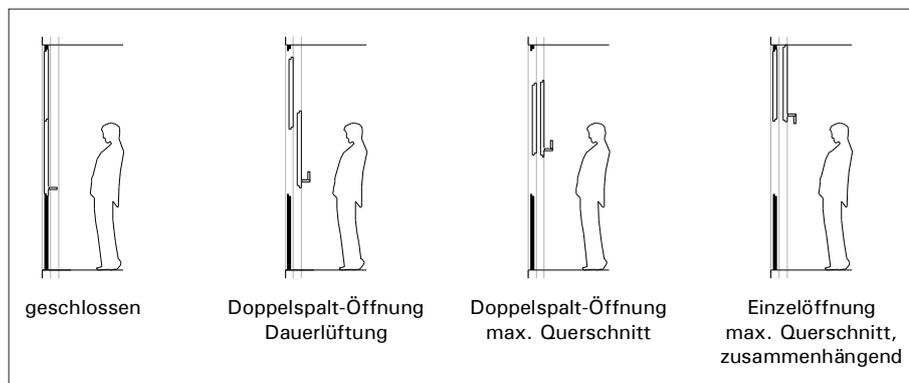


Abb. 3 Öffnungszustände der gewählten Konfiguration

Im weiteren Projektverlauf werden Computersimulationen und Messungen durchgeführt, um die Lüftungseigenschaften des Lösungsansatzes einschätzen zu können.

Verglichen wird das Vertikalschiebeelement mit einem konventionellen Kippelement. Während das Vertikalschiebeelement zur sommerlichen Taglüftung voll geöffnet werden kann, kommt für ein konventionelles Fenster auf Grund seiner geometrisch raumgreifenden Eigenschaften nur die Kippstellung in Frage.

Simulationen

Für den sommerlichen Lüftungsfall werden mittels zonaler thermischer Berechnungen über den Verlauf eines gesamten Tages Kennwerte zu Raumtemperaturverlauf, empfundener Temperatur und Luftwechsel ermittelt. Es zeigt sich, dass im Vergleich der Temperaturwerte das Vertikalschiebeelement besser abschneidet als das Kippelement: Die Arbeitsstunden mit empfundenen Temperaturen über 30° C treten beim Vertikalschiebeelement etwa halb so häufig auf [Abb. 4 und 5].

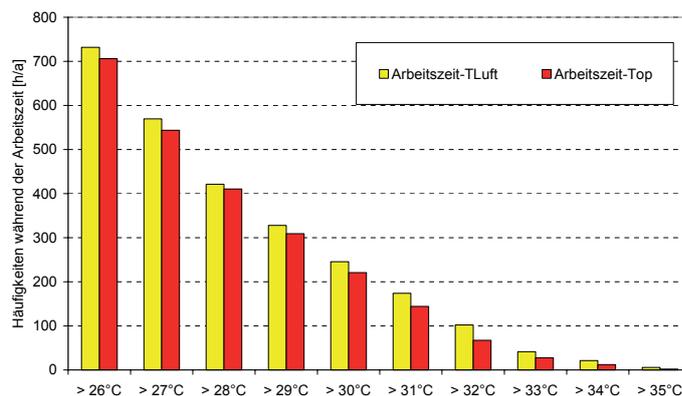


Abb. 4 empfundene Temperaturen Kippelement

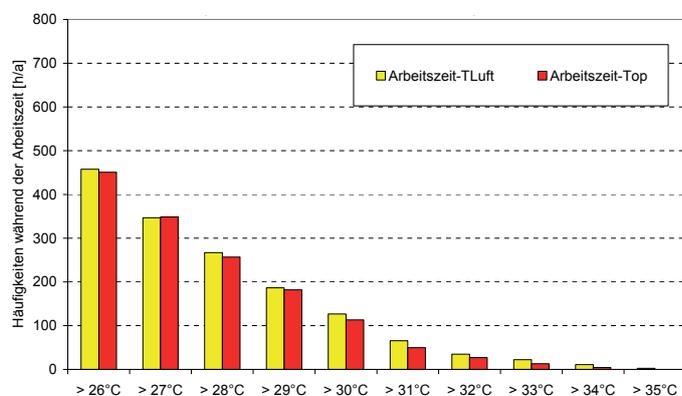


Abb. 5 empfundene Temperaturen Schiebeelement

Um ein Absenken der Raumtemperatur auch unter die Außenlufttemperatur zu erreichen, werden weitere Szenarien mit einer Bauteilaktivierung als Aktivtechnik simuliert. In der Kombination mit dieser Maßnahme lassen sich mit dem Vertikalschiebeelement sehr gute raumklimatische Bedingungen erzielen, da es leicht motorisierbar ist und so mit einer übergeordneten Gebäudesteuerung eingesetzt werden kann.

Mit Hilfe einer hochauflösenden CFD Simulation werden die Dauerlüftung im Sommerfall während der Arbeitszeit und in der Nacht sowie der Winterlüftungsfall genauer betrachtet.

Im sommerlichen Szenario haben sich zu den Betrachtungszeitpunkten in Folge der Dauerlüftung die Temperaturschichtung im Raum und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen sowohl beim Kipp- als auch beim Vertikalschiebelement bereits so weit ausgeglichen, dass der natürliche Antrieb für den Luftaustausch schon weitgehend neutralisiert ist. In der Simulation des winterlichen Szenarios lässt sich die Wirksamkeit der natürlichen Antriebskräfte zu Beginn des Lüftungsvorgangs dagegen sehr deutlich ablesen. Dabei wird ein weiterer Vorteil des Vertikalschiebelements erkennbar: Der Benutzer kann intuitiv und stufenlos die geeignete Öffnungsgröße einstellen. Dies ermöglicht sogar bei sehr kalten Außenlufttemperaturen eine natürliche Lüftung ohne Einschränkung der Behaglichkeit. Die Abbildung 6 zeigt die massive Ausbreitung kalter Luft kurz nach dem Öffnen des Kippflügels, während beim Schiebelement, das sich in der Position der Doppelspaltöffnung befindet, ein ausreichender Luftwechsel ohne Behaglichkeitseinbußen möglich ist [Abb. 6 und 7].

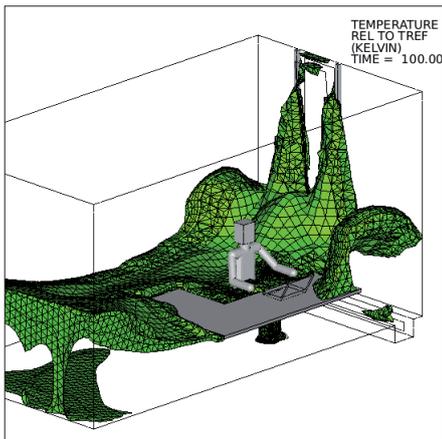


Abb. 6 Ausbreitung kalter Luft Kippflügel

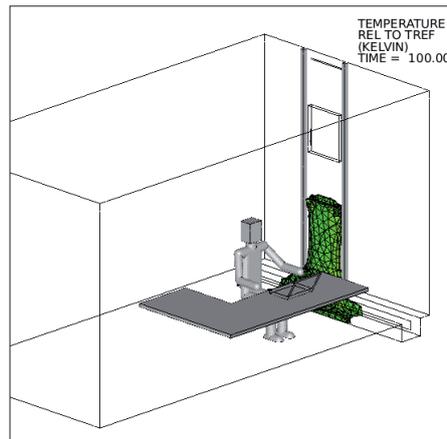


Abb. 7 Ausbreitung kalter Luft Schiebeelem.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass das Vertikalschiebelement durch seine bedarfsgerechte Dosierbarkeit ein breites Spektrum an Lüftungsmöglichkeiten aufweist. So ist es mit einer maximalen Doppelspaltöffnung dem Kippelement bei der Nachtauskühlung überlegen und eignet sich mit einer minimalen Spaltöffnung sehr gut für die gezielte natürliche Lüftung bei kalten Außentemperaturen.

Messungen

Zur Überprüfung der Erkenntnisse unter realen Bedingungen werden an einem Versuchsaufbau im Maßstab 1:1 an der Hochschule Biberach Messungen durchgeführt.

Für die winterliche Lüftung wird innerhalb eines kurzen Betrachtungszeitraums wiederum das Vertikalschiebeelement mit dem Kippelement verglichen und dabei in beiden Fällen der gleiche Lüftungsquerschnitt eingestellt.

Im Versuchsaufbau wird die Luftgeschwindigkeit und die Raumtemperatur gemessen. Der Luftwechsel wird durch Messung der Abnahme eines zuvor eingebrachten Messgases errechnet. Dabei zeigt sich, dass sich bei der Doppelspaltöffnung des Vertikalschiebelements trotz geringerer mittlerer Luftgeschwindigkeit ein höherer Luftwechsel einstellt und daher eine höhere Lüftungseffektivität gegeben ist.

Die Messungen bestätigen die Vermutung, dass bei der Betrachtung des Lüftungsverhaltens über einen kürzeren Zeitraum deutlichere Unterschiede zwischen den Öffnungsarten erkennbar sind als in der Langzeitbetrachtung.

Technische Durcharbeitung und Bau des Prototyps

Der technischen Durcharbeitung liegt eine empirische Vorgehensweise zugrunde. Anhand von Arbeitsmodellen werden schrittweise Lösungsansätze überprüft. Die Erkenntnisse führen in einem kontinuierlichen Entwicklungsprozess zum Bau eines Prototyps.

Zunächst werden für das Vertikalschiebeelement Betriebszustände definiert. Sie stellen die für die Lüftung entscheidenden Schlüsselpositionen dar und leiten sich aus den in der Zielsetzung formulierten Leistungsmerkmalen ab.

Folgende drei Betriebszustände werden als Hauptbetriebszustände festgelegt:

- Geschlossener Zustand (A).
Es findet keine Lüftung statt.
- Symmetrische Doppelspaltöffnung (B).
Es kann stufenlos jede beliebige Öffnungshöhe der Spalte von der minimalen bis zur maximalen Doppelspaltöffnung eingestellt werden. Bei dieser Position steht die individuelle Regulierung der Lüftungsintensität durch den Benutzer im Vordergrund.
- Vollöffnung (C).
Es soll ein großer, zusammenhängender Öffnungsquerschnitt auf mittlerer Höhe hergestellt werden, um den Bedürfnissen der Nutzer nach Stoßlüftung und Außenbezug nachkommen zu können.

Für den Wechsel zwischen den drei Hauptbetriebszuständen gibt es vier alternative Bewegungsabläufe. Diese und die zugrunde liegenden technischen Abläufe werden zur detaillierten Analyse in Einzelabschnitte unterteilt.

Tabelle 1 Varianten für den Wechsel zwischen den Betriebszuständen

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Bewegungsablauf	Die Vollöffnung (C) wird über die symmetrische Doppelspaltöffnung (B) erreicht. Ein direkter Übergang von A nach C ist nicht möglich.	Ausgehend vom geschlossenen Zustand (A) werden die Betriebszustände symmetrische Doppelspaltöffnung (B) und Vollöffnung (C) direkt erreicht. Ein direkter Übergang von B nach C ist nicht möglich.	Ausgehend vom geschlossenen Zustand (A) werden die Betriebszustände symmetrische Doppelspaltöffnung (B) und Vollöffnung (C) direkt erreicht. Ein direkter Übergang von B nach C ist ebenfalls möglich.	Die symmetrische Doppelspaltöffnung (B) wird über das Verschieben der deckungsgleichen Flügel aus der Vollöffnung (C) erreicht. Ein direkter Übergang von A nach B ist nicht möglich.
Vorteil	Leichte Bedienbarkeit aufgrund des eindeutigen Bewegungsablaufs.	Direkte Ansteuerbarkeit der gewünschten Öffnungsart aus dem geschlossenen Zustand.	Direkter Wechsel zwischen allen Betriebszuständen.	-
Nachteil	Die beiden Öffnungsarten B und C können in diesem Fall nicht als gleichrangig bewertet werden, da die Vollöffnung der symmetrischen Doppelspaltöffnung nachgeschaltet ist.	Im geschlossenen Zustand muss die Mechanik durch einen Nutzereingriff auf die jeweilige Öffnungsrichtung eingestellt werden. Die symmetrische Doppelspaltöffnung kann nicht direkt zur Vollöffnung vergrößert werden.	Der direkte Wechsel zwischen allen Betriebszuständen hat eine komplexe Einstellbarkeit der Öffnungsmechanik zur Folge. Dies erschwert eine intuitive Bedienung.	Es ist keine stufenlos regulierbare symmetrische Doppelspaltöffnung möglich.

Mit Hilfe der Systematisierung wird es möglich, aus den Leistungsmerkmalen der Bewegungsabläufe Rückschlüsse auf die Bedienung und die technischen Anforderungen zu ziehen. Parallel zur Analyse der Bewegungsvorgänge werden die technischen Grundlagen für die bauliche Umsetzung erarbeitet.

- Verlauf der Dichtungsebene
- Gewichtsausgleich
- Kopplung
- Handhabung

Wegen der günstigen bauphysikalischen Eigenschaften wird eine gerade durchlaufende Dichtungsebene der Flügel in geschlossenem Zustand gewählt. Der Gewichtsausgleich und die Kopplung der beiden Flügel stellen im Zusammenhang mit der Handhabung die Schwerpunkte der weiteren technischen Entwicklungsarbeit dar.

In nachfolgender Matrix ist vereinfacht die Eignung eines unabhängigen bzw. abhängigen Gewichtsausgleichs für die Kopplungsarten dargestellt.

Tabelle 2 Gewichtsausgleich und Kopplung

Gewichtsausgleich		Kopplung		
		gegenläufig	gleichläufig	ohne
unabhängig	Federkraft / Gegengewicht	+	+	+
	Kraftwandlung	+	+	+
abhängig	Umlenkung	++	-	-

Zunächst werden Lösungen überprüft, bei denen der Gewichtsausgleich der beiden Flügel jeweils unabhängig erfolgt. Beim zugehörigen Arbeitsmodell werden als Gewichtsausgleich Federn vorgesehen und die Kopplung erfolgt mittels schaltbarer Zahnstangenmechanik. Der untere Flügel wird durch eine Ausstellschere in die Verschiebeebene gebracht. Im Modell ist das Grundprinzip zwar erfolgreich umgesetzt, es zeigt sich jedoch, dass das Ausstellen aufwendig ist und hohe Kosten erwarten lässt.

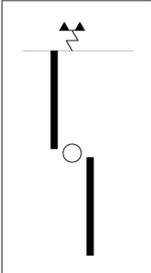
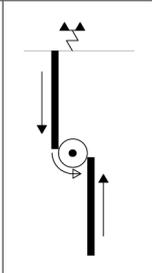
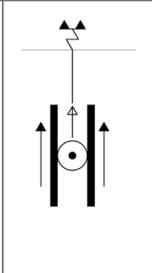
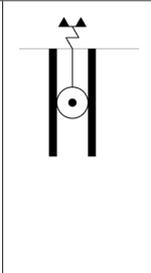
Bei handelsüblichen Vertikalschiebefenstern erfolgt der Ausstellvorgang des unteren Flügels über eine verkröpfte Führungsnut. Da sich diese Technik nicht mit einem Gewichtsausgleich durch Federn kombinieren lässt, wird bei einem weiteren Arbeitsmodell das Prinzip der Kraftwandlung mit einer Getriebeübersetzung untersucht. Die beiden Flügel sind an Stahlseilen als Zugelemente aufgehängt und werden jeweils durch Aufwickeln an einer Welle mittels Bediengurten bewegt. Die zu Grunde liegende Technik ähnelt der eines Rollladens.

Dieser Bautyp lässt einen direkten Wechsel zwischen allen gewünschten Betriebszuständen zu. Der technische und wirtschaftliche Aufwand erscheint kalkulierbar, da Antrieb und Gewichtsausgleich in einer bewährten Technik erfolgen. Die Gurtbedienung hat den Vorteil, dass die Handhabung vom Flügel als dem beweglichen Bauteil abgelöst ist. Allerdings ist der Bedienkomfort insgesamt nicht befriedigend, da der Nutzer mit dem Griff und den beiden Gurten zu viele Elemente betätigen muss.

Um den Vorteil der Gurtbedienung nutzen zu können und zugleich eine Vereinfachung der Handhabung zu erreichen, wird die Bedienung auf einen Gurt reduziert. Möglich wird dies dadurch, dass sich während des Bewegungsvorgangs die Kopplungsart und die Art des Gewichtsausgleichs automatisch ändern.

Das Prinzip ist in folgendem Schema dargestellt.

Tabelle 3 Schema des variablen Gewichtsausgleichs mit variabler Kopplung

A	B		C
geschlossen	symmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
			

-  Umlenkung, gleichläufig
-  Umlenkung, gegenläufig
-  Kopplung, inaktiv
-  Gewichtsausgleich, zwei Einheiten

Die Vollöffnung ergibt sich durch eine Fortsetzung des Öffnungsvorgangs über die maximale Doppelspaltöffnung hinaus. In geschlossenem Zustand muss somit keine Einstellung getroffen werden, welcher Betriebszustand angesteuert werden soll. Die Flügel sind zunächst gegenläufig gekoppelt. In der Position der maximalen Doppelspaltöffnung ändert sich die gegenläufige in eine gleichläufige Kopplung. Da sich das Gewicht der Flügel in dieser Phase nicht mehr gegenseitig ausgleicht, wird ein zusätzlicher Gewichtsausgleich wirksam.

Grundlage für die technische Umsetzung dieses Schemas ist eine automatische Umschaltung der Kopplungsart. Bei herkömmlichen Vertikalschiebefenstern wird der abhängige Gewichtsausgleich über eine direkte Umlenkung der Seilverbindung hergestellt, so dass keine Änderung der Kopplungsart möglich ist. Erst durch die Abhängung beider Flügel von der gleichen Welle, also einer indirekten Kopplung an der Welle, lässt sich bei richtiger Wahl der Wicklung ein automatischer Übergang von der gegenläufigen in die gleichläufige Kopplung erreichen.

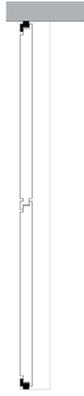
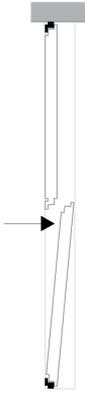
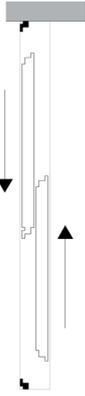
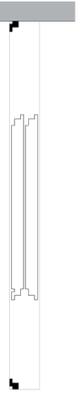
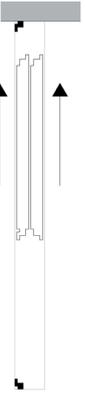
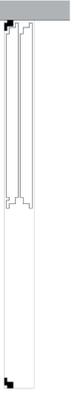
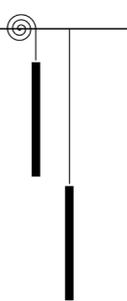
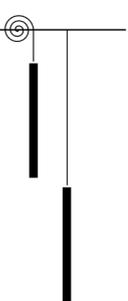
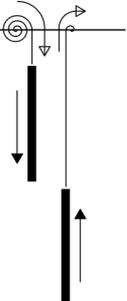
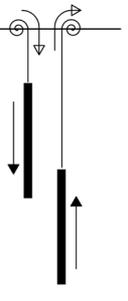
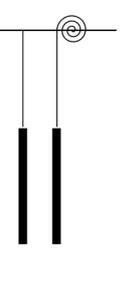
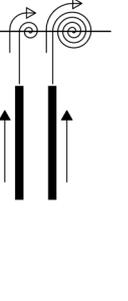
Prototyp

Dieses Prinzip für den Gewichtsausgleich und die Kopplung zweier Flügel eines Vertikalschiebeelements stellt eine bislang nicht bekannte Neuerung dar und wird zur maßgeblichen Grundlage für die Bauart und Funktionsweise des ersten Prototyps.

Durch Betätigen der Handhabe am unteren Flügel wird dieser entriegelt und anschließend gekippt. Aus dieser Position wird er in einer gekröpften Führungsnut vertikal verschoben. Der Flügel ist an Stahlseilen aufgehängt und hebt sich durch Aufwickeln der Seile auf eine Welle. Die dafür notwendige Drehbewegung bringt der Nutzer durch die Betätigung einer Antriebskette auf. Der obere Flügel ist ebenfalls über Stahlseile mit der Welle verbunden. Gleichzeitig mit dem Anheben des unteren Flügels wird die Seilwicklung des oberen Flügels abgewickelt, so dass sich dieser in einer gegenläufig synchronen Bewegung absenkt. Die Flügel stehen in gegenseitigem Gewichtsausgleich. In der Deckungsgleiche sind die Stahlseile des oberen Flügels vollständig abgewickelt und die maximale Doppelspaltöffnung ist hergestellt. Bei einer Fortsetzung der Drehbewegung hebt sich der obere Flügel wieder an, indem sich seine Aufhängung in umgekehrter Richtung wieder aufwickelt. Der Öffnungsvorgang des unteren Flügels setzt sich fort, so dass sich die Flügel nun gleichlaufend synchron nach oben bewegen. Den Gewichtsausgleich für beide Flügel leistet jetzt ein Übersetzungsgetriebe.

Der Bewegungsablauf ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4 Bewegungsablauf Prototyp I

Betriebszustand	A			B			C
	geschlossen	Ausstellen des unteren Flügels	Lösen des oberen Flügels	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
							
Art des Eingriffs	Entriegeln	Kippen	horizontaler Versatz	gegenläufige Vertikalverschiebung	-	gleichläufige Vertikalverschiebung	-
Bedienung der Handhabe	Drehbewegung am Griff	Ziehbewegung am Griff	-	Ziehbewegung an der Kette	-	Ziehbewegung an der Kette	-
Gewichtsausgleich	-	-	-	gegenseitig	gegenseitig	Kraftwandlung	Kraftwandlung
Kopplungsart	-	-	-	gegenläufig	-	gleichläufig	-
Status der Wicklung							

In Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner werden auf dieser Grundlage Konstruktionszeichnungen erstellt und ein erster funktionsfähiger Prototyp des Öffnungselements gebaut, der über einen Zeitraum von ca. 2 Monaten erfolgreich ersten Belastungstests unterzogen.



Bild 1 Bewegungsablauf des Prototyps, ausgestellt auf der Messe Bau 2007

Der Prototyp wird im Rahmen des Messestandes Holzbau der Zukunft auf der BAU 2007 vorgestellt. Seine Realisierung zeigt, dass eine Weiterentwicklung des Vertikal-schiebemechanismus für eine verbesserte, natürliche Lüftung möglich ist. Im Gegensatz zu vorhandenen Systemen erlaubt der neu entwickelte Bewegungsmechanismus dem Nutzer über eine einfache intuitive Bedienung die bedarfsgerechte Lüftung mit der Doppelspaltöffnung und dem automatisierten Übergang in die Vollöffnung. Neben den funktionalen Vorzügen zeichnet sich der Prototyp durch seine ästhetische Qualität aus. Mit der Verwendung des Baustoffs Holz als flächigem Bauteil ergeben sich neue Möglichkeiten für die Gestaltung und Gliederung moderner Fassaden. Schon während der Bearbeitungsphase haben sich Kontakte mit Interessenten ergeben, die aufgrund der spezifischen Vorteile des neu entwickelten Elements einen Einsatz in konkreten Bauvorhaben erwägen. Im Fall einer Realisierung würde das Öffnungselement den objektspezifischen Anforderungen angepasst und den noch ausstehenden Tests für die Zulassung zum Markt unterzogen werden. Nach momentaner Einschätzung liegen die Kosten für das Öffnungselement erwartungsgemäß über denen eines Drehkippelements vergleichbarer Größe. Es erscheint daher wichtig, die Vorteile wirtschaftlich bewertbar darzustellen und dies in den Zielgruppen zu publizieren. Mit ersten Erfahrungen der Serienfertigung und einer zunehmenden Verbreitung ist eine Reduzierung der Herstellungskosten zu erwarten.

The façade of a building and its adaptability to different climatic situations outside the building has a huge influence on the energy costs of the building and the climatic conditions within the building. Guaranteeing agreeable interior conditions while using as little energy as possible places high demands on the openings which control and regulate the exchange between the external and the internal atmosphere.

Ventilation in particular provides potential for cutting costs and at the same time raising the comfort level within a building. The opening mechanisms in use today lead to energy losses and a lack of comfort due to their methods of operation. Optimised ventilation together with improved insulation provides the starting point for this new and already tested solution: A vertical sliding mechanism with opaque, highly insulating elements allows for natural ventilation.

The vertical sliding mechanism offers many advantages when used in building shells.

Large format sliding mechanisms in combination with the increased weight per unit area of modern multi-pane insulation glass results in high loads on the framework construction and window hardware. Thus, their use is only conditionally suitable in applications with moving opening elements. The traditional combination of ventilation, lighting and a view afforded by the window located on closed wall panels is thus placed in question.

In contrast, the use of highly heat-insulating panel elements facilitates the construction of lighter opening ventilation frames in the façade. When combined with large-format fixed glass comprising multi-pane insulation glass with a high heat penetration resistance in the place of opaque wall panels, the functions are entirely restructured. This restructuring enables the targeted and thus more economical use of materials and can make an important contribution to the improvement of energy and material flows through the building shell.

The aim of this assignment is to develop an opening element which provides new possibilities for natural ventilation in conjunction with the vertical sliding mechanism and the use of opaque opening ventilation frames. During the assignment research, it has become clear that extensive scope for development exists in contrast with the common, vertically sliding systems - in particular with respect to the mode of operation.

The project is divided up into three areas of activity:

Initially, a requirements analysis is researched and analysed on the basis of historic and current examples of vertical sliding windows, in particular with respect to operation and effectiveness. With the aid of a step-by-step selection process, the performance of theoretical possible configurations of vertical sliding systems is assessed and the potentials estimated accordingly. Capability characteristics for an improved opening element are defined as a result of the theoretical assessments and with respect to the weaknesses detected in the available systems on the basis of the analysis.

Computer simulations were conducted in parallel with technical developments, in order to enable the evaluation of the ventilation characteristics of the solution method. In order to assess the findings, a test rig was set up with a 1:1 scale and comparative measurements were obtained under real conditions. The simulations and the measurements both confirm the advantages of the ventilation element over conventional opening formats.

In order to harmonise findings for the development of a prototype, variants are developed for the technical implementation of the solution method and assessed using working models.

This process takes place in close exchange with cooperative partners from the fields of façade and mechanical engineering.

The development work leads ultimately to the invention of a new type of opening mechanism and to the construction of a prototype with the predefined performance characteristics. This is successfully put through the first trials and durability tests which are a prerequisite for an introduction to the market.

Summary

Requirements analysis and definition of the performance characteristics

In a theoretical preliminary test process, a range of sliding pattern variants were compared and an estimate of potentials conducted.

If one combines these results with the market research findings, one discovers that the market does not offer a simple configuration with a two-part sliding mechanism above the breast height which conforms with the following performance characteristics:

- Double-split opening for infinitely variable constant ventilation.
- Full opening at mid-height for shock aeration and view.
- Manual drive with intuitive operation.

The vertical slide element comprises a double leaf with counter-directional coupling of the elements. It is possible to suspend this coupling if the user prefers. It is therefore possible to slide the elements synchronously or to move one element independently of the other.

During the next stages of the project, computer simulations and measurements are carried out in order to estimate the ventilation characteristics of the solution method. The vertical sliding element is compared with a conventional tilt-in sash. Whilst it is possible to fully open the vertical sliding element to provide ventilation throughout summer days, a conventional window can only be placed in its tilted position due its geometrical space-consuming characteristics.

Simulations

For the summer ventilation case, zonal thermal calculations shall first be used to obtain characteristic values across one entire day for the room temperature gradient, the perceived temperature and the air exchange.

The results show that the vertical sliding element fares better than the tilt-in sash in the temperature values comparison: Working hours with a perceived temperature of over 30° C occur half as often with the vertical sliding element.

In order to achieve a reduction in the room temperature to below the external temperature, additional scenarios are simulated with the activation of a thermal mass as an additional active system. In combination with this measure, the vertical sliding element is able to attain superb atmospheric room conditions, because it is easy to motorise and can thus be utilised in conjunction with a superior building control system.

With the aid of high resolution CFD simulation, the first scenario examined is that of constant ventilation in conjunction with the summer case, during working hours and at night.

At the selected observation time points, the temperature layers in the room and the internal and external temperature differences with the tilt-in sash and the vertical sliding element balance themselves to such an extent with constant ventilation, that the natural drive for the air exchange is largely neutralised. The effectiveness of the natural drive forces at the start of a ventilation sequence are particularly clear with the simulation results for the winter ventilation case.

When examining the ventilation in winter, a decisive advantage of the vertical sliding element is highly apparent: The user is able to intuitive set infinitely variable opening dimensions as respectively appropriate. This facilitates natural ventilation without resulting in restrictions to comfort, even with the coldest of external temperatures. Diagram 6 shows the massive propagation of cold air after opening the tilt-in sash window, whilst the sliding element enables sufficient air exchange without affecting comfort

The results of the simulation show that the vertical sliding element permits a broad spectrum of ventilation possibilities, due to its demand-orientated air dosage. Thus, the maximum double-split opening is superior to the tilt and turn window for night-time cooling, whilst a minimal opening crack is also very effective for targeted natural ventilation with cold external temperatures.

Measurements

In order to test the results under real conditions, measurements were carried out on a test rig with a 1:1 scale at the Biberach Technical University.

During a short observation period, wintertime ventilation with the vertical sliding element is compared once again with the tilt and turn window, with the same ventilation profile selected in both cases.

The air speed and room temperature are measured on the test rig and the air exchange is calculated on the basis of the discharge of a measuring gas introduced beforehand. It is apparent here that a higher level of air exchange takes place via the double-split opening of the vertical sliding element despite a lower mean air speed, and that greater ventilation effectiveness is thus achieved.

The measurements confirm the conjecture, that the observation of the ventilation behaviour over a shorter period of time shows much clearer differentiation between the opening formats than is apparent over longer-term observations.

Technical workings and construction of the prototype.

The technical workings are based on an empirical process.

The solution methods are checked on a step-by-step basis using the working models. The findings are incorporated throughout a constant development process and serve to harmonise the technical solution upon which to construct the prototype.

Firstly, the operating states are defined for the opening element. These specify decisive key positions for the ventilation and are derived from the performance characteristics formulated during definition of the objective.

The following three operating states are specified as the main operating states:

- Closed state (A).
No ventilation is taking place.
- Symmetrical double-split opening (B).
An infinitely variable opening height from the minimum to maximum double-split opening can be set. In this position, the individual regulation of the ventilation intensity as defined by the user is focal.
- Full opening (C).
A large, continuous opening cross-section at medium height should be produced in order to cater for the needs of the user for shock aeration and external supply.

In order to provide a detailed analysis of the movement stages and the basic technical sequences, the complete motion is divided up into individual steps. It is possible to differentiate between four movement stage variants for the changes between the three main operating states.

It is possible to draw conclusions on the operating and technical requirements with the aid of this systemisation and on the basis of the complete motion performance characteristics.

The technical foundations for the constructural implementation are developed in parallel with the analysis of the movement stages.

- Seal plane
- Weight compensation
- Coupling
- Operation

The window panes are in a closed state on a single plane because a straight, continuous seal is favoured due to the beneficial physical structural characteristics. The weight compensation and the coupling of the two panes, in conjunction with the operation, provide the focuses of the next stages of technical development.

The following table conveys a simplified picture of the suitability of an independent or dependent weight compensation system for the coupling types.

On this basis, an estimation of the design variants is carried out with respect to operation and serviceability and a selection of solution methods results.

Initially, assessments concentrate on those solution methods in which the weight compensation of the two panes takes place independently. In the case of the associated working models, weight compensation is planned in the form of springs, whilst the coupling configuration comprises a switchable rack and pinion system. An arm moves the lower panes to the sliding level.

The basic principle is transferred to the model, although it is apparent that the venting action is elaborate and likely to incur high costs.

With conventional vertical sliding windows, the process of opening the lower pane takes place via a cranked guide slot.

As this principle cannot be combined with spring-based weight compensation, the conversion of force for weight compensation is examined on a subsequent working model. The two panes are suspended on steel cables which act as tension members. They are moved as the cables are reeled onto shafts by operating cords.

This fundamental technique is similar to that applied with a roller blind.

This build type facilitates the direct transition between all of the desired operating states. The technical and economic outlay appears to be calculable because the drive and weight compensation systems are already in common use. An advantage of the cord operation is that it is detached from the window as a moveable part. However, user comfort is not entirely satisfactory because the user must operate too many elements, in the form of the handle and the two cords.

In order to be able to utilise the advantages of the cord, whilst achieving a simplified operation, the process is reduced to one cord. This is made possible by driving the two panes with one cord, with the types of coupling and weight compensation changing automatically during the movement process.

Full opening is the result of the continuation of the opening process beyond the maximum double-split opening. Thus it is not necessary to set the operating state required when starting from the closed state. The panes are initially counter-directionally coupled. In the maximum double-split opening position, the counter-directional coupling changes to a parallel coupling. With the weight of the panes in this phase no longer reciprocally balanced, additional weight compensation becomes effective.

The basis for the technical implementation of this design is an automatic switching of the type of coupling. With conventional vertical sliding windows, the dependent weight compensation is produced with a direct directional change of the cable connection, meaning that no change in the type of coupling is possible. Only when the two panes are suspended from the same shaft, i.e. an indirect coupling with the shaft, is it possible to achieve an automatic transfer from counter-directional to parallel coupling upon correct selection of the winding.

Prototype

This principle, comprising the weight compensation and coupling of the two panes of a vertical sliding element, presents an entirely new innovation and provides the decisive foundations for the build type and functionality of the first prototype.

By activating the handle on the lower pane, this is released and subsequently tilted. From this position, it is vertically shifted to a cranked guide slot. The pane is suspended on a steel cable and is raised by winding the cable onto a shaft. The rotational movement required for this is produced by the user activating a drive chain. The top pane is also connected with the shaft via a steel cable. As the lower pane is raised, the top pane's cable is also unwound and it is lowered in a counter-directional synchronous movement. The panes are now reciprocally counter-balanced. In the twinned position, the upper pane's steel cable is fully unwound and the maximum double-split opening produced. If the rotational movement is continued, the upper pane is hoisted once again as its suspension cable is wound up in the opposite direction. The opening procedure for the lower pane continues and the pane moves synchronously upward. The weight compensation for both panes is provided by transmission gearing.

Design drawings have been generated with the cooperative partner on this basis and the first functioning prototype of the opening element produced.

The prototype is to be presented to the public on the „Holzbau der Zukunft“ [Wooden Construction for the Future] exhibition stand at the BAU 2007. Its production demonstrates that it is possible to further develop the vertical sliding mechanism for improved, natural ventilation. In contrast to available systems, the newly developed movement mechanism enables the user to operate an intuitive system to enjoy ventilation in accordance with their needs, with the double-split opening and automated changeover to full opening,

Even during the investigative phase, contacts with interested parties resulted in actual build applications being considered, due to the specific advantages of the newly developed element. In the event of a real implementation, the opening element would be adapted to the object-specific requirements and subjected to outstanding tests for approvals required prior to market introduction. According to current estimations and as one would expect, the costs for the opening element lie above those for a tilt and turn window of the same size. It would thus appear important to present the advantages in an economically assessable manner, and to publish these for the target groups. After initial series production experiences and an increasing product spread, one would anticipate that a reduction in the manufacturing costs would follow.

1. Ziel und Verlauf des Projekts

Der Energiehaushalt von Gebäuden und das Raumklima werden maßgeblich durch die Gebäudehülle und deren Anpassbarkeit an unterschiedliche klimatische Zustände bestimmt. Die Sicherstellung verträglicher innerer Bedingungen in Verbindung mit der Notwendigkeit, dies mit einem möglichst geringen Energieverbrauch zu erreichen, stellt hohe Anforderungen an die Kontrollierbarkeit bzw. Regulierbarkeit der Wechselbeziehung zwischen Außen- und Innenklima.

Vor allem die Lüftung beinhaltet Potential zur Verbesserung der Energiebilanz und des Komforts eines Gebäudes. Heute verbreitete Öffnungsmechanismen führen in der Regel aufgrund ihrer Handhabung zu Energieverlusten und zu Einbußen des Nutzerkomforts. Eine optimierte individuelle Lüftungsmöglichkeit am Arbeitsplatz bei gleichzeitiger Verbesserung der Wärmedämmung der Gebäudehülle bildet den Ausgangspunkt für den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ansatz:

Die Anwendung des vertikalen Schiebemechanismus in Kombination mit opaken, hochwärmedämmenden Schiebeelementen.

Vertikaler Schiebemechanismus

Bei den Öffnungsarten vereint der vertikale Schiebemechanismus [Abb. 1.1] vergleichsweise viele Vorteile:

- Durch das raumsparende Öffnungsprinzip erhalten die anliegenden Grundrissflächen eine größtmögliche Nutzungsvervielfältigung.
- Die Öffnungsbewegung findet in der Elementebene statt. Außen- und raumseitig können ohne Einschränkung weitere Manipulatoren zur Lenkung der Stoffströme angeordnet werden.
- Die vertikale Positionierbarkeit von Öffnungsquerschnitten erlaubt die Nutzung der thermischen Antriebskräfte im Rauminneren zur effizienten Unterstützung der natürlichen Lüftung [Abb. 1.2].
- Der Volumenstrom bei der Lüftung ist stufenlos dosierbar.
- Der Zusammenhang zwischen dem Öffnungsgrad und der Wirkung wird vom Benutzer unmittelbar visuell nachvollzogen. Das Maß der Lüftung kann daher intuitiv bedarfsgerecht eingestellt werden.
- Die Öffnungsstellung ist windsicher, da die Flügelbewegung senkrecht zu den auftreffenden Windkräften erfolgt.

Aufgrund dieser Punkte eröffnet der vertikale Schiebemechanismus ein hohes Potential für die Steigerung der Effizienz, des Komforts und der Behaglichkeit bei der natürlichen Belüftung von Räumen.

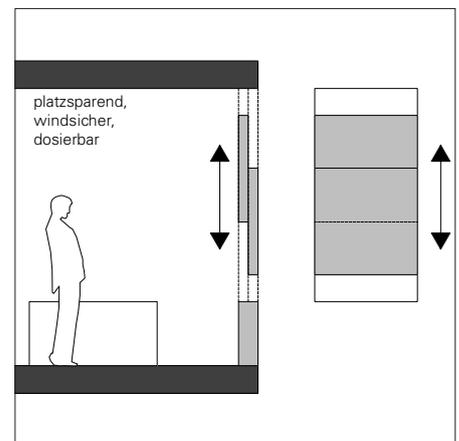


Abb. 1.1 Vertikaler Schiebemechanismus

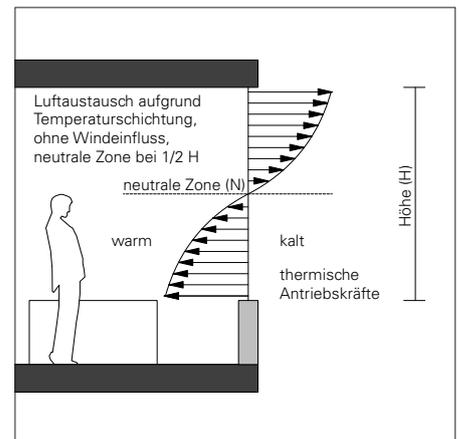


Abb. 1.2 Grundprinzip Luftaustausch

Opake Öffnungsflügel

In der traditionellen Bautechnik stellt das Fenster als Öffnung in der massiven Außenwand die thermische Schwachstelle dar, die es gilt, möglichst klein zu halten [Bild 1.1]. Die fortschreitende Entwicklung moderner Mehrscheibenisolierrgläser erfordert nun eine Neubewertung der Funktionsprofile von Bauteilen innerhalb der Gebäudehülle. Aufgrund der inzwischen hohen Wärmedurchgangswiderstände moderner Verglasungen in Verbindung mit der Möglichkeit der Nutzung solarer Einstrahlung eignen sich Gläser auch für eine großflächige Verwendung anstelle der ehemals opaken Wandflächen.

Im Vergleich zu den statischen Bauteilen der Außenwandkonstruktion sind bewegliche Öffnungsflügel entsprechend ihrer Funktionsweise und der sich daraus ableitenden konstruktiven Anforderungen komplexe, teure und verhältnismäßig anfällige Bauteile. Wegen ihres hohen Flächengewichts eignen sich die modernen Mehrscheibenisolierverglasungen für diesen Verwendungszweck nur eingeschränkt: bei kleinen Elementgrößen relativiert der hohe Rahmenteil den Nutzen der Verglasung in funktionaler wie ästhetischer Hinsicht. Mit zunehmender Größe der schweren Glasflächen steigen die konstruktiven Anforderungen an eine bewegliche Rahmenkonstruktion überproportional. Vor diesem Hintergrund bieten sich leichte, hochwärmedämmende Paneele als opake Füllelemente an. In mehrschichtiger Bauweise mit Holzwerkstoffen lassen sie sich als rahmenloser Öffnungsflügel in ein Fassadenelement integrieren.

Ihre Merkmale sind:

- Auflösung des Konflikts zwischen Rahmenanteil und Flügelfläche
- Gewichtsoptimierung durch materialspezifische Sandwichkonstruktion
- Nutzung der Fläche zur Aussteifung des Öffnungsflügels
- Integrationsmöglichkeit von Beschlägen
- Integrationsmöglichkeit zusätzlicher Lüftungsöffnungen innerhalb der Flügel
- Integrationsmöglichkeit dezentraler Bestandteile der Gebäudetechnik
- Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen wie z. B. Holz [Bild 1.2]
- hohe haptische Qualität

Kombiniert man opake Lüftungselemente mit großflächigen Festverglasungen werden die ehemals im Bauteil „Fenster“ integrierten Funktionen Lüften und Belichten / Durchblick getrennt. Diese Spezialisierung erlaubt eine gezielte und damit wirtschaftlichere Verwendung der Materialien und kann damit einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Energie- und Stoffströme durch die Gebäudehülle leisten.

Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es, einen Manipulator [1.1] für die Gebäudehülle zu entwickeln, der unter Zuhilfenahme des vertikalen Schiebemechanismus sowie dem Einsatz opaker Öffnungsflügel neue Möglichkeiten für die natürliche Lüftung aufzeigt.

Konkret soll der Prototyp eines neuartigen Lüftungselements als Teil der Gebäudehülle unter Beachtung aller funktionalen und technischen Anforderungen sowie unter Beachtung des wichtigen Aspekts einer einfachen manuellen Bedienbarkeit entwickelt werden.

Die im Forschungsantrag ebenfalls angelegte Untersuchung von Kombinationsmöglichkeiten vertikaler Schiebefenster mit zusätzlichen Manipulatoren im Sinne einer Addition von Schichten wird zugunsten der oben beschriebenen baukonstruktiven Umsetzung des einschichtigen Öffnungselements zurückgestellt. Im Laufe der Bearbeitung zeigt sich, dass gegenüber vorhandenen vertikal verschiebbaren Systemen – insbesondere hinsichtlich der Handhabung – ein großes Entwicklungspotential besteht. Eine gute Kombinationsfähigkeit mit weiteren Manipulatoren – auch marktüblichen, wie beispielsweise vertikal verfahrbaren Verschattungs- oder Blendschutzsystemen – liegt in der Natur des vertikalen Schiebemechanismus und stellt aus Sicht der Bearbeiter kein dringliches Problem dar.

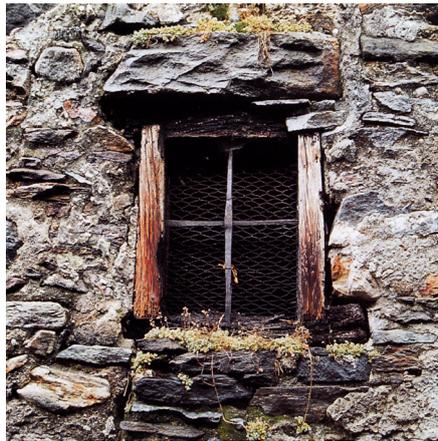


Bild 1.1 Massivwand mit kleiner Öffnung



Bild 1.2 Festverglasung mit opaken Lüftungselementen aus Holz (Drehflügel); ZVK Wiesbaden, Arch. Herzog+Partner

Projektverlauf

Zuerst wird mit Hilfe eines schrittweisen Auswahlverfahrens die Leistungsfähigkeit theoretisch möglicher Konfigurationen vertikaler Schiebesysteme untersucht und deren Potentiale abgeschätzt. Anschließend werden historische und aktuelle Beispiele recherchiert und hinsichtlich Ihrer Handhabung und Wirkungsweise analysiert.

Als Ergebnis der theoretischen Untersuchungen und im Hinblick auf die in der Analyse festgestellten Schwächen vorhandener Systeme wird anhand von Leistungsmerkmalen ein verbessertes Öffnungselement definiert. Im weiteren Projektverlauf werden mit Unterstützung durch externe Ingenieurbüros Computersimulationen durchgeführt, um die Lüftungseigenschaften des Lösungsansatzes einschätzen zu können. Zudem werden in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Biberach an einem Modell im Maßstab 1:1 Messungen unter realen Bedingungen vorgenommen.

Parallel erfolgt anhand von Arbeitsmodellen die technische Annäherung an den Bau eines Prototyps. Diese Entwicklungsarbeit findet in engem Austausch mit einer Fasadensbaufirma und einem Getriebehersteller statt. Ein erster Prototyp wird auf der internationalen Messe Bau 2007 in München ausgestellt.

Nach einer Phase der technischen Überarbeitung wird der Prototyp erfolgreich Prüfungen und Belastungstests unterzogen, die notwendig sind, um die Zulassung für den Einbau in konkreten Bauvorhaben vorzubereiten.

Derzeit werden weitere Ansätze für eine Optimierung der Mechanik und der Bedienung untersucht, um die Chancen für eine erfolgreiche Markteinführung steigern zu können. Ziel ist es, die Ergebnisse in einem weiteren Prototyp zusammenzuführen, der als Anschauungsobjekt für das Fachpublikum und für mögliche Auftraggeber dienen könnte.

2. Bedarfsanalyse und Definition der Leistungsmerkmale

Ausgehend von den spezifischen Vorteilen des Vertikalschiebemechanismus wird für das Öffnungselement zunächst ein konkreter Anwendungsfall ermittelt. Die theoretisch möglichen Schiebekonfigurationen werden dazu schrittweise eingegrenzt. Die Kriterien sind die zu erwartende Lüftungseffizienz, eine Abschätzung der Praxistauglichkeit sowie die technische Umsetzbarkeit und Bedienung. Als Synthese dieser Betrachtungen und einer Analyse historischer Beispiele und der am Markt vorhandenen Systeme werden die maßgeblichen Leistungsmerkmale definiert.

2.1 Potentialabschätzung vertikaler Schiebekonfigurationen

Ausgangspunkt ist eine Analyse der theoretisch möglichen Schiebeschemata unter Voraussetzung bestimmter Annahmen. Im Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit wird die maximale Komplexität der Varianten durch eine Einschränkung der Parameter wie folgt eingegrenzt:

- Maximale Anzahl der hintereinander liegenden vertikalen Ebenen: 3
- Maximale Anzahl der vertikal verschiebbaren Flügel: 3
- Maximale Anzahl der hintereinander liegenden vertikalen Ebenen mit vertikal verschiebbaren Flügeln: 3

Ermittlung lüftungsrelevanter Systemkennwerte

In einem ersten Schritt werden die relevanten Öffnungszustände der Konfigurationen dargestellt und die für die Lüftung maßgeblichen Kennwerte ermittelt.

- geschlossen
- symmetrische Doppelspaltlüftung für Dauerlüftung
- symmetrische Doppelspaltlüftung mit maximaler Öffnung
- Öffnung für maximalen zusammenhängenden Querschnitt

Folgende Kennwerte werden in Relation zur Systemhöhe (hg) ermittelt:

- ds: maximaler Abstand der Öffnungsspalte für die Dauerlüftung
- As: maximaler Querschnitt, linear symmetrische Öffnung
- Az: maximaler Querschnitt, zusammenhängende Öffnung

Die Varianten werden gemäß ihrer Leistung in den genannten Kennwerten geordnet. Bei gleichen Kennwerten wird die Konfiguration mit dem geringer einzuschätzenden technischen Aufwand vorangestellt und eine erste Auswahl getroffen [Abb. 2.1]. Nun werden die Konfigurationen noch ausgeschlossen, die keine symmetrische Doppelspaltöffnung zulassen.

Abschätzung der Praxistauglichkeit

Im zweiten Schritt erfolgt eine Abschätzung der Praxistauglichkeit der Systeme bezogen auf eine Einbausituation mit einer angenommenen Raumhöhe von 2,80 m. Die ausgewählten Konfigurationen bestehen aus Fassadenelementen mit einer 3er, 4er und 5er Teilung und werden hinsichtlich ihrer geometrischen Anpassbarkeit an folgende Kriterien untersucht:

- Absturzsicherung durch eine Brüstungshöhe von 0,9 m und 1,1 m
- Eignung als Fluchtweg bei einer zusammenhängenden Öffnung von mindestens 0,6 m x 1,1 m
- freier Durchblick auf mittlerer Höhe im Öffnungszustand

Die vertikal dreigeteilte Konfiguration wird der funktionalen Zonierung einer geschosshohen Fassade in folgende drei Bereiche unmittelbar gerecht: Brüstungsbereich, Bereich des Blickfelds und Oberlichtbereich. Die 4er Teilung bringt demgegenüber keinen zusätzlichen Nutzen.

Systeme mit fest stehendem Mittelteil sind nicht zweckmäßig. Sinnvoller ist die Anordnung der festen Flügel an den Rändern des Systems (also oben oder unten). Mit einer Vergrößerung oder Verkleinerung des beweglichen Flügels gegenüber seiner Parkposition kann keine wertbare Verbesserung des Gesamtlüftungsverhaltens erzielt werden. Jede Einzelwertverbesserung wird durch eine Minderung der Flexibilität und eine Verschlechterung gleichrangiger Kennwerte aufgehoben.

Die Varianten werden gemäß ihrer Beurteilung in eine Rangfolge eingeordnet. Für die weitere Untersuchung werden demzufolge Konfigurationen mit einer 3-Teilung gewählt.

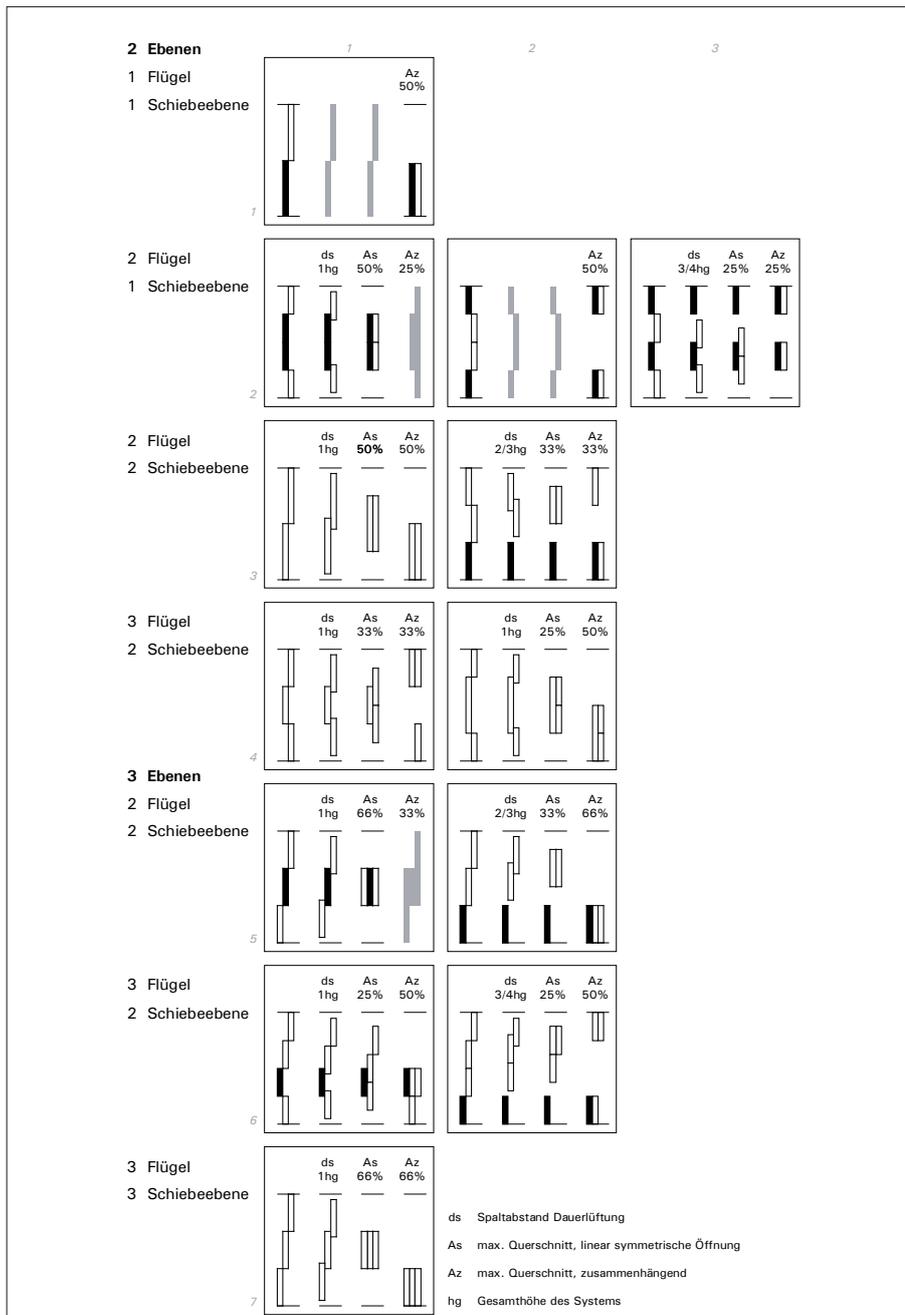


Abb. 2.1 Systemkennwerte

Öffnungsvorgang und Handhabung

Im dritten Schritt wird der Bewegungsablauf für den Öffnungsvorgang in Einzelphasen hinsichtlich folgender Kriterien der Bedienbarkeit untersucht [Abb. 2.2]:

- Erreichbarkeit der Handhabe in allen Öffnungszuständen
- Anzahl der notwendigen Bewegungsvorgänge für die Dauerlüftung
- Anzahl der notwendigen Bewegungsvorgänge für die Vollöffnung

Dabei kommen auch unterschiedliche Kopplungsarten der Flügel (starr, gelenkig, gegenläufig, gleichläufig) in Betracht. In der Grafik sind die Varianten durch einen Zifferncode bezeichnet, der die Anzahl der Ebenen, die Anzahl der Bewegungsflügel und die Anzahl der Ebenen mit Bewegungsflügel wiedergibt. Ausgehend vom geschlossenen Zustand ist nach links der Bewegungsvorgang für die Dauerlüftung und nach rechts der Ablauf für die Vollöffnung, fallweise mit integrierter Dauerlüftung, angetragen. Die Pfeile markieren die relevanten Betriebszustände „Dauerlüftung“ (grau), maximale Spaltlüftung (weiß) und Vollöffnung (schwarz).

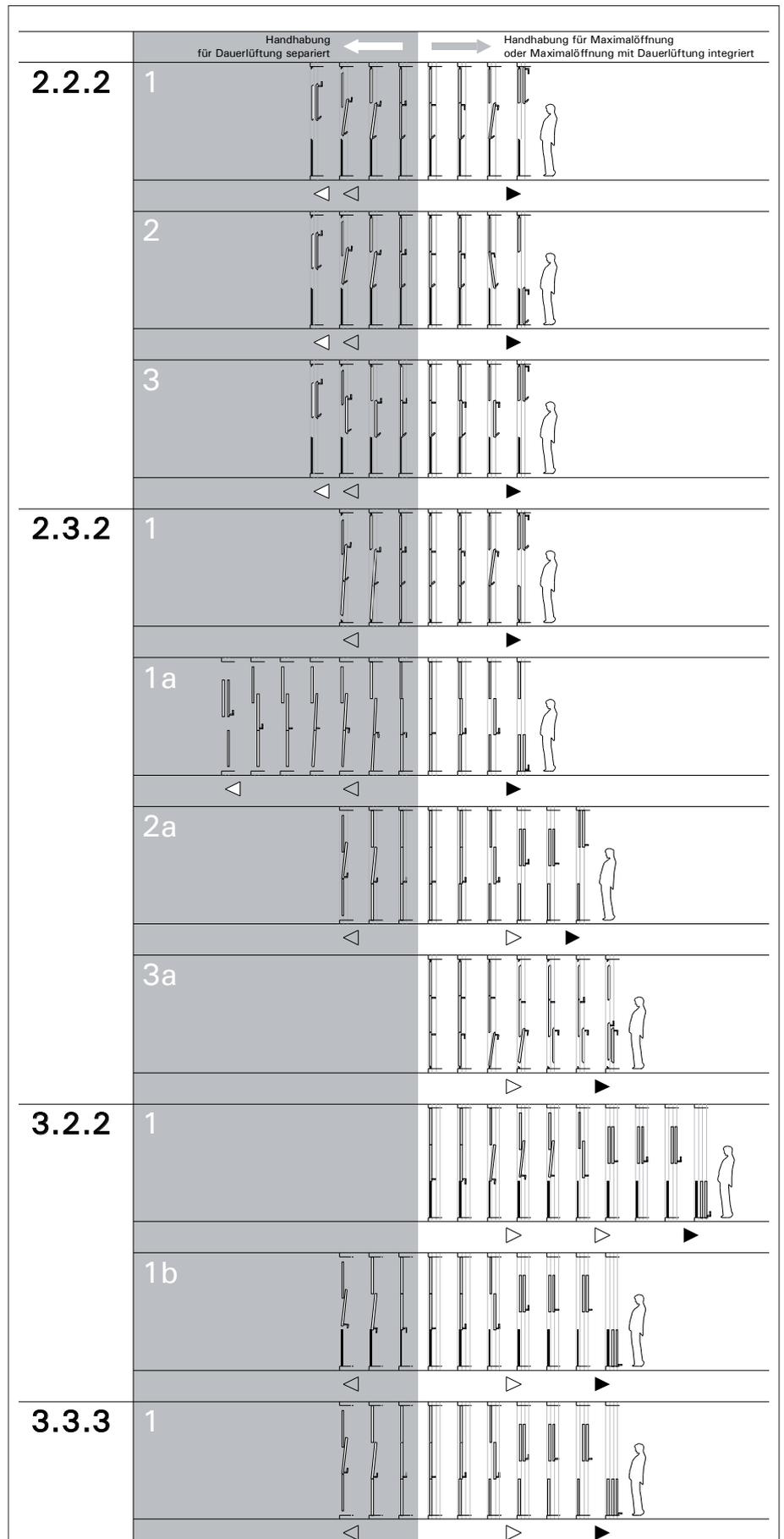


Abb. 2.2 Ausgewählte Beispiele Öffnungsvorgang

Bewertung

Die Handhabbarkeit dreier beweglicher Flügel unter der Voraussetzung einer guten Erreichbarkeit aller Flügel erweist sich als komplexer Vorgang und daher untauglich für die Praxis. Die für die Bedienbarkeit notwendige Kopplung der Flügel zu einem Doppelflügel lässt eine komplizierte Detailausbildung erwarten. Die Trennung des Bewegungsablaufs für Spaltlüftung von den Öffnungsarten Stoßlüftung und symmetrischer Lüftung ist hinsichtlich der Benutzbarkeit denkbar, ein direkter Übergang zwischen den jeweiligen Lüftungsarten wäre für die Benutzung wünschenswert. Die Einbeziehung der Brüstung zur geschosshohen Lüftung erscheint aufwendig, weil der Schiebemechanismus in Bodennähe aus Gründen der Betriebssicherheit nur spalthoch geöffnet werden kann. Bei der weiteren Untersuchung werden Konfigurationen mit einem 2-teiligen Schiebemechanismus oberhalb der Brüstungsebene bevorzugt betrachtet.

2.2 Marktrecherche und Analyse historischer Beispiele

Historische Beispiele

Die Recherche historischer Beispiele zeigt, dass das Vertikalschiebefenster auf eine lange Tradition zurückblickt. Einen entscheidenden Entwicklungsschub stellt der Einbau eines Systems zum Ausgleich des Flügelgewichts dar bei dem Gegengewichte über Schnüre und eine Umlenkrolle mit den Flügeln verbunden sind.

Diese Entwicklung findet im Wesentlichen in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts in England als Weiterentwicklung des französischen Vertikalschiebefensters ohne Gegengewicht statt. Der vor über 300 Jahren entwickelte Mechanismus des vertikal verschiebbaren Fensters mit Gegengewicht - in angelsächsischen Ländern unter der Bezeichnung ‚sash-window‘ oder ‚vertical sliding window‘ [Bild 2.1] bekannt - bildet auch für die meisten der heute erhältlichen Systeme die Grundlage. Das Prinzip des Gegengewichts wird in modifizierter Form auch bei gegenseitig aneinander gehängten Fensterflügeln angewendet. Die Verwendung von Vertikalschiebefenstern ist in Deutschland im 18. und 19. Jahrhundert an Bauwerken in Preußen und in ostfriesischen und sächsischen Bereichen belegt [2.1].

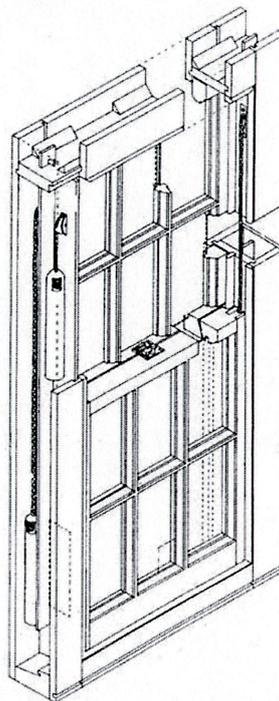


Bild 2.1 Konstruktiver Aufbau eines traditionellen Vertikal-Schiebefensters (sash-window)

Einen Überblick über die weitere Entwicklung und den Einsatz von Vertikalschiebefenstern vermitteln Konstruktionsbücher des 20. Jahrhunderts [2.2]. Dort nimmt das Vertikalschiebefenster mit einem breiten Anbieterspektrum einen gleichwertigen Platz neben den anderen Öffnungsarten ein. In Konstruktionsbüchern aus den 60er Jahren finden sich neben gegengewichts-basierenden auch feder-basierende Lösungen für vorzugsweise zweiflügelige Konfigurationen. Daneben gibt es sogar dreiflügelige Anordnungen. Als Vorzüge der Fenster werden die Sturmsicherheit, die Wirksamkeit der Lüftung, die Kombinationsmöglichkeit mit Insektenschutzvorrichtungen und Vorhängen sowie die Raumersparnis, als Nachteil vor allem die mangelnde Dichtigkeit genannt. Während im angelsächsischen und skandinavischen Raum auch heute noch einfache Vertikalschiebemechanismen gebräuchlich sind, wird im deutschsprachigen Raum die technische Weiterentwicklung ab den 70er Jahren nicht im notwendigen Maße weitergetrieben. Beispiele eingebauter Fenster finden sich in Deutschland noch im Schul- und Verwaltungsbau der 60er und 70er Jahre. Viele der damaligen Anbieter haben die Herstellung in den 80er Jahren aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die Gebäudehülle, der vergleichsweise hohen Kosten und der damit verbundenen geringen Absetzbarkeit eingestellt [2.3]. Laut Aussage der damaligen Anbieter gibt es aber eine permanente Nachfrage von Seiten der Planer.

Am Markt erhältliche Vertikalschiebesysteme

Die derzeit am europäischen Markt erhältlichen Systeme werden recherchiert. Die Recherche umfasst unabhängig vom Rahmenmaterial alle manuell bedienbaren Vertikalschiebesysteme für die Verwendung als Fenster in der Fassade. Aus Gründen der Vollständigkeit werden auch Lösungen berücksichtigt, die unlängst vom Markt genommen wurden.

Die Anfragen bei Beschläge- und Fensterherstellern ergeben, dass nur mehr ein vergleichsweise kleines Spektrum an unterschiedlichen Systemen angeboten wird [2.4]. In der Regel handelt es sich neben einflügeligen Fenstern um zweiflügelige Vertikalschiebefenster, deren Flügel entweder miteinander gekoppelt oder jeweils mit Gegengewichten bzw. Federn versehen sind. Bei Fenstern mit Holzrahmen befinden sich die Flügel im geschlossenen Zustand in versetzten Ebenen, im Metallbereich vorzugsweise in einer Ebene und werden mit Hilfe seitlich verkröpfter Führungsnuten aus der Dichtung geführt [Bild 2.2].

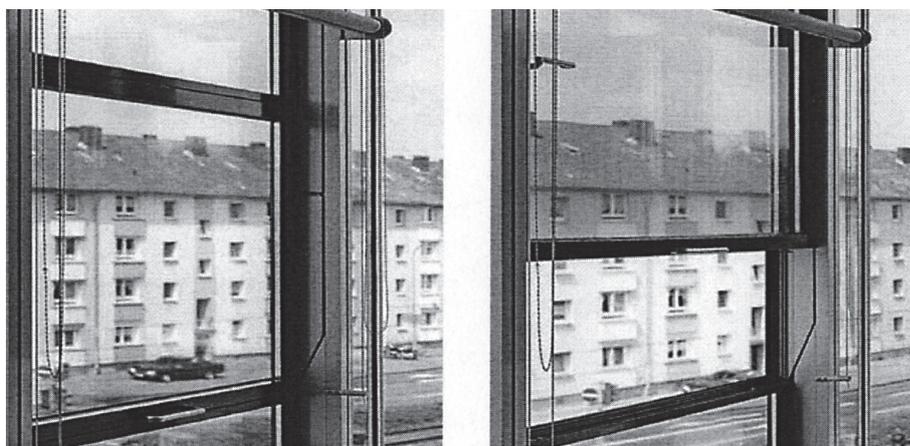


Bild 2.2 Vertikalschiebefenster mit gekoppelten Flügeln und verkröpfter Führungsnut (li.: geschlossen, re.: geöffnet)

Betrachtet man die Ergebnisse der Marktrecherche, gibt es nach derzeitigem Stand der Technik drei Ausführungsvarianten für 2-teilige, manuell zu betätigende Vertikalschiebemechanismen:

- Ausführungsart 1 mit einzeln verschiebbaren Flügeln:
Die ausschließlich getrennte Handhabung der Flügel bringt eine engere Begrenzung der Elementgrößen und Einbauhöhen mit sich, da der obere Flügel auch in geschlossenem Zustand manuell erreichbar sein muss.
- Ausführungsart 2 mit gegenläufig gekoppelten Flügeln (zwei Varianten):
Die Flügel bewegen sich beim Öffnen aufeinander zu. Der maximal zusammenhängende Öffnungsquerschnitt ist auf die halbe Flügelgröße beschränkt.
Die Flügel bewegen sich beim Öffnen voneinander weg. Es lassen sich nicht zwei separate Öffnungen herstellen. Zudem benötigen beide Flügel in geöffnetem Zustand Platz außerhalb der Systemhöhe des geschlossenen Zustands.
- Ausführungsart 3 mit nur einem verschiebbaren Flügel:
Es lässt sich keine Doppelspaltöffnung herstellen.

2.3 Definition der Leistungsmerkmale

Die theoretischen Untersuchungen erbringen als Ergebnis eine Auswahl geeigneter Konfigurationen unterschiedlicher Komplexität hinsichtlich Ebenenanzahl, Anzahl der beweglichen Flügel und Anzahl der Verschiebeebenen. Konfigurationen mit mehr als zwei Verschiebeebenen lassen dabei nur einen geringen Mehrwert hinsichtlich des Lüftungsverhaltens bei vergleichsweise hohem technischen Aufwand erwarten. Erste überschlägige Volumenstromberechnungen zeigen außerdem, dass die Herstellung einer Lüftungsöffnung im Bodenbereich der Brüstung gegenüber geschlossenen Brüstungselementen keinen nennenswerten Vorteil bringt.

Setzt man die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen mit den Erkenntnissen der Marktrecherche in Beziehung, zeigt sich, dass selbst die Konfiguration mit dem geringsten Komplexitätsgrad unter den favorisierten Varianten, nämlich der 2-teilige Schiebemechanismus oberhalb der Brüstungsebene, mit den untersuchten Leistungsmerkmalen am Markt nicht vorhanden ist und bereits eine Umsetzung dieses Mecha-

nismus eine entscheidende Weiterentwicklung vorhandener Systeme im Sinne des Forschungsziels darstellt.

Aus den Nachteilen der erhältlichen Systeme lässt sich für diese Konfiguration das folgende Hauptmerkmal als Zielsetzung ableiten:

Die Entwicklung eines Mechanismus, der bei ausschließlicher Betätigung des unteren Flügels beide für die Lüftung wichtigen Öffnungsarten erlaubt:

- Die Doppelspaltöffnung mit zwei voneinander getrennten Querschnitten für eine wirksame Dauerlüftung.
- Eine Öffnung mit einem großen, zusammenhängenden Öffnungsquerschnitt für die Stoßlüftung und Sekundärfunktionen wie etwa Ausblick oder Nutzung als Fluchtweg in mittlerer Höhe.

Das zu entwickelnde Vertikalschiebeelement besteht demnach aus einem Doppelflügel mit einer gegenläufigen Kopplung der Flügel. Nach Wahl des Nutzers lässt sich diese Kopplung durch die Betätigung der Handhabe inaktiv stellen. In dieser Einstellung lassen sich die Flügel entweder gleichlaufend gemeinsam verschieben, oder ein Flügel ist unabhängig vom anderen verschiebbar.

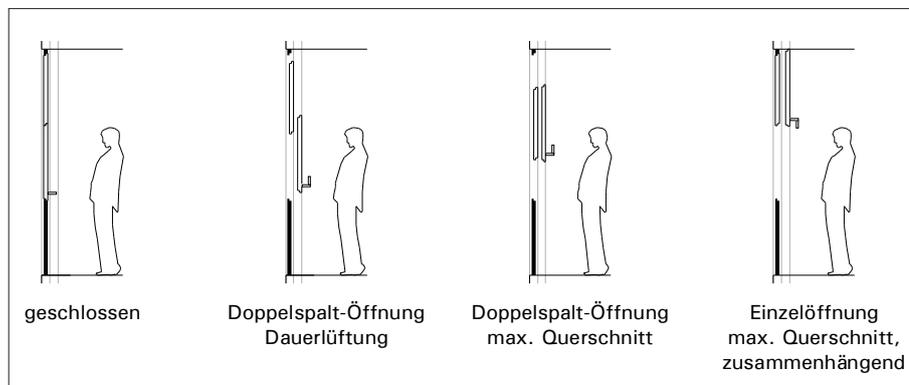


Abb. 2.3 Öffnungszustände der gewählten Konfiguration

3. Lüftungseigenschaften Kipp- und Vertikalschiebeelement im Vergleich

3.1 Lüftungssimulationen

Vor Beginn der technischen Durcharbeitung des Öffnungselements werden rechnerische Simulationen zur Abschätzung der zu erwartenden Lüftungseigenschaften durchgeführt. Um die Ergebnisse qualitativ bewerten zu können, laufen parallel Simulationen mit einem Kippelement in vergleichbarer Baugröße.

Die maßgeblichen Randbedingungen, die Einfluss nehmen auf das Strömungsverhalten im Lüftungsfall, sind der Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen, die Dauer des Lüftungsvorgangs sowie der Öffnungsgrad. Abhängig von den Klimaverhältnissen im jahres- und tageszeitlichen Wechsel werden für den Gebrauch relevante Lüftungsszenarien durch diese Parameter bestimmt.

In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Müller-BBM und dem Ingenieurbüro für Bauklimatik Hausladen + Meyer werden für die vergleichenden Computersimulationen drei relevante Lüftungsszenarien ausgewählt:

- winterliche Taglüftung
- sommerliche Taglüftung
- sommerliche Nachtlüftung

Für diese Szenarien werden in einem ersten Schritt zonale thermische Simulationen [3.1] erstellt, die den Luftwechsel über einen längeren Zeitraum quantifizieren und dabei den Einfluss der Speichermassen berücksichtigen.

Diese Berechnungen werden vom beauftragten Ingenieurbüro durchgeführt und die Ergebnisse gemeinsam ausgewertet.

Darauf aufbauend erstellt das Ingenieurbüro für Bauklimatik Hausladen + Meyer auf Basis numerischer Strömungsmechanik hochauflösende CFD-Simulationen (englisch: computational fluid dynamics) [3.2]. Mit dieser Methode können im Unterschied zur zonalen thermischen Simulation Luftbewegungen und Temperaturverteilungen im Raum differenziert abgebildet werden.

Durch das Ingenieurbüro Müller-BBM werden die Ergebnisse beider Untersuchungen in einem Bericht zusammen gestellt [3.3].

Simulationsaufbau

Als Rahmenbedingung für die Simulationen wird ein standardmäßiger, nicht klimatisierter Büroraum mit folgenden Eigenschaften angenommen:

Geometrie:

- Raamtiefe 5,4 m
- Raumbreite 2,6 m
- Raumhöhe 2,8 m

Umschließende Bauteile:

- Leichtbauinnenwände, dreiseitig, gegen klimatisch gleichwertige Räume
- Fassade mit Wärmeschutzisolierverglasung, außenliegender Alulamellenraffstore
- Geschoßdecke, Sichtbeton
- Hohlraumboden mit Estrich, Teppichbelag

Orientierung:

- Südwest

Interne Wärmelasten:

- Computerarbeitsplatz, Belegung mit einer Person

Ohne Berücksichtigung:

- Querlüftung
- Windeinfluss

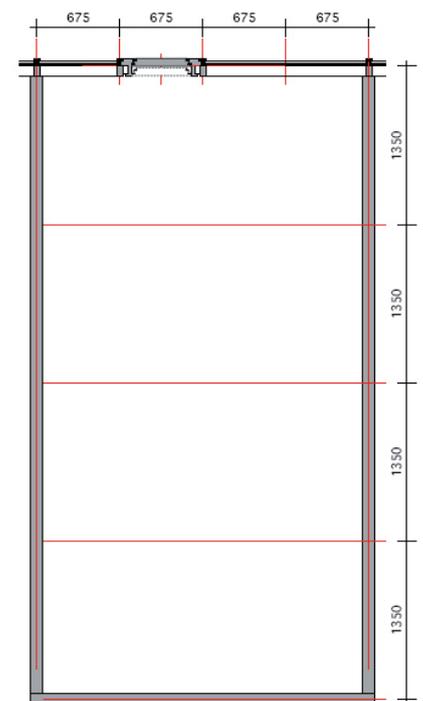


Abb. 3.1 Grundriss Versuchsraum

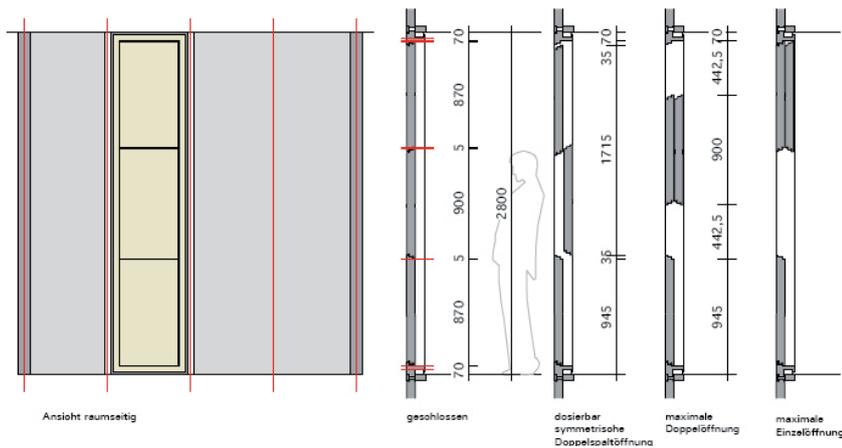


Abb. 3.2 Ansicht und Schnitt der Fassade mit Vertikalschiebeelement

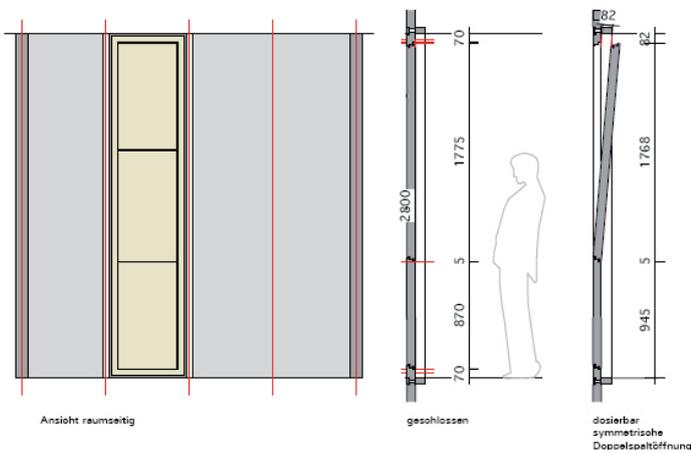


Abb. 3.3 Ansicht und Schnitt des standardmäßigen Kippelements (Vergleichselement)

3.1.1 Zonale thermische Simulation

Die zonale thermische Simulation (häufig auch als „thermische Gebäudesimulation“ oder „dynamische Simulation“ bezeichnet) bildet das thermische Verhalten eines Gebäudes oder Raumes unter Berücksichtigung aller wesentlichen Energieströme ab. Dabei wird die Fensterlüftung in Form von zeitvariablen Lüftungsvolumenströmen und somit energetisch korrekt abgebildet. Dieser weit verbreitete Simulationstypus basiert auf Zonen, welche die Bilanzgrenzen für die Energieströme darstellen. Ein Raum wird dabei typischerweise durch eine einzelne Zone abgebildet. Als Ergebnis liefert dieser Simulationstypus den zeitlichen Verlauf sowohl aller auftretender Wärme- und Luftvolumenströme als auch der Luft- und Strahlungstemperaturen bzw. der daraus abgeleiteten Empfindungstemperatur.

In einem ersten Ansatz werden für die beiden Öffnungstypen die erreichbare Lüftungsintensität und die daraus resultierenden sommerlichen Temperaturen ermittelt und vergleichend gegenübergestellt. Hierzu liefern die zonalen thermischen Simulationen als Ergebnis den zeitlichen Verlauf des Lüftungsvolumenstroms und die daraus resultierenden sommerlichen Temperaturen in dem exemplarisch betrachteten Büroraum. Der Lüftungsvolumenstrom variiert mit der Lufttemperaturdifferenz zwischen dem Rauminneren und der Umgebung. Die ermittelten Temperaturen stellen zwar räumliche Mittelwerte dar, reichen jedoch für einen ersten Vergleich der beiden Öffnungsarten aus.

Als Ergebnis lassen sich erste bewertende Aussagen hinsichtlich erreichbarer Lüftungsintensität (Frischluftzufuhr, Raumtemperatur) und resultierender thermischer Behaglichkeit ableiten. Darüber hinaus liefern die zonalen thermischen Simulationen auch die Eingangsgrößen für die nachfolgend durchgeführten CFD-Simulationen.

Thermische Rahmenbedingungen

Für die zuvor beschriebene Simulationssituation werden folgende thermische Rahmenbedingung angenommen:

Die zugrunde gelegten Wetterdaten basieren auf den VDI Richtlinien 2078 für heiße Tage im Juli mit maximalen Außentemperaturen von 32° C um 16:00 Uhr.

Der fiktive Standort befindet sich im Stadtkern von München.

Als Worst-Case Szenario wird ein Tag gegen Ende einer ausgeprägten Schönwetterperiode mit heißen, windarmen Tagen gewählt.

Aerodynamisch wirksame Flächen

Die für den Luftwechselvergleich entscheidende Größe wird als aerodynamisch wirksame Fläche bezeichnet. Diese Größe ist das Produkt der Projektionsfläche und dem spezifischen Durchflussbeiwert c_v der Öffnungsart:

- Kippflügel 5° $F_a = 0,073 \text{ m}^2$
- Doppelspaltöffnung, maximal $F_a = 0,240 \text{ m}^2$
- Doppelspaltöffnung, 10 cm $F_a = 0,055 \text{ m}^2$

Während der Kippflügel im Betrachtungszeitraum permanent 5° geöffnet ist, befindet sich das Vertikalschiebeelement tagsüber in der Position der maximalen Doppelspaltöffnung und zwischen 18 - 8 Uhr im Hinblick auf den Witterungs- und Einbruchschutz in einer auf 10 cm verringerten Öffnungshöhe.

Als Ausnahme wird in den nachfolgend aufgeführten Varianten 3a und 3b der Einsatz einer elektromotorischen Steuerung des Vertikalschiebeelements vorgesehen. Dadurch kann die maximale Spaltöffnung für niederschlagsfreie Nächte angenommen werden.

Lüftungsszenarien

Tabelle 3.1 Lüftungsszenarien

Grundszenario:	manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung
Variante 1:	manuelle Fensterbedienung ohne Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung
Variante 2:	manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung
Variante 3a:	elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung, ohne Betonkernkühlung (Vollöffnung des Schiebelements in niederschlagsfreien Nächten)
Variante 3b:	elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung (Vollöffnung des Schiebelements in niederschlagsfreien Nächten)

Die Varianten 1, 2 und 3b sehen zur Nutzung der Wärmespeicherkapazität zu Kühlzwecken eine Betonkernkühlung vor. Der damit verbundene Aufwand ist bei der vergleichenden Bewertung der Simulationsergebnisse zu berücksichtigen.

Kennwerte

Folgende Kennwerte werden errechnet:

- Raumtemperaturverlauf
- Empfundene Temperatur
- Luftwechsel

In jeweils drei Diagrammen werden für jedes Lüftungsszenario aufgezeigt:

- Einschwingvorgang
- Temperaturen und Lüftungsintensität
- Häufigkeit erhöhter Empfindungstemperatur

Bei der Betrachtung des Lüftungsverhaltens im Sommer hat die Erwärmung der umgebenden Bauteile einen Einfluss auf die Temperaturentwicklung im Raum. Im Verlauf von mehreren Wochen schwingt die Raumlufttemperatur im Tag-Nachtwechsel mit einem insgesamt ansteigenden Temperaturverlauf ein.

Die nachfolgend abgebildeten Diagramme zeigen die Einschwingvorgänge der Lüftungsszenarien für das Grundszenario und alle Varianten im Überblick.

In einem zweiten Diagramm wird über einen Zeitraum von 24 Stunden die Wechselbeziehung zwischen Luftwechsel, Außenlufttemperatur, Raumlufttemperatur und der empfundenen Temperatur in einem Kurvendiagramm wiedergegeben.

Die dritte Darstellung zeigt die Häufigkeit erhöhter sommerlicher Empfindungstemperaturen im Verlauf eines ganzen Jahres.

Grundszenario:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung

Variante 1:
manuelle Fensterbedienung ohne Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.

Variante 2:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.

Variante 3:
elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung
(Vollöffnung in niederschlagsfreien Nächten).
3a (re) ohne Betonkernkühlung
3b (li) mit Betonkernkühlung

Kippelement

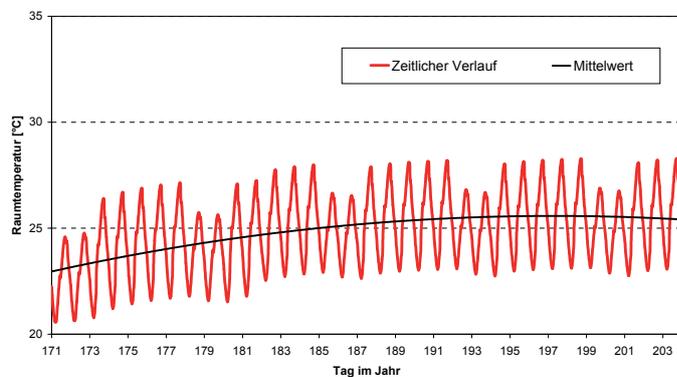
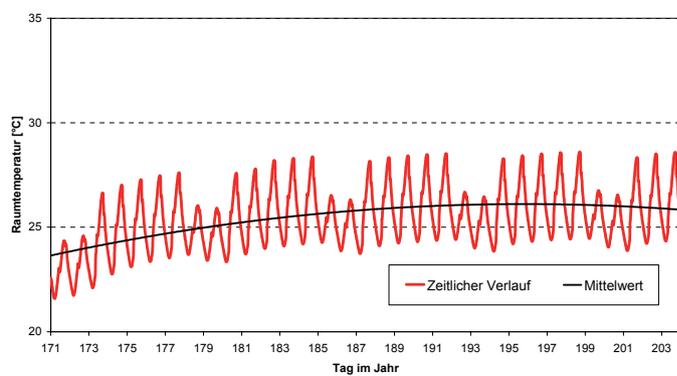
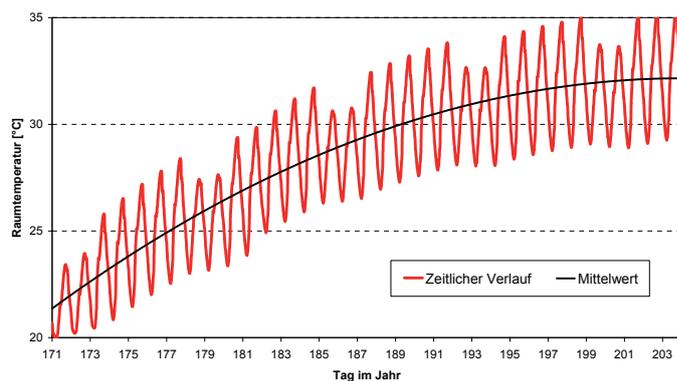


Abb. 3.4 Einschwingvorgänge Kippelement

Schiebeelement

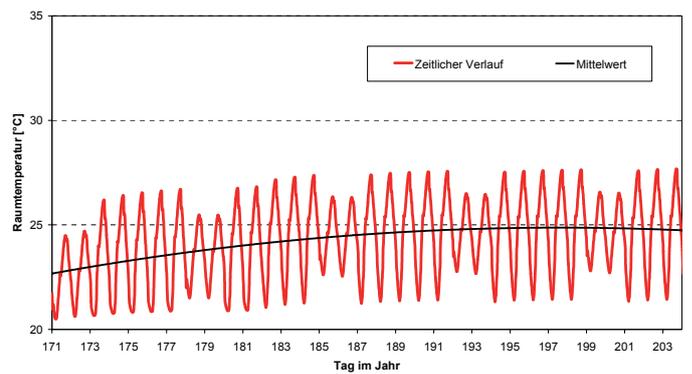
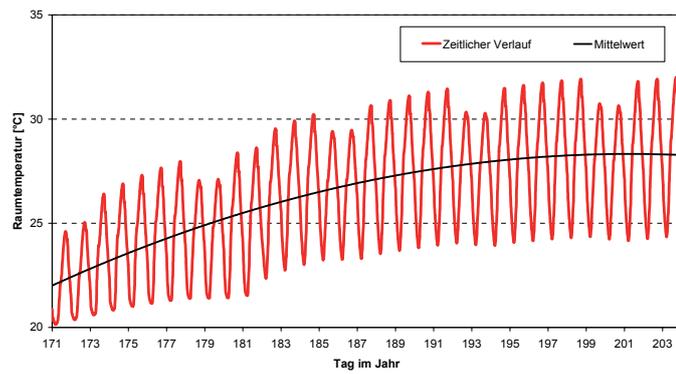
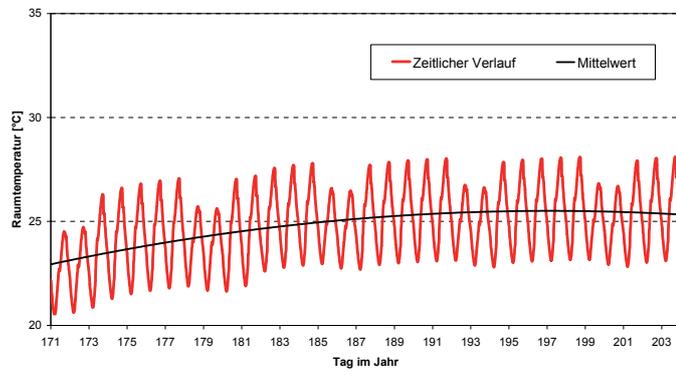
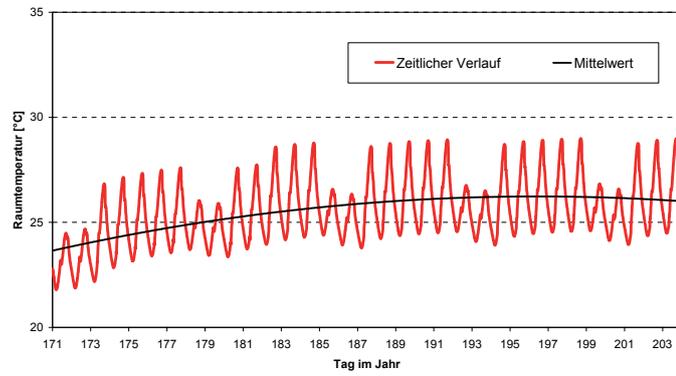
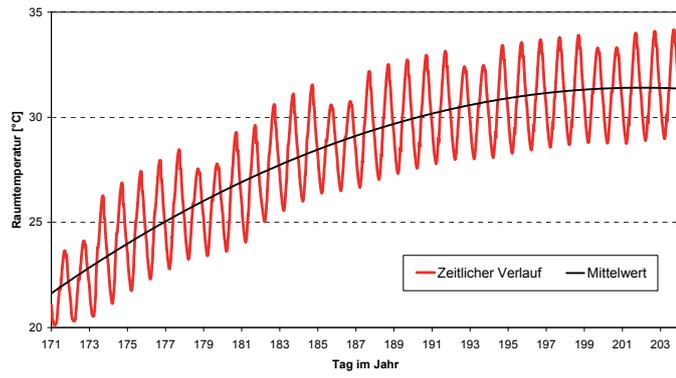
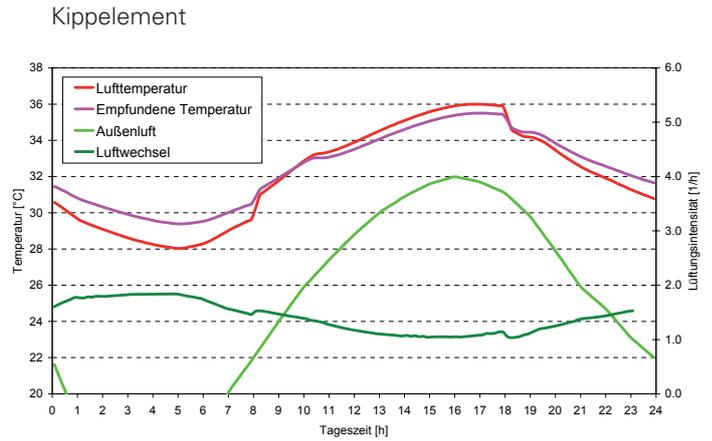
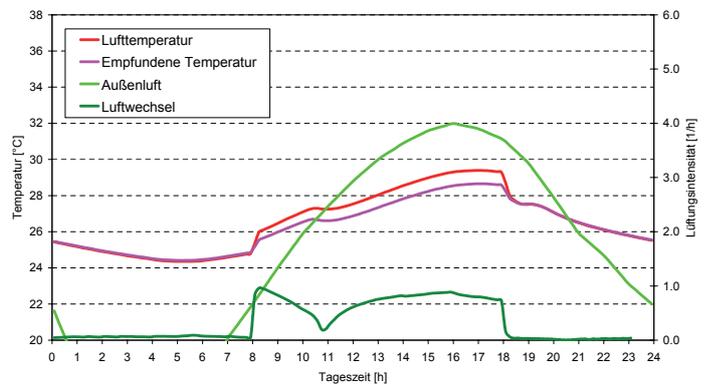


Abb. 3.5 Einschwingvorgänge Schiebeelement

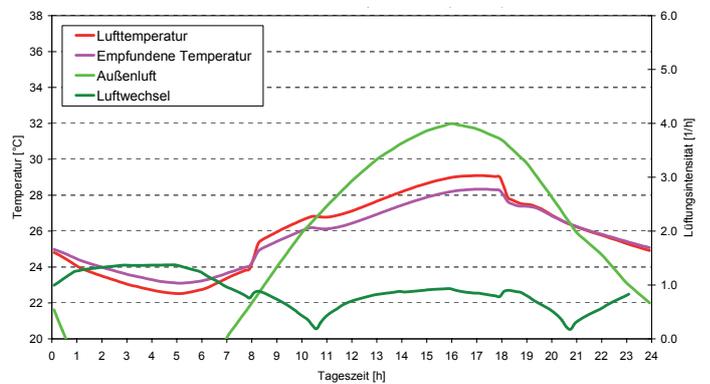
Grundszenario:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung



Variante 1:
manuelle Fensterbedienung ohne Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.



Variante 2:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.



Variante 3:
elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung
(Vollöffnung in niederschlagsfreien Nächten).
3a (re) ohne Betonkernkühlung
3b (li) mit Betonkernkühlung

Abb. 3.6 Temperaturen und Lüftungsintensität Kippelement

Schiebeelement

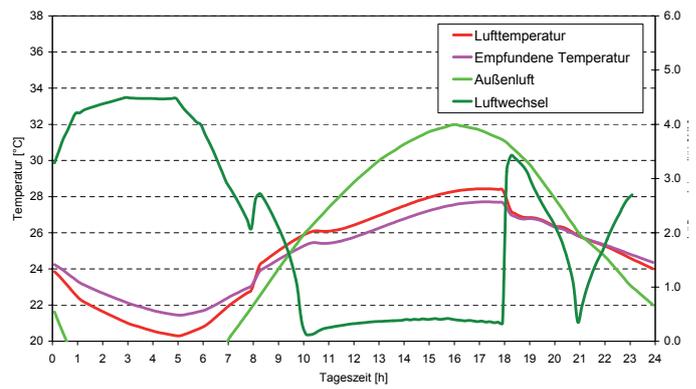
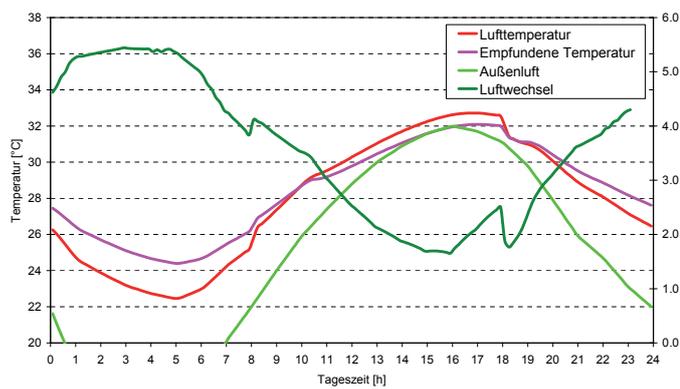
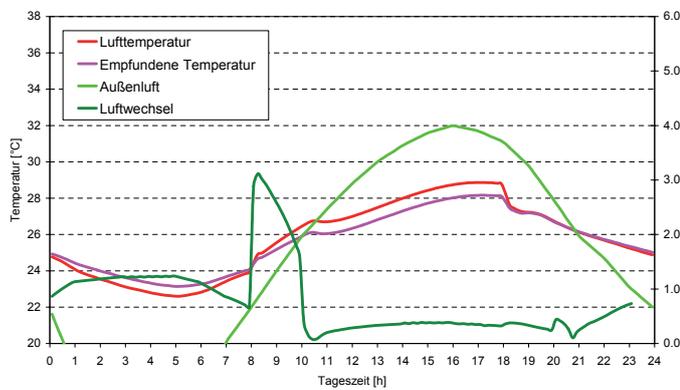
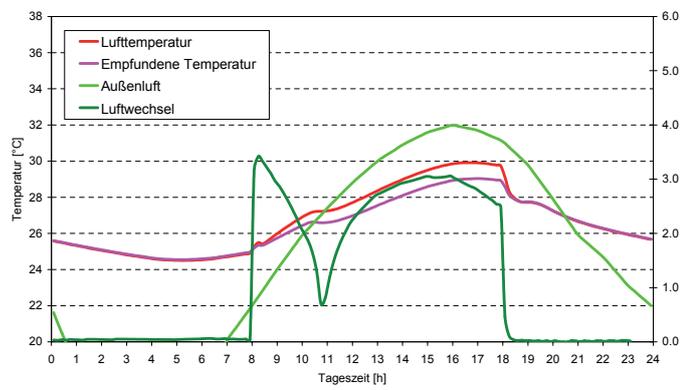
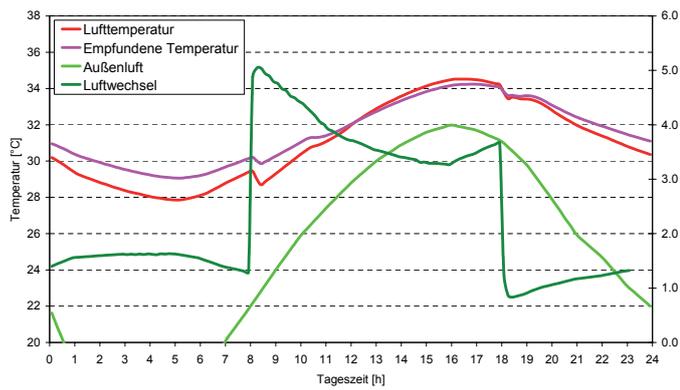
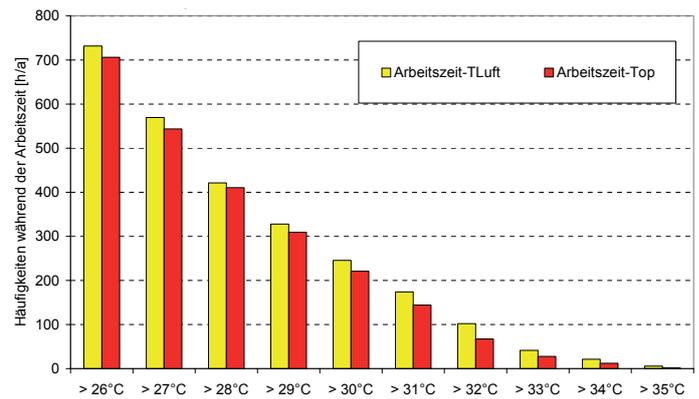


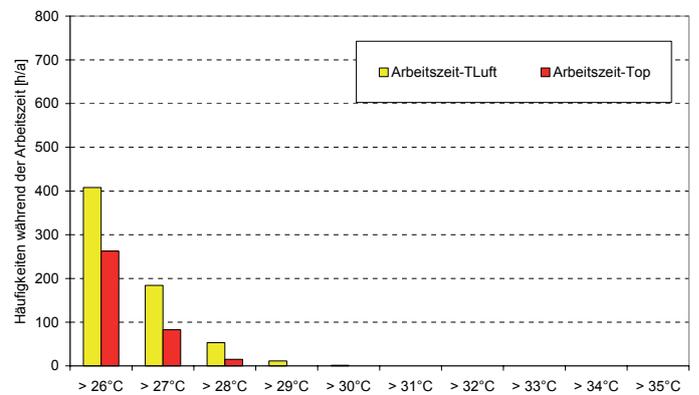
Abb. 3.7 Temperaturen und Lüftungsintensität Schiebeelement

Grundszenario:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung

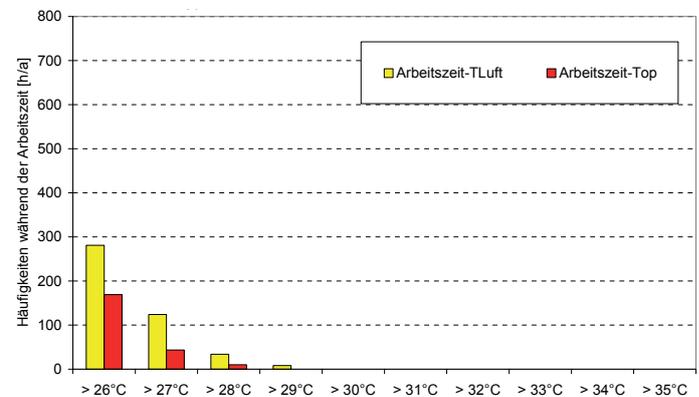
Kippelement



Variante 1:
manuelle Fensterbedienung ohne Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.



Variante 2:
manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung,
mit Betonkernkühlung.



Variante 3:
elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung
(Vollöffnung in niederschlagsfreien Nächten).
3a (re) ohne Betonkernkühlung
3b (li) mit Betonkernkühlung

Abb. 3.8 Häufigkeit erhöhter Temperaturen Kippelement

Schiebeelement

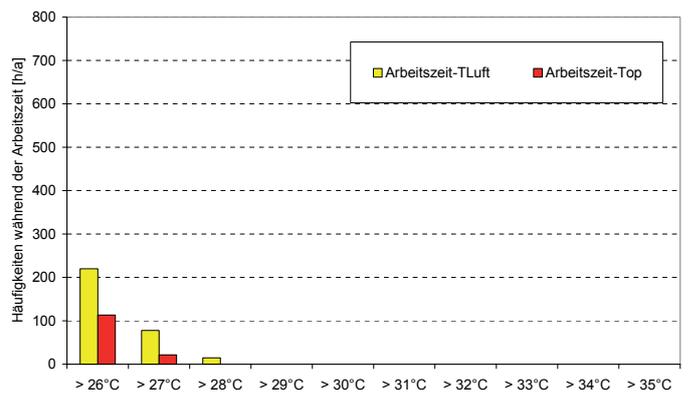
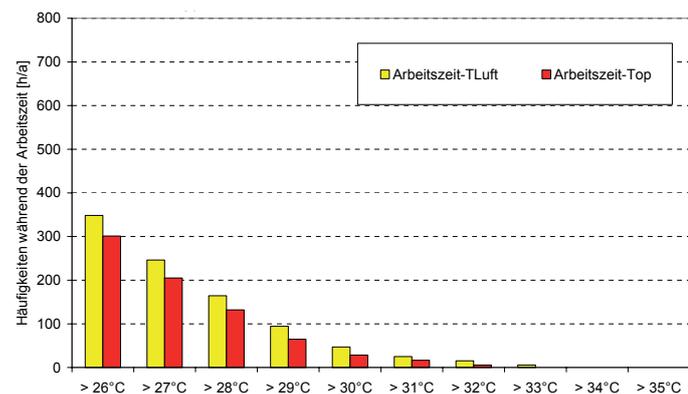
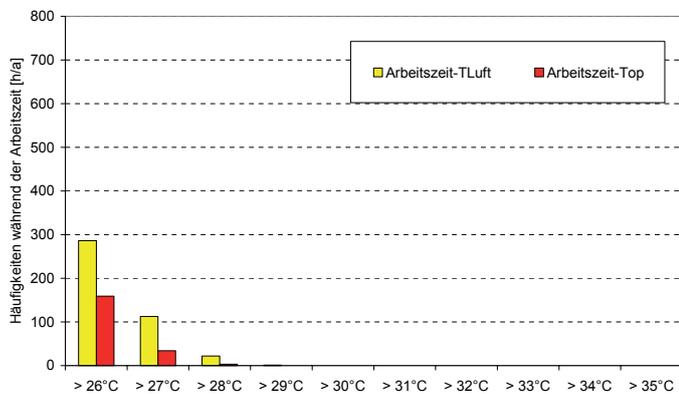
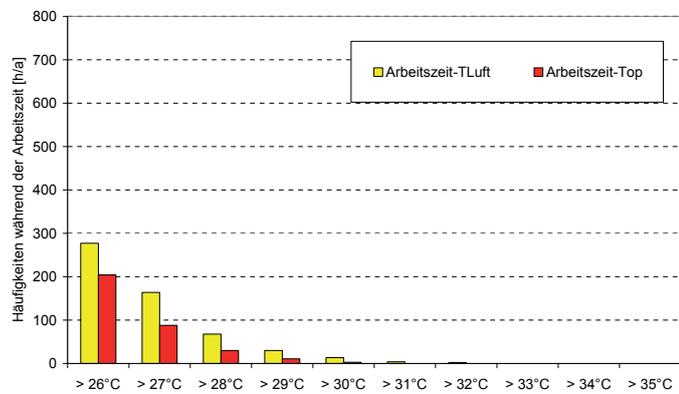
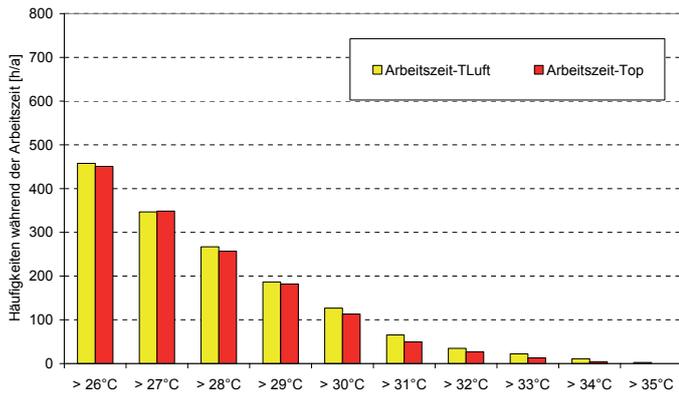


Abb. 3.9 Häufigkeit erhöhter Temperaturen Schiebeelement

3.1.2 Ergebnis

Tabelle 3.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

		Kippelement	Vertikalschiebeelement
Grundszenario manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung	Lufttemp.max Lufttemp.mittel Einschwingzeit Luftw. Nacht Luftw. Tag empf.Temp > 26 empf.Temp > 30	36°C 32-33°C 4 Wo 1,5-2,0 1/h 1,0-1,5 1/h 700 h/a 220 h/a	34°C 31°C 4 Wo 1,5-2,0 1/h 3,0-5,0 1/h 450 h/a 110 h/a
Variante 1 manuelle Fensterbedienung ohne Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung	Lufttemp.max Lufttemp.mittel Einschwingzeit Luftw. Nacht Luftw. Tag empf.Temp > 26 empf.Temp > 30	28-29°C 26-27°C 2-3 Wo - 0,5-1,0 1/h 260 h/a 10 h/a	28-29°C 26-27°C 2-3 Wo - 2,0-3,0 1/h 205 h/a 10 h/a
Variante 2 manuelle Fensterbedienung mit Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung	Lufttemp.max Lufttemp.mittel Einschwingzeit Luftw. Nacht Luftw. Tag empf.Temp > 26 empf.Temp > 30	27-28°C 26°C 2-3 Wo 0,5-1,0 1/h 1,5 1/h 170 h/a 0 h/a	28-29°C 26°C 2-3 Wo 0,5-1,5 1/h 0,5-3,0 1/h 170 h/a 0 h/a
Variante 3a elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung, ohne Betonkernkühlung	Lufttemp.max Lufttemp.mittel Einschwingzeit Luftw. Nacht Luftw. Tag empf.Temp > 26 empf.Temp > 30		32°C 28°C 3-4 Wo 4,0-5,0 1/h 1,5-4,0 1/h 300 h/a 30 h/a
Variante 3b elektromotorische Fensterbedienung mit Nachtlüftung, mit Betonkernkühlung	Lufttemp.max Lufttemp.mittel Einschwingzeit Luftw. Nacht Luftw. Tag empf.Temp > 26 empf.Temp > 30		27-28°C 25°C 2-3 Wo 4,0-5,0 1/h 0,5-2,5 1/h 115 h/a 0 h/a

Beim Vertikalschiebeelement zeigen sich im Vergleich zum Kippelement niedrigere Werte für die durchschnittliche und die maximale Raumtemperatur (34° C zu 36° C und 31° C zu 32 - 33° C). Die maximale Raumtemperatur wird um etwa 16 Uhr, knapp zeitversetzt zur maximalen Außenlufttemperatur von 32° C erreicht. Damit liegt die maximale Raumtemperatur beim Kippelement um 4° C über der Außenlufttemperatur, beim Vertikalschiebeelement um 2° C.

Die geringeren Raumtemperaturen beim Vertikalschiebeelement sind nicht auf eine bessere Lüftungseffizienz während der Nacht zurück zu führen, sondern auf die Vollöffnung tagsüber. Dabei wirken sich im Besonderen die kühlen Vormittagsstunden positiv aus. Beim Kippelement bleibt die Vollöffnung wegen der damit verbundenen funktionalen Nachteile unberücksichtigt.

Bei der Betrachtung der Häufigkeit erhöhter sommerlicher Empfindungstemperaturen zeigt sich, dass Arbeitsstunden mit empfundenen Temperaturen über 30° C beim Vertikalschiebeelement halb so häufig auftreten wie beim Kippelement. Arbeitsstunden mit empfundenen Temperaturen über 26° C reduzieren sich durch den Einsatz des Vertikalschiebeelements auf 2/3 der Stunden beim Kippelement.

Die Simulationen zeigen, dass in der Simulationssituation eine Senkung der Raumtemperatur unter die Außentemperatur nur durch die unterstützende Betonkernkühlung erreicht wird (Varianten 1, 2, 3b). Die kühle Oberflächentemperatur der Sichtbetondecke mit Betonkernkühlung wirkt sich zudem tagsüber positiv auf die empfundene Raumtemperatur aus.

In Variante 3a tangiert die empfundene Raumlufttemperatur die Kurve der Außenlufttemperatur.

Bewertung

Der hygienisch notwendige Luftwechsel ist erwartungsgemäß in allen Varianten gegeben.

Im Vergleich der Temperaturwerte schneidet das Vertikalschiebeelement besser ab als das Kippelement. Eine wirksame Raumentwärmung wird aber ohne Aktivtechnik (beispielhaft Betonkernaktivierung) in keiner der Varianten erreicht. Nur mit dieser lässt sich die Raumtemperatur unter die Temperatur der Außenluft absenken. Kombiniert man aktive Maßnahmen mit einem elektromotorisch betriebenen Vertikalschiebeelement, lassen sich die besten Bedingungen erreichen.

Die Tagesmitteltemperatur erreicht bei der angenommenen Simulationssituation zu keinem Zeitpunkt eine Temperatur von 26° C.

Die Wirkung der Betonkernkühlung überlagert die Unterschiede im Lüftungsverhalten zwischen dem Kippelement und dem manuell betriebenen Vertikalschiebeelement. Um weitergehende Erkenntnisse über die Lüftungsqualität des Vertikalschiebemechanismus zu gewinnen, konzentrieren sich die Betrachtungen im folgenden Forschungsverlauf daher auf die Varianten ohne Betonkernaktivierung.

Ausgehend von den quantitativen Ergebnissen der zonalen thermischen Simulationen werden, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, für ausgewählte Momentaufnahmen die Luftgeschwindigkeit sowie die Temperaturverteilung im Raum ermittelt, da diese Größen die Raumdurchströmung widerspiegeln.

3.1.3 CFD Simulation (englisch: computational fluid dynamics)

Im Gegensatz zur zonalen thermischen Simulation liefert die hochauflösende CFD-Simulation die räumliche Verteilung der Lufttemperatur und die lokalen Luftgeschwindigkeiten. Die örtliche Verteilung der Luftgeschwindigkeiten ergibt die Luftströmungen innerhalb des betrachteten Raumes. Bei diesem Simulationstypus wird der angenommene Simulationsraum in sehr viele so genannte „finite Volumen“ aufgeteilt. Dies erfordert eine hohe Rechnerleistung, so dass mit CFD-Simulationen nur sehr kurze bzw. stationäre Zustände simuliert werden. Die notwendigen Daten zu dynamischen Vorgängen, die über einen längeren Zeitraum ablaufen (in diesem Fall die Wärmespeicherung der massiven Bauteile) werden aus der vorgeschalteten zonalen thermischen Simulation entnommen.

Parameter und Kennwerte

Der Versuchsaufbau und die Rahmenbedingungen für die CFD-Simulation basieren auf den vorangegangenen zonalen thermischen Simulationen.

Für ausgewählte Zeitpunkte und Betriebssituationen werden die Lüftungseffizienz und die Behaglichkeit im Raum überprüft. Die Ergebnisse werden wieder mit denen eines konventionellen Kippflügels verglichen.

Es werden die folgenden drei Lüftungsszenarien betrachtet.

- Szenario 1: Lüftung zur Nachtauskühlung
- Szenario 2: Lüftung während der Arbeitszeit
- Szenario 3: Lüftung während der Arbeitszeit im Winterfall

Lüftung zur Nachtauskühlung (Szenario 1)

Für die Nachtlüftung ist neben dem Luftwechsel der Strömungsverlauf für eine wirksame Entwärmung der Speichermassen relevant.

In der zonalen thermischen Simulation des Grundszenarios ergeben sich beim Luftwechsel und beim Temperaturverlauf gleichwertige Ergebnisse beim Kippelement und Vertikalschiebeelement. Mit Hilfe der CFD-Simulation wird die Raumdurchströmung zu einem bestimmten Zeitpunkt im Tagesverlauf simuliert und dabei geprüft, ob sich bei einer der Öffnungsarten gegenüber der anderen Vorteile ergeben.

- Simulationszeitpunkt 3:30 Uhr, Tagesverlauf Grundszenario aus der zonalen thermischen Simulation
- Außentemperatur 16,4° C.

Lüftung während der Arbeitszeit (Szenario 2)

Für die Wirksamkeit einer einseitigen natürlichen Lüftung ist die Raumdurchströmung von Bedeutung, um die Luftqualität auch für tiefer im Raum liegende Arbeitsplätze aufrecht zu erhalten.

Da die zonale thermische Simulation zeigt, dass ohne Aktivtechnik zur Kühlung die Variante 3a den erforderlichen thermischen Bedingungen am nächsten kommt, wird diese Variante der CFD-Simulation zugrunde gelegt.

- Simulationszeitpunkt 15:30 Uhr, Tagesverlauf Variante 3a aus der zonalen thermischen Simulation
- Außentemperatur 31,7° C.

Lüftung während der Arbeitszeit im Winterfall (Szenario 3)

Beim Dreh-Kippflügel führt die natürliche Lüftung im Winter erfahrungsgemäß zu Zugerscheinungen und Unbehaglichkeit sowie einer nicht kontrollierbaren Entwärmung des Raums. Da der Vertikalschiebemechanismus die Möglichkeit bietet, den Öffnungsquerschnitt stufenlos einzustellen wird in der CFD-Simulation überprüft, ob bereits mit einer kleinen Spaltöffnung der hygienisch notwendige Luftwechsel ohne diese Nachteile erreicht wird.

Diesem Fall liegen keine Berechnungen aus der zonalen thermischen Simulation zugrunde, da der Einschwingvorgang im Winterfall nicht berücksichtigt werden muss.

- Simulationszeitpunkt 5 Minuten nach dem Öffnen
- Außentemperatur 0° C
- Innentemperatur 22,6° C (zum Zeitpunkt des Öffnens)
- Kippflügel, 5°, $F_a = 0,073 \text{ m}^2$ (aerodynamisch wirksame Fläche)
- Doppelspaltöffnung, 1,5 cm, $F_a = 0,008 \text{ m}^2$ (aerodynamisch wirksame Fläche)

Zunächst werden die Temperaturverhältnisse 60 Sekunden nach dem Öffnen simuliert. Nachfolgend wird die Raumauskühlung über einen Zeitraum von 5 Minuten visualisiert.

Kennwerte

In der CFD-Simulation werden jeweils folgende Werte berechnet:

- Oberflächentemperaturen
- Raumtemperaturen (gegliedert in Luft- und Strahlungstemperaturen)
- Luftgeschwindigkeiten

Daraus lassen sich folgende Qualitäten ableiten:

- Raumdurchspülung
- thermische Behaglichkeit

Ergebnis

Lüftung zur Nachtauskühlung (Szenario 1)

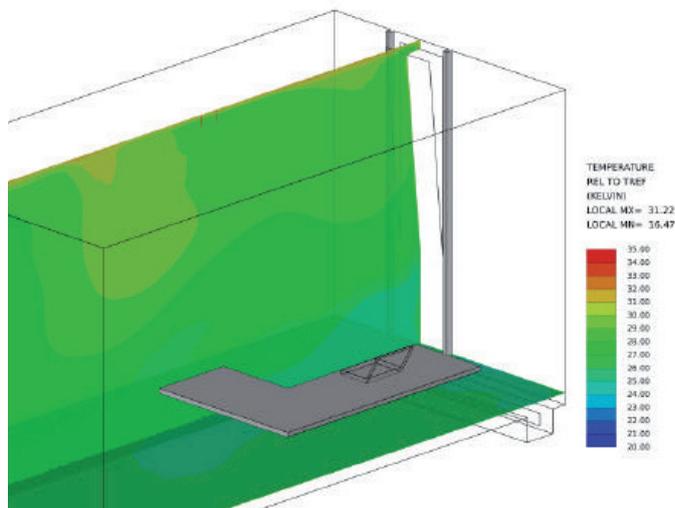


Abb. 3.10 Temperaturen in den frühen Morgenstunden im Sommer bei gekipptem Fenster

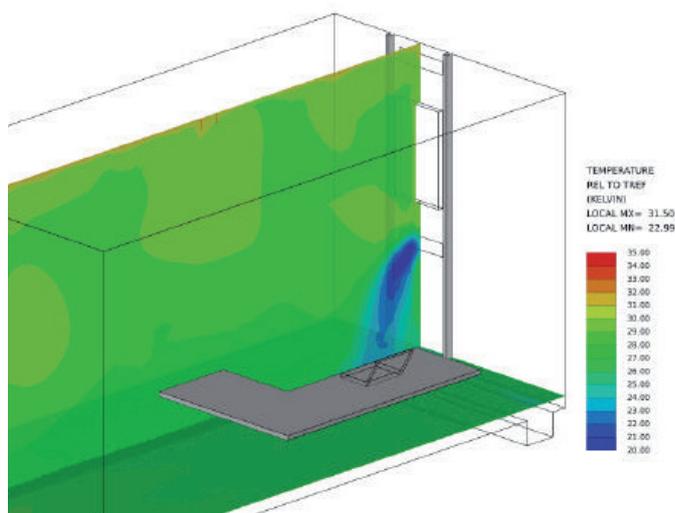


Abb. 3.11 Temperaturen in den frühen Morgenstunden im Sommer beim Schiebeelement

Die Abbildung zur Verteilung der Lufttemperatur zeigt beim Kippflügel eine thermische Schichtung mit 25 - 26° C im Bodenbereich und 29 - 31° C direkt unter der Decke. Der Mittelwert der Lufttemperatur entspricht mit ca. 28° C in etwa dem in der zonalen thermischen Simulation ermittelten Wert. Die durch den Kippflügel einströmende, kühle Außenluft breitet sich deutlich erkennbar im Bodenbereich aus. Dieses Ergebnis belegt die in der zonalen thermischen Simulation bereits gewonnene Erkenntnis, dass mittels geöffnetem Kippflügel während der Nachtlüftung eine Raumdurchspülung erreicht wird, die bewirkt, dass sich die Temperatur vom Öffnungselement bis zum hinteren Raumabschluss gleichmäßig verteilt, aber keine ausreichende Raumentwärmung entsteht. Beim Vertikalschiebeelement ergibt sich ein vergleichbares Bild. Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Raumdurchspülung bei Nachtlüftung kann zwischen dem Kippelement und dem Vertikalschiebeelement somit nicht konstatiert werden. Aufgrund des vorausgehenden Lüftungszeitraums haben sich die Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außen und die Temperaturschichtung im Raum bereits weitgehend angeglichen. Der Vorteil der Doppelspaltöffnung des Vertikalschiebeelements ist wegen der geringen Temperaturunterschiede nicht mehr wirksam.

Lüftung während der Arbeitszeit (Szenario 2)

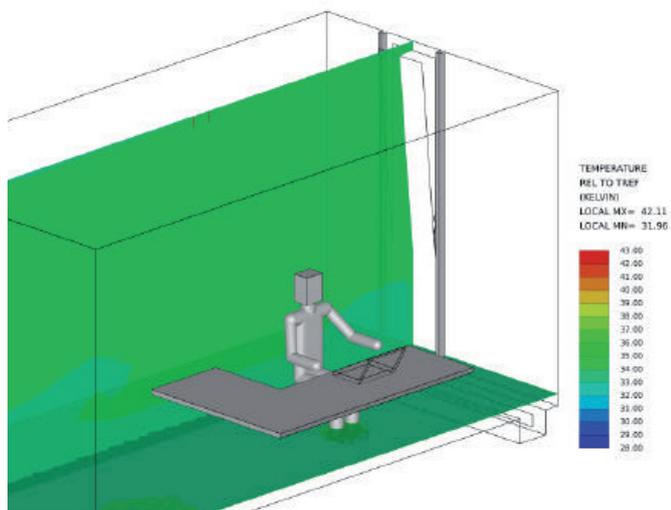


Abb. 3.12 Temperaturen an einem heißen Sommernachmittag bei gekipptem Fenster

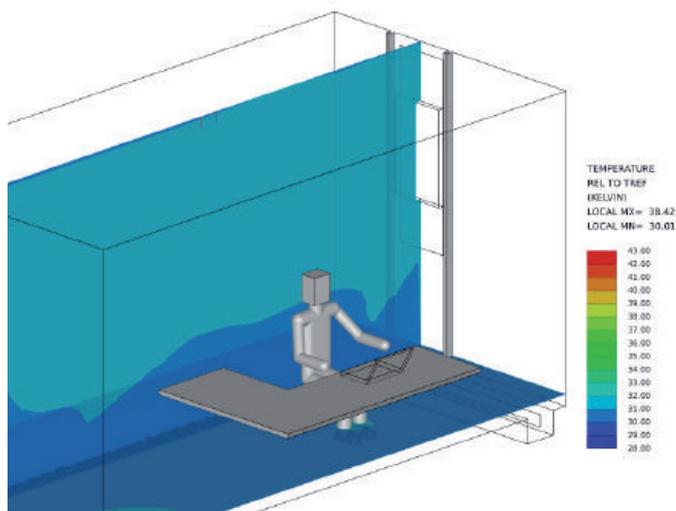


Abb. 3.13 Temperaturen an einem heißen Sommernachmittag beim Schiebeelement

Beim Kippelement ist die thermische Schichtung innerhalb des Raumes aufgrund der vorausgehenden intensiven Nachtlüftung relativ gering ausgeprägt.

Beim Vertikalschiebeelement ist die Temperaturverteilung und damit die Raumdurchspülung ähnlich ausgeglichen, jedoch auf einem niedrigeren Niveau. Die Raumlufttemperaturen liegen zwischen 30 - 32° C und sind im Vergleich zur Außenlufttemperatur von 32° C als moderat zu bezeichnen.

Lüftung während der Arbeitszeit im Winterfall (Szenario 3)

60 Sekunden nach dem Öffnen entsteht aufgrund der großen Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen ein starker natürlicher Antrieb für den Luftaustausch.

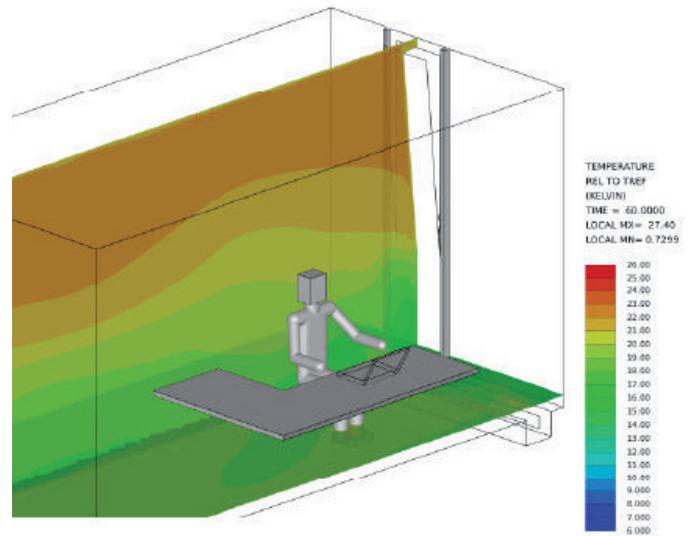
Das Kippelement lässt keine Einstellung des Öffnungsgrades zu, so dass sich ein hoher Volumenstrom mit ca. 120 cbm/h einstellt. Der damit verbundene Luftwechsel von 3,0 1/h führt zu einer raschen Auskühlung des Raums und Zugerscheinungen am Arbeitsplatz.

Beim Vertikalschiebeelement lassen sich die Öffnungsspalte so einstellen, dass sich bei einem Volumenstrom von 28 cbm/h ein Luftwechsel von ca. 0,7 1/h ergibt, der dem Luftbedarf einer Person entspricht.

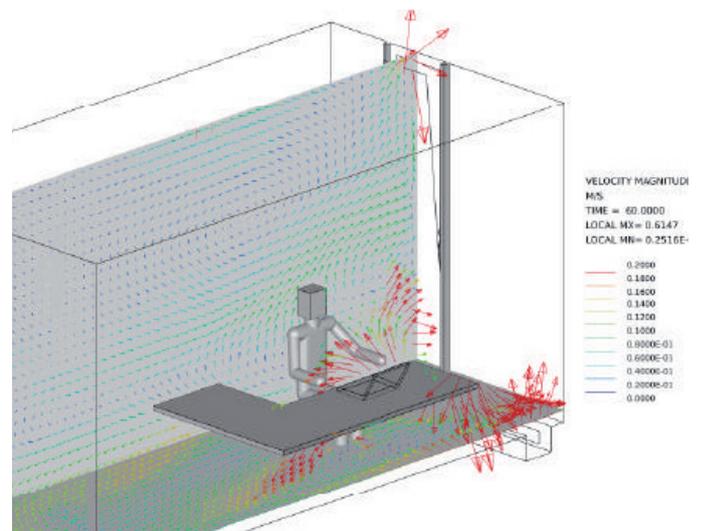
Auf den Abbildungen [Abb. 3.14 bis 3.15] der nächsten Doppelseite ist gut zu erkennen, dass im Winterfall das Öffnen eines Kippelements zu intensiven Zugerscheinungen - insbesondere im Fußbereich - führt. Die Erfahrungen bei winterlicher Lüftung mittels Kippelement werden damit bestätigt. Meist werden die Kippflügel aufgrund der intensiven Zugerscheinungen und Abkühlung schnell wieder geschlossen.

Kippelement 60 Sekunden nach dem Öffnen

Raumlufthtemperatur



Luftgeschwindigkeiten Axonometrie



Luftgeschwindigkeiten Grundriss

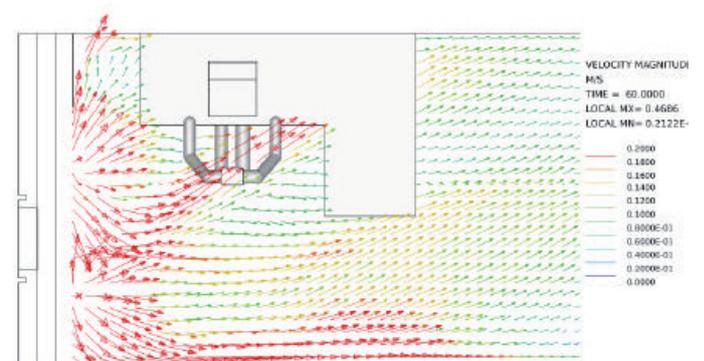


Abb. 3.14 Lüftung während der Arbeitszeit im Winterfall Kippflügel

Schiebeelement 60 Sekunden nach dem Öffnen

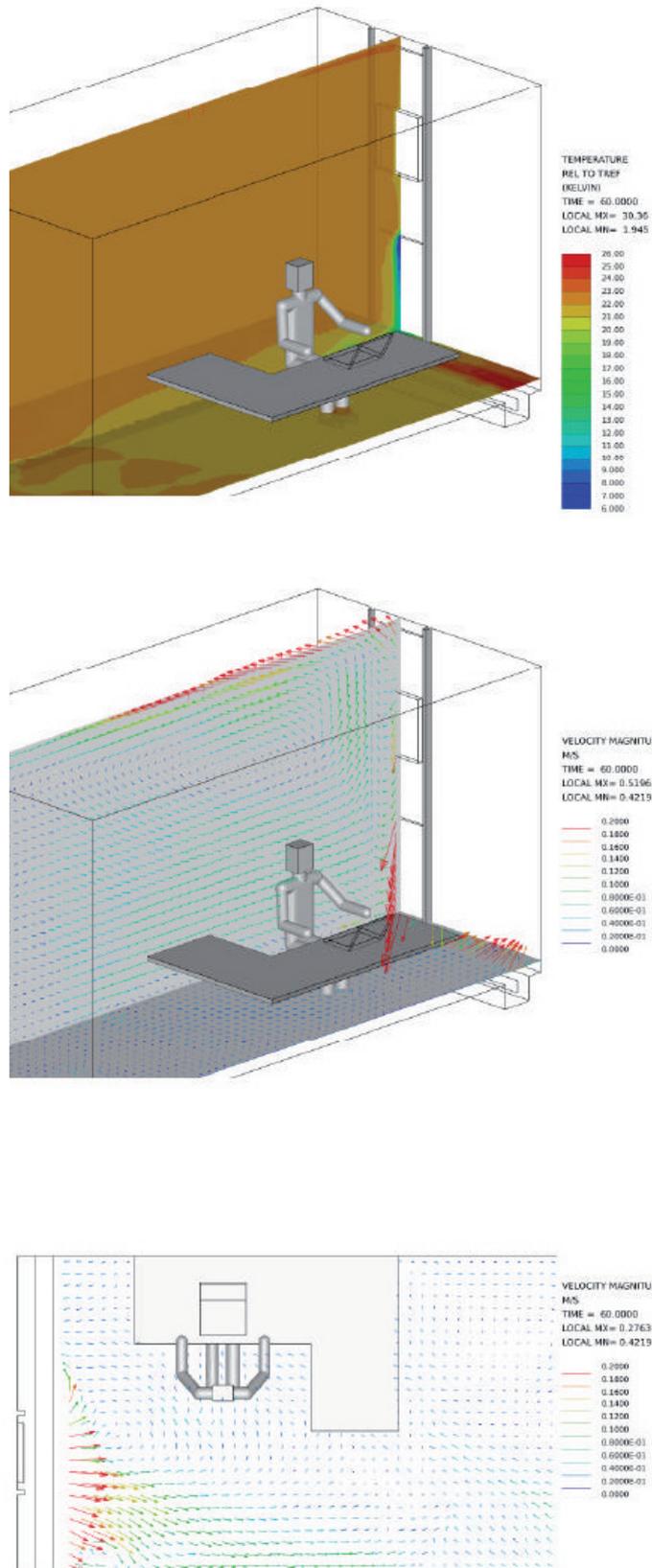
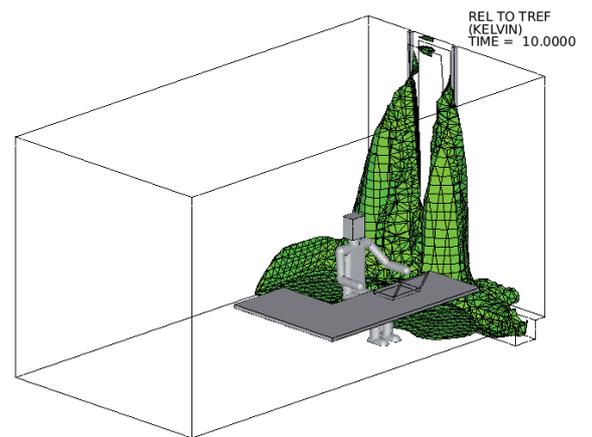


Abb. 3.15 Lüftung während der Arbeitszeit im Winterfall Schiebeelement

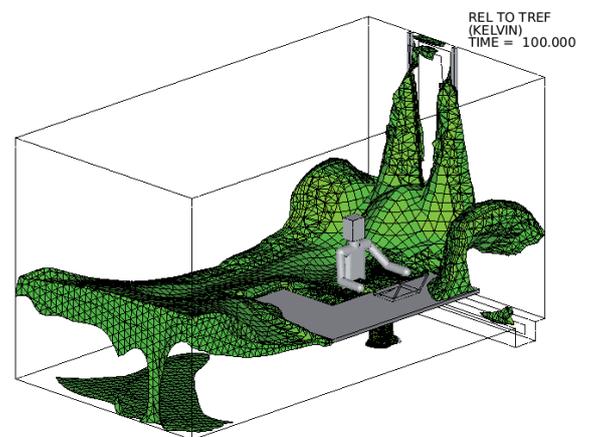
Zeit nach dem Öffnen

Kippelement im Verlauf bis 5 Min. nach dem Öffnen

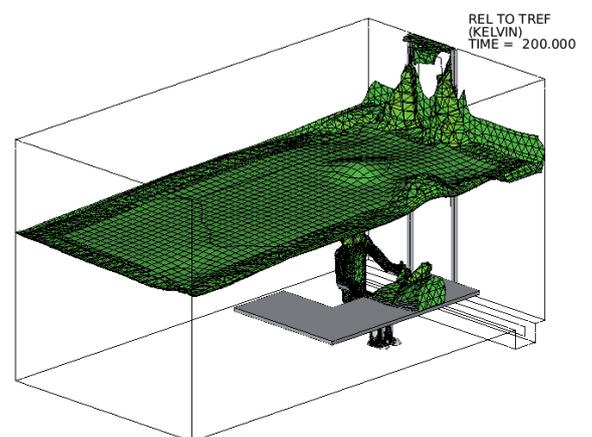
5 Sekunden



1,5 Minuten



3,5 Minuten



5 Minuten

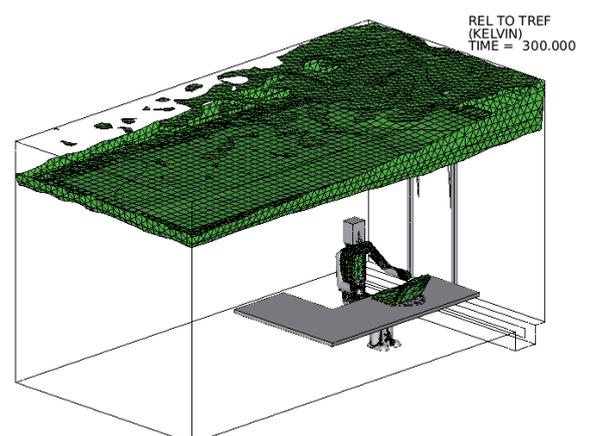


Abb. 3.16 Fortschreiten der 18°C Grenze beim Kippflügel

Schiebeelement im Verlauf bis 5 Min. nach dem Öffnen

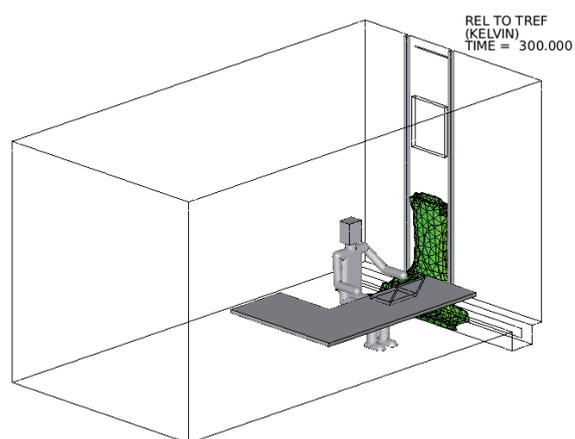
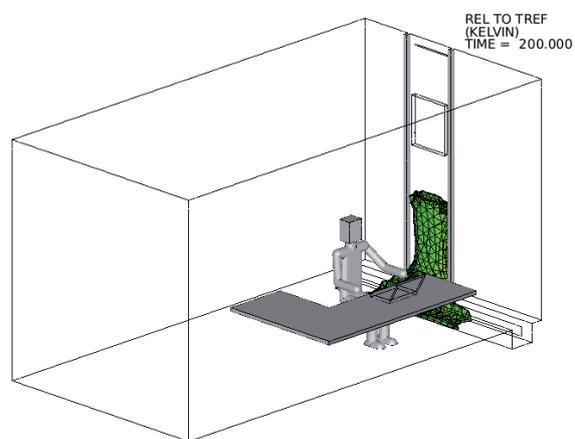
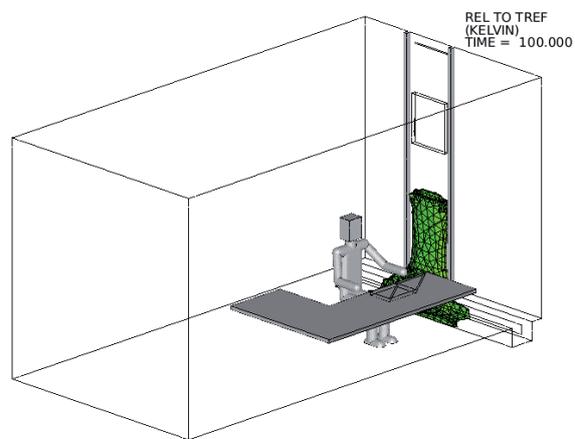
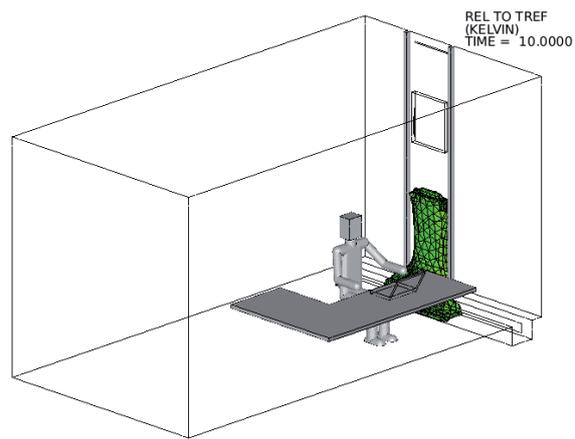


Abb. 3.17 Fortschreiten der 18°C Grenze beim Schiebeelement

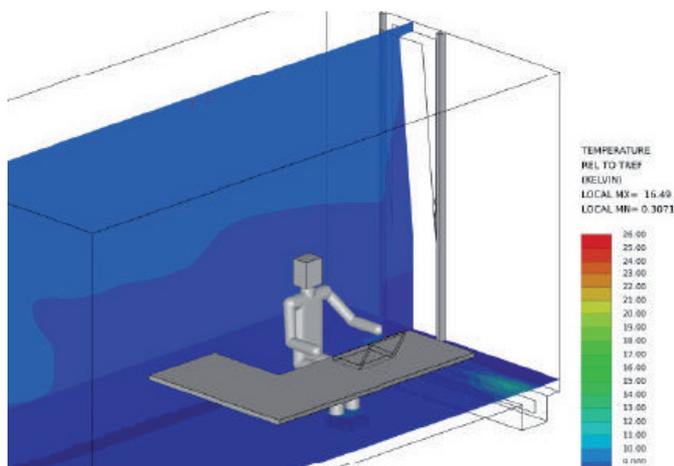


Abb. 3.18 Temperaturverteilung 5 Min. nach Öffnen des Kippelements im Winterfall

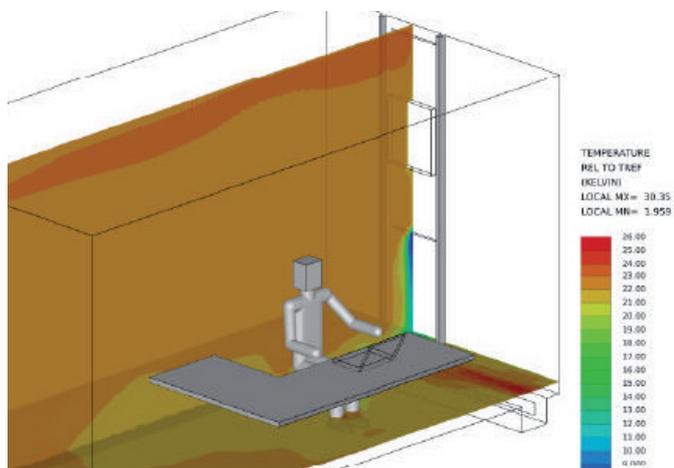


Abb. 3.19 Temperaturverteilung 5 Min. nach Öffnen des Schiebelements im Winterfall

Im Verlauf bis 5 Min. nach Öffnen des Fensters werden die unterschiedlichen Auswirkungen auf das Raumklima und die Lüftungswärmeverluste des Beispielraums auf den Abbildungen [Abb. 3.16 bis 3.19] besonders deutlich. Die Sequenz auf der vorhergehenden Doppelseite zeigt die Ausbreitung der kalten Zuluft im Vergleich der beiden Öffnungsarten gleich bleibender Heizleistung über einen Zeitraum von 5 Minuten. Deutlich sichtbar ist, wie der Raum bei Kippfensterlüftung mit großen Mengen kalter Außenluft „voll läuft“.

Bewertung

Bei den betrachteten Zuständen, denen eine Dauerlüftung vorausgeht, hat sich die Temperaturschichtung im Raum und die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen sowohl beim Kipp-, als auch bei Vertikalschiebeelement soweit ausgeglichen, dass der natürliche Antrieb für den Luftaustausch weitgehend fehlt.

In den gewählten Simulationsszenarien kann eine detaillierte Darstellung und qualitative Bewertung der Raumdurchströmung zu Beginn eines Lüftungsvorgangs daher nicht abgebildet werden.

Bei der winterlichen Lüftung wird ein entscheidender Vorteil des Vertikalschiebeelements deutlich. Der Benutzer kann intuitiv und stufenlos die geeignete Öffnungsgröße einstellen. Dies ermöglicht sogar bei sehr kalten Außenlufttemperaturen eine natürliche Lüftung ohne Einschränkungen der Behaglichkeit.

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen zeigen zusammen mit den zonalen thermischen Berechnungen, dass das Vertikalschiebeelement durch seine bedarfsgerechte Dosierbarkeit ein breites Spektrum an Lüftungsmöglichkeiten aufweist. So ist es mit einer maximalen Doppelspaltöffnung dem Dreh-Kippflügel bei der Nachtauskühlung überlegen (Variante 3a der zonalen thermischen Simulationen) und eignet sich mit einer minimalen Spaltöffnung sehr gut für die gezielte natürliche Lüftung bei kalten Außentemperaturen.

3.2 Experimentelle Messungen

Mit Hilfe von experimentellen Messungen lassen sich weitergehende Kenntnisse über die Lüftungseigenschaften der Doppelspaltöffnung im Vergleich mit der Kippöffnung gewinnen. Im Gegensatz zu den Simulationen, die sich für die Betrachtung vergleichsweise langer Zeiträume eignen, bietet es sich bei Messungen unter realen Bedingungen an, den Schwerpunkt auf den Zeitraum direkt nach dem Beginn des Lüftungsvorgangs zu legen. Zu diesem Zeitpunkt sind die Temperaturdifferenzen zwischen dem Innen- und dem Außenraum noch verhältnismäßig groß und die natürlichen Antriebskräfte besonders wirksam. Es zeichnen sich Merkmale der beiden Öffnungsarten durch messbare Unterschiede ihrer Lüftungseffektivität ab, die der Nutzer kurz nach dem Öffnen wahrnimmt.

Auch wenn in der experimentellen Versuchsanordnung andere Parameter als in den Simulationen angesetzt werden, lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf die Plausibilität der zuvor gewonnenen Erkenntnisse zu.

In Zusammenarbeit mit der Hochschule Biberach, Labor für Raumluft und Klimatechnik, werden für die vergleichende experimentelle Untersuchung zwei Messreihen unter winterlichen Randbedingungen durchgeführt [4.1].

Für die Messungen stehen im Technikum Gebäudeklimatik zwei gleiche Räume mit den erforderlichen messtechnischen Einrichtungen zur Verfügung. In einem der beiden Räume werden zwei vorhandene Kippflügel durch Modelle des Vertikalschiebelements im Maßstab 1:1 ersetzt, so dass parallel vergleichend beobachtet und gemessen werden kann.

3.2.1 Versuchsaufbau

Die Messungen finden in zwei gleichartigen, nebeneinander liegenden Hörsälen im Technikum der Hochschule Biberach statt:

- Raumtiefe 7,56 m
- Raumbreite 9,92 m bzw. 9,85 m
- Raumhöhe 3,20 m

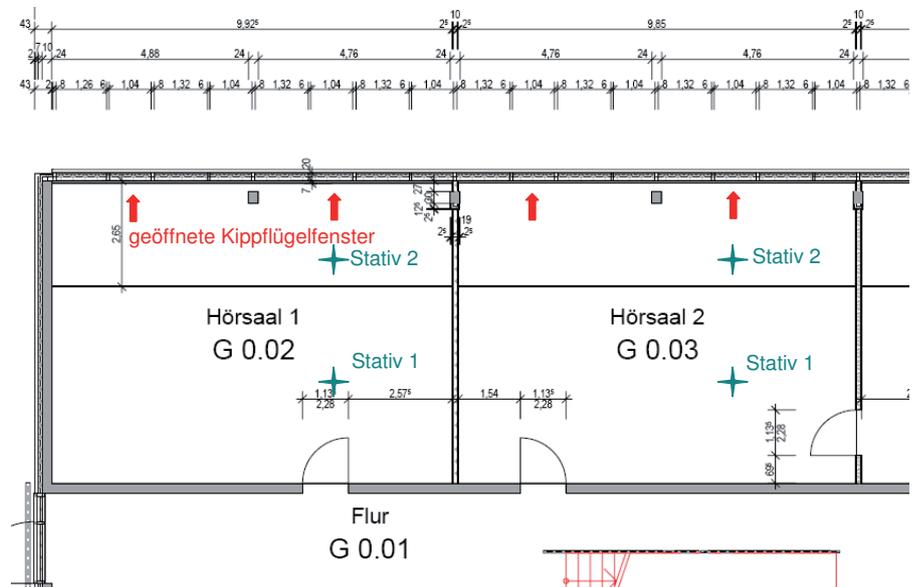


Abb. 3.20 Grundriss Versuchsaufbau

In Hörsaal 1 befinden sich zwei Kippflügel mit einer Öffnungsbreite von jeweils 1,04 m.

Im Hörsaal 2 werden an gleicher Stelle Modelle des Vertikalschiebelements eingebaut, mit denen sich unterschiedliche Öffnungsgrade einstellen lassen.



Bild 3.1 Modell Schiebeelement

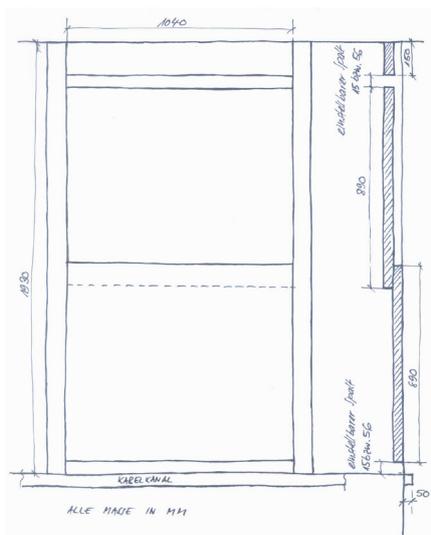


Abb. 3.21 Schnitt Modell Schiebeelement

Im Zuge von zwei Messkampagnen werden folgende Experimente durchgeführt. Bei der zweiten Messkampagne findet dabei keine Strömungsvisualisierung statt. Wegen der nahezu gleichartigen Randbedingungen wird auf eine erneute Luftgeschwindigkeits- und Temperaturmessung in Hörsaal 1 verzichtet.

Strömungsvisualisierung

Zur Visualisierung der Strömung wird im fassadennahen Bereich mit Hilfe eines Generators ein schnell auflösendes Nebelfluid eingebracht und die Strömungsvorgänge auf Video aufgezeichnet (nur erste Messkampagne).

Luftgeschwindigkeit

Für die Messungen der Luftgeschwindigkeit werden je Raum zwei Stative mit Messfühlern ausgestattet. In Anlehnung an DIN 1964 werden die Messwerte in drei Höhen (0,1 m, 1,1 m und 1,7 m) genommen.

Die Stative befinden sich im Abstand von 5,0 m (Stativ 1) und 2,0 m (Stativ 2) von der Fassade. Die Messdauer beträgt ca. 120 Minuten.

Raumlufttemperatur

Die Messfühler für die Raumlufttemperatur werden entsprechend denen der Luftgeschwindigkeitsmessung angeordnet. Die Messdauer ist identisch.



Bild 3.2 Messstativ

Luftwechsel

Zur Messung der Lüftungseffektivität (Luftwechsel) wird die Konzentrationsabklingmethode angewendet. Dazu werden Proben der Raum- und der Außenluft genommen. Anschließend werden 30 Milliliter Schwefelhexafluorid (SF₆) als Tracergas in den Raum eingebracht und sorgfältig mit der Raumluft vermischt. In Intervallen von 15 Minuten werden über einen Zeitraum von 120 Minuten während des Lüftungsvorgangs Proben der Raumluft entnommen. Der Luftwechsel kann durch die Bestimmung des Abklingverhaltens der Tracergaskonzentration ermittelt werden.

Den Messungen liegen folgende Parameter zugrunde:

Thermische Rahmenbedingungen Messkampagne 1

- Außentemperatur: 4° C (zu Messbeginn)
- Windgeschwindigkeit: windstill
- Mittlere Innentemperatur: 20,7° C (Hörsaal 1), 18,3° C (Hörsaal 2)

Thermische Rahmenbedingungen Messkampagne 2

- Außentemperatur: 2,9° C (zu Messbeginn)
- Windgeschwindigkeit: windstill
- Mittlere Innentemperatur: 20,5° C (Hörsaal 1), 19,6° C (Hörsaal 2)

Öffnungsquerschnitte Messkampagne 1

- Hörsaal 1 - Kippflügel: Öffnung mit vergleichbarer Querschnittsfläche
- Hörsaal 2 - Vertikalschiebeelement: 56 mm, jeweils (oberer und unterer Spalt)

Öffnungsquerschnitte Messkampagne 2

- Hörsaal 1 - Kippflügel: Öffnung wie Messkampagne 1
- Hörsaal 2 - Vertikalschiebeelement: 15 mm, jeweils (oberer und unterer Spalt)

Ergebnis Messkampagne 1

Die Strömungsvisualisierung gibt beim Vertikalschiebeelement das erwartete Bild wieder. Gut erkennbar dringt durch den unteren Spalt Außenluft in den Raum ein, die warme Raumluft in Deckennähe strömt durch den oberen Spalt ins Freie aus. Wegen dem geringen Anteil nicht vernebelter Luft im Rauminnen eignet sich die Methode allerdings nicht, um die dort vorhandene Strömung sichtbar zu machen.

Bei den Messungen ist eine quantitativ exakte Bestimmung der aerodynamisch wirksamen Querschnitte für die untersuchten Öffnungsarten nicht ohne weiteres möglich. Daher wurde der geometrisch freie Öffnungsquerschnitt näherungsweise gleichgesetzt. Die in den Messräumen parallel gewonnenen Ergebnisse werden aus diesem Grund nicht direkt verglichen, sondern für jede Öffnungsart getrennt miteinander in Relation gesetzt.

Erst im Vergleich können Aussagen über die spezifischen Lüftungsmerkmale zwischen Vertikalschiebe- und Kippflügel getroffen werden. Das Verhältnis zwischen Luftgeschwindigkeit und Raumtemperatur zeigt dabei, dass die Doppelspaltöffnung trotz geringerer mittlerer Luftgeschwindigkeiten eine raschere Absenkung der Raumtemperatur zur Folge hat.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Temperaturverlauf an den Messpunkten in Hörsaal 1 (Kippfenster) und Hörsaal 2 (Vertikalschiebeelement):

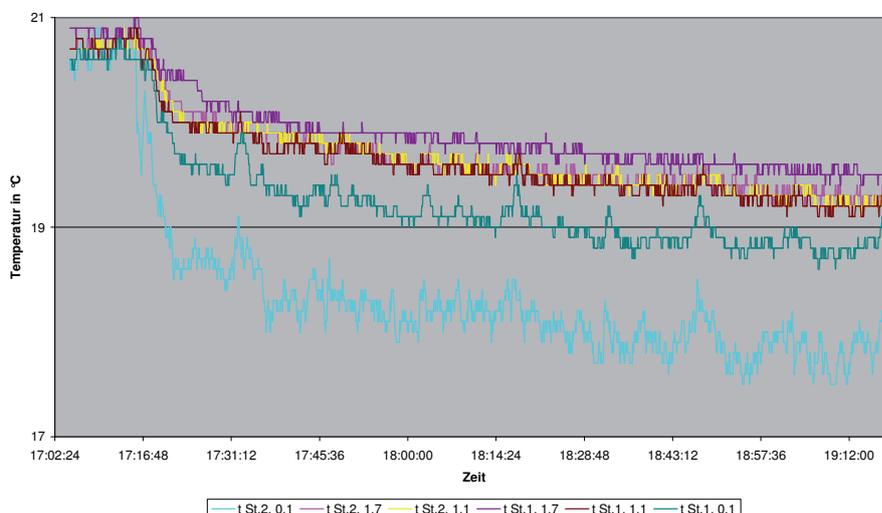


Abb. 3.22 zeitlicher Temperaturverlauf Kippfenster

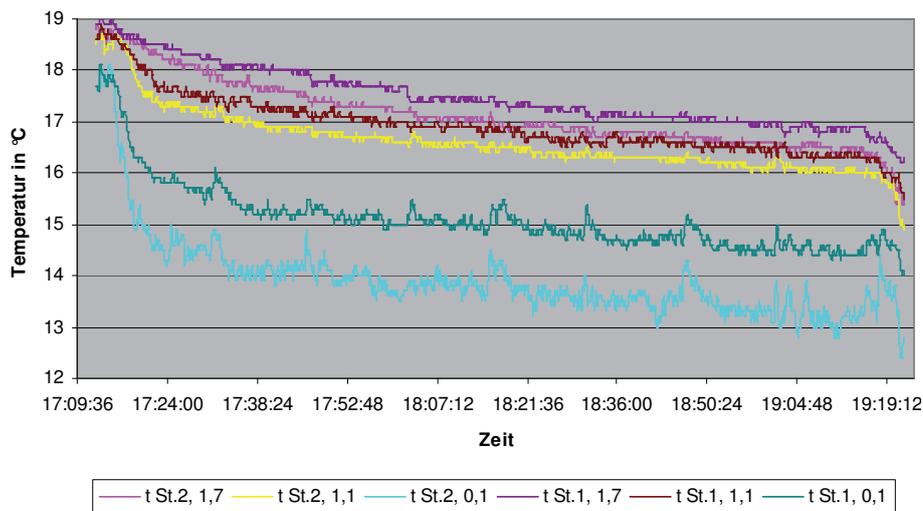


Abb. 3.23 zeitlicher Temperaturverlauf Schiebeelement

Zu Beginn der Messung herrscht in Hörsaal 1 eine Raumlufttemperatur von etwa 21° C im Mittel. Sie verringert sich während des betrachteten Zeitraums auf einen Mittelwert von 18,8° C. Die Raumluft erfährt eine mittlere Abkühlung von 2,2° C. Im Hörsaal 2 beträgt die mittlere Abkühlung im gleichen Zeitraum 4,3° C. Zu Beginn der Messung liegt die Raumtemperatur noch bei 18,6° C im Mittel und sinkt an allen Messpunkten stärker ab auf einen Mittelwert von 14,3° C.

Tabelle 3.3 Luftgeschwindigkeiten

Stativ Nummer	Messhöhe in m	Luftgeschwindigkeit in m/s im Messzeitraum von 17:20 Uhr bis 19:10 Uhr			
		Hörsaal 1 Kippelement		Hörsaal 2 Vertikalschiebeelement	
		Mittel	Max	Mittel	Max
1	1,7	0,083	0,159	0,047	0,146
1	1,1	0,090	0,184	0,065	0,211
1	0,1	0,159	0,297	0,153	0,315
2	1,7	0,094	0,240	0,037	0,175
2	1,1	0,108	0,327	0,051	0,361
2	0,1	0,266	0,491	0,394	0,653

Die obenstehende Tabelle zeigt, dass während des Entwärmungsvorgangs die mittlere Luftgeschwindigkeit beim Kippflügel mit Ausnahme eines der Messpunkte höher und teilweise sogar doppelt so hoch ist.

Die höhere Lüftungseffektivität der Doppelspaltöffnung wird auch in der Tracergasmesung bestätigt. Die SF6 Konzentration wird beim Vertikalschiebelement von ca. 37 ppb auf ca. 2 ppb reduziert, während sie im gleichen Betrachtungszeitraum beim Kippelement nur von ca. 25 ppb auf ca. 3 ppb sinkt [Abb. 3.24].

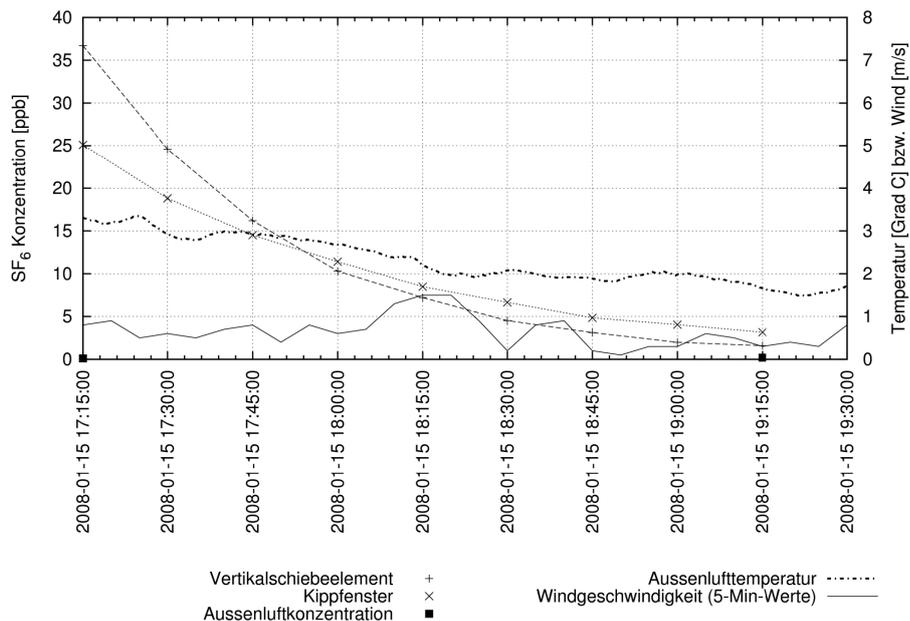


Abb. 3.24 Abnahme der SF6-Konzentrationen während Messkampagne 1

Die Hochschule Biberach errechnet in der Messkampagne 1 folgende Luftwechsel zahlen:

- Vertikalschiebelement 1,5
- Kippelement 1,0

Die Messungen bestätigen die Vermutung, dass bei der Betrachtung des Lüftungsverhaltens über einen kürzeren Zeitraum nach dem Öffnen deutlichere Unterschiede zwischen den Öffnungsarten erkennbar sind als in der Langzeitbetrachtung der Simulationen.

Ergebnis Messkampagne 2

Das Ergebnis der Messkampagne 2 untermauert die Erkenntnisse zur Lüftung im Winter aus der CFD-Simulation.

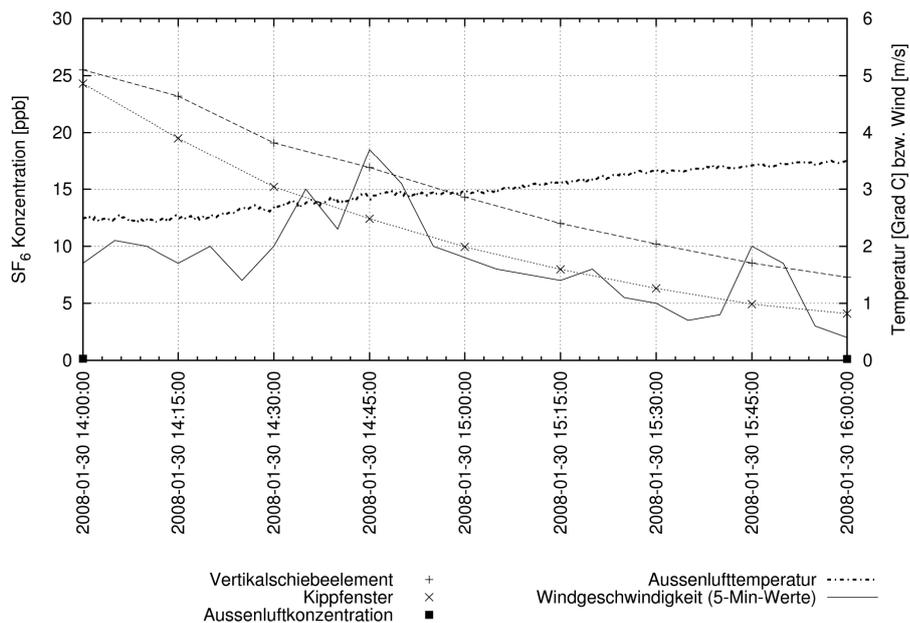


Abb. 3.25 Abnahme der SF6-Konzentrationen während Messkampagne 2

Über den gewählten Zeitraum von ca. 2 Stunden sinkt die Konzentration des Schwefelhexafluorids von ca. 26 ppb auf ca. 7 ppb. Gleichzeitig steigt die Raumtemperatur infolge der inneren Kühllasten sogar an während sie in der vergleichenden Messung der Messkampagne 1 beim Kippflügel abfällt.

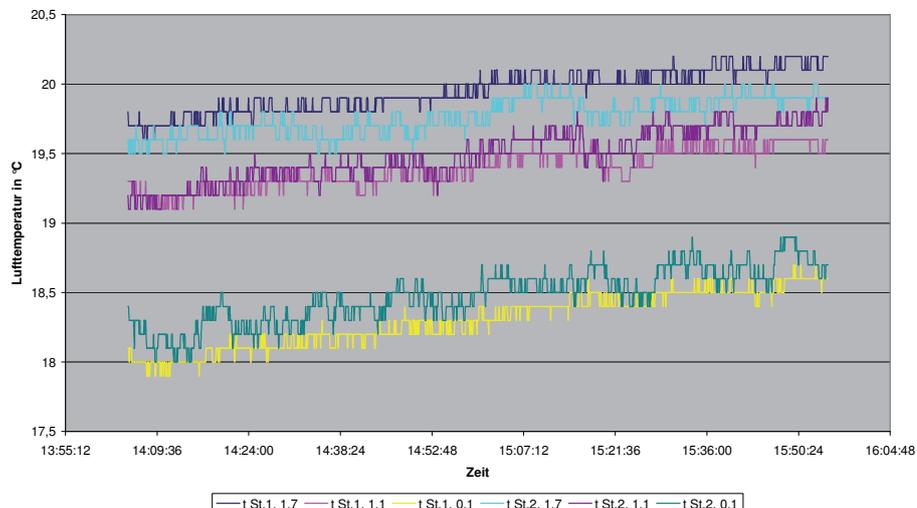


Abb. 3.26 zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Hörsaal 2 (Schiebeelement)

Die nachstehende Tabelle zeigt, dass während des Lüftungsvorgangs die mittlere Luftgeschwindigkeit bei der Spaltöffnung immer unter der des Kippfensters in Messkampagne 1 liegt. Teilweise beträgt sie am gleichen Messpunkt nur 1/4.

Tabelle 3.4 Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzen

		Hörsaal 2 Vertikalschiebeelement		
Stativ Nummer	Messhöhe in m	Luftgeschwindigkeit in m/s		Turbulenzgrade in %
		Mittel	Max	
1	1,7	0,037	0,090	41,77
1	1,1	0,028	0,111	53,92
1	0,1	0,039	0,208	34,45
2	1,7	0,089	0,144	24,88
2	1,1	0,037	0,250	81,32
2	0,1	0,200	0,421	17,89

Dies zeigt, dass mit der gewählten Spaltöffnung von nur 1,5 cm eine wirksame Lüftung erreicht wird, ohne dass die Temperatur im Raum absinkt. Die geringen Luftgeschwindigkeiten lassen eine hohe Behaglichkeit erwarten.

Bewertung

In einem Betrachtungszeitraum von zwei Stunden nach dem Öffnen sind die Luftwechselraten bei einer Doppelspaltöffnung 50% höher als bei einem Kippelement mit gleichem freien Öffnungsquerschnitt. Die Messungen der Luftgeschwindigkeit ergeben zudem, dass dem Bedürfnis des Nutzers nach einem raschen Luftaustausch entsprochen werden kann ohne dass Einbußen hinsichtlich der Behaglichkeit hingenommen werden müssen.

4. Technische Durcharbeitung

Dieses Kapitel beschreibt die technische Entwicklung bis zum Bau des Prototyps. Zunächst werden wichtige Begriffe und folgende technische Grundlagen vorgestellt:

- Gewichtsausgleich
- Kopplung
- Handhabung
- Verlauf der Dichtungsebene

Anschließend werden Betriebszustände definiert, die sich aus den in Kapitel 2 als Zielsetzung formulierten Leistungsmerkmalen ableiten. Diese stellen Schlüsselpositionen im Bewegungsablauf dar. Die Unterteilung des Gesamtablaufs in Einzelabschnitte ermöglicht eine detaillierte Analyse der Bewegungsvorgänge und der zugrunde liegenden technischen Abläufe.

Parallel zur systematischen Untersuchung der Betriebszustände und Bewegungsabläufe werden die technischen Grundlagen für die bauliche Umsetzung erarbeitet. Auf dieser Basis wird eine Einschätzung der Ausführungsvarianten im Hinblick auf Handhabung und Gebrauchstauglichkeit vorgenommen und eine Auswahl von Lösungsansätzen getroffen.

Bei der Entwicklung des Prototyps werden in einer Kooperation mit der Fassadenbau-firma Schindler die Lösungsansätze anhand mehrerer Arbeitsmodelle im Maßstab 1:1 überprüft und weiter entwickelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Grundlage für den Bau eines ersten Prototyps, der auf der Messe Bau 2007 ausgestellt wird.

Wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt, wird eine Einbausituation mit feststehender Brüstung angenommen. Alle in diesem Kapitel abgebildeten Systemschnitte beziehen sich auf den rot umrandeten Bereich. Die Raumseite befindet sich immer rechts im Systemschnitt.

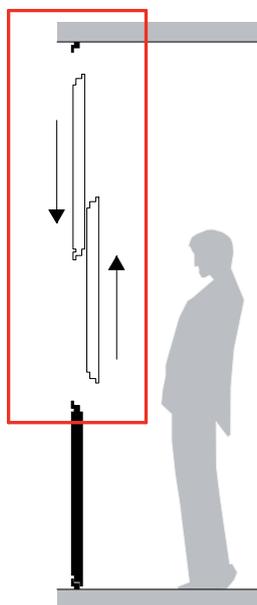


Abb 4.1 Einbausituation Vertikalschiebeelement

4.1 Gewichtsausgleich

Das Funktionsprinzip des vertikalen Schiebens bedingt, dass die Wirkung der Schwerkraft auf die verschiebbaren Teile sowohl im Ruhezustand als auch in der Bewegung ausgeglichen werden muss.

Wie aus der historischen Betrachtung und der Marktanalyse hervor geht, lassen sich für den Gewichtsausgleich bisher folgende zwei Prinzipien unterscheiden:

Das Gewicht kann einerseits durch einen gegenseitigen Ausgleich der Flügel oder unabhängig voneinander mit Hilfe zusätzlicher Maßnahmen kompensiert werden.

4.1.1 Gegenseitiger Gewichtsausgleich

Beim gegenseitigen Gewichtsausgleich werden die Flügel über eine Richtungsumlenkung miteinander gekoppelt und sind daher gegenläufig verschiebbar. Das Gewicht des einen Flügels wird mittels einer Umlenkung genutzt, um das Gewicht des anderen Flügels auszugleichen.

4.1.2 Unabhängiger Gewichtsausgleich

Sollen die Flügel einzeln verschiebbar sein, sind folgende Prinzipien eines unabhängigen Gewichtsausgleichs möglich:

- Federkraft
- Gegengewicht
- Kraftwandlung

Die technischen und physikalischen Merkmale der genannten Methoden werden nun genauer betrachtet:

Federkraft

Beim Federausgleich kompensieren Druck- oder Zugfedern das Gewicht der verschiebbaren Flügel. Federn sind elastische Maschinenelemente, bei denen nach Beanspruchung keine bleibende Verformung eintritt. Gefertigt werden sie überwiegend aus Federstahl, dessen spezielle Legierung die Elastizität gewährleistet. Die häufigste Form sind Schraubenfedern, auch Torsionsfedern genannt. Federn kann aber auch ein geschlossenes Gaspolster z. B. bei Gasdruckfedern.

Grundsätzlich unterscheidet man Druck- von Zugfedern nach der Art ihrer Belastung. Die Zugfeder reagiert mit ansteigender Zugkraft auf eine ansteigende Längenänderung, die Druckfeder entwickelt umgekehrt eine Druckkraft bei Stauchung.

Federn können wegen ihres eindeutigen Zusammenhangs zwischen Längenänderung und Federkraft als Kraftmesser in Waagen verwendet werden, da eine bestimmte Längenänderung stets einer definierten Federkraft entspricht, die an einer Skala ablesbar gemacht werden kann. Der Zusammenhang zwischen Verformung und Federkraft wird als Federkennlinie bezeichnet. Die Federkennlinie verläuft im mittleren Verformungsbereich meist linear, nicht jedoch in den Extremen. Dort ist die Längenänderung nicht proportional zur Federkraft und die Federkennlinie verläuft degressiv oder progressiv. In diesen Fällen dehnt bzw. staucht sich die Feder über- bzw. unterproportional.

Im direkt proportionalen Zusammenhang zwischen Verformung und Federkraft liegt die grundlegende Problematik beim Einsatz von Federn zur Kompensation von beweglichen Lasten: Die Federkraft kann nur an einer Position im Verlauf des Öffnungsvorgangs das Gewicht des Schiebeflügels exakt kompensieren. In allen anderen Positionen ist die Federkraft schwächer oder stärker als das Gewicht des Schiebeflügels.

Bei der Verwendung von Gasdruckfedern ergibt sich diese Schwierigkeit in abgeschwächter Form, da bei diesen die Federkennlinie im mittleren Belastungsbereich annähernd horizontal eingestellt werden kann. Der Nachteil von Gasdruckfedern in der Praxis liegt aber in höheren Anschaffungs- und Instandhaltungskosten und einer kürzeren Lebensdauer.

An Hand der folgenden Grafik wird der beschriebene Zusammenhang am Beispiel eines Vertikalschiebeelements, dessen Öffnungsbewegung durch eine Druckfeder unterstützt wird, veranschaulicht.



Bild 4.1 Zugfeder



Bild 4.2 Druckfeder

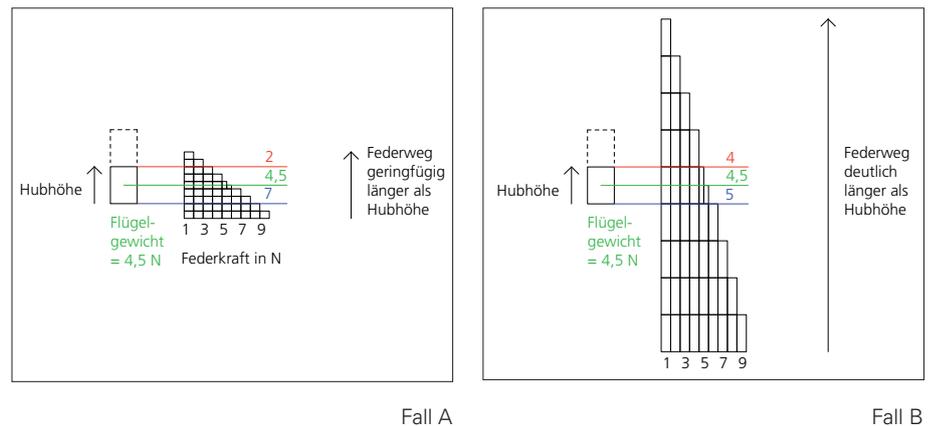


Abb 4.2 Federkraft

Der Schiebeflügel wird um die Hubhöhe nach oben verschoben.

Im Fall A wird der Schiebevorgang des Fenstergewichts durch eine Druckfeder unterstützt, deren Federlänge im entspannten Zustand geringfügig länger ist als die zu überwindende Hubhöhe. Somit ist die Feder im geschlossenen Zustand des Schiebflügels annähernd maximal gespannt. Die Federkraft ist in dieser Position weit größer als für den Gewichtsausgleich des Flügels nötig wäre. Erhebliche Maßnahmen zum Bremsen des Schiebflügels sind notwendig. Mit zunehmender Hubhöhe lässt die Federkraft so rapide nach, dass zum vollständigen Öffnen des Schiebflügels die Federkraft kaum mehr zur Unterstützung der Öffnungsbewegung beiträgt.

Im Fall B wird der Schiebevorgang des Fenstergewichts durch eine Druckfeder unterstützt, deren Federlänge im entspannten Zustand deutlich länger ist als die zu überwindende Hubhöhe. Die Feder wird so eingebaut, dass sie im geschlossenen Zustand des Fensters nicht ihre maximale Stauchung erreicht und im geöffneten Zustand noch weit von ihrem entspannten Zustand entfernt ist. Wie die Skala mit der angetragenen Federkraft zeigt, bleibt die Federkraft damit über den gesamten Bewegungsvorgang des Schiebflügels annähernd im Bereich des Flügengewichtes. Dadurch müssen kurz nach dem Öffnen nur geringe Bremsmaßnahmen ergriffen werden, und zum Erreichen der vollen Hubhöhe reicht eine geringe Zusatzkraft zur Unterstützung der Federwirkung aus.

Zugfedern eignen sich für den Anwendungsfall nicht, da der Federweg, um einen Effekt wie in Fall B zu erreichen, mit zusätzlichem Aufwand übersetzt oder umgelenkt werden müsste.

Gegengewicht

Das Gewicht der verschiebbaren Flügel wird durch meist seilgeführte Gegengewichte ausgeglichen.

Zur Aufnahme der Gegengewichte und deren Führung wird im seitlichen Rahmenteil des Elements ein vertikaler Hohlraum benötigt. Dieser sollte ebenso wie die Umlenkung am oberen Rahmenteil zu Wartungszwecken einfach zugänglich sein. Dies ist mit Einschränkungen bei der Gestaltungsfreiheit und der Integrierbarkeit des vertikalen Schiebeelements in unterschiedliche Fassadensysteme verbunden.

Durch die Gegengewichte verdoppelt sich bei diesem Ausgleichsprinzip das Gesamtgewicht des Öffnungselements nahezu.

Kraftwandlung

Die Arbeit als physikalische Größe wird als das Produkt aus Kraft mal Wegstrecke definiert ($W = F \times s$). Bei der Kraftwandlung wird mittels einer mechanischen Übersetzung die aufzubringende Kraft durch die Verlängerung der Wegstrecke verringert.

Beispiele für dieses Prinzip in der alltäglichen Anwendungen sind u. a. die Schaltung beim Fahrrad, Fahrzeuggetriebe oder der Flaschenzug bei Hubwerkzeugen.

Die Anwendung auf den vertikalen Schiebemechanismus ist am Markt bislang nicht bekannt.

4.2 Kopplung

Bei einer Kopplung der Flügel werden diese miteinander verbunden.

Neben dem gegenseitigen Gewichtsausgleich eignet sich die Kopplung dafür, die Bewegung bei der Bedienung eines Flügels auf den anderen zu übertragen. Durch das automatisierte Zusammenspiel kann der obere Flügel bewegt werden, auch wenn er für den Benutzer nicht in jeder Position erreichbar ist

Eine Kopplung kann eine gegen- oder gleichläufige Bewegung der Flügel auslösen. Bei einer gegenläufigen Kopplung bewegen sich die Flügel synchron aufeinander zu. Bei einer gleichläufigen Kopplung bewegen sich die beiden Flügel synchron in einer Richtung.

Tabelle 4.1 Kopplung

Kopplungsart	Bewegung der Flügel
gegenläufig	in entgegengesetzter Richtung
gleichläufig	in gleicher Richtung

Bei den auf dem Markt erhältlichen Vertikalschiebefenstern findet man ausschließlich die gegenläufige Kopplung mit Seilaufhängung und Umlenkrolle vor. Eine gleichläufige Kopplungsart ist bislang nicht bekannt.

Für Öffnungselemente dieser Bauart ergibt sich der Nachteil, dass aufgrund des gegenläufigen Verschiebens keine Vollöffnung einstellbar ist.

Um dies zu erreichen, müssten die Flügel entweder auch einzeln verschiebbar sein, d. h. die Kopplung müsste lösbar sein, oder es kann die Kopplungsart während des Bewegungsvorgangs gewechselt werden. Für die Konstruktion einer solchen umschaltbaren Kopplung würden sich Zahnräder oder vergleichbare Kopplungselemente eignen.

4.3 Handhabung

Die Handhabung beschreibt die Art und die Wirkungsweise der Bedienung des Vertikalschiebeelements durch den Benutzer. Um im Sinne einer einfachen Handhabung die Anforderungen an die Konstruktion zu definieren, wird der Bewegungsablauf in vier Phasen unterteilt:

Einleitungsphase

Ausgehend vom geschlossenen Zustand wird das Vertikalschiebeelement entriegelt und beide Flügel in die Ausgangsposition für die vertikale Schiebebewegung gebracht.

Öffnungsphase

Aus der Ausgangsposition werden durch das Verschieben der Flügel die Öffnungsarten für die Lüftung eingestellt.

Schließphase

Die Schließphase ist die Umkehrung der Öffnungsphase.

Abschlussphase

Die Abschlussphase ist die Umkehrung der Einleitungsphase.

4.3.1 Einhandgriffbedienung

Bei vergleichbaren Öffnungsmechanismen für Fenster hat sich zur Handhabung die sog. Einhandgriffbedienung bewährt. Ein in der Regel drehbar gelagerter Griff dient sowohl dazu, den Flügel zu bewegen als auch die Verriegelungs- und Ausstellmechanik des Fensters zu steuern. Bei einem Drehkipplügel lässt sich beispielsweise mit der Drehrichtung der Handhabe die gewünschte Öffnungsart Drehen oder Kippen vorwählen. Überträgt man dieses Prinzip auf das Vertikalschiebeelement könnte dort ebenfalls durch eine Drehbewegung an der Handhabe in den Schlüsselpositionen der weitere Verlauf der Bewegung eingestellt werden.

Tabelle 4.2 Bedienung der Handhabe im Bewegungsablauf

		Einleitungsphase	Öffnungs- / Schließphase		Abschlussphase
			Doppelspaltöffnung	Vollöffnung	
I	Ver- und Entriegelung	X			X
	Einstellung des Gewichtsausgleichs	X	X	X	
	Einstellung der Kopplungsart	X	X	X	
II	Übertragung der Antriebskraft		X	X	

Jede Änderung des Betriebszustands erfordert eine Bedienung der Handhabe. Abhängig von der Bauart und den Leistungsmerkmalen können die in der obenstehenden Tabelle aufgeführten Eingriffe notwendig sein. Dabei können zwei unterschiedliche Arten unterschieden werden:

- Bedienung der Handhabe zur Steuerung des Bewegungsablaufs
- Benutzung der Handhabe zur Bewegung der Flügel (Übertragung der Antriebskraft)

Im Folgenden werden die Abläufe bei der Bedienung der Handhabe näher betrachtet:

Ver- und Entriegelungsmechanik

In der Einleitungs- und Abschlussphase müssen die Flügel ent- bzw. verriegelt und aus der Dichtungsebene gelöst- bzw. an die Dichtebene angepresst werden.

Nahe liegender Lösungsansatz für diese Eingriffe stellt eine Griffbedienung dar, bei der analog zu einem herkömmlichen Fenster durch Drehen der Ver- und Entriegelungsbeschlag im Falz betätigt wird. Wenn der obere Flügel nicht über eine eigene Verriegelung verfügt, wird dieser im Stulpbereich durch den unteren Flügel in die Dichtebene gepresst und mitverriegelt. Andernfalls besteht die Möglichkeit, die Verriegelungsmechanik des oberen Flügels mit der des unteren zu koppeln und damit indirekt über die Handhabe zu bedienen.

Einstellung des Gewichtsausgleichs

Ein unabhängiger Gewichtsausgleich erlaubt prinzipiell ein freies Verschieben der beiden Öffnungsflügel gegeneinander, so dass die gewünschten Öffnungsarten Doppelspaltöffnung und Vollöffnung eingestellt werden können ohne die Art des Gewichtsausgleichs zu wechseln.

Bei einem gegenseitigen Gewichtsausgleich entsteht abhängig vom gewählten Bewegungsablauf die Notwendigkeit, an einer der Schlüsselpositionen die Art des Gewichtsausgleichs zu wechseln. Für eine einfache Bedienbarkeit sollte dieser Wechsel ebenfalls über eine Einstellung an der Einhandbedienung des Öffnungsflügels vorzunehmen sein.

Da die Bauteile für den Gewichtsausgleich im Rahmen des Öffnungselements untergebracht sind, müssen die Steuersignale der Einhandbedienung über den Flügel in das Rahmenteil übertragen werden.

Für die Bediensicherheit muss gewährleistet sein, dass die Flügel auch während des Wechsels in Position gehalten werden. Die Möglichkeit einer Fehlbedienung muss zu jedem Zeitpunkt ausgeschlossen sein.

Einstellung der Kopplungsart

Zum Wechsel zwischen einer gegenläufigen, gleichläufigen oder unabhängigen Bewegung der Flügel ist die Änderung der Kopplungsart notwendig. Ebenso wie bei der Einstellung des Gewichtsausgleichs müssen die Bewegungen, die durch die Handhabe in den Falzbeschlag des Flügels eingeleitet werden, auf Beschlagteile im Rahmen übertragen werden. Die Notwendigkeit eines präzisen Zusammenspiels an den Schlüsselpositionen stellt hohe Anforderungen an die Konstruktion. Für einen dauerhaft verschleißarmen und sicheren Betrieb des Öffnungselements ist eine Fehlbedienung durch den Nutzer auszuschließen.

Der Wechsel zwischen den Kopplungsarten muss konstruktiv so konzipiert sein, dass der Benutzer die richtige Bedienung des Öffnungselements intuitiv erfassen kann.

Übertragung der Antriebskraft

Bei herkömmlichen Vertikalschiebefenstern wird die Antriebskraft in der Regel durch vertikales Schieben an einem Griff auf den Flügel übertragen. Meist sind zu Beginn des Bewegungsablaufs zum Ausstellen zusätzliche horizontale Bewegungen auf den Flügel auszuüben. Die Kombination der beiden Bewegungsarten erfordert vom Benutzer ein gewisses Koordinationsvermögen, das sich nach einiger Übung einstellt.

4.3.2 Alternativen zur Einhandgriffbedienung

Da der Griff bei der Einhandgriffbedienung mit dem sich bewegenden Flügel mitwandert, ist die Größe des Öffnungselements begrenzt, um die Erreichbarkeit der Handhabe in jeder Position zu gewährleisten. Für ähnliche Bauteile, die trotz einer manuellen Bedienung in ihrer Größe oder Einbauhöhe nicht begrenzt sein dürfen, gibt es zur Vermeidung dieses Konflikts indirekte Formen der Kraftübertragung, beispielsweise Gurtbedienung bei Rollläden, die Ketten- oder Perlschnurbedienung bei Sonnenschutzlamellen oder Kurbelbedienung bei Ausstellmarkisen.

Bei diesen Arten der Kraftübertragung ist der Antrieb losgelöst vom geometrischen Verlauf, den die Bauteile während des Öffnens vollziehen. Für den Benutzer ist die Bedienung intuitiver, da sich auch komplexe Öffnungsvorgänge mit einer einfachen linearen Bedienung bewerkstelligen lassen.

4.4 Verlauf der Dichtungsebene

Bei den am Markt erhältlichen Vertikalschiebesystemen verläuft die Dichtung entweder gerade durchgehend oder versetzt.

Im ersten Fall liegen die Flügel im geschlossenen Zustand in einer Ebene.

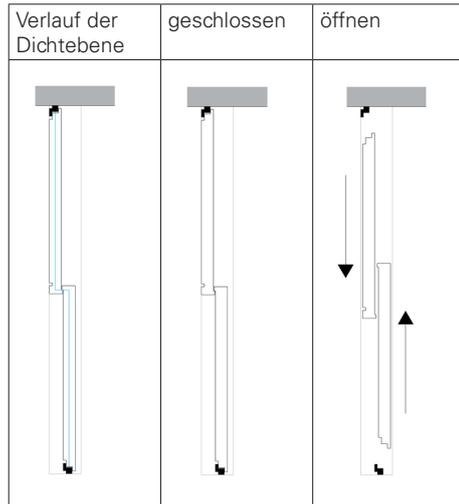
Um sie gegeneinander verschieben zu können, muss einer der Flügel - in der Regel der untere - ausgestellt werden.

Im anderen Fall sind die Flügel in jeder Position versetzt zueinander und lassen sich daher ohne geometrische Konflikte vertikal bewegen.

Die Lage der Dichtungsebenen beeinflusst maßgeblich den Bewegungsablauf und bestimmt das mechanische Zusammenspiel der beweglichen Teile im Verlauf der Bedienung.

Versetzte Dichtungsebene

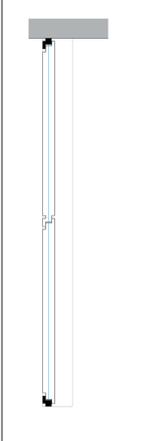
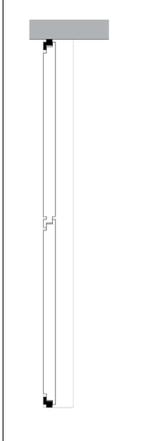
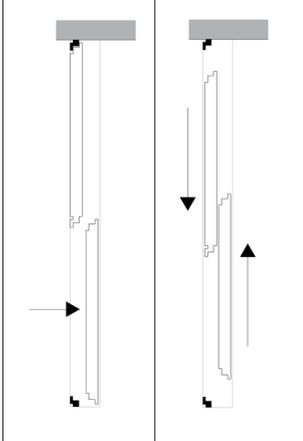
Tabelle 4.3 Versetzte Dichtungsebene

Verlauf der Dichtebene	geschlossen	öffnen
		

Befinden sich im geschlossenen Zustand die Flügel in versetzten Ebenen, gestaltet sich der Einleitungsvorgang einfach, da lediglich ein Lösen aus der Dichtebene erfolgen muss.

Gerade durchgehende Dichtungsebene

Tabelle 4.4 Gerade durchgehende Dichtungsebene

Verlauf der Dichte Ebene	geschlossen	ausstellen	öffnen
			

Bei gerade durchgehender Ebene sind die Dichtigkeit und der Wärmedurchgang leichter kontrollierbar als bei der versetzten. Das Positionieren des unteren Flügels in die Schiebeebe ist hier beispielhaft als paralleler Ausstellvorgang dargestellt. Möglich ist auch ein Kippvorgang des unteren Flügels. Beim anschließenden Schieben läuft der untere Flügel in einer gekröpften Führungsnut in die Senkrechte. In beiden Fällen ist der Öffnungsvorgang technisch aufwendiger als bei der Variante mit versetzter Dichtungsebene.

4.5 Betriebszustände und Bewegungsabläufe

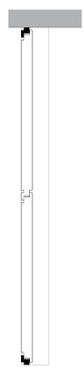
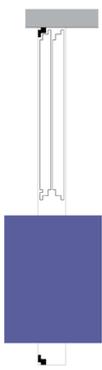
4.5.1 Betriebszustände

Man unterscheidet zwischen Haupt- und Zwischenbetriebszuständen. Die Hauptbetriebszustände bilden die für die Lüftung entscheidenden Schlüsselpositionen ab. Die Zwischenbetriebszustände ergeben sich beim Übergang dazwischen.

Folgende drei Betriebszustände werden als Hauptbetriebszustände festgelegt:

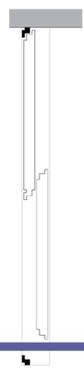
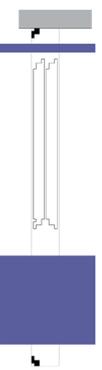
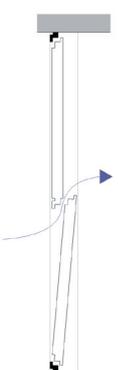
- Geschlossener Zustand (A).
Es findet keine Lüftung statt.
- Symmetrische Doppelspaltöffnung (B).
Es kann stufenlos jede beliebige Öffnungshöhe der Spalte von der minimalen bis zur maximalen Doppelspaltöffnung eingestellt werden. Bei dieser Position steht die individuelle Regulierung der Lüftungsintensität durch den Benutzer im Vordergrund.
- Vollöffnung (C).
Es soll ein großer, zusammenhängender Öffnungsquerschnitt auf mittlerer Höhe hergestellt werden, um den Bedürfnissen der Nutzer nach Stoßlüftung und Außenbezug nachkommen zu können.

Tabelle 4.5 Hauptbetriebszustände

A	B	C
geschlossen	symmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
		

Folgende Zwischenbetriebszustände ergeben sich:

Tabelle 4.6 Zwischenbetriebszustände

Übergang A - C	Übergang B - C	Übergang A - C, A - B
Einzelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Ausstellungsvorgang
		

4.5.2 Bewegungsabläufe

Es gibt vier Varianten für den Wechsel zwischen den notwendigen Betriebszuständen geschlossen (A), Doppelspaltöffnung (B) und Vollöffnung (C).

In Variante 1 ist die einfache und intuitive Bedienung die Folge eines fortlaufenden, eindeutigen Bewegungszyklus. Aus dem geschlossenen Zustand öffnet sich das Element ohne Wahlmöglichkeit in der für die Lüftung besonders wirksamen Doppelspaltöffnung. Wird der Bewegungsablauf vom Nutzer über die maximale Doppelspaltöffnung hinaus kontinuierlich fortgesetzt ergibt sich die Vollöffnung als zusätzliche Option. Der technische Aufwand erscheint verhältnismäßig.

Bei Variante 2 kann man von der geschlossenen Position die Betriebszustände Doppelspaltöffnung oder Vollöffnung direkt erreichen. Das Konzept ähnelt dem eines Drehkippflügels bei dem man ebenfalls über eine Einstellung an der Handhabe wählen kann, ob das Fenster gedreht oder gekippt werden soll. Voraussetzung dafür ist eine Beschlagtechnik, die eine einfache Voreinstellung direkt an der Handhabe zulässt und eine Fehlbedienung ausschließt.

Variante 3 bietet in allen Betriebszuständen eine Wahlmöglichkeit an. Diese Flexibilität hat jedoch einen höheren technischen Aufwand zur Folge und erschwert die Handhabung.

Variante 4 erfüllt die Grundanforderungen nach einer stufenlos einstellbaren Doppelspaltöffnung nicht und wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4.7 Varianten für den Wechsel zwischen den Betriebszuständen

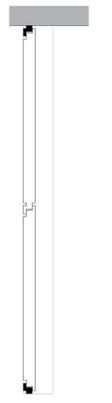
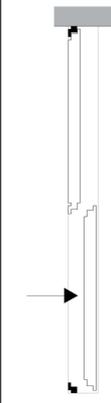
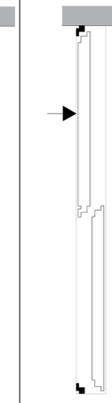
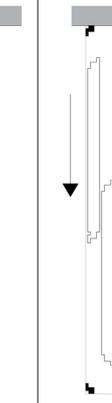
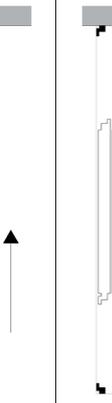
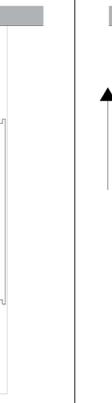
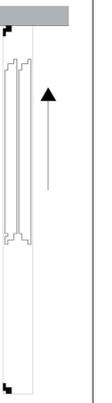
	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Bewegungsablauf	Die Vollöffnung (C) wird über die symmetrische Doppelspaltöffnung (B) erreicht. Ein direkter Übergang von A nach C ist nicht möglich.	Ausgehend vom geschlossenen Zustand (A) werden die Betriebszustände symmetrische Doppelspaltöffnung (B) und Vollöffnung (C) direkt erreicht. Ein direkter Übergang von B nach C ist nicht möglich.	Ausgehend vom geschlossenen Zustand (A) werden die Betriebszustände symmetrische Doppelspaltöffnung (B) und Vollöffnung (C) direkt erreicht. Ein direkter Übergang von B nach C ist ebenfalls möglich.	Die symmetrische Doppelspaltöffnung (B) wird über das Verschieben der deckungsgleichen Flügel aus der Vollöffnung (C) erreicht. Ein direkter Übergang von A nach B ist nicht möglich.
Vorteil	Leichte Bedienbarkeit aufgrund des eindeutigen Bewegungsablaufs.	Direkte Ansteuerbarkeit der gewünschten Öffnungsart aus dem geschlossenen Zustand.	Direkter Wechsel zwischen allen Betriebszuständen.	-
Nachteil	Die beiden Öffnungsarten B und C können in diesem Fall nicht als gleichrangig bewertet werden, da die Vollöffnung der symmetrische Doppelspaltöffnung nachgeschaltet ist.	Im geschlossenen Zustand muss die Mechanik durch einen Nutzereingriff auf die jeweilige Öffnungsrichtung eingestellt werden. Die symmetrische Doppelspaltöffnung kann nicht direkt zur Vollöffnung vergrößert werden.	Der direkte Wechsel zwischen allen Betriebszuständen hat eine komplexe Einstellbarkeit der Öffnungsmechanik zur Folge. Dies erschwert eine intuitive Bedienung.	Es ist keine stufenlos regulierbare symmetrische Doppelspaltöffnung möglich.

4.5.3 Vergleich der Bewegungsabläufe

Als Grundlage der vorausgehenden Untersuchungen werden zunächst Festlegungen hinsichtlich der Bauart getroffen. Im Weiteren werden die Wechselmöglichkeiten zwischen den Betriebszuständen unter Berücksichtigung der physikalischen und mechanischen Grundlagen als Bewegungsabläufe näher betrachtet und verglichen.

In geschlossener Position befinden sich die Flügel in einer Ebene. Die Dichtungsebene verläuft gerade. Der untere Flügel wird zum Verschieben nach innen ausgestellt. Um einen Durchblick auf Augenhöhe zu erreichen, werden die Flügel bei der Vollöffnung vollständig nach oben geschoben, so dass sich der freie Querschnitt direkt über der Brüstung befindet.

Tabelle 4.8 Variante 1

Einleitungsphase			Öffnungsphase			
A			B			C
geschlossen	erster Flügel in Schiebeweise	zweiter Flügel in Schiebeweise	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
0	1	2	3	4	5	6
						

Der Bewegungsablauf erfolgt linear von A über B nach C und kann an jeder Stelle angehalten oder umgekehrt werden. Der Bewegungsablauf in entgegengesetzter Richtung erfolgt in umgekehrter Reihenfolge der Einzelschritte. Bis zur maximalen Doppelspaltöffnung (4) sind die Öffnungsflügel gegenläufig gekoppelt. Bei einer Fortsetzung des Öffnungsvorgangs in die asymmetrischen Doppelspaltöffnung (5) muss für die gleichläufige Bewegung die Kopplungsart geändert werden. Soweit bis zur Position 4 ein abhängiger Gewichtsausgleich erfolgt, muss dieser ebenfalls gewechselt werden.

Bei einer Umsetzung der Variante 1 ist eine technische Lösung für den Übergang zwischen gegenläufiger und gleichläufiger Schiebewegung der Flügel zu entwickeln.

Tabelle 4.9 Variante 2

Öffnungsphase		Einleitungsphase				Öffnungsphase	
C		A		B			
Vollöffnung	Einzelspalt- öffnung	erster Flügel in Schiebe- position	geschlossen	erster Flügel in Schiebe- position	zweiter Flügel in Schiebe- position	symme- trische Doppelspalt- öffnung	maximale Doppelspalt- öffnung
3'	2'	1'	0	1	2	3	4

Ausgehend von der Position 0 können unabhängig voneinander die Betriebszustände B (3) und C (3') erreicht werden. Der Bewegungsablauf kann an jeder Stelle angehalten oder umgekehrt werden. Der Bewegungsablauf in entgegengesetzter Richtung erfolgt wie bei Variante 1 in umgekehrter Reihenfolge der Einzelschritte.

Für den Wechsel von A nach B ist eine gegenläufige Kopplung der Flügel sinnvoll. Beim Wechsel in den Betriebszustand C muss in Position 0 die gegenläufige Kopplung aufgehoben werden. Entsprechend der Richtung des Bewegungsablaufs muss auch die Art des Gewichtsausgleichs eingestellt werden. Für den Wechsel von A nach C ist ein abhängiger Gewichtsausgleich ausgeschlossen.

Bei einer Umsetzung der Variante 2 ist eine technische Lösung für die Wahl zwischen gegenläufiger Schiebebewegung und dem unabhängigen Verschieben des unteren Flügels in Position 0 zu entwickeln.

Tabelle 4.10 Variante 3

Öffnungsphase		Einleitungsphase				Öffnungsphase			
C		A				B		C	
Vollöffnung	Einzelspaltöffnung	erster Flügel in Schiebeweise	geschlossen	erster Flügel in Schiebeweise	zweiter Flügel in Schiebeweise	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
3' bzw. 6	2'	1'	0	1	2	3	4	5	6 bzw. 3'

An jedem der 3 Hauptbetriebszustände besteht die Wahlmöglichkeit jeden der beiden anderen Zustände direkt anzusteuern. Zusätzlich zu den Positionen an denen in den vorhergehenden Varianten Steuerungseingriffe notwendig waren, kann der Nutzer in Variante 3 auch in der Position der Vollöffnung (6 bzw. 3') wählen, welche der beiden anderen Hauptbetriebszustände er ansteuern möchte. Entsprechend der Richtung des gewählten Bewegungsablaufs muss auch an dieser Position die Art der Kopplung und des Gewichtsausgleichs eingestellt werden. Die Anforderungen an die dafür zu entwickelnde Beschlagstechnik sind daher komplexer als bei den vorhergehenden Varianten.

4.6 Vorstufen des Prototyps

Anhand von Arbeitsmodellen werden schrittweise Lösungsansätze überprüft. Als Teil eines empirischen Entwicklungsprozesses dienen sie der Annäherung an die technische Lösung zum Bau des Prototyps.

Wie aus dem vorhergehenden Kapitel hervorgeht, stellen der Gewichtsausgleich und die Kopplung der beiden Flügel die Schwerpunkte der technischen Entwicklungsarbeit dar.

Zwischen der Art des Gewichtsausgleichs und der Kopplungsart bestehen Abhängigkeiten hinsichtlich ihrer gegenseitigen Kombinierbarkeit. In nachfolgender Matrix ist die Eignung eines unabhängigen bzw. abhängigen Gewichtsausgleichs für die Kopplungsarten vereinfacht dargestellt.

Tabelle 4.11 Gewichtsausgleich und Kopplung

Gewichtsausgleich		Kopplung		
		gegenläufig	gleichläufig	ohne
unabhängig	Federkraft / Gegengewicht	+	+	+
	Kraftwandlung	+	+	+
abhängig	Umlenkung	++	-	-

Für die gegenläufige Kopplung eignet sich der abhängige Gewichtsausgleich besonders, da sie sich bauartbedingt ergibt. Die beiden Flügel sind über eine Umlenkung miteinander verbunden. Eine gleichläufige Kopplung lässt sich mit dieser Art des Gewichtsausgleichs nicht erreichen.

Beim unabhängigen Gewichtsausgleich sind alle Kopplungsarten möglich.

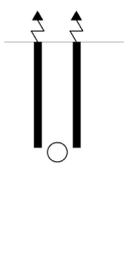
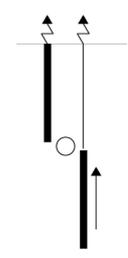
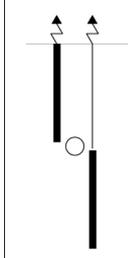
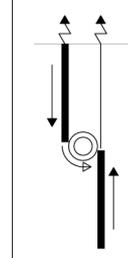
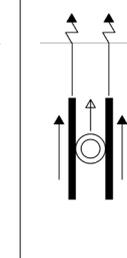
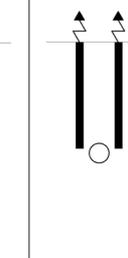
4.6.1 Unabhängiger Gewichtsausgleich

Im Folgenden werden zunächst zwei Lösungsansätze überprüft bei denen der Gewichtsausgleich jeweils unabhängig erfolgt. An mehreren Arbeitsmodellen wird die technische Umsetzung entwickelt und die Handhabung getestet.

Unabhängiger Gewichtsausgleich mit Federkraft

Bei diesem Lösungsansatz gleichen Federn das Gewicht der Flügel bei jeder Bewegung unabhängig voneinander aus. Die Kopplung dient lediglich zum Ansteuern des oberen Flügels. Abhängig von der gewünschten Bewegungsart wird sie über die Handhabung gleichläufig, gegenläufig oder inaktiv eingestellt.

Tabelle 4.12 Schema des unabhängigen Gewichtsausgleichs mit variabler Kopplung

C		A	B		C
Vollöffnung	Einzelspalt- öffnung	geschlossen	symme- trische Doppelspalt- öffnung	asymme- trische Doppelspalt- öffnung	Vollöffnung
					

-   Kopplung, gleichläufig
-  Kopplung, gegenläufig
-  Kopplung, inaktiv
-  Gewichtsausgleich, eine Einheit

Beim Wechsel zwischen den Betriebszuständen A und B sind die Flügel gegenläufig gekoppelt. Der Gewichtsausgleich der beiden Flügel erfolgt unabhängig voneinander mit Federn bzw. Gegengewichten.

Beim Wechsel zwischen den Betriebszuständen B und C werden durch das Betätigen der Handhabe die Flügel gleichlaufend gekoppelt. Der unabhängige Gewichtsausgleich bleibt auch im Gleichlauf beider Flügel wirksam.

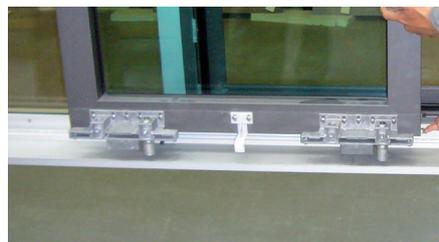
Beim Wechsel zwischen den Betriebszuständen A und C wird im geschlossenen Zustand durch das Betätigen der Handhabe die Kopplung deaktiviert. Der untere Flügel kann nun einzeln verschoben werden.

Da sich die Flügel im geschlossenen Zustand in einer Ebene befinden, müssen sie vor dem Verschiebevorgang ausgestellt werden. Bei marktüblichen Vertikalschiebefenstern mit Federausgleich wird auf eine ebenengleiche Stellung der Flügel in geschlossenem Zustand verzichtet, da es einen Konflikt zwischen Ausstellrichtung und der Wirkungsrichtung der Federn gibt.

Vor dem Einsetzen der Schiebewegung ist daher ein separater Ausstellvorgang erforderlich. Dazu werden folgende parallele Ausstellmechanismen untersucht.

- Parallelschiebekippbeschlag

Der Parallelschiebekippbeschlag wird bei Fassaden für Horizontalschiebeflügel, die in geschlossenem Zustand ebenengleich sind, verwendet. Die Mechanik des Beschlags erlaubt die Verwendung eines Öffnungsflügels mit konventioneller Falzprofilierung.

**Bild 4.3** Parallelschiebekippbeschlag

- Ausstellscheren

Ausstellscheren werden verwendet, um Öffnungsflügel zur Herstellung umlaufender Lüftungsspalte parallel aus ihrer geschlossenen Position zu führen.

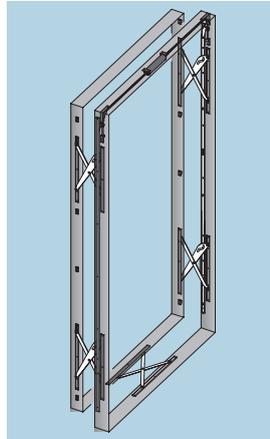


Bild 4.4 Ausstellscheren

Mit Hilfe von Arbeitsmodellen im Maßstab 1:1 wird der Bewegungsablauf studiert und die Eignung der Lösungsansätze abgeschätzt.

Um zu verhindern, dass die Feder die Ausstellbewegung nachvollziehen muss, wird der Flügel in einem separaten Ausstellvorgang losgelöst vom Angriffspunkt der Feder horizontal bewegt.

Dieses Prinzip wird in einem ersten Modell veranschaulicht und geometrisch überprüft. Zwei seitliche Bretter werden wie Schubladenschlitten im Rahmen des Elements vertikal verschoben. Der Öffnungsflügel wird zwischen den beiden Brettern horizontal verschoben. Bei beiden Bewegungsrichtungen wird der verschiebbare Teil in Nuten ähnlich einer einfachen Schublade geführt.



Bild 4.5 Nut für Ausstellvorgang



Bild 4.6 schiebbares Bauteil

In einem weiteren Modell wird eine Ausstellschere mit Vertikalauszügen für die senkrechte Führung mit einer Zahnstangenmechanik für die Kopplung kombiniert.

Tabelle 4.13 Schema Arbeitsmodell mit Ausstellscheren

	A	B		C
	geschlossen	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
Schnitt oben				
Schnitt unten				
Schnitt oben				
Schnitt unten				

- oberer Flügel
- unterer Flügel und Ausstellscheren
- Lastenauszug
- Zahnräder und Zahnstangen

Beim Ausstellen des unteren Flügels schließt sich die Schere. Der untere Flügel befindet sich nun in einer Ebene mit einem Auszug und kann vertikal verschoben werden. Der Gewichtsausgleich greift am Schlitten des Auszugs an und vollzieht eine reine Vertikalbewegung. Über die Zahnstange des unteren Flügels wird mittels eines Zahnrads die Bewegung auf die Zahnstange des oberen Flügels übertragen. Für eine unabhängige Bewegung des unteren Flügels wird die Kopplung vor dem Verschieben deaktiviert. Für einen Wechsel der Kopplungsart wird in der Deckungsgleiche die Kopplung der Zahnstangen gelöst und eine starre Verbindung zwischen den beiden Flügeln hergestellt.



Bild 4.7 Zahnräder und Zahnstangen



Bild 4.8 Parallelausstellschere



Bild 4.9 Detail Zahnräder und Zahnstange

Am Arbeitsmodell wurde das Grundprinzip erfolgreich umgesetzt. Es zeigte sich jedoch, dass die Führung der Flügel in Vertikalauszügen zwar eine präzise, aber zugleich aufwendige Lösung darstellt, die hohe Kosten erwarten lässt.

Die Kopplung über Zahnstangen und Zahnräder stellt hohe Anforderungen an das Zusammenspiel der mechanischen Bauteile und erfordert entsprechend geringe Toleranzen, die in der Baupraxis kaum zu realisieren sind. Die komplexe Bauweise macht den Mechanismus anfällig für Störungen. Es ergibt sich die Notwendigkeit, die Bauteile zu Revisionszwecken zugänglich zu halten. Da sich die Elemente linear über die gesamte Fensterhöhe erstrecken, stehen Revisionsöffnungen im Konflikt mit gestalterischen Ansprüchen an das Fassadenelement.

Eine Überprüfung des Mechanismus hinsichtlich der Handhabung wird aufgrund der vorgenannten Nachteile nicht detailliert vorgenommen.

Unabhängiger Gewichtsausgleich mit Kraftwandlung

Bei handelsüblichen Vertikalschiebefenstern erfolgt der Ausstellvorgang des unteren Flügels über eine verkröpfte Führungsnut. Da sich dieses Prinzip nicht mit einem Gewichtsausgleich durch Federn kombinieren lässt, wird beim nachfolgend beschriebenen Arbeitsmodell das Prinzip der Kraftwandlung für das Vertikalschiebefenster untersucht.

Ausgangspunkt für das Arbeitsmodell sind folgende Ansätze:

- Ausstellen des unteren Flügels durch Kippen
- Verschieben des unteren Flügels in einer gekröpften Führungsnut
- Übertragung der Bewegung mittels Welle und Seilaufhängung
- Antrieb der Welle mit Gurten
- Unabhängiger Gewichtsausgleich durch Kraftwandlung

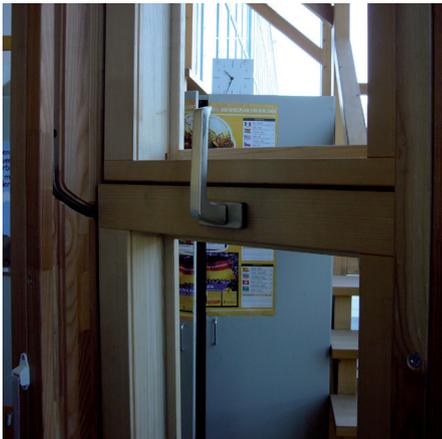


Bild 4.10 gekröpfte Nut für Kippvorgang



Bild 4.11 gekröpfte Nut am Flügelfußpunkt



Bild 4.12 Rollladengurte beidseitig



Bild 4.13 getrennte Wellen

Durch Betätigen der Handhabe am unteren Flügel wird dieser entriegelt und kann gekippt werden. Er befindet sich nun in einer Position in der er in einer gekröpften Führungsnut vertikal verschoben werden kann. Der Flügel ist an Stahlseilen aufgehängt und wird durch ein Aufwickeln der Seile auf eine Welle angehoben. Die dafür notwendige Drehbewegung wird mittels eines Rollladengurtantriebs erzeugt. Den Gewichtsausgleich leistet dabei ein Übersetzungsgetriebe. Sobald sich der untere Flügel in der Verschiebeebe befindet, kann der obere Flügel in gleicher Weise durch einen eigenen Gurtantrieb bedient werden.

Mit diesem Prinzip lässt sich zwischen allen gewünschten Betriebszuständen direkt wechseln. Der technische und wirtschaftliche Aufwand ist kalkulierbar, da Antrieb und Gewichtsausgleich in einer bewährten Technik erfolgen. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Untersuchungen am Zahnstangen- und Schubladenmodell ermöglicht die Bauweise mit Seilaufhängung der Flügel eine schlanke Ausbildung der vertikalen Fassadenprofile. Einzige Schwächung der Profile stellt die Führungsnut für die vertikale Schiebewegung der Flügel dar. Die Technik zur Aufhängung und Umlenkung der Seile kann oberhalb des Vertikalschiebeelements vorgesehen werden. Da das Vertikalschiebeelement mit geringer Elementbreite im Verhältnis zu seiner Höhe angelegt ist, konzentriert sich der zu Revisionszwecken zugänglich auszubildende Technikbereich bei der Bauweise mit Seilaufhängung auf den oberen Riegel.

Ein Vorteil bei der Handhabung ist, dass die Schiebewegung nicht unmittelbar am Flügel ausgeübt werden muss, sondern mittelbar über den Bediengurt erfolgen kann. Die Notwendigkeit, dass mindestens der untere Flügel für den Nutzer immer in erreichbarer Nähe bleibt, ist damit aufgehoben. Allerdings ist die Handhabung aufgrund der vollständig getrennten Bedienung der beiden Flügel nicht befriedigend. Der Nutzer muss mit dem Griff und den Gurten drei Bedienelemente betätigen.

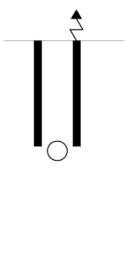
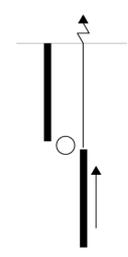
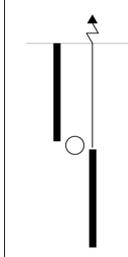
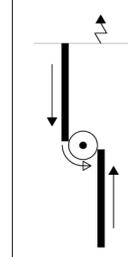
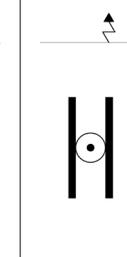


Bild 4.14 Rollladengurte beidseitig

4.6.2 Variabler Gewichtsausgleich

Um den Vorteil der Gurtbedienung nutzen zu können und zugleich eine Vereinfachung der Handhabung zu erreichen, wird die Bedienung auf einen Gurt reduziert.

Tabelle 4.14 Schema des variablen Gewichtsausgleichs mit variabler Kopplung, Variante 1

C		A	B	
Vollöffnung	Einzelspalt- öffnung	geschlossen	symme- trische Doppelspalt- öffnung	maximale symme- trische Doppelspalt- öffnung
				

-  Umlenkung, gegenläufig
-  Kopplung, inaktiv
-  Gewichtsausgleich, eine Einheit

Der Bediengurt ist an der Welle befestigt und in geschlossenem Zustand aufgewickelt. Für die Erzeugung einer Drehbewegung wird der Gurt abgewickelt. Über den auf dem Bild erkennbaren Zahnriemen treibt die Welle eine Spule an, auf die der überschüssige Gurt aufgewickelt wird.

Um mit einem Gurt beide Wellen anzutreiben werden diese miteinander über Zahnräder gekoppelt. Die Kopplung kann für den Fall einer unabhängigen Bewegung der Flügel inaktiv gestellt werden. Dazu wird im Modell die Zahnradverbindung manuell getrennt.



Bild 4.15 Variable Kopplung beider Wellen mit einer Zahnradverbindung

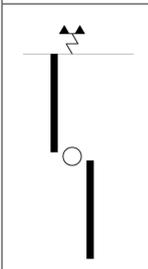
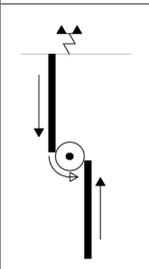
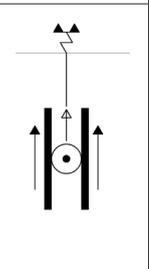
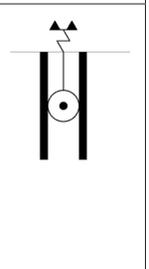


Bild 4.16 Gurt und Zahnriemen

Eine weitere Vereinfachung dieses Prinzips ist in folgendem Schema dargestellt. Die Vollöffnung ergibt sich automatisch durch eine Fortsetzung des Öffnungsvorgangs über die maximale Doppelspaltöffnung hinaus. In geschlossenem Zustand muss somit keine Einstellung getroffen werden, welcher Betriebszustand angesteuert werden soll.

Im Wechsel von Betriebszustand A zu B sind die Flügel gegenläufig gekoppelt und werden über einen gemeinsamen Gurt bedient. Beim Wechsel von B nach C ändert sich die gegenläufige in eine gleichläufige Kopplung. Die Bedienung erfolgt weiterhin über den Gurt. In dieser Phase gleicht sich das Gewicht der Flügel nicht mehr gegenseitig aus. Ein zusätzlicher Gewichtsausgleich zur Kompensation des Gewichts beider Flügel wird wirksam.

Tabelle 4.15 Schema des variablen Gewichtsausgleichs mit variabler Kopplung, Variante 2

A	B		C
geschlossen	symmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	
			

-  Umlenkung, gleichläufig
-  Umlenkung, gegenläufig
-  Kopplung, inaktiv
-  Gewichtsausgleich, zwei Einheiten

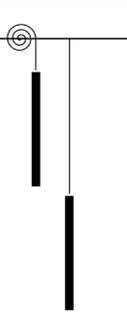
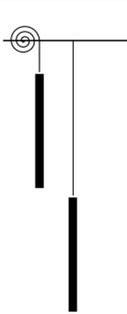
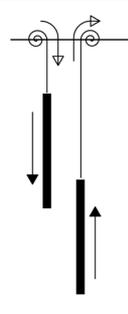
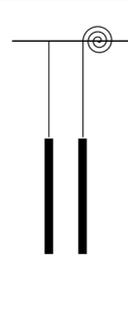
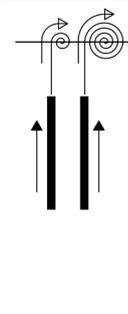
Auch bei der technischen Umsetzung dieses Schemas liegt die Hauptaufgabe darin, eine Lösung für die Umschaltung der Kopplungsart zu finden. Wie sich bei den vorhergehenden Untersuchungen herausgestellt hat, ist es schwierig, den Wechsel der Kopplungsart über eine willkürliche Betätigung der Handhabe auszulösen. Der Wechsel von gegenläufiger zu gleichläufiger Bewegung zwischen Betriebszustand B und C soll daher ohne Eingriff des Nutzers ablaufen.

4.6.3 Automatik für die variable Kopplung

Durch die Befestigung der Abhängung beider Flügel von der gleichen Welle ist es möglich, sich wie bei der Umlenkung den Vorteil des gegenseitigen Gewichtsausgleichs und der gegenläufigen Kopplung zunutze machen. Während bei dieser der abhängige Gewichtsausgleich über eine direkte Seilverbindung der beiden Flügel hergestellt wird und damit keine Änderung der Kopplungsart zulässt, eröffnet sich im Fall einer indirekten Kopplung an der Welle bei richtiger Wahl der Wicklung die Möglichkeit, einen automatischen Übergang von der gegenläufigen in die gleichläufige Kopplung zu erreichen.

Dieses Prinzip für den Gewichtsausgleich und die Kopplung zweier Flügel eines Vertikalschiebelements stellt eine bislang nicht bekannte Neuerung dar und wird zur maßgeblichen Grundlage für die Bauart des ersten Prototyps.

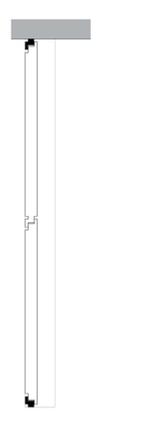
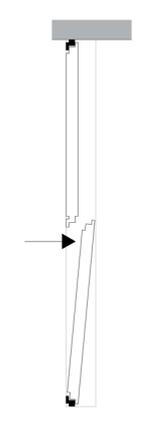
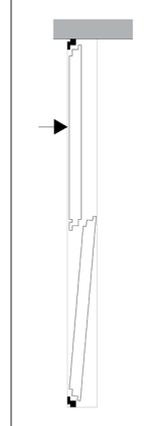
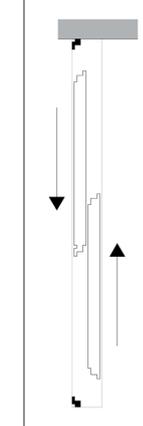
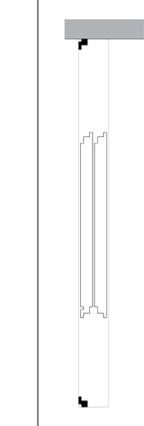
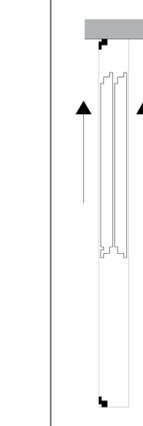
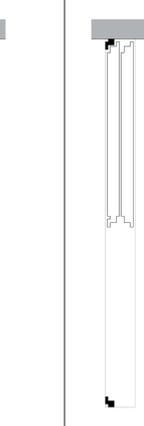
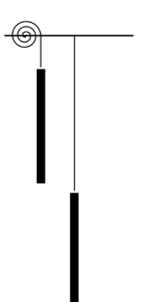
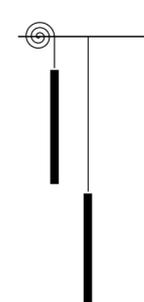
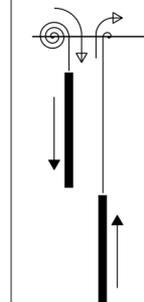
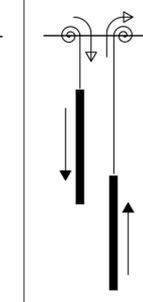
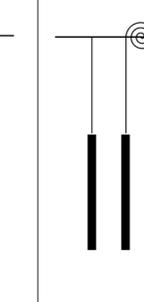
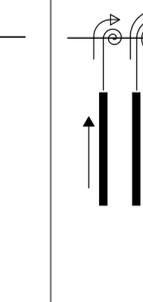
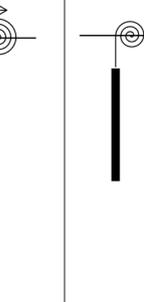
Tabelle 4.16 Schema der Automatik für die variable Kopplung

Betriebszustand	A			B			C
	geschlossen	Ausstellen des unteren Flügels	Lösen des oberen Flügels	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
Status der Wicklung							

4.7 Prototyp

Die folgende Tabelle zeigt den Bewegungsablauf und die Funktionsweise des Prototyps.

Tabelle 4.17 Bewegungsablauf Prototyp

Betriebszustand	A			B			C
	geschlossen	Ausstellen des unteren Flügels	Lösen des oberen Flügels	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
							
Art des Eingriffs	Entriegeln	Kippen	horizontaler Versatz	gegenläufige Vertikalverschiebung	-	gleichläufige Vertikalverschiebung	-
Bedienung der Handhabe	Drehbewegung am Griff	Ziehbewegung am Griff	-	Ziehbewegung an der Kette	-	Ziehbewegung an der Kette	-
Gewichtsausgleich	-	-	-	gegenseitig	gegenseitig	Kraftwandlung	Kraftwandlung
Kopplungsart	-	-	-	gegenläufig	-	gleichläufig	-
Status der Wicklung							

Durch Betätigen der Handhabe am unteren Flügel wird dieser entriegelt und anschließend gekippt. Aus dieser Position wird er in einer gekröpften Führungsnut vertikal verschoben. Der Flügel ist an Stahlseilen aufgehängt und wird durch ein Aufwickeln der Seile auf eine Welle angehoben. Die dafür notwendige Drehbewegung wird über die Betätigung einer Antriebskette erzeugt. Der obere Flügel ist ebenfalls über Stahlseile mit der Welle verbunden. Gleichzeitig mit dem Anheben des unteren Flügels wird die Seilwicklung des oberen Flügels abgewickelt, so dass sich dieser in einer gegenläufig synchronen Bewegung absenkt. Die Flügel stehen in gegenseitigem Gewichtsausgleich. In der Deckungsgleiche sind die Stahlseile des oberen Flügels vollständig abgewickelt und die maximale Doppelspaltöffnung ist hergestellt. Bei einer Fortsetzung der Drehbewegung hebt sich der obere Flügel wieder an indem seine Aufhängung in umgekehrter Richtung wieder aufgewickelt wird. Der Öffnungsvorgang des unteren Flügels setzt sich fort, so dass sich die Flügel nun gleichlaufend synchron nach oben bewegen. Den Gewichtsausgleich für beide Flügel leistet dabei ein Übersetzungsgetriebe.

Tabelle 4.18 Bewegungssequenz Prototyp I, raumseitig

A			B				C
geschlossen	Ausstellen des unteren Flügels	Lösen des oberen Flügels	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
0	1	2	3	4	5	6	7

**Tabelle 4.19** Bewegungssequenz Prototyp I, außenseitig

A			B				C
geschlossen	Ausstellen des unteren Flügels	Lösen des oberen Flügels	symmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	Vollöffnung
0	1	2	3	4	5	6	7



C				B			A
Vollöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	symmetrische Doppelspaltöffnung	Lösen des oberen Flügels	Ausstellen des unteren Flügels	geschlossen
7	6	5	4	3	2	1	0



C				B			A
Vollöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	asymmetrische Doppelspaltöffnung	maximale Doppelspaltöffnung	symmetrische Doppelspaltöffnung	Lösen des oberen Flügels	Ausstellen des unteren Flügels	geschlossen
7	6	5	4	3	2	1	0



Auf dieser Grundlage werden in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner Konstruktionszeichnungen für den Bau des Prototyps erstellt.

Technische Daten des Prototyps:

- Rahmen: Weißtanne massiv
- Füllungen: Holzpaneele mit Weißtannefurnier
- Rahmengröße: 1883 mm (h) x 550 mm (b) x 206 mm (d)
- Flügelgröße: 910 mm (h) x 474 mm (b) x 96 mm (d)

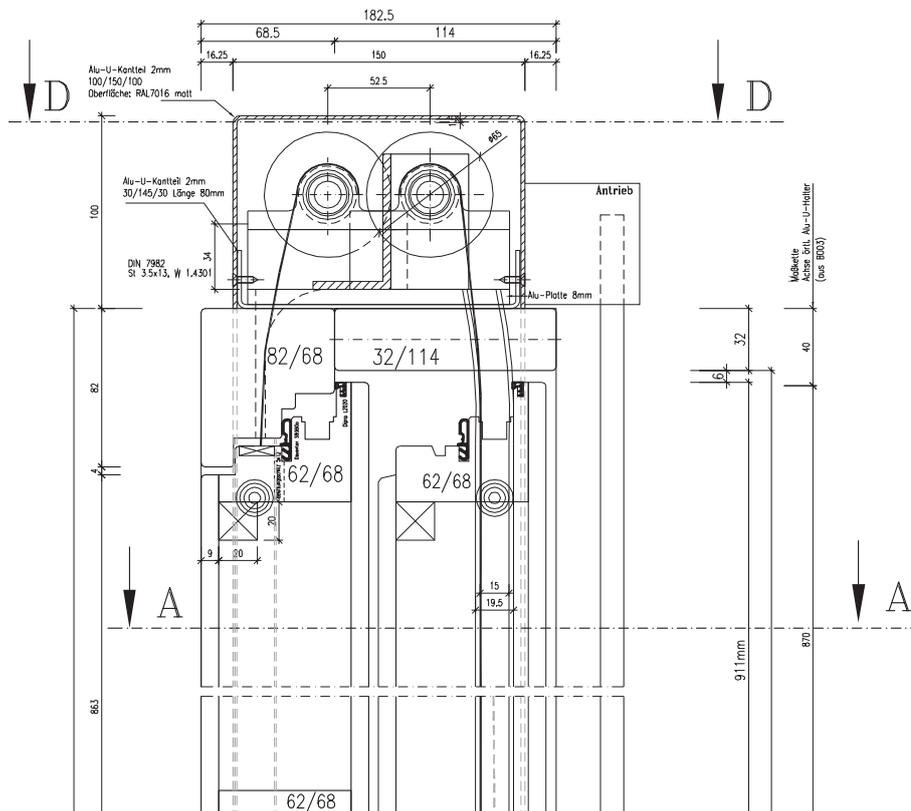


Abb. 4.3 Vertikalschnitt Prototyp Messe Bau 2007

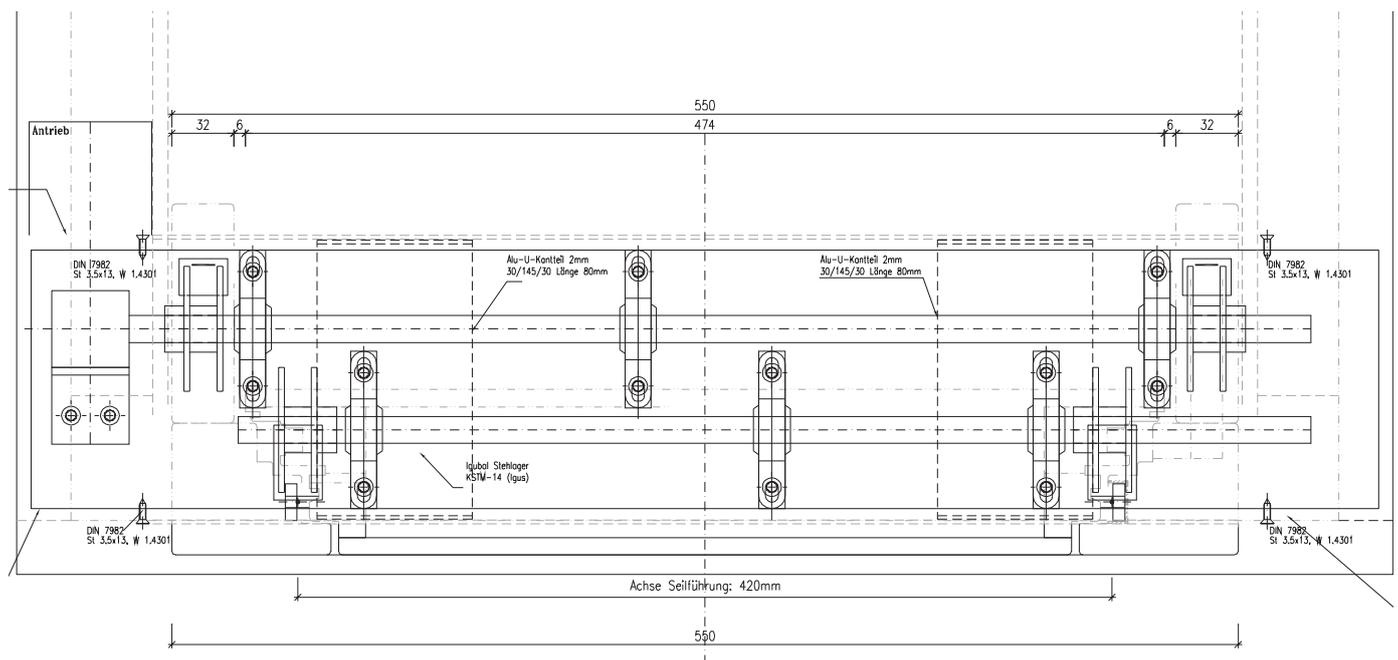


Abb. 4.4 Schnitt D-D Prototyp Messe Bau 2007



Bild 4.17 geschlossene Position



Bild 4.18 maximale Doppelspaltöffnung



Bild 4.19 Blick ins Getriebe, raumseitig



Bild 4.20 Blick ins Getriebe, von oben

An der Oberseite des Vertikalschiebeelements befindet sich der Antrieb.



Bild 4.21 Führungsnut unten, raumseitig

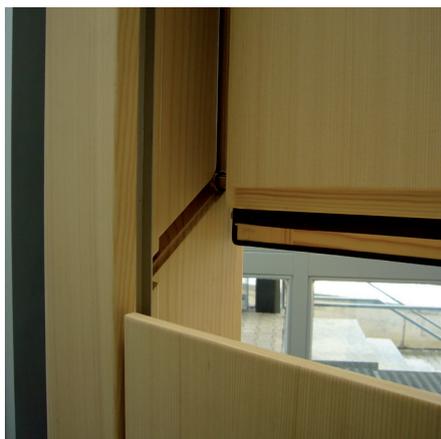


Bild 4.22 Führungsnut unten, von außen

An der Innenseite ist die gekröpfte Führungsnut für das Ausstellen des unteren Flügels sichtbar.

Präsentation des Prototyps auf der Messe BAU 2007

Der Prototyp wird im Rahmen des Messestandes Holzbau der Zukunft auf der BAU 2007 dem Messepublikum präsentiert. Die Messebesucher haben die Möglichkeit, das Vertikalschiebeelement eigenhändig zu bedienen und sich über die Hintergründe im persönlichen Gespräch zu informieren. Es kann reges Interesse am Prototyp verzeichnet werden.

Die Erwartung, dass der Kettenantrieb von den Besuchern intuitiv bedient werden kann, wird größtenteils bestätigt. Die Reaktionen der Besucher auf die Vorteile des Vertikalschiebelements sowie dessen gestalterische Umsetzung fallen positiv aus. Die Art der Kette bewährt sich im Dauerbetrieb nicht, da sie durch Abrieb Schmutzspuren an den Händen hinterlässt und bei Fehlbedienung die Gefahr der Verformung besteht.



Bild 4.23 Prototyp I und Informationsplakat



Bild 4.24 auf dem Messestand

Tests am Prototyp

Als Vorbereitung für die Markteinführung und Zulassung, wird der Prototyp ersten Prüfungen und Belastungstests unterzogen. Gegenüber dem Modell, das auf der Messe BAU 2007 präsentiert wird, werden vor Durchführung der Tests folgende Modifikationen vorgenommen:

- Aufhängung beider Flügel an einer Welle zur Reduzierung der beweglichen Teile
- Aufhängung der Flügel an textilen Gurten anstelle der Stahlseile zur Verminderung von Unregelmäßigkeiten bei der Wicklung

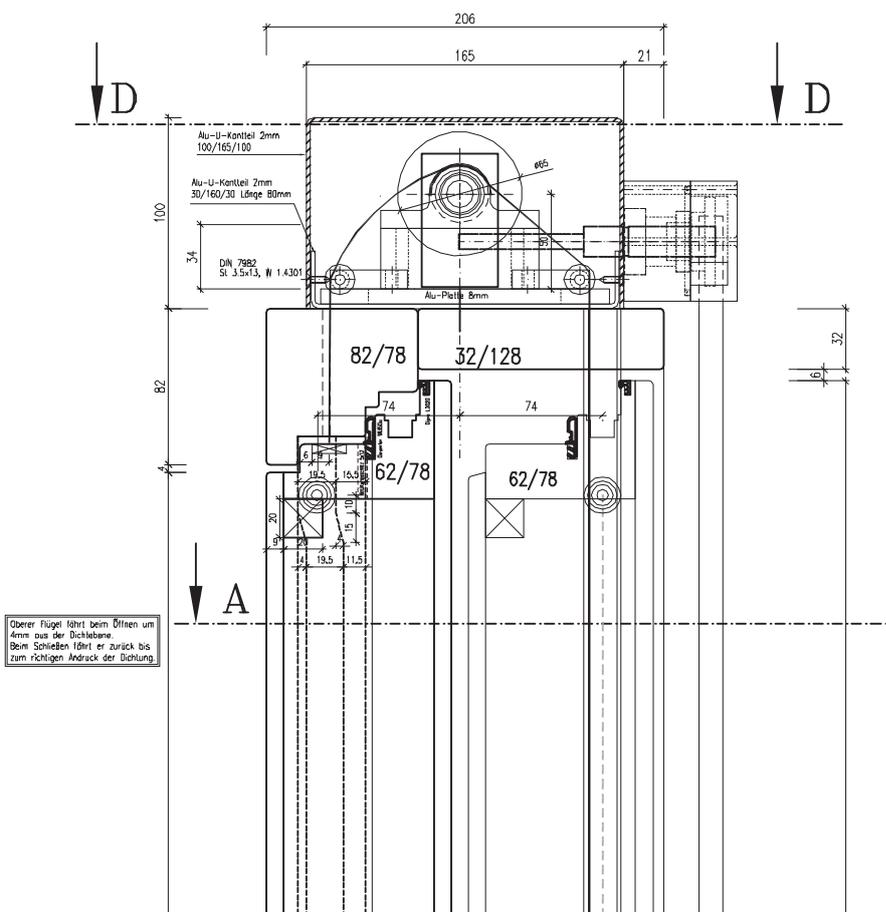


Abb. 4.5 Vertikalschnitt Prototyp Testreihe

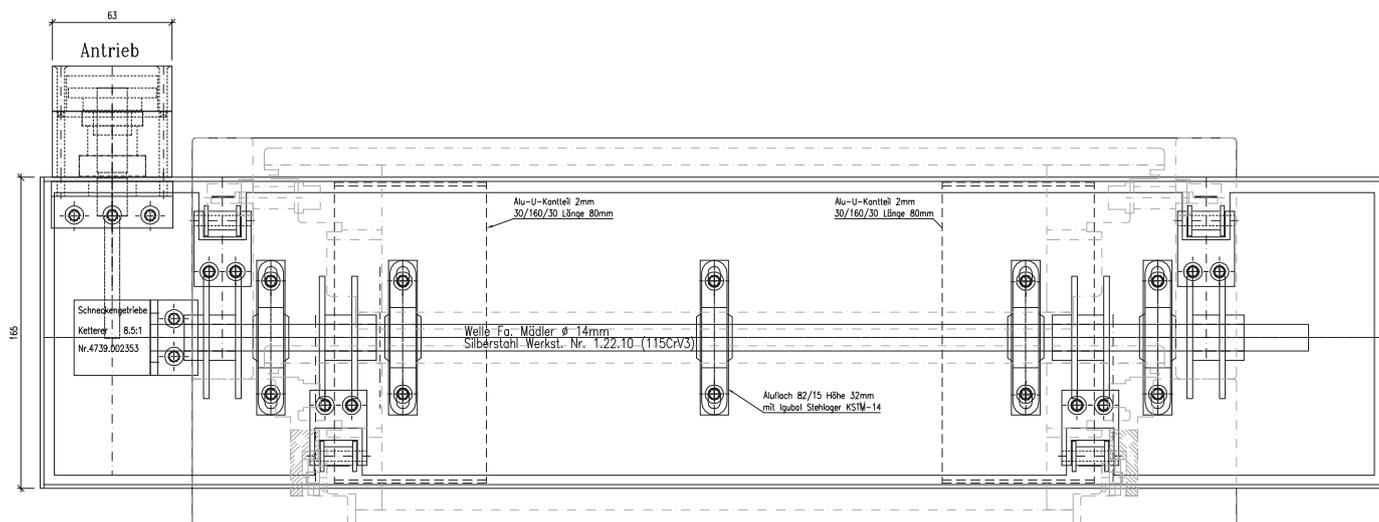


Abb. 4.6 Schnitt D-D Prototyp Testreihe

In einem Zeitraum von ca. 2 Monaten wird der modifizierte Prototyp vom Kooperationspartner Belastungstests unterzogen. Getestet wird die Gebrauchstauglichkeit und Dauerbelastbarkeit der Beschlags- und Antriebsteile. In einem entsprechenden Versuchstand werden über 10.000 Öffnungszyklen durchlaufen. Auf eine komplette Schließung und Verriegelung wird dabei vorerst verzichtet.

Tabelle 4.20 Prüffolge

Nummer	Datum	Zyklen
1	24.05.2007	Beginn
2	05.06.2007	3050
3	11.06.2007	3750
4	18.06.2007	5400
5	25.06.2007	6900
6	02.07.2007	8700
7	09.07.2007	10130
8	12.07.2007	11010

Das Prüfelement ist nach 11.010 Prüfzyklen noch voll funktionsfähig. Es sind keine Schäden an der Gurtbefestigung und den Führungsnuten feststellbar. Die Gurtumlenkrollen und die Befestigung der Welle zeigen Belastungsfolgen, die die Funktion jedoch nicht einschränken.



Bild 4.25 Abnutzungsspuren am Getriebe



Bild 4.26 Antriebswelle um 5mm verschoben

5. Ausblick

Der Prototyp zeigt, dass eine Weiterentwicklung des Vertikalschiebemechanismus für eine verbesserte, natürliche Lüftung möglich ist. Im Rahmen der Bedarfsanalyse wird die Anwendung auf den Bereich mit dem größten Entwicklungspotential fokussiert und die Defizite vorhandener Systeme festgestellt. Im Gegensatz zu diesen erlaubt der neu entwickelte Bewegungsmechanismus dem Nutzer über eine einfache intuitive Bedienung die bedarfsgerechte Lüftung mit der Doppelspaltöffnung und dem automatisierten Übergang in die Vollöffnung.

Neben den funktionalen Vorzügen zeichnet sich der Prototyp durch seine hohe ästhetische Qualität aus. Mit der Verwendung des Baustoffs Holz als flächigem Bauteil ergeben sich neue reizvolle Ausdrucksmöglichkeiten für die Gestaltung und Gliederung moderner Fassaden. Innenräumlich wirkt sich Holz aufgrund seiner Haptik zudem positiv auf das Wohlbefinden der Nutzer aus.

Aufgrund der viel versprechenden Ergebnisse wird der Bau eines zweiten Prototyps vorbereitet. Dabei ist eine Optimierung der folgenden technischen Aspekte geplant:

- Minimierung von Reibungswiderständen durch den Einsatz von reibungsarmen und laufruhigen Lagern und Führungsnuten aus Kunststoff
- Verbesserung der Bedienung durch eine alternative Antriebskette, z. B. Perlschnur
- Holzrahmenkonstruktion mit hohem Wärmedurchlasswiderstand [5.1]
- Optimierung der Falzgeometrie zur Vermeidung von Tauwasserausfall [5.2]
- Hochwärmegeämmte Holzpaneele mit Füllungen aus Vakuumdämmelementen
- Optimierung der Antriebseinheit hinsichtlich Wärmeschutz und Revisionsierbarkeit
- Verbesserung der Öffnungsflügel hinsichtlich der Ableitung von Niederschlagswasser
- Kombination mit Manipulatoren und zusätzlichen Maßnahmen gegen Einbruch, Insekten und Niederschlag
- Bestimmung der Format- und Gewichtsgrenzen

Eine Weiterentwicklung, die über eine reine Optimierung hinausgeht, bestünde in der Einführung einer Einhandbedienung. Um auf den Griff verzichten zu können, müssten die Vorgänge des Entriegeln, Ausstellens und Verriegelns mittels der Kette bedienbar sein. Erste Ansätze für eine technische Lösung sind bereits vorhanden und könnten im Rahmen einer weiteren Forschungstätigkeit ausgearbeitet werden.

Schon während der Bearbeitungsphase ergeben sich in Folge der BAU 2007 und über die Kooperationspartner Kontakte mit Interessenten, die aufgrund der spezifischen Vorteile des neu entwickelten Elements einen Einsatz in konkreten Bauvorhaben erwägen. Für den Fall einer Realisierung würde das Öffnungselement den objektspezifischen Anforderungen angepasst und den noch ausstehenden Tests für die Zulassung zum Markt unterzogen werden.

Nach momentaner Einschätzung liegen die Kosten für das Öffnungselement erwartungsgemäß über denen eines Drehkippelements vergleichbarer Größe. Um am Markt bestehen zu können, erscheint es daher wichtig, die Vorteile wirtschaftlich bewertbar darzustellen und dies in den potentiellen Zielgruppen zu publizieren. Durch eine Verbreitung und mit ersten Erfahrungen in der Serienfertigung ist eine Reduzierung der Herstellungskosten zu erwarten.

6. Anhang

Anhang zum Bericht Nr. M66 371/1

Verfasser: Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg

Bericht vom 12.03.2007

Verfasser: Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel

Bericht Nr. M66 371/2

Verfasser: Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg

Bericht vom Januar 2008

Verfasser: Hochschule Biberach, Biberach/Riß

Prüfbericht 07/07/H06

Verfasser: Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding

Konstruktionszeichnungen zum Prototypen Messe Bau 2007

Verfasser: Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding

Konstruktionszeichnungen zum Prototypen Testreihe

Verfasser: Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding

MÜLLER-BBM

Robert-Koch-Straße 11
82152 Planegg bei München
Tel. +49(89)85602 - 0
Fax +49(89)85602 - 111
www.MuellerBBM.de

Dr.-Ing. Gunter Pültz
Tel. +49(89)85602-336
Gunter.Pueltz@MuellerBBM.de

M66 371/1 plz
29. Dezember 2006

Vertikalschiebeelement - Lüftungsintensität

Ergebnisse der zonalen Simulationen

Bericht Nr. M66 371/1

Auftraggeber:	Technische Universität München, Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik, Univ. Prof. H. Kaufmann, Herrn Philipp Donath, Herrn Carl Magnus Bickel
Bearbeitet von:	Dr.-Ing. Gunter Pültz
Berichtsumfang:	Insgesamt 35 Seiten, davon 25 Seiten Textteil und 10 Seiten Anhang.

MÜLLER-BBM

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines und Aufgabenstellung	4
2	Untersuchte Szenarien	4
3	Thermische Behaglichkeit	5
4	Variante 1: Manuelle Bedienung mit Nachtlüftung	6
4.1	Kippelement	6
4.2	Vertikalschiebeelement	8
5	Variante 2: Manuelle Bedienung mit Betonkernkühlung	10
5.1	Kippelement	10
5.2	Vertikalschiebeelement	12
6	Variante 3: Manuelle Bedienung mit Betonkernkühlung und Nachtlüftung	15
6.1	Kippelement	15
6.2	Vertikalschiebeelement	17
7	Variante 4: Elektromotorisch Bedienung mit Nachtlüftung	20
7.1	Ohne Bauteilkühlung	20
7.2	Mit Bauteilkühlung	22
8	Zusammenfassung	25

Hinweis für den Leser:

Der Inhalt des Berichts Nr. M66 371/1 ist im bewertenden Bericht Nr. M66 371/2 wieder gegeben. Daher ist an dieser Stelle nur der Anhang zum Bericht abgedruckt.

MÜLLER-BBM

Anhang

9	Meteorologie	2
9.1	Sommerliche Schönwetterperiode im Juli nach VDI 2078	2
9.2	Testreferenzjahr	2
10	Geometrie	3
10.1	Standardbüro (2-Achser)	3
11	Bauteilaufbauten	5
11.1	Standardbüro	5
12	Fassaden	6
12.1	Standardbüro	6
12.2	Energetische Kennwerte	7
13	Innere Wärmelasten	8
13.1	Personen	8
13.2	Geräte	8
13.3	Beleuchtung	9
14	Gebäudetechnische Anlagen	9
14.1	Passives Klimakonzept	9
15	Natürliche Lüftung	9
15.1	Kippelement	9
15.2	Vertikalschiebeelement	10
15.3	Windeinfluss	10

MÜLLER-BBM

Anhang

Grundlagen der zonalen Simulationen

MÜLLER-BBM

9 Meteorologie

Die Ermittlung der sommerlichen Temperaturverhältnisse basiert auf Wetterdaten nach VDI 2078 für heiße Tage im Juli (ausgeprägte Schönwetterperiode als worst-case-Szenario) sowie den meteorologischen Daten des Testreferenzjahres (TRY) für statistische Aussagen zur Häufigkeit erhöhter sommerlicher Temperaturen.

9.1 Sommerliche Schönwetterperiode im Juli nach VDI 2078

München ist gemäß VDI 2078 der Kühllastzone 3 zuzuordnen, für die eine maximale Außenlufttemperatur von 32 °C um 16⁰⁰ Uhr MEZ (= 17⁰⁰ MESZ) angegeben wird. Die maximale Globalstrahlung tritt um 12⁰⁰ Uhr MEZ auf und erreicht in der Horizontalen einen Wert von ca. 860 W/m².

Die meteorologischen Daten der VDI 2078 werden üblicherweise auch der sommerlichen Auslegung von raumluftechnischen Anlagen zugrunde gelegt. Um das thermische Verhalten analog VDI 2078 während einer ausgeprägten Schönwetterperiode zu simulieren, erfolgt die Berechnung für eine größere Anzahl heißer, windarmer Tage (eingeschwungener Zustand) im Juli.

9.2 Testreferenzjahr

Gemäß Angaben des Deutschen Wetterdienstes ist München dem Testreferenzjahr, Region 13, zuzuordnen.

Die Datensätze des Testreferenzjahres enthalten die stündlichen Werte von

- Außenlufttemperatur
- Außenluftfeuchte
- Sonnenintensität (Direktstrahlung)
- Himmelsstrahlung (Diffusstrahlung)
- u.a.

für alle 8760 Stunden (365 Tage) eines durchschnittlichen Jahres ohne extreme sommerliche Schönwetterperioden.

Es wird davon ausgegangen, dass das untersuchte Gebäude im Stadtzentrum angesiedelt ist. Um den Einfluss der Umgebungsbebauung zu berücksichtigen, welcher sich aufgrund dieser Lage ergibt, wird ein empirischer Stadtkernzuschlag zur Außenlufttemperatur des Testreferenzjahres von $\Delta T = 2 \text{ K}$ angesetzt.

Das normale, unmodifizierte Testreferenzjahr des DWD enthält keine ausgeprägte sommerlichen Schönwetterperioden. Aus diesem Grund wird nicht das originale Testreferenzjahr, sondern ein modifiziertes Testreferenzjahr für München verwendet, welches einen durchschnittlichen Extremsommer (welcher ebenfalls vom DWD stammt) beinhaltet. Da alle Wetterdaten des DWD auf Messwerten der Jahre 1960...1990 basieren, erachten wir im Hinblick der jüngsten Klimaentwicklungen (Sommer 2003, Hitzemonate Juni/Juli 2006, Klimawandel, etc.) das Testreferenzjahr mit dem Extremsommer als repräsentativer als das Original-Testreferenzjahr.

MÜLLER-BBM

10 Geometrie

Nachfolgend ist die idealisierte Geometrie des exemplarisch ausgewählten Raumes aufgeführt.

10.1 Standardbüro (2-Achser)

Im Vorfeld wurde ein 2-Achs-Büro (Achismaß 1,35 m) als Standardbüro für beide Öffnungselemente vereinbart, welcher folgende, für derartige Räume typische idealisierte Geometrie aufweist:

- lichte Tiefe 5,4 m
- lichte Breite 2,6 m
- lichte Höhe 2,8 m

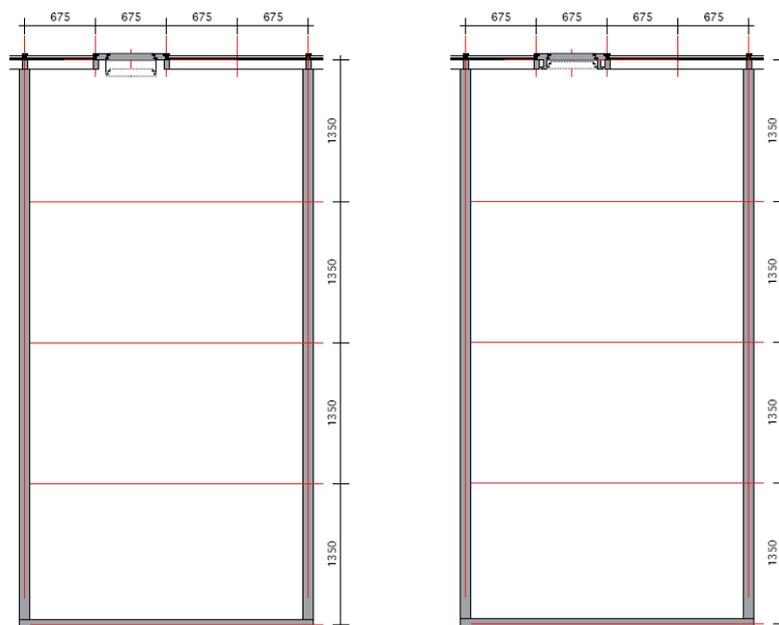


Abbildung 27. Grundriss des untersuchten Standardbüros (2-Achser)

Die Fassade des Regelbüros weist folgende Orientierung auf (Norden = 0° = 360° Azimutwinkel):

- Fassade nach Südwesten ca. 225 °

Der verglaste Fassadenbereich ist bei beiden Öffnungsvarianten raumhoch ausgebildet, wobei der Bereich mit den Öffnungselementen jeweils in opaker Holzbauweise ausgeführt ist (siehe Abbildung 28 und 29). Die detaillierten Abmessungen können ebenfalls Abbildung 28 und 29 entnommen werden.

MÜLLER-BBM

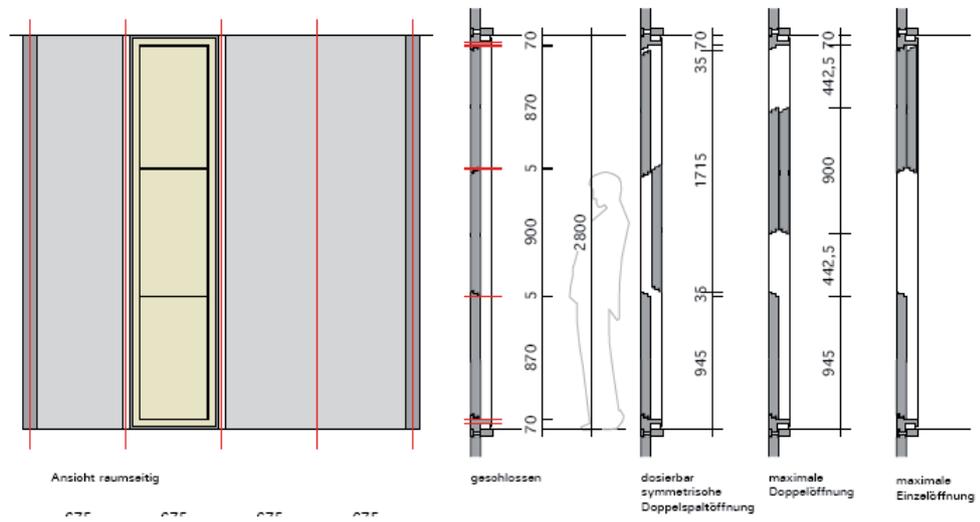


Abbildung 28. Ansicht und Schnitt der Fassade mit Vertikalschiebeelement

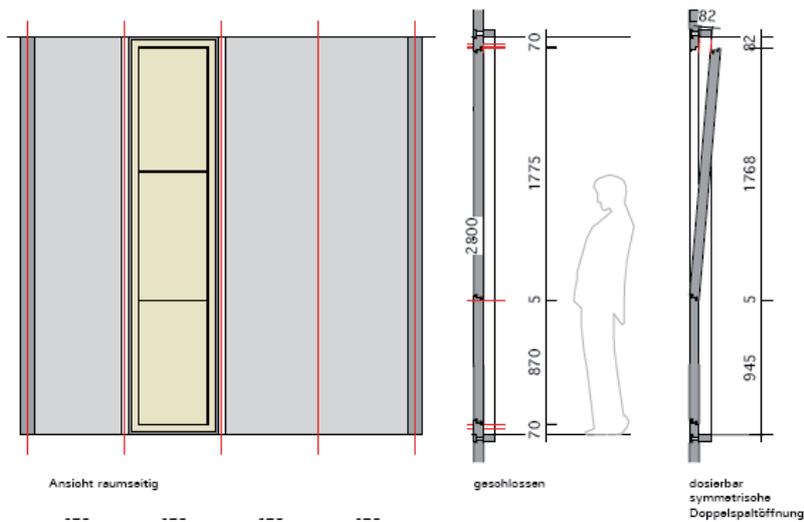


Abbildung 29. Ansicht und Schnitt der Fassade mit Kippelement

MÜLLER-BBM

11 Bauteilaufbauten

Für die massiven (nicht verglasten) Bauteile werden in den Simulationen die im folgenden aufgeführten Schichtaufbauten (nur die thermisch relevanten Schichten werden berücksichtigt) angesetzt.

11.1 Standardbüro

11.1.1 Fußboden/Decke

Der Fußboden bzw. die Decke zeigt folgenden Schichtaufbau (von oben nach unten):

Schicht	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	c_p [J/(kg·K)]
5 mm Teppich	200	0,06	1300
40 mm Fließestrich	2100	1,2	900
18 mm Gipsbauplatten	1200	0,58	1000
~ 87 mm Luftspalt ($R = 0,17 \text{ m}^2\text{K/W}$)	-	-	-
240 mm Beton (armiert mit 2% Stahl)	2400	2,5	1000

11.1.2 Innenwände

Die Raumaufteilung muss flexibel sein, so dass die Innenwände in Leichtbauweise ausgeführt werden:

Schicht	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	c_p [J/kg K]
25 mm Gipskartonplatte	900	0,25	1000
40 mm Mineralwolle	50	0,04	900
25 mm Gipskartonplatte	900	0,25	1000

11.1.3 Tür

Die Tür zeigt idealisiert folgenden Schichtaufbau:

Schicht	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	c_p [J/kg K]
50 mm Konstruktionsholz	700	0,18	1600

11.1.4 Außenwand

Die als Holzpaneel ausgeführte opake Außenwand zeigt folgenden idealisierten Schichtaufbau:

Schicht	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	c_p [J/kg K]
10 mm Holzplatte	700	0,18	1600
25 mm Vakuumisulationspaneel (VIP)	10	0,004	100
10 mm Holzplatte	700	0,18	1600

MÜLLER-BBM

12 Fassaden

Im folgenden sind die verglasten Fassadenbereiche des untersuchten Raumes hinsichtlich Verglasung und Sonnenschutz detailliert aufgeführt.

12.1 Standardbüro

Die Fassade des Standardbüros ist raumhoch verglast, siehe Abbildung 28 und 29.

12.1.1 Verglasung

Die einschalige Fassade weist aus wärmeschutztechnischen Gründen in jedem Fall eine Isolierverglasung auf, welche in Form einer normalen Wärmeschutzverglasung ausgebildet ist.

Nachfolgend ist der detaillierte Scheibenaufbau der Verglasung aufgeführt, wie er den Simulationen zugrunde gelegt wird.

- Wärmeschutzisolierverglasung:
 - Außenscheibe als 6 mm unbeschichtete Floatglasscheibe
 - 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
 - Innenscheibe als 6 mm Floatglasscheibe mit low-e Beschichtung zum SZR hin (Pos. 3)
- Eine derartige Verglasung (z.B. iplus S der Fa. Interpane, Ultra N der Fa. St.Gobain, o.ä.) weist üblicherweise einen Gesamtenergiedurchlassgrad in der Größenordnung von ca. $g = 60\%$ und einen Wärmedurchgangskoeffizient von ca. $U_g = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf.
- Rahmenanteil ca. 20%, Wärmedurchgangskoeffizient ca. $U_f = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

12.1.2 Sonnenschutz

Die Fassaden weisen einen vollflächigen, außenliegenden Lamellensonnenschutz auf:

- Außensonnenschutz:
 - Raffstore mit Alulamellen (80 mm breit, 72 mm Abstand, konvex gekrümmt, Neigung der Lamellen i.M. 45°)
 - Farbgebung standardmäßig, d.h. beidseitig Aluminiumfarben (alternativ: weiße Oberfläche und graue Unterseite)
 - Abstand zur Fassade: i.M. ca. 100 mm
 - Automatisches Schließen des Sonnenschutzes bei einem Schwellwert der außen auftreffenden Globalstrahlung von ca. 175 W/m^2

MÜLLER-BBM

12.2 Energetische Kennwerte

In den Simulationen werden keine konstanten Gesamtenergiedurchlassgrade bzw. Abminderungswerte (g-Werte bzw. F_c -Werte) angesetzt, da diese Werte stark mit dem Winkel der auftreffenden Sonne variieren (vgl. dazu Abbildung 30). Stattdessen werden die Strahlungstransmission, Reflektion und Absorption der einzelnen Fassadenebenen (Glasscheiben und Sonnenschutz) in Abhängigkeit des Auftreffwinkels, der solaren Strahlung, der Scheibenstärke und der detaillierten Ausbildung – bei winkelselektiven Systemen auch in Abhängigkeit der Lamellenstellung – ermittelt (entspricht einem variablen Gesamtenergiedurchlassgrad).

Diese energetischen Kennwerte werden mit Hilfe strahlungsphysikalischer Berechnungen auf Basis der jeweiligen spektralen Verteilung der einzelnen Glasscheiben bzw. der Sonnenschutzelemente gemäß DIN EN 410 bzw. ISO 15099 im Vorfeld der Simulationen berechnet.

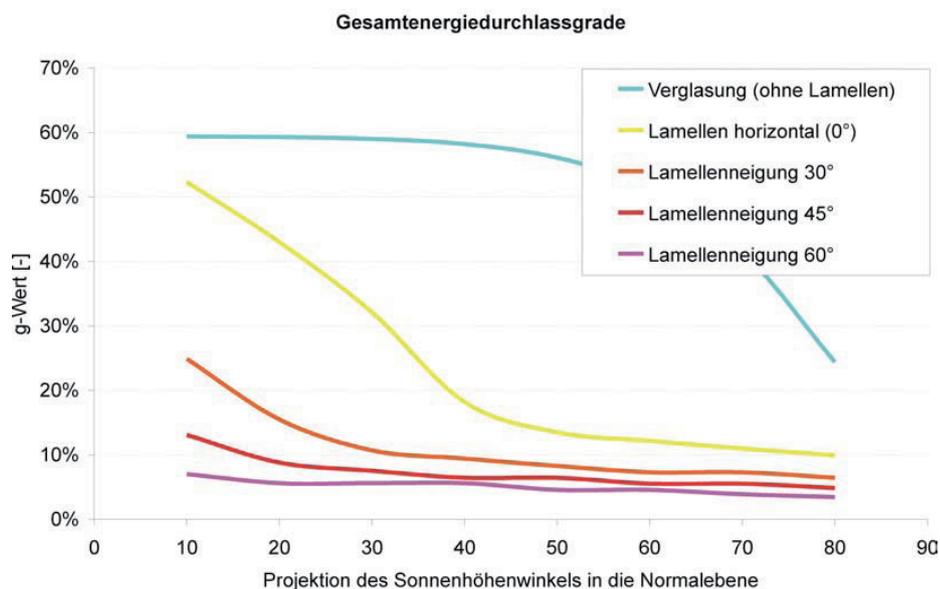
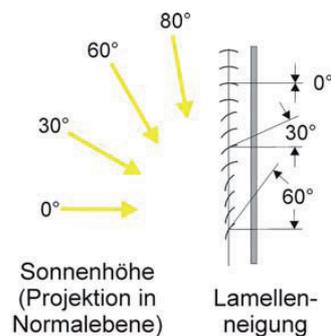


Abbildung 30. Abhängigkeit des g-Wertes von Sonnenhöhe und Neigung der Lamellen

MÜLLER-BBM

13 Innere Wärmelasten

Im folgenden sind die Ansätze der inneren Wärmelasten im Detail aufgeführt.

13.1 Personen

13.1.1 Betriebszeiten

Im Hinblick auf die Personenbelegung des Standardbüros wird von folgenden Betriebszeiten ausgegangen:

- Werktags: ganztags 8°...18° Uhr
- Wochenende: kein Betrieb

13.1.2 Personenbelegung

Für das untersuchte Standardbüro wird während der Betriebszeiten von folgenden Belegungen ausgegangen:

- Regelbüro 1 Person

Außerhalb der Betriebszeiten wird davon ausgegangen, dass sich keine Personen in dem Raum aufhalten.

13.1.3 Wärmeabgabe der Person

Der Wärmeabgabe der Person wird durch folgenden vereinfachenden Ansatz für die Wärmefreisetzung von Personen gemäß VDI 2078, Tabelle A1, Rechnung getragen:

- Sommerfall (Raumlufthtemperatur 26°C): Pro Person 70 W sensibel

Dabei entspricht die sensible Wärmefreisetzung der trockenen Wärmeabgabe der Personen. In den Simulationen wird davon ausgegangen, dass die Personen 50% konvektiv an die Raumluf abgeben und 50% in Form thermischer Strahlung freisetzen.

13.2 Geräte

In den Simulationen wird davon ausgegangen, dass die nachfolgend aufgeführten Geräte einen näherungsweise konstanten Wärmeeintrag in die jeweiligen Räume aufweisen. Neben den aufgeführten Geräten werden keine weiteren Wärmelasten durch Geräte angesetzt.

13.2.1 Standardbüro

Für das Standardbüro werden folgende Geräte angesetzt:

- 1 PC á 80 W¹ 80 W
- 1 TFT-Bildschirme á 40 W¹ 40 W

¹ Schätzwert im eingeschalteten Zustand für einen durchschnittlichen Betrieb

MÜLLER-BBM

13.2.2 Aufteilung der Wärmelasten

In den Simulationen wird idealisierend davon ausgegangen, dass die Geräte ca. 90% der Wärme konvektiv an die Luft abgeben (z.B. über das Gebläse der PC) und die restlichen 10% in Form thermischer Strahlung freisetzen.

13.2.3 Betriebszeit Geräte

In den Simulationen wird davon ausgegangen, dass alle Geräte nur während der Betriebszeiten eingeschaltet sind.

13.3 Beleuchtung

Der betrachtete Raum weist großflächig verglaste Außenfassaden auf, welche einen entsprechenden Tageslichteintrag ermöglichen. Idealisierend wird daher davon ausgegangen, dass das Kunstlicht während der Arbeitszeit nicht eingeschaltet werden muss.

14 Gebäudetechnische Anlagen

14.1 Passives Klimakonzept

Das betrachtete Standardbüro weist weder aktive Kühldecken noch eine mechanische Lüftung auf.

15 Natürliche Lüftung

Der untersuchte Raum wird ausschließlich natürlich über Öffnungselemente gelüftet.

In den thermischen Simulationen wird die Lüftungsintensität über die geöffneten Elemente in Abhängigkeit der Lufttemperaturdifferenz zwischen der Luft im Büro und der Außenluft berechnet. Diese ändert sich im Tagesgang laufend, so dass mit einem zeitvariablen Lüftungsvolumenstrom der manuellen Lüftung simuliert wird.

15.1 Kippelement

Für das Kippelement wird von tagsüber permanent gekipptem Flügel ausgegangen. Dabei weist der bewegliche Kippelement näherungsweise folgende strömungstechnische Charakteristika auf:

- Fläche (h = 1,73 m; b = 0,42 m)	ca. 0,73 m ²
- Durchflussbeiwert in Kippstellung ¹⁾	ca. 0,1 [-]
- Anzahl der offenbaren Kippelemente	1 [-]

¹⁾ ermittelt nach FEIST, Passivhaus-Institut, Darmstadt

MÜLLER-BBM

15.2 Vertikalschiebeelement

Für das Vertikalschiebeelement wird von verschiedenen Flügelstellungen ausgegangen, welche wie folgt strömungstechnisch charakterisiert sind:

a) Maximale Lüftungsintensität (oben und unten so weit wie möglich offen):

- Offene Fläche (h = 0,44 m; b = 0,42 m) jeweils ca. 0,18 m²
- Durchflussbeiwert ca. 0,65 [-]
- Anzahl der geöffneten Schiebeelemente 2 [-]

b) Nachtlüftung mit Witterungs- und Einbruchschutz (ohne Antrieb/Steuerung):

- Offene Fläche (h = 0,10 m; b = 0,42 m) jeweils ca. 0,04 m²
- Durchflussbeiwert ca. 0,65 [-]
- Anzahl der geöffneten Schiebeelemente 2 [-]

15.3 Windeinfluss

Bei Windangriff am Gebäude kann sich bei geöffneten Lüftungselementen und gleichzeitig geöffneten Innentüren eine windinduzierte Querlüftung in dem Gebäude einstellen. Für eine Berechnung der windinduzierten Querlüftung ist zum einen die detaillierte Winddruckverteilung auf der Gebäudehaut und zum anderen verlässliche Winddaten für den Standort des BV erforderlich.

Der Windeinfluss wird für die Vergleichsstudie zur thermisch induzierten natürlichen Lüftung vereinfachend vernachlässigt.

**ingenieurbüro
für bauklimatik**
hausladen + meyer

Natürliche Lüftung mit einem neu entwickelten Schiebefenster

Hausladen + Meyer GbR
Sickingenstr. 10
D-34117 Kassel
Fon: (0561) 310 968 40
Fax: (0561) 310 968 39
Mail info@ib-bauklimatik.de

12. März 2007

Inhalt

1	Aufgabenstellung.....	1
2	Vorgehensweise	1
3	Eckdaten des untersuchten Raums	1
4	Modellbeschreibung	1
5	Winterfall.....	2
5.1	Randbedingungen.....	2
5.2	Ausgangssituation	2
5.3	60 Sekunden nach Öffnen des Fensters	4
5.4	Bei dauerhaft geöffnetem Fenster	8
6	Taglüftung Sommerfall	10
6.1	Randbedingungen.....	10
7	Nachtlüftung Sommerfall.....	12
7.1	Randbedingungen.....	12

Auftraggeber Müller-BBM GmbH
Planegg bei München

Bearbeiter Dr.-Ing. Christoph Meyer

Dieser Bericht hat 13 Seiten zzgl. dieser, Inhaltsverzeichnis und Deckblatt.

Kassel, den 12. März 2007

gez.

Dr.-Ing. Christoph Meyer

1 Aufgabenstellung

Für ein an der TU München neu entwickeltes Schiebefenster werden für ausgewählte Betriebssituationen die Lüftungseffizienz und Behaglichkeitsauswirkungen im Raum überprüft. Die Ergebnisse werden mit denen eines konventionellen Kippfensters verglichen.

2 Vorgehensweise

Untersucht wird ein Standard-Einzelbüro mit großflächig verglaster Fassade, das durch einen Unterflurkonvektor entlang der Fassade beheizt wird.

Der Raum wird in einem 3D-Rechenmodell abgebildet, und die Raumluftströmung mittels Simulation (CFD) ermittelt. Zum Einsatz kommt das Strömungssimulationsprogramm Star-CD.

Zunächst wird die Raumluftströmung bei geschlossenem Fenster berechnet. Dieser Betriebszustand dient als Startsituation für die Simulation der zeitlichen Änderung des Raumklimas in den ersten fünf Minuten nach Öffnen des Fensters.

Die für die Simulation angenommenen Randbedingungen sind im Anhang zu diesem Bericht zusammengestellt.

3 Eckdaten des untersuchten Raums

	Schiebefenster	Kippfenster
Raummaße B x H x T	2,7 x 2,8 x 5,4 m	
Fassadenfläche	7,56 m ²	
Fenstermaße B x H	0,5 x 1,75 m	
Fassadenqualität	1,3 W/(m ² K)	

4 Modellbeschreibung

Die Simulationsmodelle des untersuchten Raumes haben ein Rechengitter von jeweils knapp 300.000 Zellen.

Als Rechengitter wurde ein sogenanntes Hybridgitter gewählt. Es besteht im wandnahen Bereich aus tetraeder-, im ungestörten Luftraum in der Raummitte aus hexaederförmigen Zellen. Eine fünflagige, wandparallele Zellschicht von 0,1 m Dicke gestattet eine korrekte Abbildung der wandnahen Strömung und der resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten.

Als Turbulenzmodell kommt ein hybrides k-e-Modell zum Einsatz, eine Kombination aus Low- und High-Reynolds Modellen.

5 Winterfall

5.1 Randbedingungen

	Schiebefenster	Kippfenster
Fensteröffnung	je 1,5 cm Schlitzweite oben und unten	5° Kippstellung
Innenwände, Boden und Decke	ohne Wärmedurchgang	
Heizleistung	304 W gesamt, konstant 113 W/m lfd. Länge Unterflurkonvektor, konstant	
interne Lasten	Person 70 W; Laptop 36 W	
solare Einträge	keine	
Außentemperatur	0°C	

5.2 Ausgangssituation

Als Ausgangssituation für die Betrachtung der Vorgänge nach Öffnen der Fenster, wurde zunächst das Raumklima ermittelt, das sich bei den in Kapitel 3 beschriebenen Randbedingungen und bei geschlossenem Fenster einstellt.

Eine Unterscheidung zwischen den beiden untersuchten Fenstervarianten erübrigt sich hier. Die Ergebnisse für Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und –geschwindigkeit sind in Abbildung 1 bis Abbildung 3 dargestellt.

Die Verglasung ist mit knapp 18°C die kälteste Fläche im Raum, alle anderen Oberflächen, mit Ausnahme der im Raum sitzenden Person und des Laptops, betragen um 23°C. Die Raumlufttemperatur beträgt im Mittel über das gesamte Raumvolumen ca. 22,6°C bei sehr konstanter Verteilung.

Die stärksten Luftbewegungen mit ca. 1,6 m/s entstehen an der Verglasung. Der Unterflurkonvektor schattet den Raum sehr wirksam von Kaltluftabfall an der Fassade und von Zugerscheinungen in Bodennähe ab. In der dargestellten Ebene 0,1 m über dem Boden treten Luftgeschwindigkeiten von nur knapp 0,05 m/s auf, die noch dazu von der Raumtiefe zur Fassade gerichtet sind. Die größten Luftgeschwindigkeiten (ca. 0,8 m/s) in der Aufenthaltszone entstehen durch die vom Unterflurkonvektor aufsteigende Warmluft, in Abbildung 3 hinter der Person.

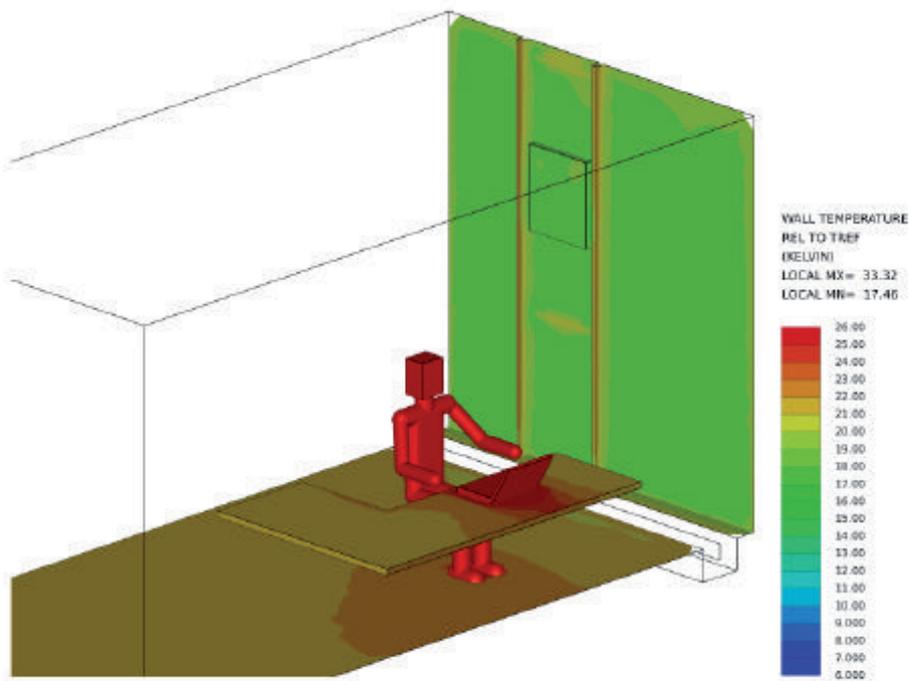


Abbildung 1 Oberflächentemperaturen bei geschlossenem Fenster.

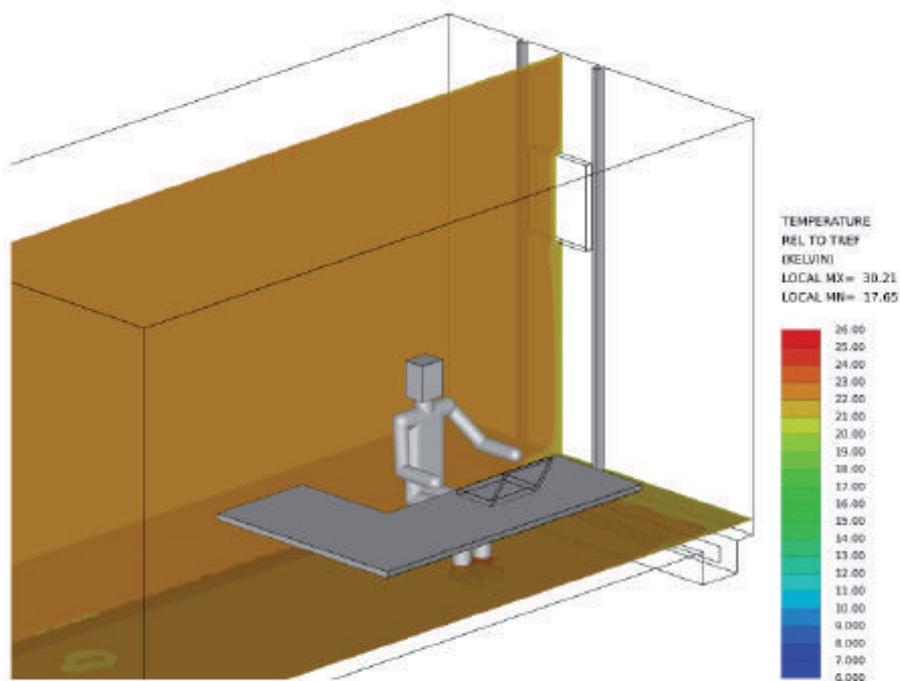


Abbildung 2 Raumlufttemperatur bei geschlossenem Fenster.

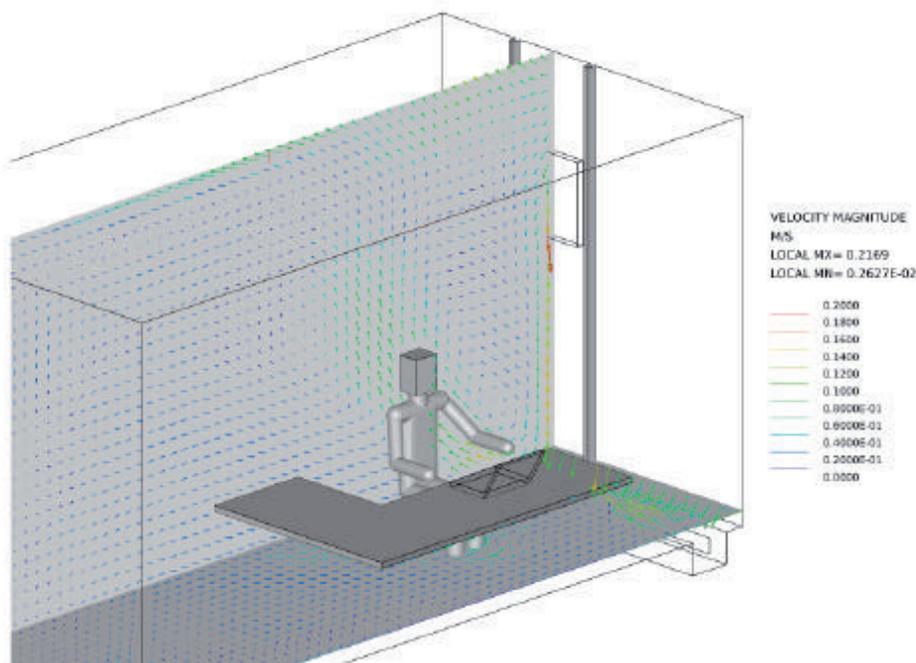


Abbildung 3 Luftgeschwindigkeit bei geschlossenem Fenster.

5.3 60 Sekunden nach Öffnen des Fensters

Ausgehend von der in Kapitel 5.2 dargestellten Situation wurde mittels Simulation ermittelt, wie sich das Raumklima in den ersten Minuten nach Öffnen des Fensters entwickelt. Hier wird exemplarisch das Raumklima zu einem Zeitpunkt 60 Sekunden nach Öffnen des Fensters dargestellt.

Zunächst entsteht, alleine durch die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen angetrieben, der folgende Luftaustausch bzw. Luftwechsel:

	Kipfenster	Schiebefenster
Volumenstrom	120 m ³ /h	28 m ³ /h
Luftwechsel	ca. 3,0 h ⁻¹	ca. 0,7 h ⁻¹

Der Luftaustausch durch das Kipfenster ist für eine Dauerlüftung deutlich zu hoch. Erführt zu Behaglichkeitseinbußen und übermäßigen Wärmeverlusten.

Der Luftaustausch durch das Schiebefenster entspricht dagegen recht genau dem Luftbedarf einer Person. Das Fenster eignet sich in der untersuchten Stellung gut für eine Dauerlüftung. Behaglichkeitseinbußen durch Zugscheinungen sind im Zusammenspiel mit dem Unterflurkonvektor lediglich in direkter Fassadennähe unterhalb des Fensters zu befürchten.

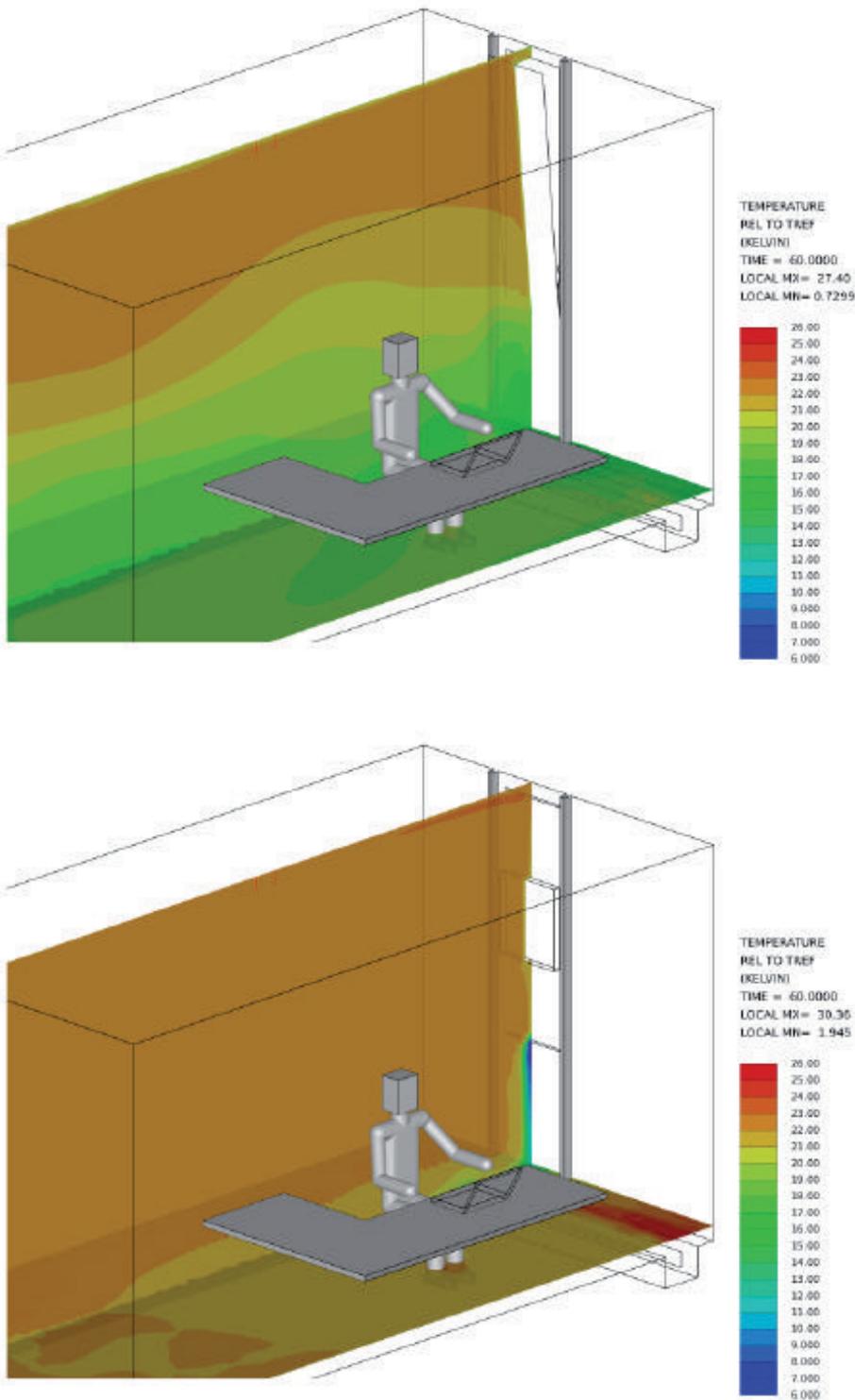


Abbildung 4 Bei gekipptem Fenster (oben) ist die Raumlufttemperatur in Bodennähe bereits auf ca. 18°C gesunken, beim Schiebefenster (unten) beträgt sie überall in der Aufenthaltszone noch mindestens 21°C.

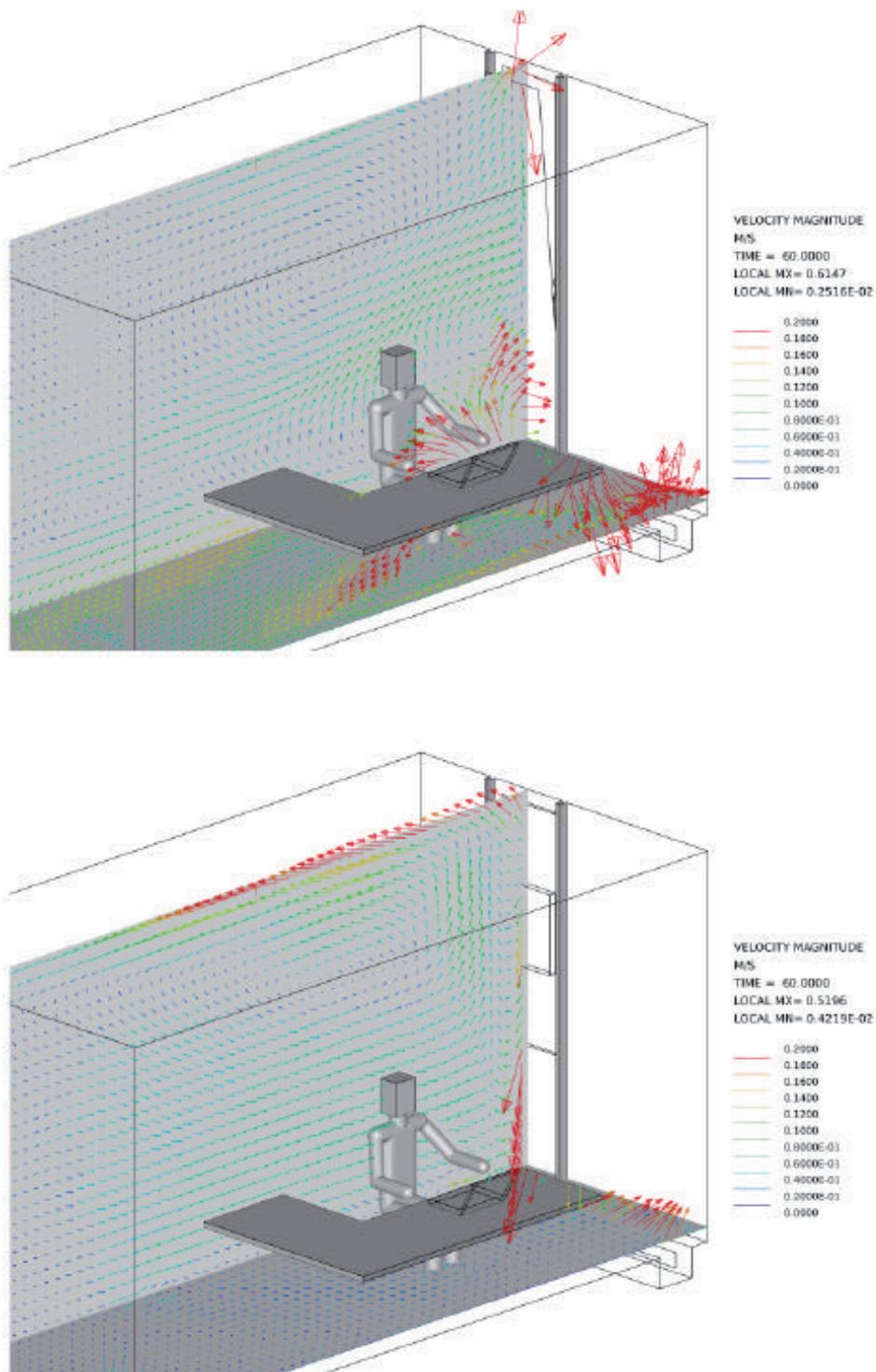


Abbildung 5 Bei gekipptem Fenster (oben) treten im Aufenthaltsbereich, und dort vor allem in Bodennähe, wesentlich stärkere Luftbewegungen auf als beim Schiebefenster (unten).

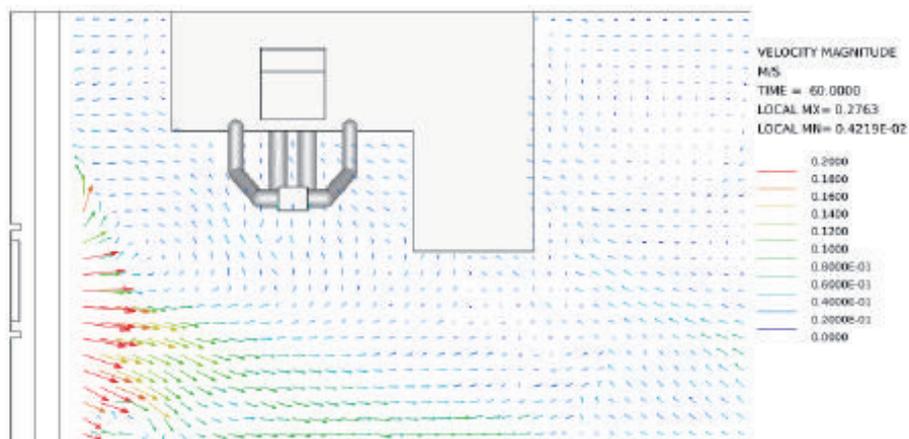
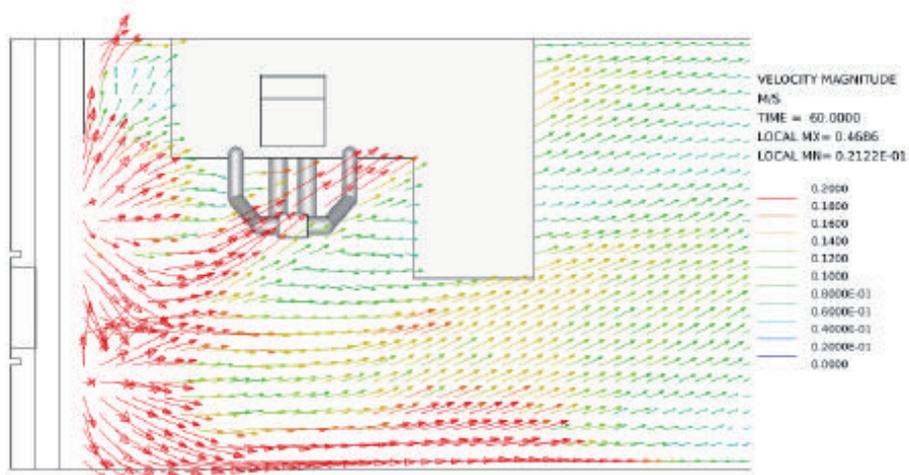


Abbildung 6 Die Luftgeschwindigkeiten in 0,1 m Höhe über dem Boden und innerhalb der Aufenthaltszone im direkten Vergleich zwischen gekipptem Fenster (oben) und Schiebefenster (unten).

5.4 Bei dauerhaft geöffnetem Fenster

Ein in der Praxis wenig wahrscheinlicher Fall zeigt deutlich die unterschiedlichen Auswirkungen der beiden Fenstervarianten auf das Raumklima bzw. den Lüftungswärmeverlust des Beispielsraumes.

In Abbildung 7 ist die Lufttemperatur dargestellt, die sich bei dauerhaft geöffneten Fenstern und gleichbleibender Heizleistung (s. Kapitel 3) einstellen würde.

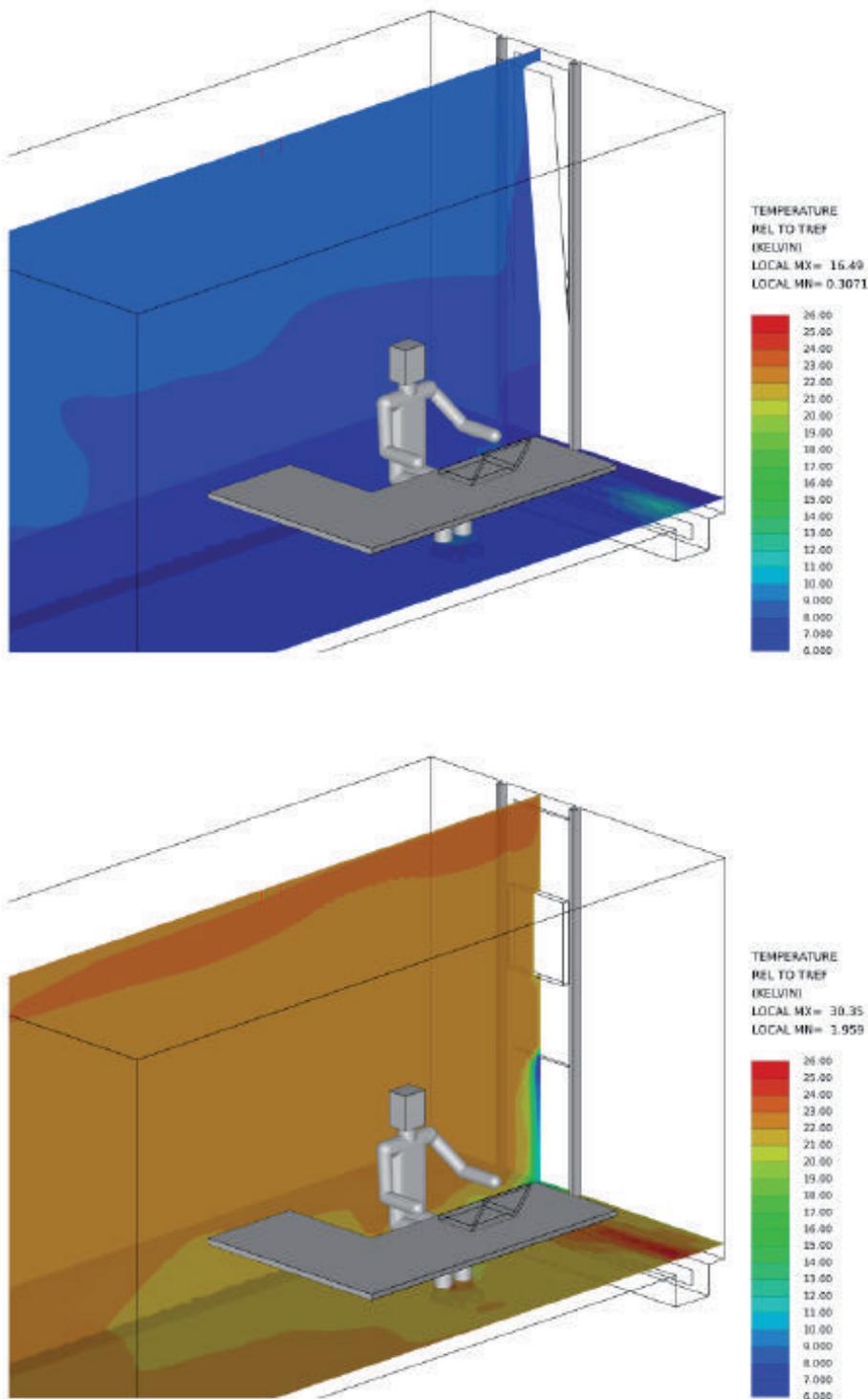


Abbildung 7 Lufttemperaturen bei dauerhaft gekipptem Fenster (oben) und Schiebefenster (unten) und bei in beiden Fällen identischer Wärmezufuhr.

6 Taglüftung Sommerfall

6.1 Randbedingungen

Für die Simulation der Lüftung am Tage bei sommerlichen Wetterbedingungen wurden Randbedingungen eingesetzt, die sich aus zonalen thermischen Simulationen ergaben, und die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

Die in der Simulation nachgebildete Situation entspricht den Nachmittagsstunden eines heißen Sommertages.

	Schiebefenster	Kippfenster
Fensteröffnung	vollständig geöffnet je ca. 42 cm Schlitzweite oben und unten	5° Kippstellung
Oberflächentemperaturen aus zonaler Simulation (Müller BBM)	Innenwände 31,0°C Boden 30,0°C Decke 29,5°C Verglasung (außen) 37°C	Innenwände 34,6°C Boden 33,8°C Decke 33,3°C Verglasung (außen) 40,4°C
Heizleistung	keine	
interne Lasten	Person 70 W; Laptop 36 W	
Außentemperatur	31,7°C	

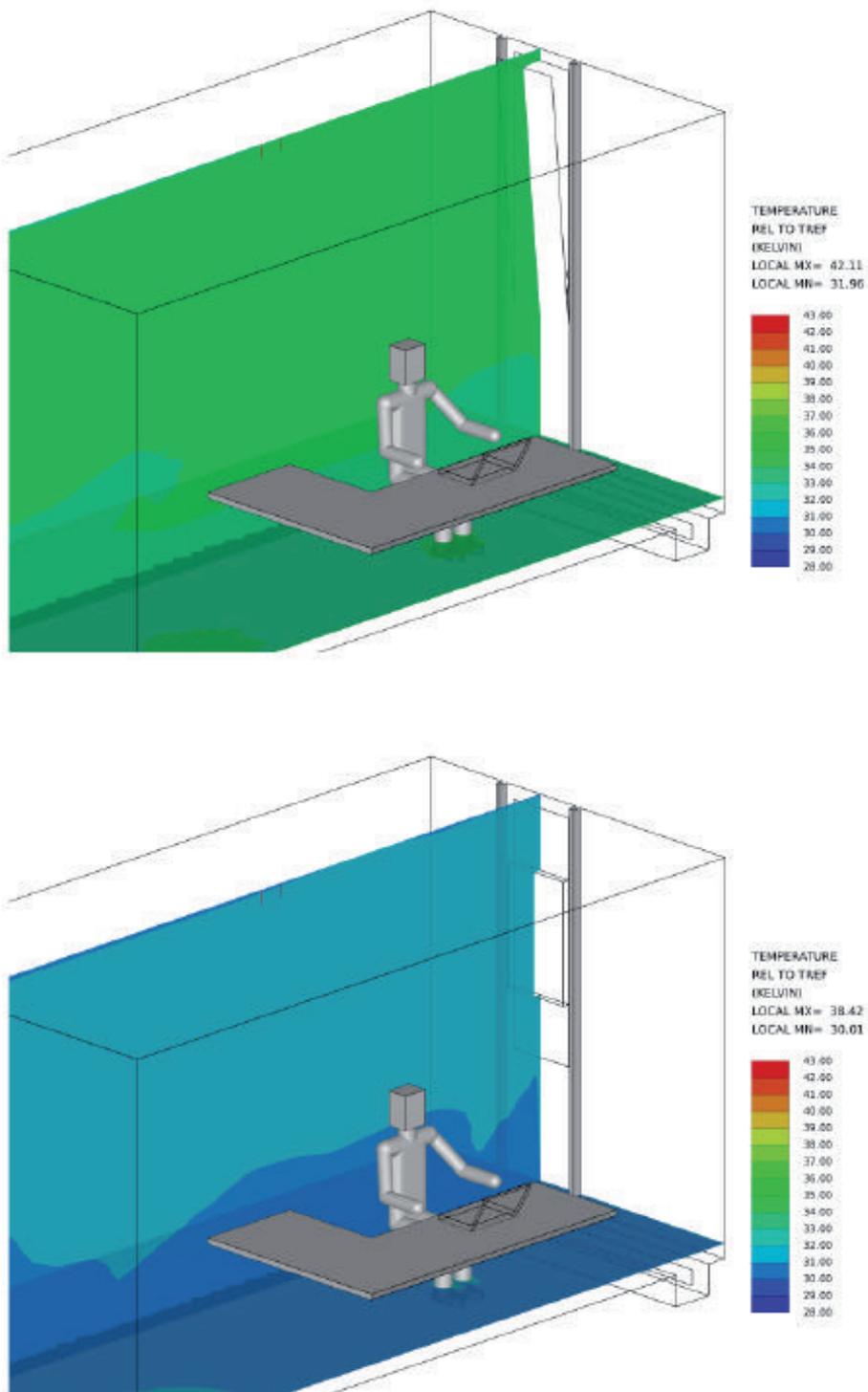


Abbildung 8 Lufttemperaturen an einem heißen Sommernachmittag bei gekipptem Fenster (oben) und weit geöffnetem Schiebefenster (unten).

7 Nachlüftung Sommerfall

7.1 Randbedingungen

Für die Simulation der Lüftung am Tage bei sommerlichen Wetterbedingungen wurden Randbedingungen eingesetzt, die sich aus zonalen thermischen Simulationen ergaben, und die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurden.

Die in der Simulation nachgebildete Situation entspricht den frühen Morgenstunden eines Sommertages.

Die Stellung der Schiebeelemente ist so gewählt, dass eine zum Kippfenster vergleichbare Einbruchs- und Regensicherheit erreicht wird.

	Schiebefenster	Kippfenster
Fensteröffnung	je 12 cm Schlitzweite oben und unten	5° Kippstellung
Oberflächentemperaturen aus zonaler Simulation (Müller BBM)	Innenwände 29,7°C Boden 30,1°C Decke 31,4°C Verglasung (außen) 27,2°C	Innenwände 30,8°C Boden 31,2°C Decke 32,6°C Verglasung (außen) 28,4°C
Heizleistung	keine	
interne Lasten	keine	
Außentemperatur	16,4°C	

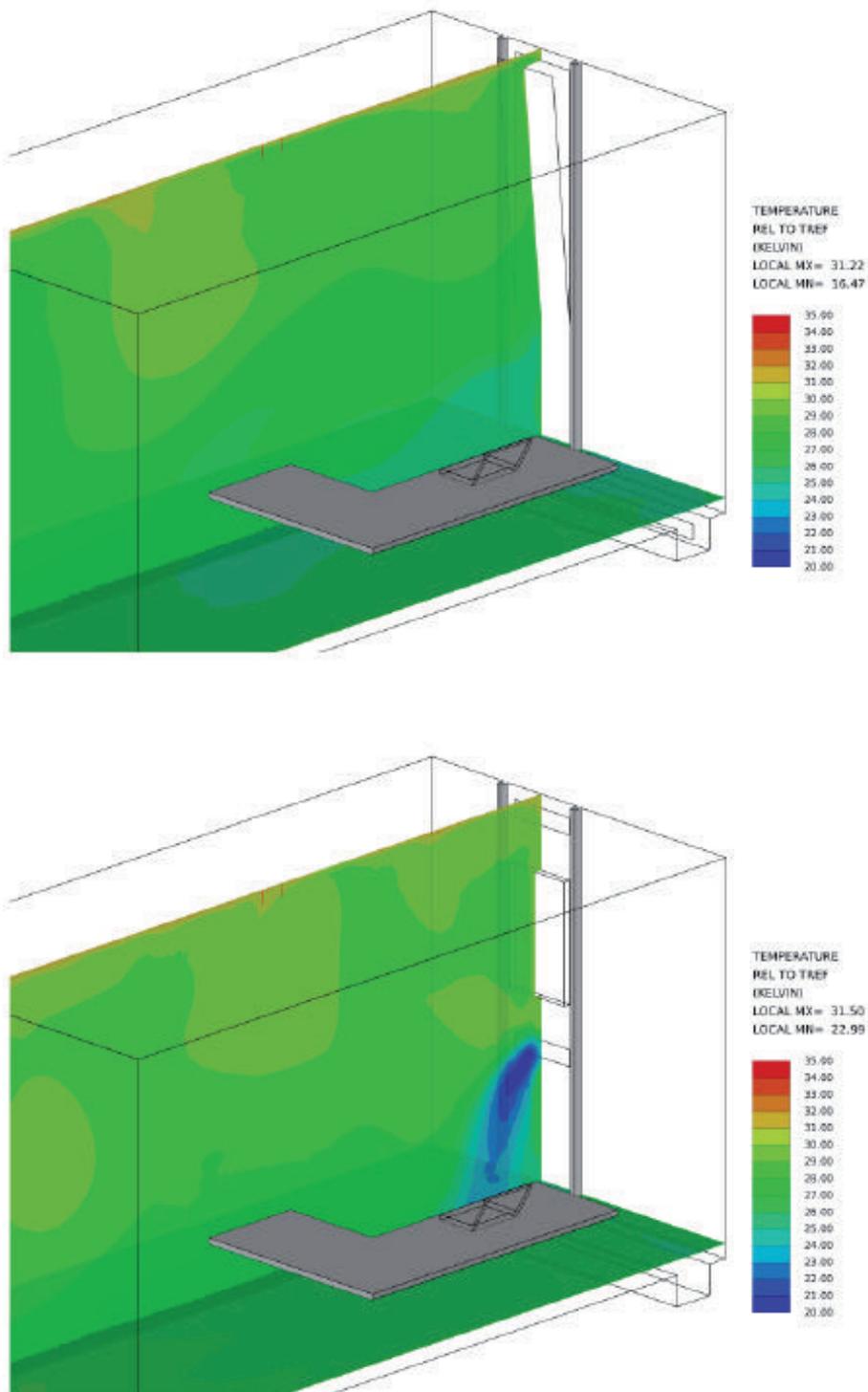


Abbildung 9 Lufttemperaturen in den frühen Morgenstunden im Sommer bei gekipptem Fenster (oben) und je 12 cm Schlitzweite beim Schiebefenster (unten).

MÜLLER-BBM

Robert-Koch-Straße 11
82152 Planegg bei München
Tel. +49(89)85602 - 0
Fax +49(89)85602 - 111
www.MuellerBBM.de

Dr.-Ing. Gunter Pültz
Tel. +49(89)85602-336
Gunter.Pueltz@MuellerBBM.de

M66 371/2 plz
22. März 2007

Vertikalschiebeelement im Vergleich zu einem Kippelement

Ergebnisse einer Simulationsstudie - Abschlussbericht

Bericht Nr. M66 371/2

Auftraggeber:	Technische Universität München, Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik, Univ. Prof. H. Kaufmann, Herrn Philipp Donath, Herrn Carl Magnus Bickel
Bearbeitet von:	Müller-BBM Gmbh, Bauklimatik, Dr.-Ing. Gunter Pültz in Kooperation mit IB Bauklimatik, Dr.-Ing. Christoph Meyer
Berichtsumfang:	Insgesamt 20 Seiten.

MÜLLER-BBM

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines und Aufgabenstellung	3
2	Untersuchte Fälle	4
3	Wintersituation (Fall 1)	5
3.1	Kippelement	5
3.2	Vertikalschiebeelement	6
4	Nachtlüftung im Sommer (Fall 2)	8
4.1	Kippelement	8
4.2	Vertikalschiebeelement	12
5	Lüftung tagsüber im Sommer (Fall 3)	15
5.1	Kippelement	15
5.2	Vertikalschiebeelement	16
6	Varianten mit Betonkernkühlung	20
7	Zusammenfassung	20

MÜLLER-BBM

1 Allgemeines und Aufgabenstellung

Am Institut für Entwerfen und Bautechnik, Fakultät für Architektur der Technischen Universität München, wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens für effiziente natürliche Lüftung in Zusammenarbeit mit Industriepartnern ein neuartiges Vertikal-Schiebeelement entwickelt (siehe Abbildung 1).

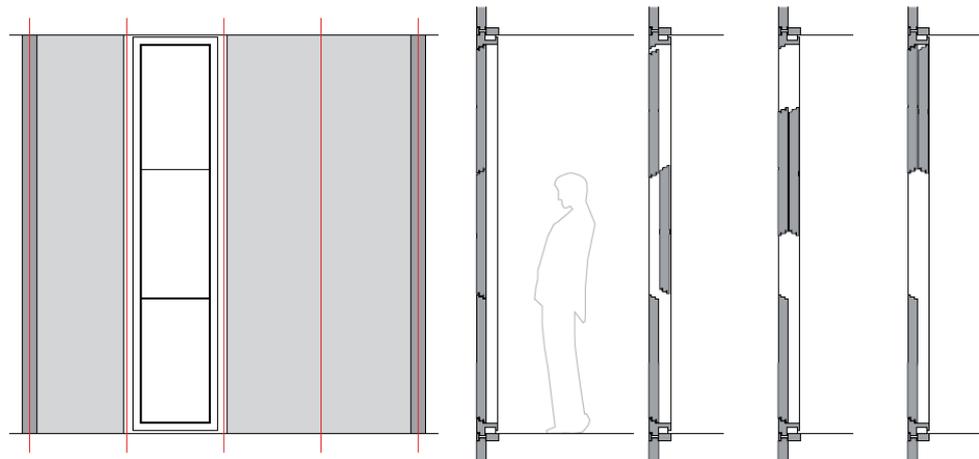


Abbildung 1. Das neuartige Vertikal-Schiebeelement in verschiedenen Öffnungssituationen (Schnitte)

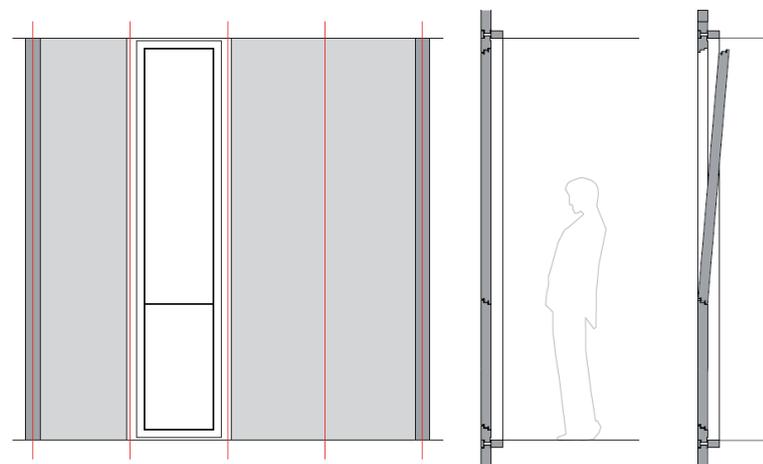


Abbildung 2. Standardmäßiges Kippelement (Vergleichselement)

Um die Vorteile dieses neuen Öffnungselements gegenüber einem herkömmlichen Kippelement aufzuzeigen, wurden für beide Arten von Öffnungselementen die in einem standardmäßigen, nicht klimatisierten Büroraum erreichbare Lüftungsintensität sowie auch die sommerlichen Temperaturen sowohl mit Hilfe von zonalen Computersimulationen wie auch mit hochauflösenden CFD-Simulationen ermittelt und vergleichend gegenübergestellt (Details dazu siehe Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 19.12.2006).

MÜLLER-BBM

2 Untersuchte Fälle

In Abstimmung mit dem AG wurde vereinbart, dass folgende drei Situationen untersucht werden sollen:

- Fall 1: Winter, Fensterlüftung tagsüber:
Das Vertikal-Schiebeelement ist nur soweit geöffnet, dass gerade der hygienisch erforderliche Mindestluftwechsel ($LW = 1,5 \text{ h}^{-1}$) in den Raum einströmt. Das Kippelement ist normal gekippt. Der Raum wird mittels Unterflurkonvektor an der Fassade mit konstanter Heizleistung beheizt.
- Fall 2: Sommerfall, Fensterlüftung während der Nacht:
Das Vertikal-Schiebeelement ist aus Gründen des Witterungs- und Einbruchschutzes oben und unten nur jeweils 12 cm weit geöffnet, das Kippelement ist normal gekippt.
- Fall 3: Sommer, Fensterlüftung nachmittags:
Das Vertikal-Schiebeelement ist vollständig geöffnet, das Kippelement ist normal gekippt.

Die Untersuchung aller drei Fälle wurde jeweils für ein konventionelles Kippflügel-element und das neu entwickelte Vertikalschiebeelement durchgeführt.

Da im Winter keine wesentlichen Wärmespeichervorgänge zu erwarten sind (der Raum wird permanent mindestens auf ca. 20°C geheizt), wurde der Winterfall (Fall 1) vereinbarungsgemäß ausschließlich mittels CFD-Simulationen untersucht.

Bei den beiden Sommerfällen (Fall 2 und 3) wurden den CFD-Simulationen zonale, thermische Simulationen vorgeschaltet, um den Einfluss der Speichermassen mit berücksichtigen zu können. Dabei wurde eine einfache Kopplung der zonalen, thermischen Simulationen mit den CFD-Simulationen in Form von Oberflächen- und Lufttemperaturen angewendet (siehe Abbildung 3); der mit dem AG abgestimmte Zeitpunkt der jeweiligen Kopplung ist Abbildung 3 zu entnehmen.

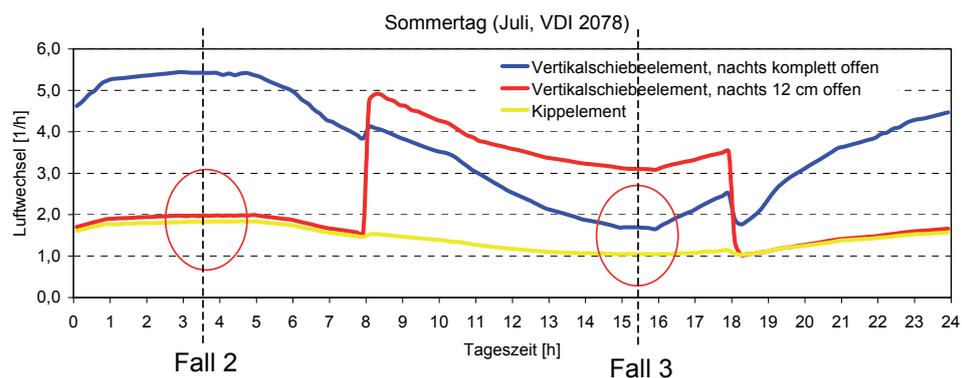


Abbildung 3. Zeitpunkte der Kopplung zwischen zonalen und CFD-Simulationen

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse kurz aufgeführt; nähere Details hierzu sind zu finden in: Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 19.12.2006, Bericht IB Bauklimatik vom 15.02.2007 und vom 12.03.2007.

MÜLLER-BBM

3 Wintersituation (Fall 1)

Ein wesentlicher Vorteil des Vertikalschiebeelements ist darin zu sehen, dass die natürliche Lüftung bei starken Antriebskräften (stärkerer Wind und/oder großen Temperaturdifferenzen im Winter) durch die stufenlose Einstellbarkeit der Öffnungsschlitze recht gut begrenzt werden kann. Hierzu ist nachfolgend exemplarisch die Lüftungssituation für die beiden Öffnungselemente für den Winterfall gegenübergestellt (Details dazu siehe Bericht des IB Bauklimatik vom 15.02.07).

3.1 Kippement

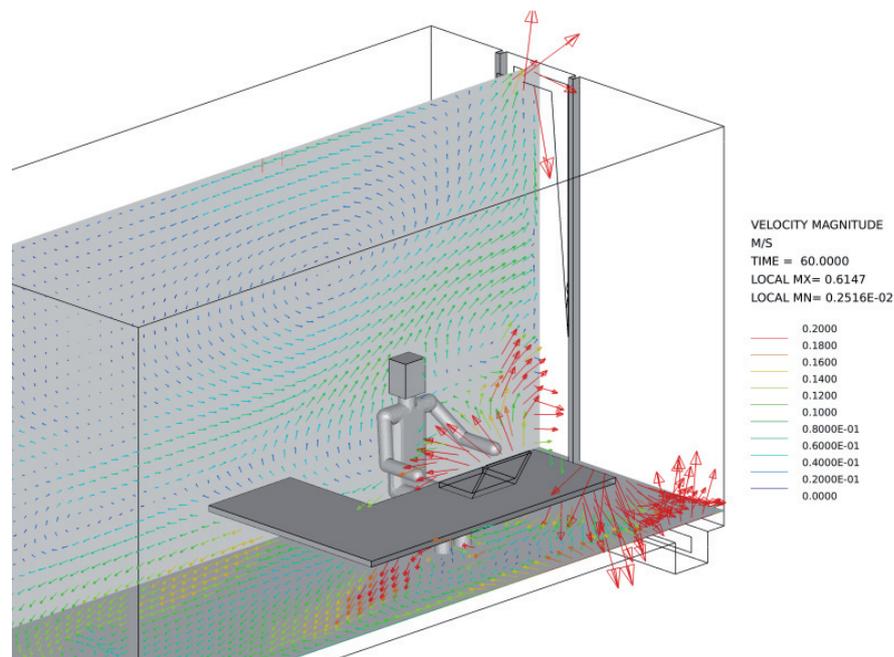


Abbildung 4. Luftgeschwindigkeiten kurz nach dem Öffnen beim Kippement

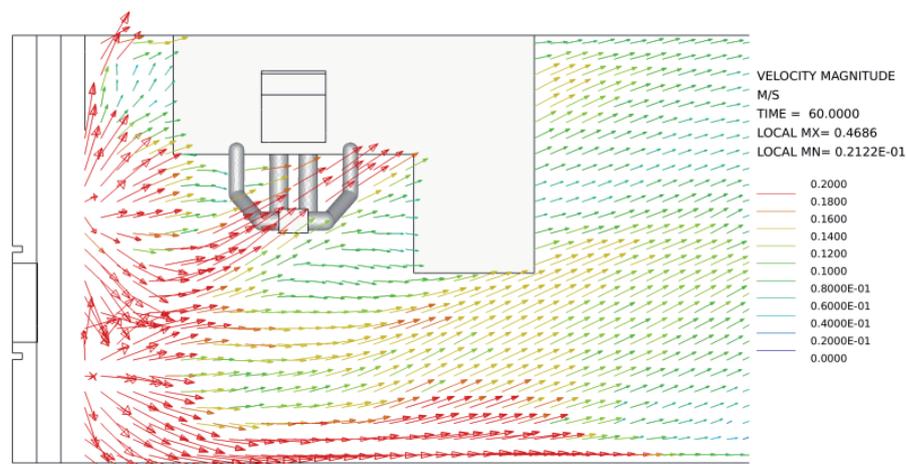


Abbildung 5. Luftgeschwindigkeiten kurz nach dem Öffnen beim Kippement

MÜLLER-BBM

In Abbildung 4 und 5 ist gut zu erkennen, dass im Winter das Öffnen eines Kippelements zu intensiven Zugserscheinungen – insbesondere im Fußbereich – führt. Darüber hinaus kühlt der Raum aufgrund des intensiven Luftaustausches auch recht schnell aus, wie in Abbildung 6 zu erkennen ist.

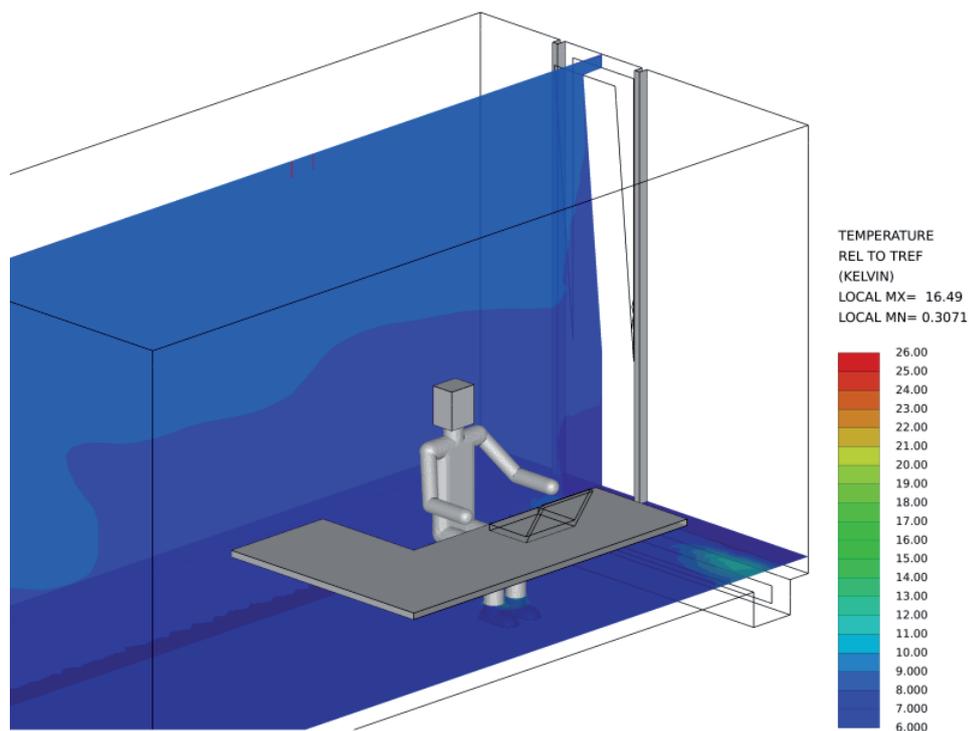


Abbildung 6. Lufttemperaturen nach einiger Zeit bei geöffnetem Kippelement

Diese Tatsachen werden durch die Erfahrungen bei winterlicher Stoßlüftung bestätigt; meist werden die Kippelement aufgrund der intensiven Zugserscheinungen bzw. Abkühlung recht schnell wieder geschlossen.

3.2 Vertikalschiebeelement

Das Vertikalschiebelement ermöglicht im Gegensatz zum Kippelement das Öffnen in Form recht kleiner Schlitze (exemplarisch oben und unten jeweils 1,5 cm), da es praktisch stufenlos einstellbar ist.

Damit kann die Intensität der natürlichen Lüftung (und der damit verbundenen Zugserscheinungen und Auskühlung) sehr viel besser begrenzt werden wie beim Kippelement. Die resultierende Luftströmung und Temperaturverteilung im Raum sind in nachfolgenden Abbildungen 7, 8 und 9 dargestellt.

In Abbildungen 7 und 8 ist zu erkennen, dass die Luftgeschwindigkeiten deutlich niedriger sind als beim Kipfenster und Zugserscheinungen allenfalls direkt am Fußpunkt des Vertikalschiebefensters – jedoch nicht im Fußbereich des Arbeitsplatzes – auftreten können.

MÜLLER-BBM

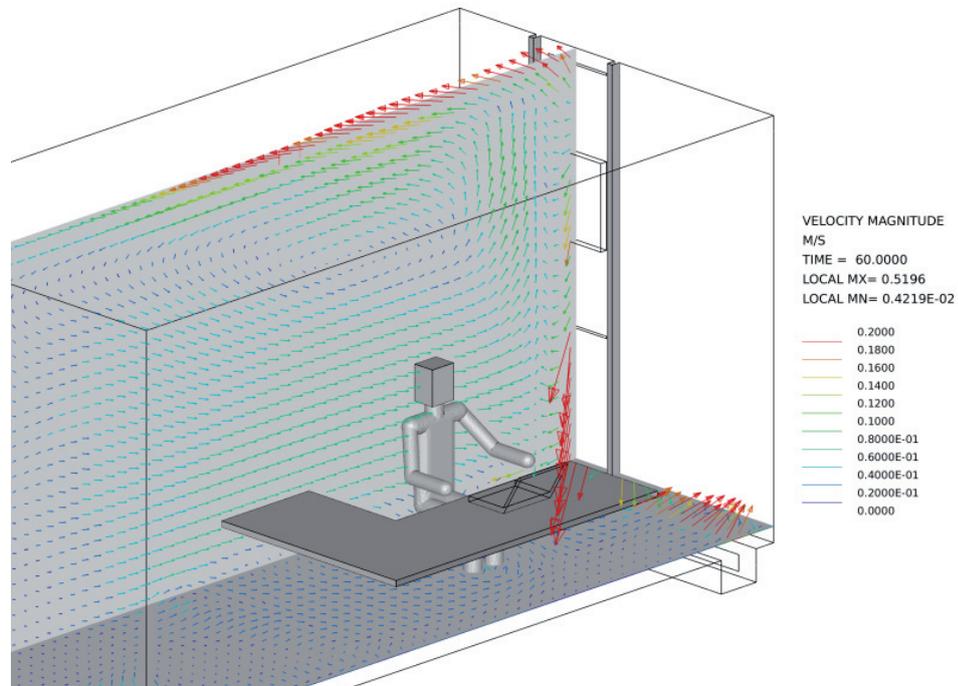


Abbildung 7. Luftgeschwindigkeiten beim Vertikalschiebeelement

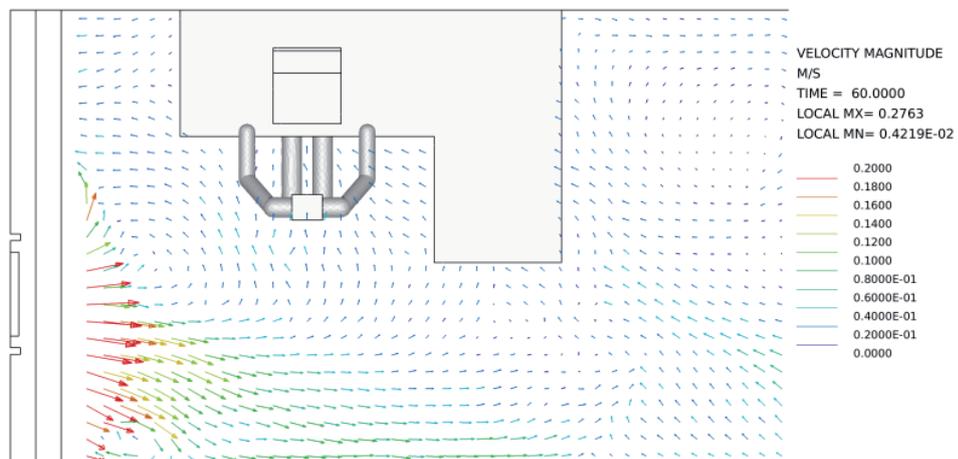


Abbildung 8. Luftgeschwindigkeiten beim Vertikalschiebeelement

In nachfolgender Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die Lufttemperaturen im Raum trotz geöffneten Lüftungselements nicht unter ca. 20°C abfallen (mit Ausnahme direkt unterhalb des Lüftungsschlitzes, wo die kalte Außenluft einströmt).

Mit dem stufenlos einstellbaren Vertikalschiebefenster ist somit eine – von den Nutzern meist bevorzugte – Permanentlüftung auch im Winter sehr gut darstellbar.

MÜLLER-BBM

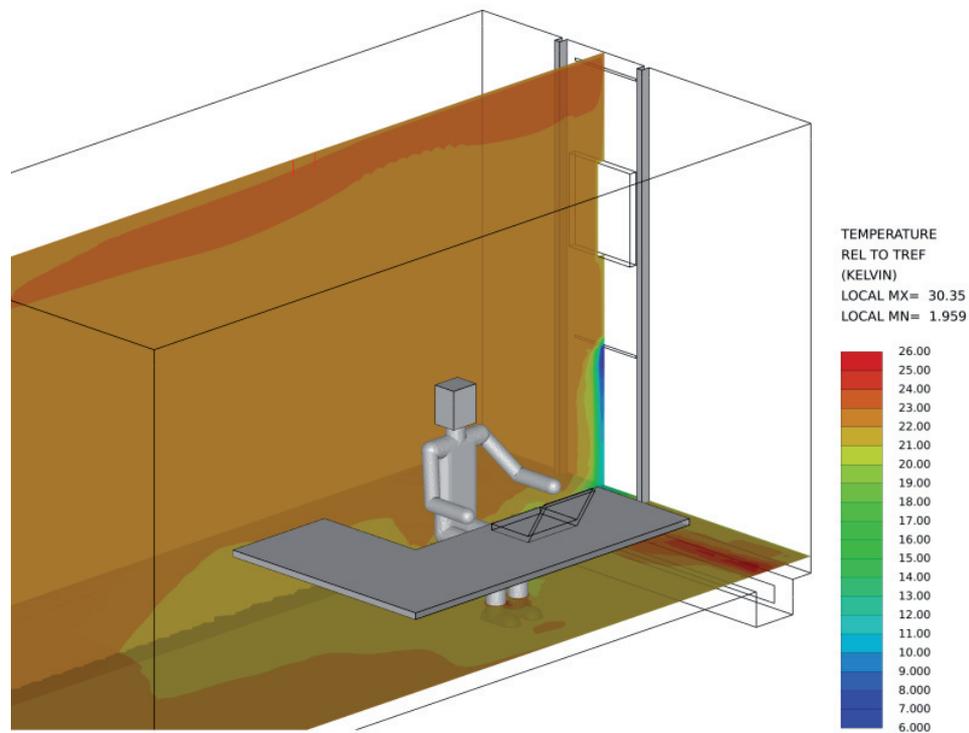


Abbildung 9. Lufttemperaturen beim Vertikalschiebeelement

4 Nachtlüftung im Sommer (Fall 2)

Im folgenden wird die Situation im Sommer bei Nachtlüftung, welche der Entwärmung der Speichermassen dient, näher betrachtet.

Hierzu wurden in einem ersten Schritt zunächst zonale, thermische Simulationen durchgeführt, um den Einfluss der Wärmespeicherung und den tageszeitlichen Verlauf der sommerlichen Temperaturen aufzuzeigen (Details dazu siehe Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 29.12.06).

Darauf aufbauend wurden für einen bestimmten Zeitpunkt während der Nachtlüftung hochauflösende CFD-Simulationen durchgeführt (Details dazu siehe Bericht des IB Bauklimatik vom 12.03.07).

4.1 Kippelement

Für das Kippelement wurde idealisierend davon ausgegangen, dass es sowohl tagsüber wie auch nachts in gekippter Stellung verbleibt.

4.1.1 Ergebnisse der zonalen, thermischen Simulationen

Die bei einer Fensterausbildung in Form des Kippelements während einer sommerlichen Schönwetterperiode zu erwartenden Temperaturen und Fensterlüftungsintensitäten nachfolgend dargestellt (Fensterstellung permanent gekippt); die nachfolgen-

MÜLLER-BBM

den Ergebnisse wurden von Müller-BBM mit Hilfe zonale, thermischer Simulationen ermittelt.

In Abbildung 10 zunächst der im Verlauf einer längeren Schönwetterperiode zu erwartende Temperaturanstieg im Raum (Einschwingvorgang) aufgetragen und in Abbildung 11 ist ein Tag am Ende dieser Schönwetterperiode (Raum im eingeschwungenen Zustand) im Tagesgang dargestellt.

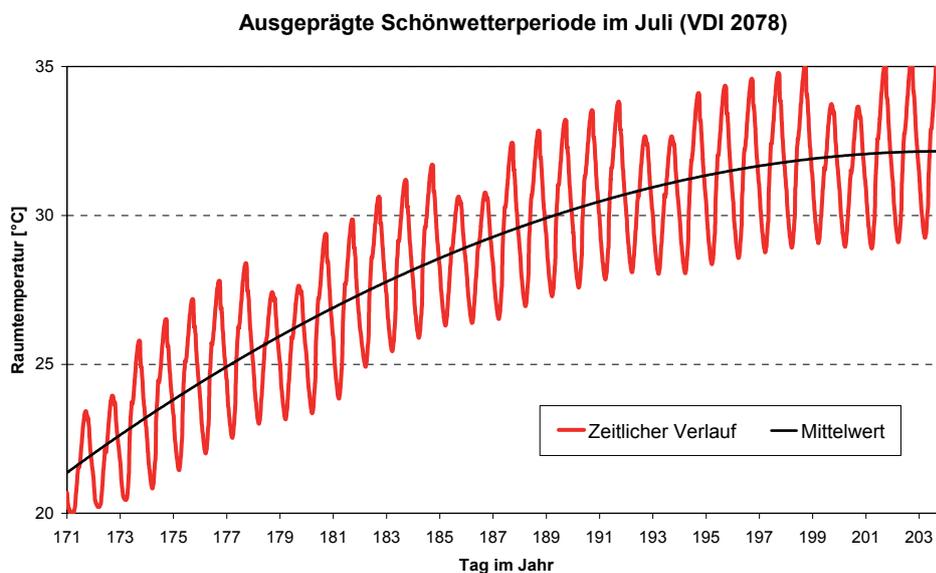


Abbildung 10. 4-Wöchiger Einschwingvorgang beim Raum mit Kippelement

In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass sich der Tagesmittelwert der empfundenen Temperatur bei ca. 32...33°C einschwingt, wobei die Spitzenwerte tagsüber bis auf ca. 35°C ansteigen.

In Abbildung 11 mit der Detaildarstellung eines heißen, sonnigen Sommertags im Juli (nach VDI 2078) ist zu sehen, dass diese Spitzenwerte der empfundenen Temperatur am Nachmittag – also bei maximaler Besonnungsintensität – auftreten. Abbildung 11 ist auch zu entnehmen, dass die Lufttemperatur im Raum sogar bis auf ca. 36°C ansteigt, obwohl die Außenlufttemperatur nicht über 32°C liegt. Diese hohen Temperaturen tagsüber sind darin begründet, dass der Raum während der Nacht nicht ausreichend entwärmt wird, was anhand der nächtlichen Temperaturen von 28...30°C deutlich wird.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die mit Hilfe des Kippelements erreichbare Lüftungsintensität während der Nacht in Höhe von ca. LW = 1,5...2,0 1/h (vgl. dazu Abbildung 11) zu gering für eine wirksame nächtliche Entwärmung ist.

Auch tagsüber wird während der Arbeitszeit mit dem Kippelement nur eine Fensterlüftungsintensität von ca. LW = 1,0...1,5 1/h (siehe Abbildung 11) erreicht, was sich bei der deutlichen Überhitzung des Raumes als zu gering und damit problematisch darstellt.

MÜLLER-BBM

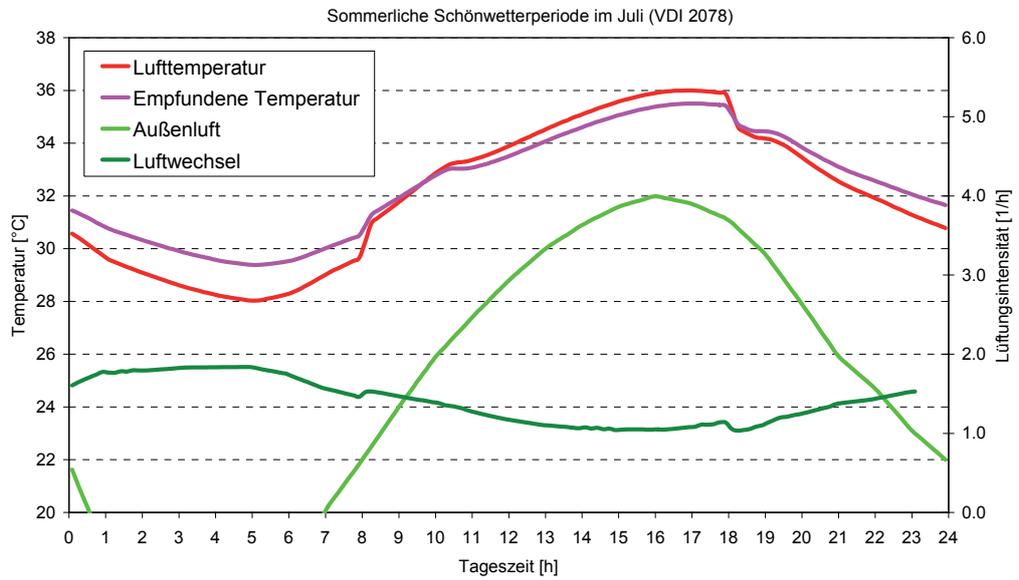


Abbildung 11. Temperaturen und Lüftungsintensität im Raum mit Kippelement

Im Verlauf eines ganzen Jahres sind in dem Raum mit einem Kippelement Häufigkeiten erhöhter sommerlicher Temperaturen zu erwarten, wie sie in Abbildung 12 aufgetragen sind.

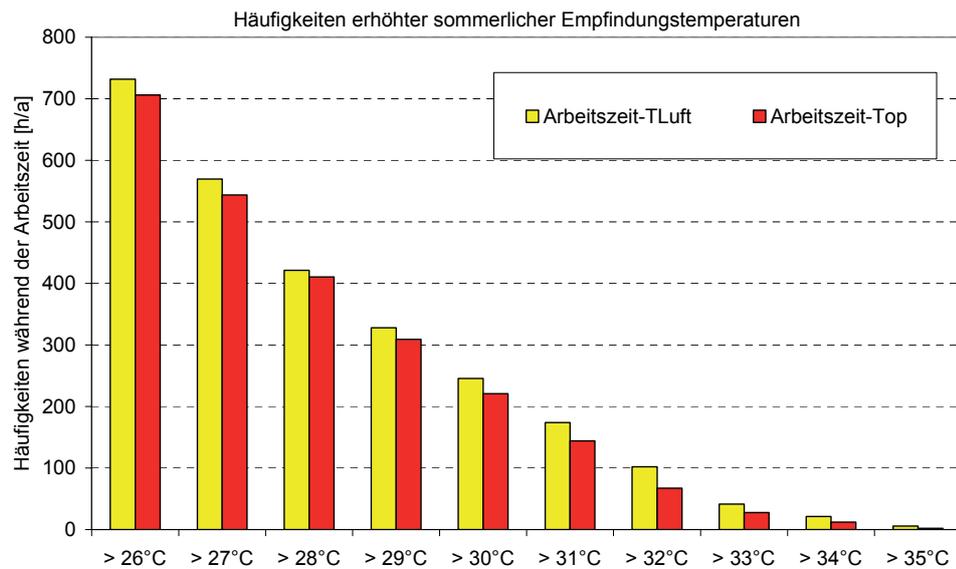


Abbildung 12. Häufigkeit der Temperaturen im Raum mit Kippelement

MÜLLER-BBM

Darin ist zu erkennen, dass die Temperaturen in dem Raum in Analogie zur sommerlichen Schönwetterperiode auch im Verlauf eines Jahres mit extremen Sommer bis auf ca. 35...36°C ansteigen. Diese Maximaltemperaturen werden jedoch nur während einiger Stunden im Jahr erreicht.

Das unakzeptabel hohe Temperaturniveau im Sommer manifestiert sich vor allem in der enormen Häufigkeit hoher Raumtemperaturen. So steigt die empfundene Temperatur in dem Raum mit Kippelement innerhalb der Arbeitszeit während ca. 700 h/a über 26°C an (vgl. dazu Abbildung 12); die Empfindungstemperatur von 30°C wird noch während ca. 220 h/a überschritten (siehe Abbildung 12).

4.1.2 Ergebnisse der hochauflösenden CFD-Simulationen

Für einen diskreten Zeitpunkt während der Nachtlüftung (um ca. 3:30 nachts, vgl. dazu Abbildung 3) wurden aufbauend auf den Ergebnissen der zonalen, thermischen Simulationen hochauflösende CFD-Simulationen vom IB Bauklimatik durchgeführt.

In Abbildung 13 ist als Ergebnis der CFD-Simulationen zur Nachtlüftung die Verteilung der Lufttemperatur im untersuchten Raum dargestellt.

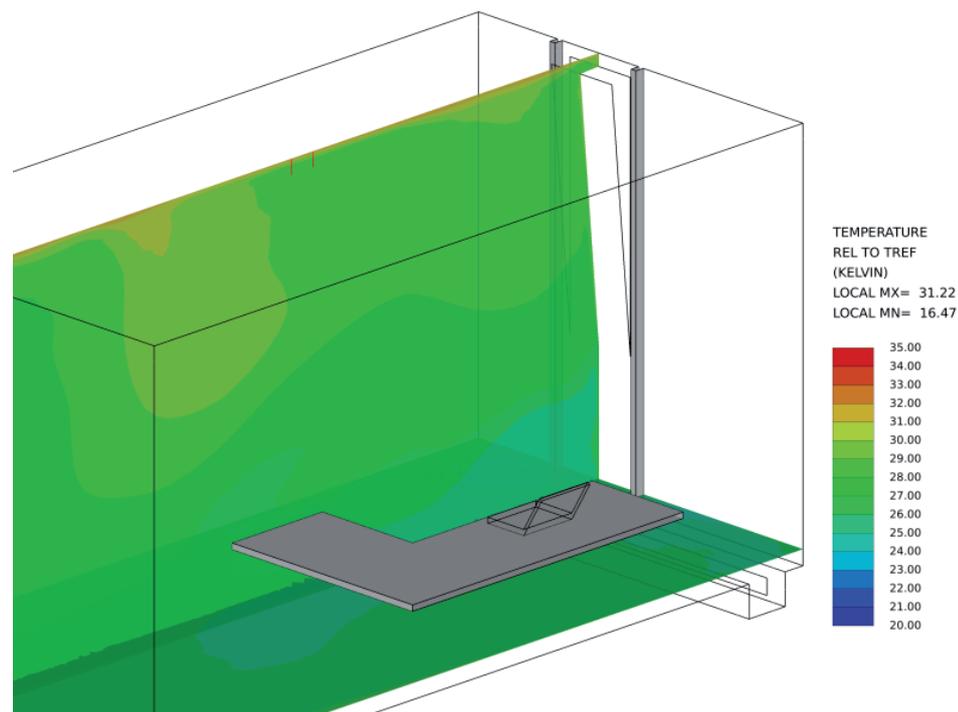


Abbildung 13. Lufttemperaturen während Nachtlüftung bei offenem Kippelement

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass sich eine gewisse thermische Schichtung ausbildet: Ca. 25...26°C im Bodenbereich und ca. 29...31°C direkt unter der Decke. Der Mittelwert der Lufttemperatur über den gesamten Raum entspricht mit ca. 28°C in etwa dem Wert der zonalen Simulationen (vgl. dazu Abbildung 11). Darüber hinaus ist Abbildung 13 auch zu entnehmen, dass sich die durch das offene Kippelement einströmende kühle Außenluft im Bodenbereich ausbreitet. Dieses Ergebnis belegt,

MÜLLER-BBM

dass mittels geöffnetem Kippfenster während der Nachtlüftung – trotz seitlichem Einströmen der kühlen Außenluft – durchaus eine ausreichende Raumdurchspülung erreicht werden kann (auch wenn die Lüftungsintensität zu gering ist).

4.2 Vertikalschiebeelement

Im folgenden wird das Vertikalschiebeelement mit ausschließlich manueller Bedienung untersucht. Dabei wird nach Vorgabe des AG davon ausgegangen, dass das Vertikalschiebeelement tagsüber während der Arbeitszeit vollständig geöffnet (Öffnungshöhe oben und unten jeweils ca. 44 cm) ist, während es nachts über aus Gründen des Witterungs- und Einbruchschutzes oben und unten jeweils nur einen offenen Lüftungsspalt in Höhe von ca. 12 cm aufweist.

4.2.1 Ergebnisse der zonalen, thermischen Simulationen

Die nachfolgenden Ergebnisse wurden von Müller-BBM mit Hilfe zonale, thermischer Simulationen ermittelt.

Die bei einer Fensterausbildung in Form des Vertikalschiebelements und dem erläuterten Öffnungsverhalten während einer sommerlichen Schönwetterperiode zu erwartenden Temperaturen und Fensterlüftungsintensitäten sind nachfolgend dargestellt. Dabei ist in Abbildung 14 wiederum zunächst der mehrwöchige Einschwingvorgang und in Abbildung 15 ein Tag am Ende dieser Schönwetterperiode dargestellt.

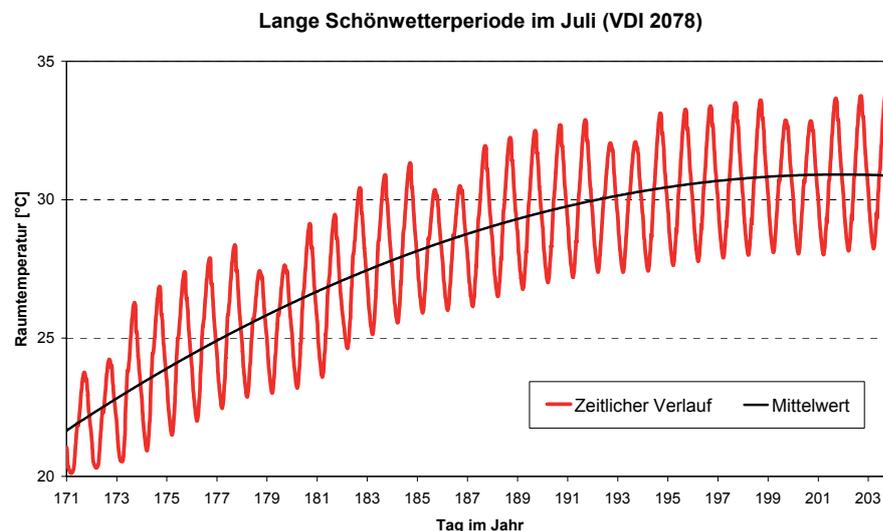


Abbildung 14. 4-Wöchiger Einschwingvorgang beim Vertikalschiebeelement

In Abbildung 14 ist zunächst zu erkennen, dass ein ähnlich langer Einschwingvorgang wie beim Kippelement zu erwarten ist, wobei sich für das Vertikalschiebeelement im eingeschwungenen Zustand etwas niedrigere Tagesmittelwerte von ca. 31°C und Maximalwerte von ca. 34°C ergeben.

MÜLLER-BBM

Die Erklärung für diese etwas günstigeren Raumtemperaturen sind in Abbildung 15 zu finden. Darin ist zu sehen, dass die Intensität der nächtlichen Fensterlüftung aufgrund der geringen Spaltweite von ca. 12 cm zwar in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Kipfenster liegt (ca. LW = 2,0 1/h, vgl. dazu Abbildung 11) und somit auch in diesem Fall keine ausreichend intensive Nachtlüftung erreicht wird. Tagsüber kann das Vertikalschiebeelement jedoch vollständig geöffnet werden, so dass in dieser Zeit eine deutlich intensivere Fensterlüftung mit ca. LW = 3...5 1/h (siehe Abbildung 15) erreicht wird.

Die tagsüber intensivere Fensterlüftung führt dann zu etwas niedrigeren Raumtemperaturen (um ca. 1...2 K niedriger als beim Kippelement, vgl. dazu Abbildung 11).

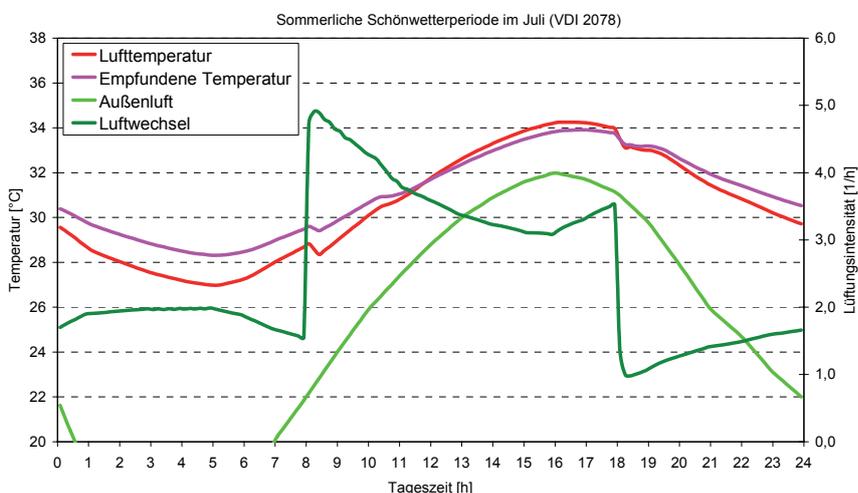


Abbildung 15. Temperaturen und Lüftungsintensität im Raum mit Vertikalschiebeelement

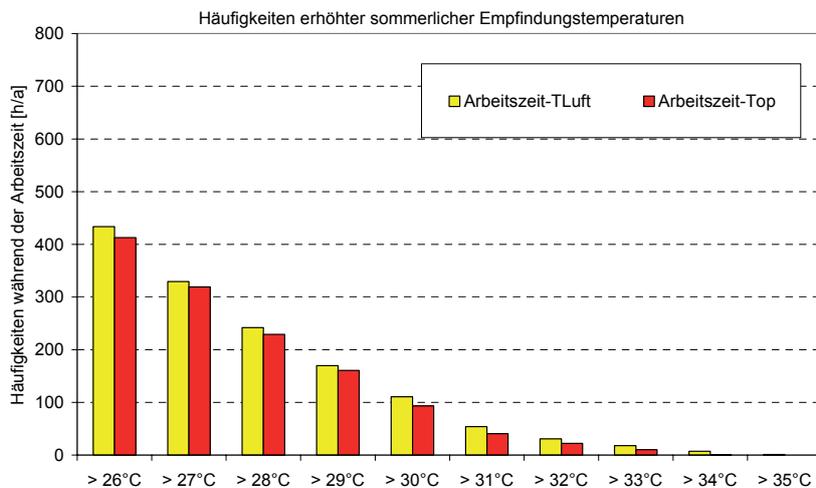


Abbildung 16. Häufigkeit der Temperaturen im Raum mit Vertikalschiebeelement

MÜLLER-BBM

Die mit Hilfe des Vertikalschiebelements während der Arbeitszeit erreichbare intensivere Fensterlüftung wirkt sich erwartungsgemäß besonders stark auf die Arbeitszeit aus. In Abbildung 16 sind die für dieses Öffnungsverhalten zu erwartenden Häufigkeiten erhöhter sommerlicher Temperaturen aufgetragen. Darin ist zu erkennen, dass sich die Überschreitungshäufigkeiten gegenüber dem Kippelement deutlich reduzieren; so steigen die Temperaturen in diesem Fall während ca. 410 h/a über 26°C und während ca. 90 h/a über 30°C an.

Obwohl mit dem Vertikalschiebelement eine tagsüber intensivere Fensterlüftung und demzufolge eine deutliche Verbesserung der sommerlichen Temperaturverhältnisse in dem Raum erreicht werden kann, stellt sich das sommerliche Temperaturniveau als unakzeptabel hoch dar.

Als wesentlicher Grund hierfür stellt sich die unzureichende Nachtlüftungsintensität dar, welche durch nachts vollständig geöffnete Vertikalschiebelemente drastisch verbessert werden kann (vgl. dazu Abschnitt 5.2).

4.2.2 Ergebnisse der hochauflösenden CFD-Simulationen

Für einen diskreten Zeitpunkt während der Nachtlüftung (um ca. 3:30 nachts, vgl. dazu Abbildung 3) wurden aufbauend auf den Ergebnissen der zonalen, thermischen Simulationen wiederum hochauflösende CFD-Simulationen vom IB Bauklimatik durchgeführt.

In Abbildung 13 ist als Ergebnis der CFD-Simulationen zur Nachtlüftung mittels Vertikalschiebelement die Verteilung der Lufttemperatur im untersuchten Raum dargestellt.

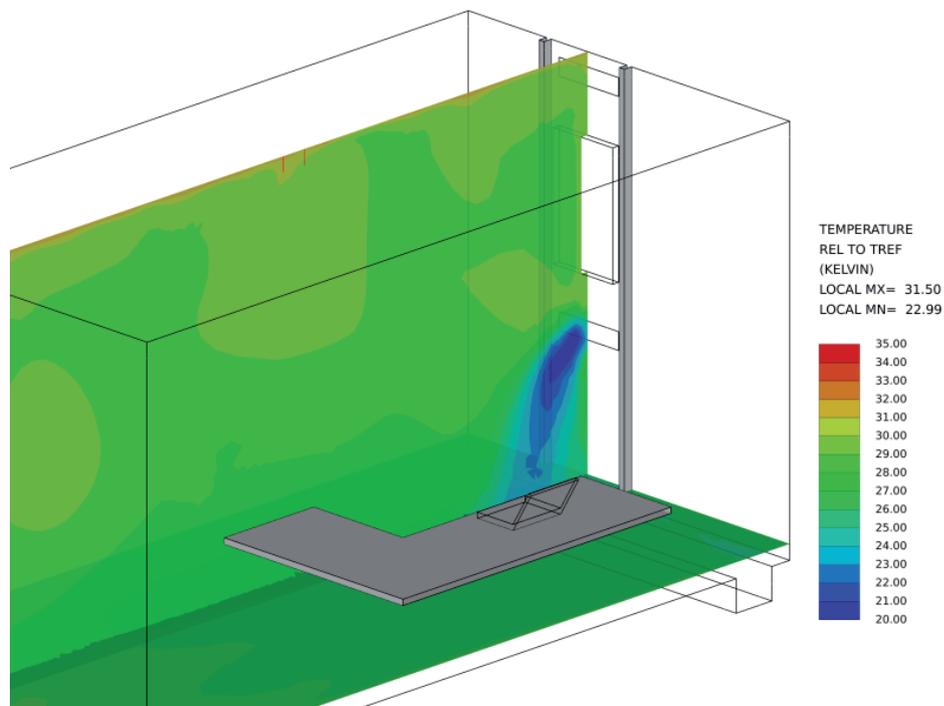


Abbildung 17. Lufttemperaturen während Nachtlüftung bei offenem Vertikalschiebelement

MÜLLER-BBM

In Abbildung 17 ist zu erkennen, wie die kühle Außenluft durch den unteren, offenen Schlitz des Vertikalschiebeelement in den Raum einströmt. Aufgrund der thermischen Auftriebskräfte stellt sich auch beim Vertikalschiebeelement eine thermische Lufttemperaturschichtung ein, bei der im Bodenbereich eine Lufttemperatur von ca. 25...26°C und im Deckenbereich eine Lufttemperatur von ca. 29...31°C herrscht.

Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Raumdurchspülung bei Nachtlüftung kann zwischen dem Kippelement (siehe Abbildung 13) und dem Vertikalschiebeelement (vgl. Abbildung 17) somit nicht konstatiert werden.

5 Lüftung tagsüber im Sommer (Fall 3)

Wie mit dem AG vereinbart wird im folgenden die Situation im Sommer tagsüber, bei natürlicher Lüftung über die geöffneten Lüftungselemente, näher betrachtet.

Hierzu wurden wiederum die Ergebnisse der im Vorfeld der CFD-Simulationen durchgeführten zonalen, thermischen Simulationen herangezogen, um den Einfluss der Wärmespeicherung und den tageszeitlichen Verlauf der sommerlichen Temperaturen aufzuzeigen (Details dazu siehe Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 29.12.06). Darauf aufbauend wurden für einen bestimmten Zeitpunkt während des Tages hochauflösende CFD-Simulationen durchgeführt (Details dazu siehe Bericht des IB Bauklimatik vom 12.03.07).

5.1 Kippelement

Für das Kippelement wurde wiederum idealisierend davon ausgegangen, dass es permanent in gekippter Stellung verbleibt.

5.1.1 Ergebnisse der zonalen, thermischen Simulationen

Die Ergebnisse der zonalen, thermischen Simulationen für das Kippelement sind in Abschnitt 4.1 zu finden.

5.1.2 Ergebnisse der hochauflösenden CFD-Simulationen

Für einen diskreten Zeitpunkt während der Lüftung tagsüber (um ca. 15:30 nachmittags, vgl. dazu Abbildung 3) wurden aufbauend auf den Ergebnissen der zonalen, thermischen Simulationen wiederum hochauflösende CFD-Simulationen vom IB Bauklimatik durchgeführt.

In Abbildung 18 ist als Ergebnis der CFD-Simulationen zur Lüftung tagsüber mittels Kippelement die Verteilung der Lufttemperatur im untersuchten Raum dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass sich in dem Raum analog zur Nachtlüftung zwar eine ausreichende Raumdurchspülung ergibt (im rückwärtigen Raumbereich ist die Luft nicht wärmer als in Fassadennähe), die Lufttemperaturen insgesamt jedoch viel zu hoch liegen (vgl. dazu auch Abbildung 11).

MÜLLER-BBM

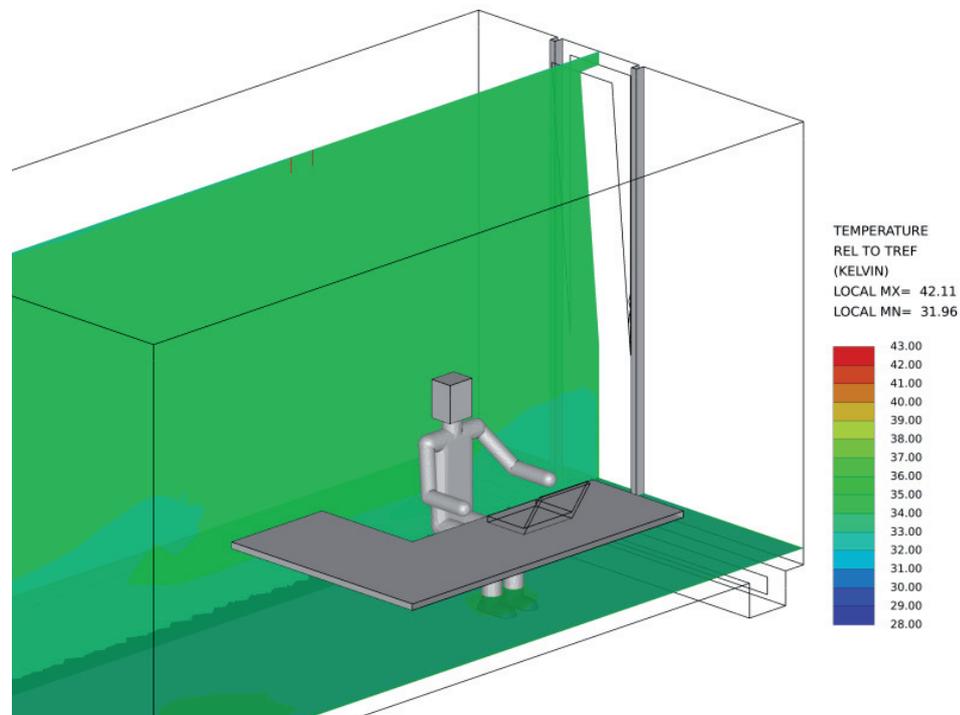


Abbildung 18. Lufttemperaturen während der Taglüftung bei offenem Kippelement

5.2 Vertikalschiebeelement

In Abstimmung mit dem AG wird im folgenden das Vertikalschiebeelement mit automatischer Steuerung untersucht. Die automatische Steuerung ermöglicht nämlich, dass das Vertikalschiebeelement nicht nur tagsüber während der Arbeitszeit, sondern auch während der Nacht vollständig geöffnet (Öffnungshöhe oben und unten jeweils ca. 44 cm) sein kann. Im Falle eines Witterungsumschwungs wird das Vertikalschiebeelement automatisch von der Steuerung geschlossen. Der Einbruchschutz wird anderweitig gewährleistet.

In diesem Falle kann das Vertikalschiebeelement seine Fähigkeiten – insbesondere bei der Nachtlüftung – voll zur Geltung bringen.

5.2.1 Ergebnisse der zonalen, thermischen Simulationen

Die nachfolgenden Ergebnisse wurden von Müller-BBM mit Hilfe zonale, thermischer Simulationen ermittelt (Details dazu siehe Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 29.12.06).

In Abbildung 19 sind wiederum zunächst der Einschwingvorgang und in Abbildung 20 die Temperaturen und Lüftungsintensität am Ende des Einschwingvorgangs dargestellt.

MÜLLER-BBM

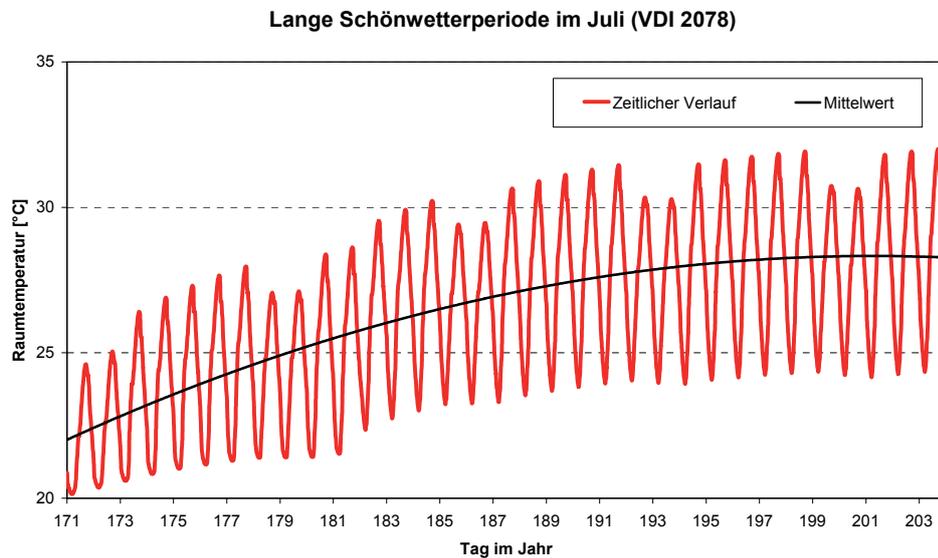


Abbildung 19. Mehrwöchiger Einschwingvorgang beim Raum mit Vertikalschiebeelement

In Abbildung 19 ist zunächst zu erkennen, dass sich der Raum ähnlich wie beim Kippfenster wiederum nach ca. 3...4 Wochen einschwingt (vgl. dazu Abbildung 10).

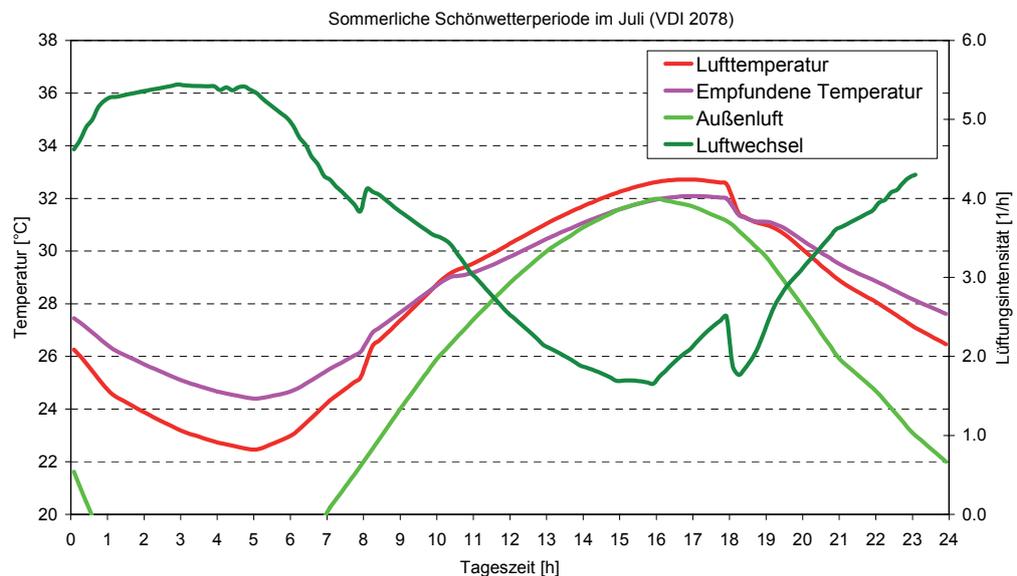


Abbildung 20. Temperaturen und Lüftungsintensität mit Vertikalschiebeelement

Allerdings zeigt der Vergleich mit dem Kippfenster, dass die wesentlich intensivere Fensterlüftung – insbesondere in den Nachtstunden – zu deutlich niedrigeren Temperaturen (um ca. 5 K, vgl. dazu Abbildung 10) führen. So pendelt sich der Tagesmit-

MÜLLER-BBM

telwert der Raumtemperatur bei ca. 28°C und die Spitzenwerte bei ca. 32°C ein. Diese deutlich günstigeren sommerlichen Temperaturen als beim Kippelement sind auch in Abbildung 20 mit den Temperaturen und der Fensterlüftungsintensität im eingeschwungenen Zustand zu erkennen. Darin ist zu sehen, dass die empfundene Temperatur in diesem Fall nur bis auf das Niveau der Außenlufttemperatur (ca. 32°C) ansteigt – und nicht wie beim Kippelement bis auf ca. 35° C (vgl. dazu Abbildung 11).

Der Grund für diese besseren Temperaturverhältnisse ist in der – gegenüber dem Kippelement – wesentlich intensiveren Nachtlüftung (ca. LW = 4,0...5,0 1/h) zu sehen, mit der eine entsprechende nächtliche Entwärmung des Raumes erreicht wird.

Diese nur bei vollständig geöffnetem Vertikalschiebefenster mögliche intensive Nachtlüftung wirkt sich auch günstig auf die Häufigkeit erhöhter sommerlicher Raumtemperaturen aus, die in Abbildung 21 für diese Variante aufgetragen sind.

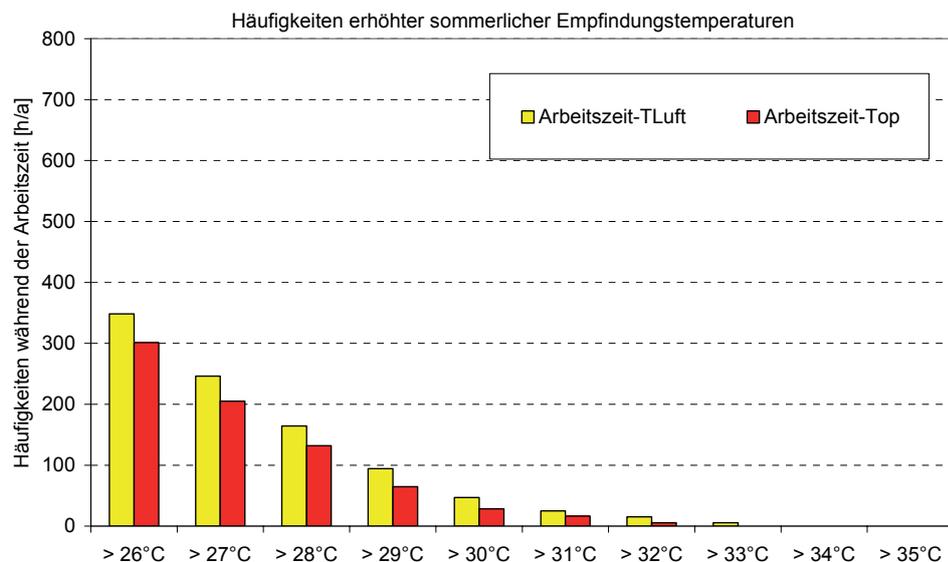


Abbildung 21. Häufigkeit der Temperaturen im Raum mit Vertikalschiebeelement

Darin ist zu erkennen, dass sich insgesamt gegenüber dem Kippelement ein deutlich niedrigeres Niveau der sommerlichen Temperaturen ergibt (vgl. dazu Abbildung 12). Darüber hinaus zeigt sich auch eine erhebliche Verbesserung der sommerlichen Temperaturen gegenüber dem – bei manueller Bedienung des Vertikalschiebefenster aus Sicherheitsgründen – eingeschränkten Nachtlüftungsbetrieb mit einer Spaltweite von nur 12 cm (vgl. dazu Abbildung 16).

Diese Ergebnisse zeigen, dass das große Optimierungspotential des Vertikalschiebefenster nur vollständig ausgeschöpft werden kann, wenn es über eine automatische Steuerung und einen elektrischen Antrieb verfügt.

MÜLLER-BBM

5.2.2 Ergebnisse der hochauflösenden CFD-Simulationen

Für einen diskreten Zeitpunkt während der Lüftung tagsüber (um ca. 15:30 nachmittags, vgl. dazu Abbildung 3) wurden aufbauend auf den Ergebnissen der zonalen, thermischen Simulationen wiederum hochauflösende CFD-Simulationen vom IB Bauklimatik durchgeführt.

In Abbildung 18 ist als Ergebnis der CFD-Simulationen zur Lüftung tagsüber mittels vollständig geöffnetem Vertikalschiebeelement die Verteilung der Lufttemperatur im untersuchten Raum dargestellt. Dabei sei darauf hingewiesen, dass sich für diesen Fall trotz des vollständig geöffnetem Vertikalschiebeelements eine Lüftungsintensität einstellt, die mit der Lüftungsintensität beim Kippelement annähernd vergleichbar ist (vgl. dazu Abbildung 3). Der Grund hierfür ist in der beim Vertikalschiebeelement wesentlich geringeren treibenden Lufttemperaturdifferenz zwischen Raumlufttemperatur und Außenluft zu sehen.

In Abbildung 22 ist zu erkennen, dass die thermische Schichtung innerhalb des Raumes aufgrund der intensiven Nachtlüftung relativ wenig ausgeprägt ist. Zudem ist in Abbildung 22 auch zu erkennen, dass die Raumlufttemperaturen zwischen 30...32°C liegen (bei einer Außenlufttemperatur von 32°C) und somit als moderat bezeichnet werden können.

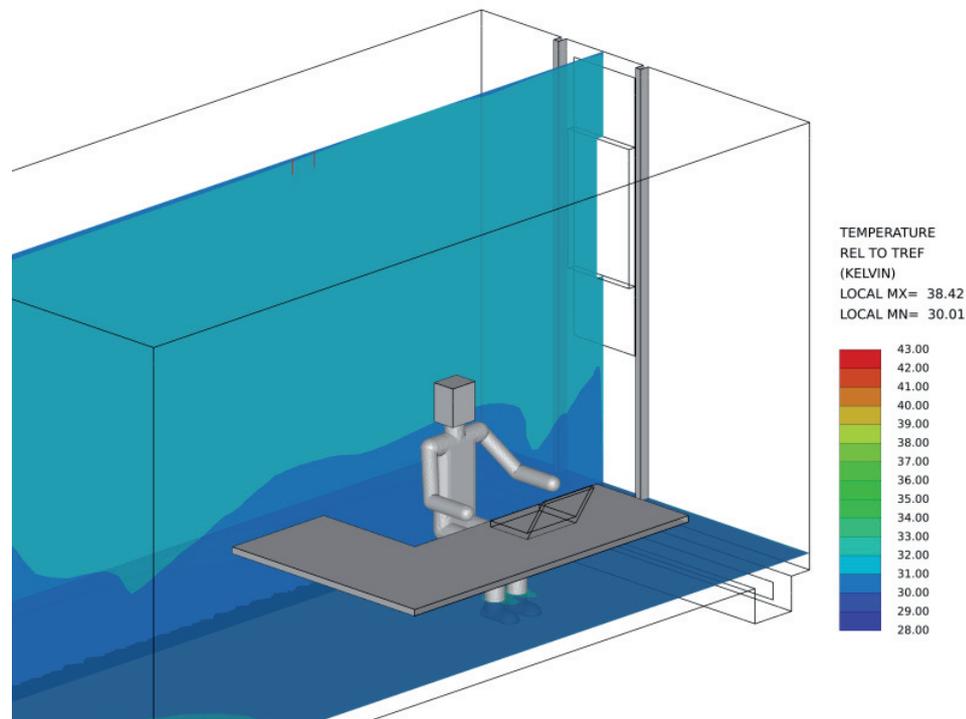


Abbildung 22. Lufttemperaturen während der Taglüftung bei offenem Vertikalschiebeelement

MÜLLER-BBM

6 Varianten mit Betonkernkühlung

Neben den aufgeführten Varianten wurden mit Hilfe der zonalen, thermischen Simulationen zusätzlich auch noch einige Varianten untersucht, die über eine Betonkernkühlung verfügten. Die Ergebnisse für diese Varianten zeigten, dass bei einem Klimakonzept mit Betonkernkühlung der Einfluss der unterschiedlichen Fensterausbildung sehr gering ist.

Die Betonkernkühlung dominierte bei diesen Varianten die sommerlichen Raumtemperaturen eindeutig (vgl. dazu Müller-BBM Bericht M66371/1 vom 29.12.06).

7 Zusammenfassung

Im Auftrag der TU München, Institut für Entwerfen und Bautechnik, wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Ausbildung der Öffnungselemente untersucht. Hierzu wurde sowohl im Winterfall wie auch im Sommerfall einem exemplarisch ausgewählten Kippelement das neu entwickelte Vertikalschiebeelement gegenübergestellt.

Die umfangreichen simulationstechnischen Untersuchungen zeigen auf, dass das Vertikalschiebeelement im Winter aufgrund seiner stufenlosen Einstellbarkeit erhebliche Vorteile gegenüber einem herkömmlichen Kippelement aufweist. Denn mit Hilfe des neuen Vertikalschiebeelements lässt sich eine zugfreie Permanentlüftung in der kalten Jahreszeit darstellen. Beim Kippelement hingegen ist nur die unbeliebte Stoßlüftung möglich.

Bei einem passiven Klimakonzept ohne jede Kühlung zeigt das Vertikalschiebeelement im Sommer – im Gegensatz zum Kippelement – ein erhebliches Potential, die sommerlichen Raumtemperaturen auf moderate Werte zu begrenzen. Allerdings setzt dies voraus, dass das Vertikalschiebeelement nachts vollständig geöffnet werden kann; dies wiederum ist nur möglich, wenn das Vertikalschiebeelement über einen elektrischen Antrieb verfügt und der Witterungsschutz über eine entsprechende Steuerung gewährleistet wird. Auch der Einbruchschutz muss in diesem Fall auf andere Weise erreicht werden.

Falls das Vertikalschiebeelement aus Gründen des Witterungs- und Einbruchschutzes im Sommer nachts nur einen Spalt weit geöffnet werden kann, sind die Vorteile gegenüber einem Kippelement nur noch wenig ausgeprägt.



Dr.-Ing. Gunter Pültz

Experimentelle Untersuchung eines Vertikalschiebelements im Hinblick auf seine Lüftungstechnische Wirksamkeit im Winterfall und Vergleich mit einem Kippflügel

Auftraggeber:
Technische Universität München
Institut für Entwerfen und Bautechnik

Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Michael Haibel
Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff

Projektbearbeitung:
Dipl.-Ing. Alexander Sperr
Stefan Hudjetz MSc

Hochschule Biberach
Karlstrasse 11
88400 Biberach

Januar 2008

Hochschule Biberach
Hochschule für Bauwesen und Wirtschaft
Labor für Raumluf- und Klimatechnik
Dipl.-Ing. Alexander Sperr
Karlstrasse 11
D-88400 Biberach an der Riss
Telefon: +49 (0)7351 – 582 260
Telefax: +49 (0)7351 – 582 299
mailto: sperr@fh-biberach.de

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Inhaltsverzeichnis****Seite**

1	Aufgabenstellung und Einleitung	1
2	Angewandte Methoden und durchgeführte Messungen.....	2
2.1	Versuchsräume	2
2.1.1	Geometrie	2
2.1.2	Wärmeversorgung	5
2.2	Messungen.....	5
2.2.1	Randbedingungen.....	5
2.2.2	Messtechnik	5
3	Auswertung.....	8
3.1	Strömungsvisualisierung	8
3.2	Raumluftgeschwindigkeit und -temperatur.....	8
3.3	Tracergasmessung	12
4	Fazit.....	19
5	Anhang	20
5.1	Filme	20
5.2	Diagramme der Luftgeschwindigkeiten	20
5.2.1	Messkampagne 1, Raum G 0.02 (Kippfenster)	20
5.2.2	Messkampagne 1, Raum G 0.03 (Schiebeelemente).....	24
5.2.3	Messkampagne 2, Raum G 0.03 (Schiebeelemente).....	27

TUM**Lüftungseffektivität****Vertikalschiebeelemente**

Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



1 Aufgabenstellung und Einleitung

An der Technischen Universität München wurde ein Vertikalschiebeelement entwickelt, mit dessen Hilfe eine dosierbare natürliche Belüftung von Räumen über variabel einstellbare Spaltöffnungen möglich ist. Um das Lüftungstechnische Verhalten des Vertikalschiebelements zu untersuchen, wurden bereits Strömungssimulationen von Müller-BBM durchgeführt. Zusätzlich zu den Ergebnissen aus diesen Simulationen soll nun an der Hochschule Biberach (im Folgenden: HBC) eine experimentelle Untersuchung unter winterlichen Randbedingungen an realen Räumen durchgeführt werden. Das Technikum Gebäudeklimatik der HBC verfügt über eine Fassade, die so modifiziert werden kann, dass es möglich ist, eine Spaltkonfiguration herzustellen, welche einem, der bereits in der Simulation untersuchten Fälle ähnelt, ohne dass hierfür das Vertikalschiebeelement selbst in der Fassade installiert werden muss. Dadurch können die Simulationsergebnisse mit experimentell gewonnenen Daten verglichen werden. Eine simultan stattfindende Messung in einem weiteren Hörsaal mit konventionellem Kippflügel in der Fassade ermöglicht den Vergleich von Vertikalschiebeelement und Kippflügel.

Im Einzelnen führt die HBC folgende Untersuchungen durch:

- Grundlagenermittlung: Vergleich der Randbedingungen in den Simulationen mit denen im Technikum Gebäudeklimatik, Abstimmung der Versuchsdetails und Parameter (z. B. Öffnungsweiten in der Fassade, Positionen zur Messung von lokalen Strömungsgeschwindigkeiten im Raum) für die Versuche in Biberach;
- Vorbereitung der Versuche (z.B. Herstellung eines Körpers, welcher das Vertikalschiebeelement repräsentiert, und dessen Einbau in die Fassade)
- Versuche unter winterlichen Randbedingungen in zwei ausgewählten Hörsälen im Technikum Gebäudeklimatik. In einem Hörsaal finden die „Messungen Vertikalschiebeelement“ und im anderen Hörsaal simultan die „Messungen Kippflügel“ statt:
 In der ersten Versuchsanordnung wird die Fläche der Doppelspaltöffnung so gewählt, dass sie der Öffnungsfläche des Kippflügels entspricht. Mit Hilfe von Tracergasmessungen wird über die Konzentrationsabklingmethode der globale Luftwechsel im Raum bestimmt. Zusätzlich werden an ausgewählten Stellen im Raum die Raumlufttemperatur und die Strömungsgeschwindigkeit messtechnisch erfasst.
 In einer zweiten Versuchsanordnung wird die Fläche der Doppelspaltöffnung so gewählt, dass sie dem in den Strömungssimulationen untersuchten Winterfall ähnelt. Wiederum wird mit Hilfe von Tracergasmessungen der globale Luftwechsel im Raum bestimmt. Zusätzlich werden an ausgewählten Stellen im Raum die Raumlufttemperatur und die Strömungsgeschwindigkeit messtechnisch erfasst.
 Messgrößen: Spurengaskonzentration im Raum, Raumlufttemperaturen an ausgewählten Stellen im Raum, Strömungsgeschwindigkeiten an ausgewählten Stellen im Raum (maximal 12), Außenbedingungen mit Hilfe der Wetterstation der Hochschule Biberach.
- Zusätzlich zu den oben beschriebenen Versuchen erfolgt eine Visualisierung der Strömung mit Theaternebel. Die Nebelversuche können jedoch aus technischen Gründen nicht gleichzeitig mit den Tracergasmessungen erfolgen und erfolgen daher separat.
- Auswertung der Ergebnisse;
- Dokumentation aller Ergebnisse und Empfehlungen in einem Bericht.



2 Angewandte Methoden und durchgeführte Messungen

2.1 Versuchsräume

2.1.1 Geometrie

Die Messungen fanden während zweier Messkampagnen am 15. und am 30.01.2008 jeweils gleichzeitig in zwei gleichartigen nebeneinander liegenden Hörsälen der HBC statt. Eine zusätzliche Messung zur Bestimmung der Infiltrationsrate auf Grund von Undichtigkeiten erfolgte am 14.02.2008. Die Hörsäle G 0.02 und G 0.03 (s. Abb. 1) befinden sich im Erdgeschoss des Technikums Gebäudeklimatik und besitzen neben einer nahezu identischen Raumgröße eine für die Versuchsanordnung sinnvolle gleichartige Fensteranordnung. Die Innenmaße der Räume betragen 9,925 m x 7,56 m x 3,20 m (G 0.02) bzw. 9,85 m x 7,56 m x 3,20 m (G 0.03), woraus sich Raumvolumina von 240 m³ bzw. 238 m³ ergeben.

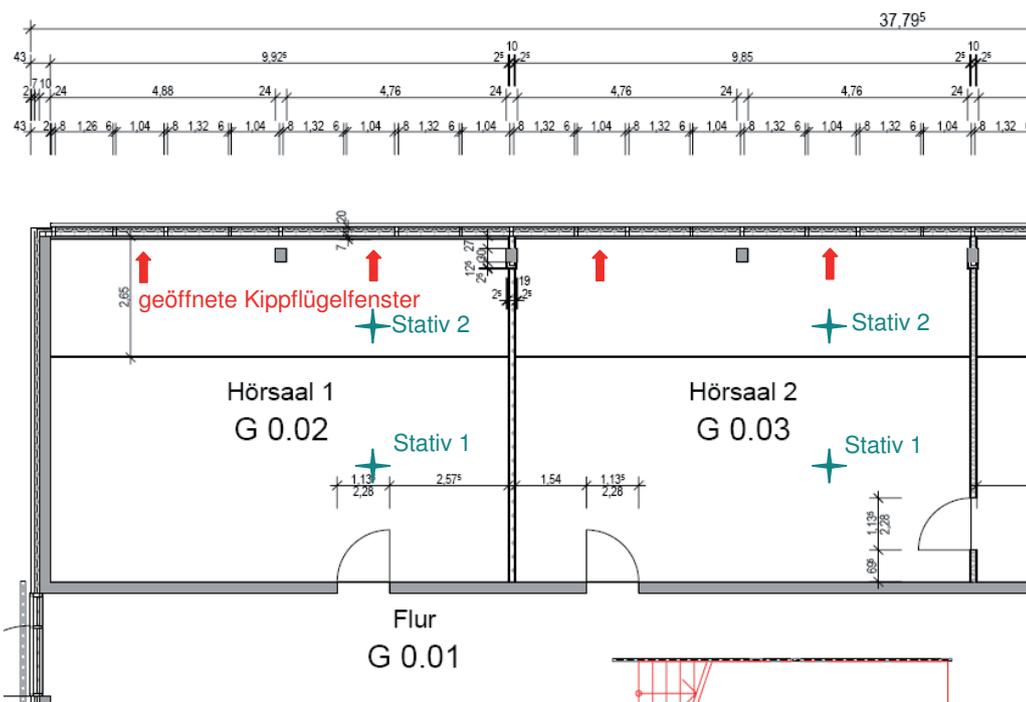


Abbildung 1: Grundriss Technikum

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



In Raum G 0.03 wurden zwei Fensterflügel ausgebaut (in Abb. 1 mit roten Pfeilen gekennzeichnet). In diese Öffnungen wurden dann die aus Styrodurplatten nachgebildeten „Schiebeelemente“ eingebaut. Die „beweglichen“ Elemente besaßen – wie die Originale – eine Höhe von 890 mm. Um die größere Gesamthöhe der Fensteröffnung auszugleichen, wurde im oberen Teil eine Styrodurplatte mit einer Höhe von 150 mm eingebaut (siehe Skizze, Abb. 2 und Foto, Abb. 3).

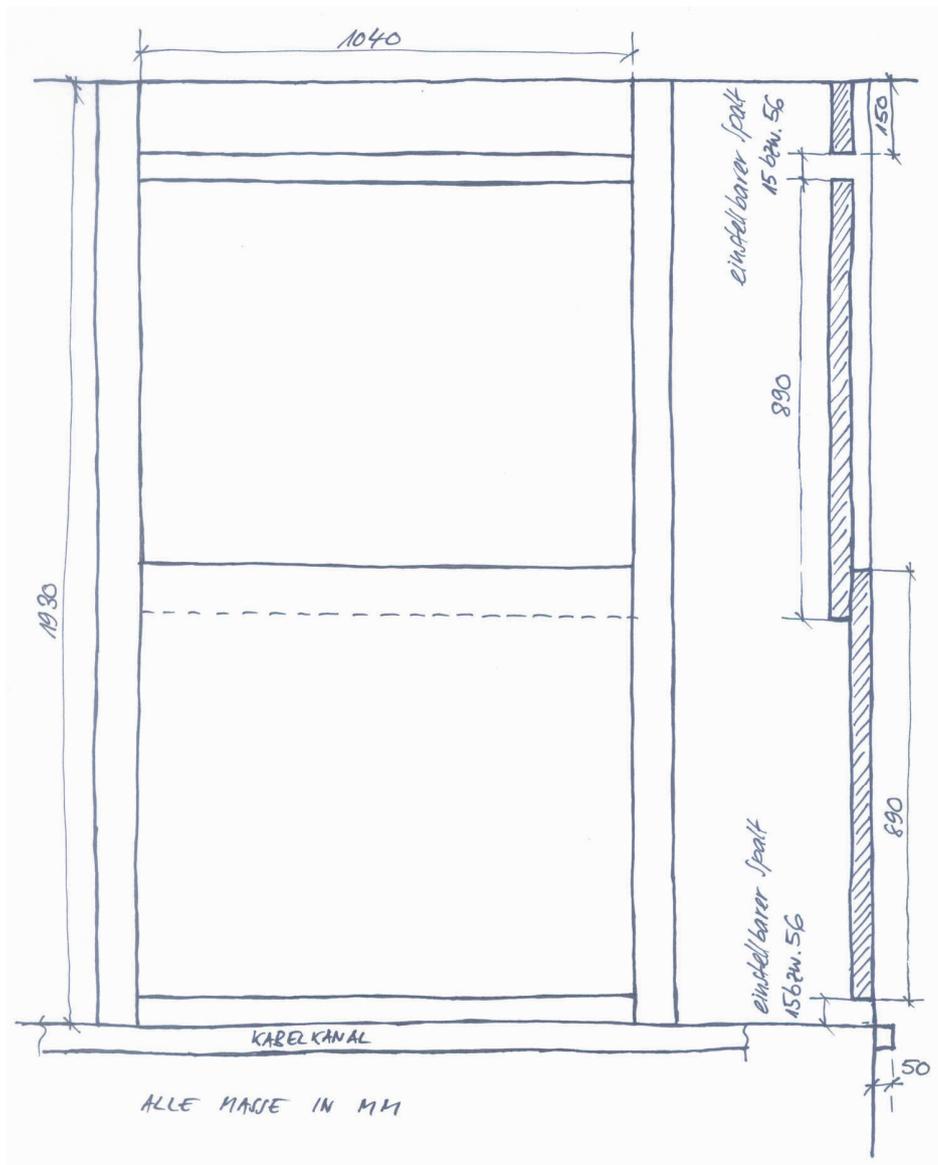


Abbildung 2: Skizze der nachgebildeten Schiebeelemente

TUM**Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente**
Januar 2008

HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**Abbildung 3: nachgebildetes Schiebeelement vor Beginn der Messung**

Für die Messungen wurden pro Raum zwei Fenster gekippt bzw. zwei Schiebeelement-Nachbildungen betrieben (siehe Abb. 1). Wie zuvor bei einer Besprechung mit den Herren Dipl.-Ing. Donath und Dipl.-Ing. Bickel festgelegt, wurden zwei verschiedene Spaltöffnungsmaße für die beiden Messkampagnen gewählt. Die Gesamtbreite der geöffneten Elemente beträgt aufgrund der baulichen Gegebenheiten 2,08 m (2 x 1,04 m) bei einer Raumbreite von 9,85 m und ist dadurch mit 20% der Raumbreite etwas geringer als in der Vorgabe bzw. auch in der Simulation angesetzt (25%). Bei der ersten Messkampagne am 15.01.2008 wurden die Spalthöhen auf jeweils 56 mm eingestellt, wodurch sich pro Doppelspalt eine gesamte geöffnete Fläche von 116.340 mm² ergibt, was der freien Querschnittsfläche eines geöffneten Kippflügels, wie er im Versuchsgebäude standardmäßig eingebaut ist, entspricht. Bei der zweiten Messkampagne am 30.01.2008 wurden die Spalthöhen von je 15 mm aus der Simulation übernommen. Wäre die freie Querschnittsfläche übernommen worden, hätten sich Spalthöhen von nur 9 mm ergeben, was angesichts der größeren Raumbreite und der Ergebnisse der ersten Messkampagne als zu gering bewertet wurde.

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



2.1.2 Wärmeversorgung

Die Räume wurden vor und während der Messungen durch statische Heizflächen unter den Fenstern beheizt, die Lüftungsanlage, über die der Raum G 0.03 mit Frischluft versorgt werden kann, war abgeschaltet.

2.2 Messungen

Während der ersten Messkampagne (15.01.2008) fand zuerst in beiden Räumen die Strömungsvisualisierung mit Theaternebel statt, anschließend wurden die Räume gründlich gelüftet und dann wieder aufgeheizt. Danach folgte jeweils eine zweistündige Aufzeichnung der Luftgeschwindigkeiten und der Raumlufttemperaturen mit gleichzeitiger Erfassung der Abnahme der eingebrachten SF₆-Konzentration zum Zwecke der Luftwechselbestimmung (Tracergasmessung).

Bei der zweiten Messkampagne (30.01.2008) fand keine Strömungsvisualisierung statt. Wegen nahezu gleichartiger Randbedingungen wie bei den Messungen am 15.01.2008 wurde auf die Geschwindigkeits- und Temperaturmessung im Raum G 0.02 verzichtet. Im Raum G 0.03 wurden diese wegen der geänderten Spalthöhen gemessen, außerdem wurde wieder in beiden Räumen die SF₆-Konzentration erfasst (Tracergasmessung).

2.2.1 Randbedingungen

Messkampagne am 15.01.2008

Außenbedingungen: Temperatur 4 °C zu Messbeginn, windstill.

Vor dem ersten Versuchsteil, der Strömungsvisualisierung mit Theaternebel betrug die mittlere Innentemperatur in Raum G 0.02 20,5 °C, in Raum G 0.03 18,7 °C. Nach der anschließenden Lüftung und erneutem Aufheizen der Räume betragen die mittleren Innentemperaturen in Raum G 0.02 20,7 °C, in Raum G 0.03 18,3 °C.

Messkampagne am 30.01.2008

Außenbedingungen: Temperatur 2,9 °C zu Messbeginn, windstill.

Nach Ausbau der Fensterflügel und Einbau der Styrodurelemente wurde der Raum G 0.03 auf eine mittlere Temperatur von 19,6 °C aufgeheizt, im Raum G 0.02 herrschte zu Beginn der Messung eine Temperatur von 20,5 °C.

2.2.2 Messtechnik

Strömungsvisualisierung

Für die Strömungsvisualisierung wurde Theaternebel mit einem Nebelgenerator vom Typ Jem ZR22 erzeugt, verwendet wurde ein schnell auflösendes Nebelfluid.

TUM**Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente**
Januar 2008

HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Geschwindigkeits- und Temperaturmessung

Für diese Messung wurden je Raum zwei Stative mit Messfühlern für folgende physikalische Größen bestückt:

- Lufttemperatur (NiCr-Ni-Thermoelemente),
- Luftgeschwindigkeit (omnidirektionale Thermoanemometer, Genauigkeit: +/- 0,02% bis +/- 0,12 m/s).

Die Größen Raumlufttemperatur und Luftgeschwindigkeit wurden in Anlehnung an DIN 1946 T.2 simultan in drei Höhen über dem Boden (0,1 m, 1,1 m und 1,7 m) gemessen. Die Stative befanden sich jeweils in Abständen von 2 m (Stativ 2) bzw. 5 m (Stativ 1) vor einem der geöffneten Elemente (siehe Abb. 1 und Foto, Abb. 4).

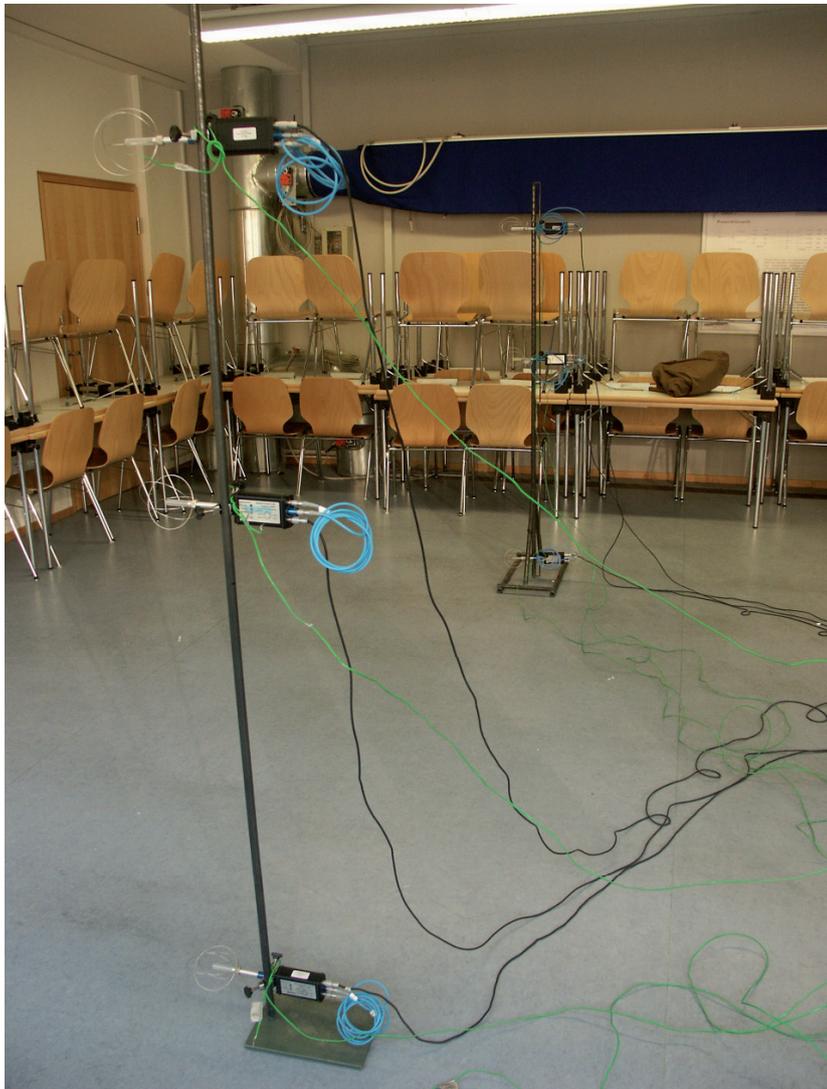


Abbildung 4: Stative mit Messfühlern

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Zur Messdatenerfassung und -speicherung kam ein ALMEMO-Datenlogger 5590-2 zum Einsatz. Sämtliche Messwerte wurden simultan an je zwei verschiedenen Stellen jeweils in Intervallen von 5 Sekunden aufgezeichnet. Die Dauer der einzelnen Messungen betrug über zwei Stunden.

Zusätzlich zu den Raumlufttemperaturen und -geschwindigkeiten wurden die Außenlufttemperaturen direkt am Gebäude mittels NiCr-Ni-Thermoelementen erfasst.

Nach dem Auslesen der Datenspeicher wurden jeweils sämtliche Messwerte in Microsoft Excel Tabellen übertragen und ausgewertet.

Tracergasmessung

Die Lüftungseffektivität (Luftwechsel) wurde mit der Konzentrationsabklingmethode untersucht. Hierzu wurden zunächst Proben der Außenluft und der Raumluft entnommen, anschließend eine bestimmte Menge (30 ml) Schwefelhexafluorid (SF_6) in jeden Raum eingebracht und gründlich mit der Raumluft vermischt. Aus der Raumluft wurden dann über eine Gesamtdauer von zwei Stunden Proben in Intervallen von je 15 Minuten genommen. Über die Bestimmung des Abklingverhaltens der SF_6 -Konzentration kann der Luftwechsel der Räume ermittelt werden.

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



3 Auswertung

3.1 Strömungsvisualisierung

Die Videos befinden sich auf der beiliegenden CD. Auf den einzelnen Clips ist folgendes zu erkennen:

- 1: Raum G 0.02, Eindringen von Außenluft durch das gekippte Fenster
- 2: Raum G 0.02, Ausströmen von Raumluft (Nebel) ins Freie
- 3: Raum G 0.03, Eindringen von Außenluft durch den unteren Schlitz
- 4: Raum G 0.03, Ausströmen von Raumluft (Nebel) durch den oberen Schlitz ins Freie
- 5: wie 4, jedoch andere Perspektive

Das Eindringen der Luft wird besonders gut im Nahfeld des Fensters bzw. Schlitzes deutlich. In größerer Entfernung von der Fassade ist mit dieser Methode kaum noch eine Strömung sichtbar zu machen, da zu wenig nicht vernebelte Luft vorhanden ist.

Bei der zweiten Messkampagne am 30.01.2008 wurde aufgrund der geringeren Öffnungsquerschnitte und der damit verbundenen Schwierigkeiten der Visualisierung völlig auf die Nebelversuche verzichtet.

3.2 Raumluftgeschwindigkeit und -temperatur

1. Messkampagne am 15.01.2008

Bei Gegenüberstellung der Mittelwerte der Luftgeschwindigkeit v erkennt man, dass in dieser Versuchsanordnung im Raum mit den Schiebeelementen kaum höhere Geschwindigkeiten erreicht werden als im Raum mit herkömmlicher Fensterkipplüftung. Lediglich am untersten Messpunkt von Stativ 2 (2 m Abstand zur Außenwand) wird hier ein höherer - allerdings der höchste - Wert festgestellt. In beiden Räumen treten die höchsten mittleren Geschwindigkeiten in Bodennähe, die niedrigsten in 1,7 m Höhe auf, siehe folgende Gegenüberstellung (Nomenklatur: v St.1, 1,7 = Luftgeschwindigkeit v am Stativ 1 in 1,7 m Höhe).

G 0.02 (Kippfenster), mittlere Geschwindigkeiten in m/s:

Fühler:	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
Mittelwert	0,0816	0,0883	0,1514	0,0916	0,1070	0,2490

G 0.03 (Schiebeelemente), mittlere Geschwindigkeiten in m/s:

Fühler:	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
Mittelwert	0,0479	0,0661	0,1513	0,0398	0,0552	0,3850

Ein etwas anderes Bild ergibt sich, wenn man die maximalen Luftgeschwindigkeiten betrachtet, die während der Messung in diesen Räumen erreicht wurden. Um die Einflüsse der Luftdurchmischung

TUM**Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
Januar 2008**

HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

zu Beginn der Messung und der Türöffnung am Ende des Messzeitraumes auszuschließen, wurde für beide Räume nur der Zeitraum von 17:20 Uhr bis 19:10 Uhr für die Mittel- und Maximalwertbildung herangezogen.

G 0.02 (Kippfenster), 17:20 Uhr bis 19:10 Uhr, Geschwindigkeiten in m/s:

Fühler:	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
Mittel	0,083	0,090	0,159	0,094	0,108	0,266
Max	0,159	0,184	0,297	0,240	0,327	0,491

G 0.03 (Schiebeelemente), Geschwindigkeiten in m/s:

Fühler:	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
Mittel	0,047	0,065	0,153	0,037	0,051	0,394
Max	0,146	0,211	0,315	0,175	0,361	0,653

Außer am fensternahen Stativ 2 in 10 cm Höhe liegen die höheren Werte der mittleren Geschwindigkeit in Raum G.0.02, also dem Raum mit den Kippflügelfenstern. Teilweise sind diese Mittelwerte hier sogar mehr als doppelt so hoch als im Raum mit der Doppelspaltlüftung. Auch liegen die Maximalwerte der Luftgeschwindigkeiten im Raum G 0.03 keineswegs derart deutlich über denen im Raum G 0.02, dass hieraus noch nicht auf eine bessere Lüftungseffektivität geschlossen werden könnte. An den beiden Messpunkten auf 1,7 m Höhe wurde sogar auch hier der höchste Wert im Raum G 0.02 gemessen. Dies bedeutet aber auch, dass die Lüftung mit den Schiebeelementen zumindest unter den hier vorliegenden Randbedingungen hinsichtlich der Luftgeschwindigkeiten keinesfalls weniger behaglich ist als eine Lüftung mit Kippfenstern.

Aus den einzelnen Luftgeschwindigkeitswerten wurden Turbulenzgrade berechnet, um auf die Geschwindigkeitsschwankungen der Luft schließen zu können. Abweichend von DIN 1946 T. 2 wurden zur Turbulenzgradberechnung nicht die sekundlichen Geschwindigkeitswerte herangezogen sondern die im 5-Sekunden-Abstand gemessenen.

Turbulenzgrade:

Messstelle	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
G 0.02	27,12	25,65	24,32	20,61	22,03	26,49
G 0.03	26,81	30,08	30,60	31,01	35,46	20,15

Trotz der höheren mittleren Geschwindigkeiten sind an fast allen untersuchten Stellen die Turbulenzgrade im Raum mit der Doppelspaltlüftung größer, was eine bessere Durchmischung der Raumluft und damit eine höhere Lüftungseffektivität wahrscheinlich macht.

Die gemessenen Lufttemperaturen machen deutlich, wie sich die beiden Räume über den Messzeitraum hinweg abkühlen, siehe folgende Diagramme:



Temperaturen G 0.02

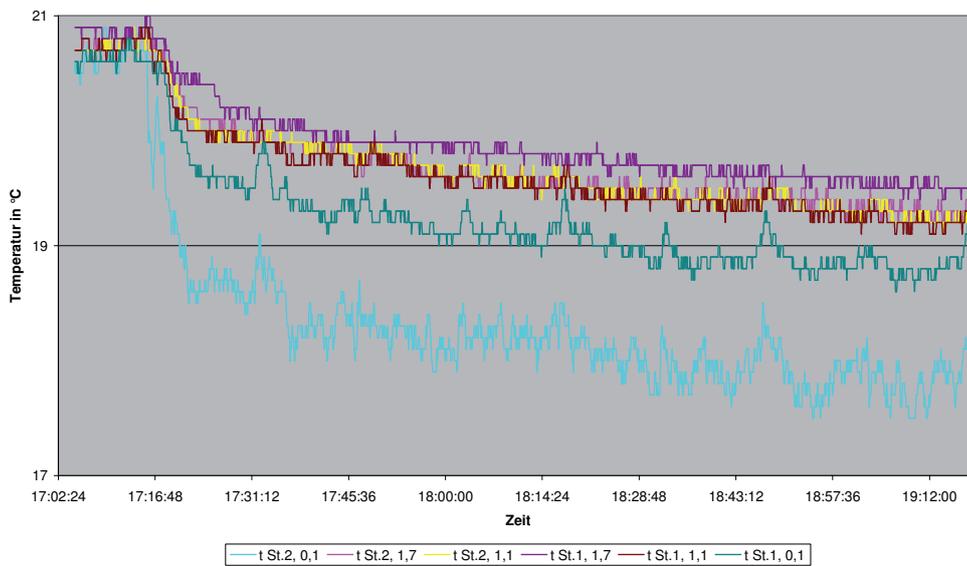


Abbildung 5: zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Raum G 0.02 (Kipfenster)

Temperaturen G 0.03

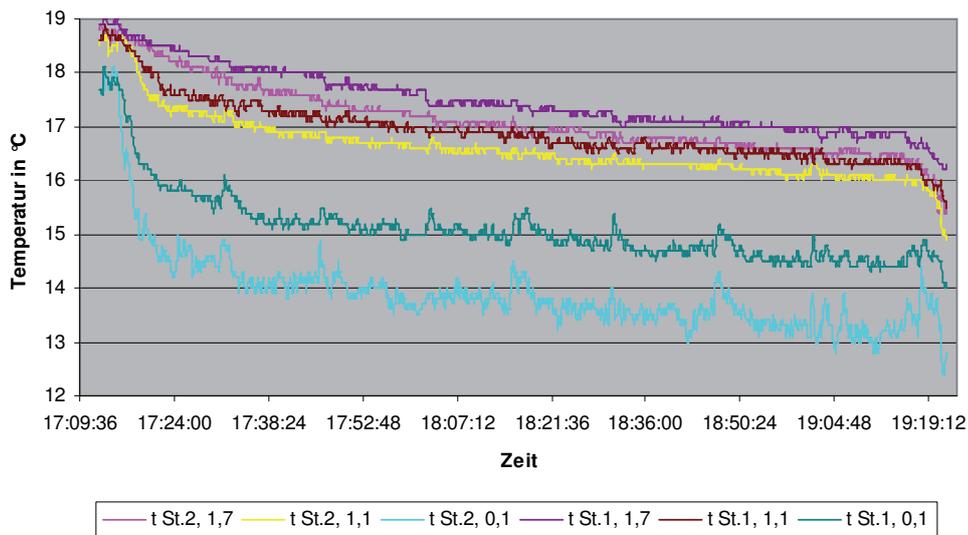


Abbildung 6: zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Raum G 0.03 (Schiebelemente)

TUM**Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente**

Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Zu Beginn der Messung herrscht in Raum G 0.02 (Kippfenster) eine sehr gleichmäßige Raumlufttemperatur von etwa 21 °C (zwischen 20,8 und 21,0 °C). Diese verringert sich während des betrachteten Zeitraumes auf einen Mittelwert von 18,8 °C. Abhängig vom Ort des jeweiligen Fühlers treten Minimalwerte zwischen 17,5 und 19,4 °C auf. Die stärkste Abkühlung der Raumluft tritt am fensternahen Stativ 2 in Bodennähe auf, hier war der Maximalwert 20,9 °C, der Minimalwert 17,5 °C, die gesamte Luftabkühlung an diesem Punkt also 3,4 K. An den anderen Fühlern wurden moderate Abkühlungen im Bereich von 2 K ermittelt.

Im Raum G 0.03 (Schiebeelemente) herrschen zu Beginn der Messung schon niedrigere Temperaturen, da hier aufgrund der Nebelversuche erst später mit der Aufheizung begonnen werden konnte. Auch ist die Temperaturverteilung nicht ganz so gleichmäßig wie im anderen Raum (mittlere Temperatur 18,6 °C, mit Werten zwischen 18,1 °C und 19,0 °C). Insgesamt kühlt sich der Raum an sämtlichen Messpunkten stärker ab, am stärksten aber auch hier an den bodennahen Messpunkten (um 5,7 K an Stativ 2 und um 4,1 K an Stativ 1), die übrigen Abkühlungen liegen im Bereich von 2,8 bis 3,8 K. Durch diese Art der Lüftung kann also bei gleichen Öffnungsquerschnitten eine schnellere und größere Abkühlung der Raumluft erfolgen als durch herkömmliche Fensterkipplüftung.

2. Messkampagne am 30.01.2008

Um Geschwindigkeitsspitzen auszuschließen, die durch das Vermischen der Raumluft bzw. die Türöffnung hervorgerufen wurden, wurden bei der Auswertung dieser Messkampagne die Messwerte der ersten und letzten 10 Minuten entfernt.

Die mittleren Luftgeschwindigkeiten liegen, wie zu erwarten war, unterhalb der bei der ersten Messkampagne ermittelten Werte. Der höchste Wert wird zwar wieder am fensternahen Stativ in Bodennähe festgestellt, allerdings bewegt sich die Luft hier im Mittel nur noch etwa halb so schnell wie bei der ersten Messkampagne. In 5 Metern Entfernung vom Fenster ist die mittlere Luftgeschwindigkeit bereits wesentlich geringerer als bei der größeren Spaltöffnung.

Die maximalen Geschwindigkeiten liegen einheitlich unter den Messwerten von Messkampagne 1. Je dichter am Boden und je dichter am Fenster, umso höher sind die maximal auftretenden Luftgeschwindigkeiten.

Die ermittelten Turbulenzgrade sind teilweise deutlich höher als bei der ersten Messkampagne und lassen trotz des offensichtlich geringeren Gesamtvolumenstroms auf eine gute Durchmischung der Luft schließen.

G 0.03, mittlere und maximale Luftgeschwindigkeiten in m/s, Turbulenzgrade T in %

Fühler:	v St.1, 1,7	v St.1, 1,1	v St.1, 0,1	v St.2, 1,7	v St.2, 1,1	v St.2, 0,1
Mittel	0,037	0,028	0,039	0,089	0,037	0,200
Max	0,090	0,111	0,208	0,144	0,250	0,421
T	41,77	53,92	34,45	24,88	81,32	17,89



Die gemessenen Temperaturen im Raum steigen während des Messzeitraumes leicht an. Hier macht sich die Beheizung des Raumes bemerkbar, der es offenbar gelingt, die eindringende Kaltluft aufzuheizen. Die höchsten Temperaturwerte werden erwartungsgemäß an den oberen Messpunkten gemessen, die niedrigsten am Boden. Der Einfluss der Fensternähe ist kaum bemerkbar.

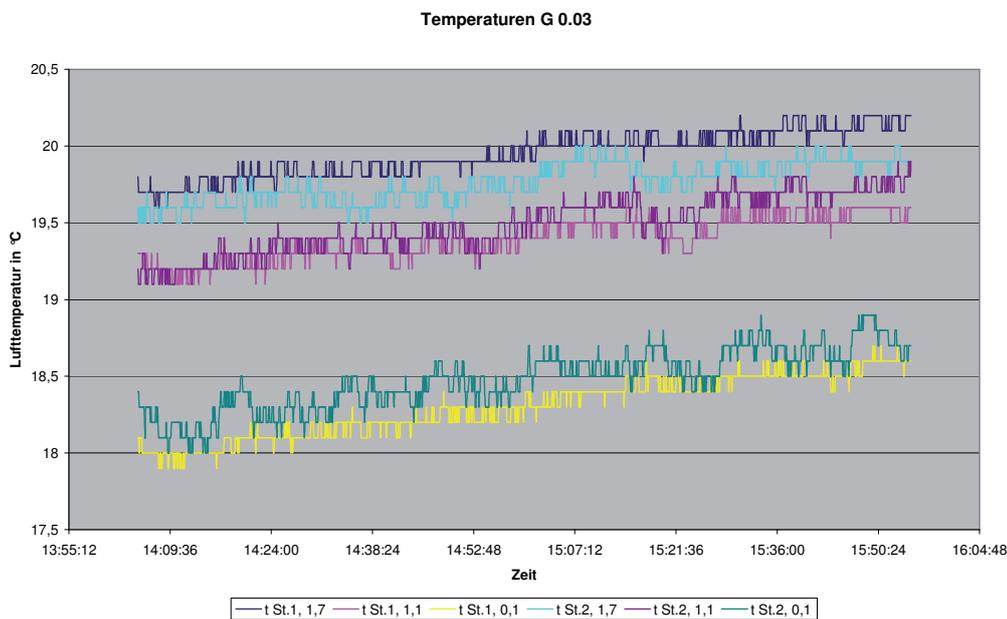


Abbildung 7: zeitlicher Verlauf der Temperaturen im Raum G 0.03

3.3 Tracergasmessung

Im folgenden Diagramm ist die Abnahme der SF_6 -Konzentrationen in den beiden Räumen bei der ersten Messkampagne dargestellt. Über den betrachteten Zeitraum nimmt diese im Fall Vertikalschiebeelement stärker ab.

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

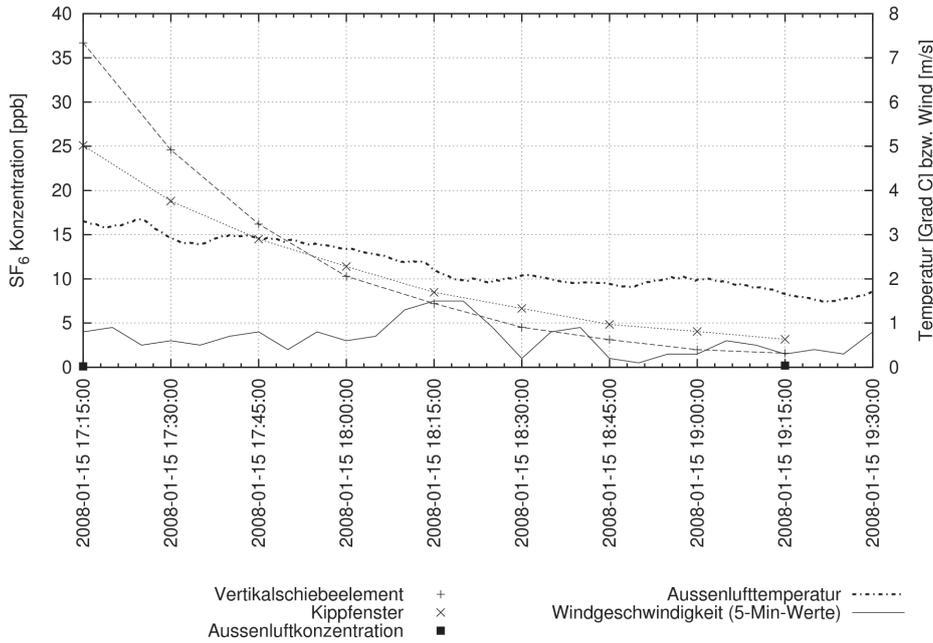
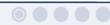


Abbildung 8: Abnahme der SF₆-Konzentrationen während Messkampagne 1

Für die zweite Messkampagne ergibt sich folgendes Bild für die Konzentrationsabnahme:

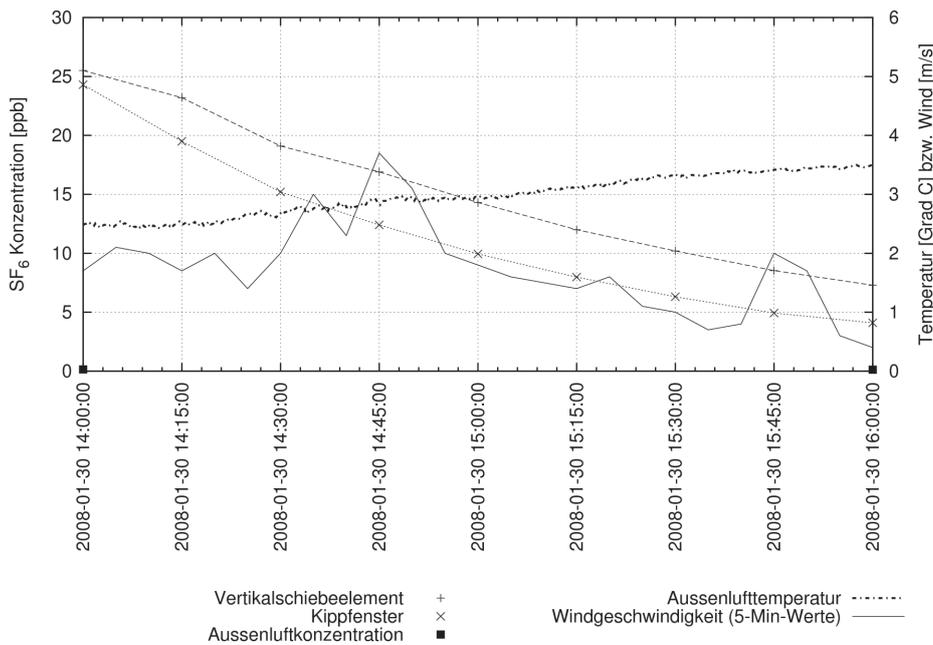


Abbildung 9: Abnahme der SF₆-Konzentrationen während Messkampagne 2

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Für die Ermittlung der Luftwechselzahlen werden die Werte in einem logarithmischen Diagramm dargestellt und Trendlinien eingefügt. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen dies für beide Messkampagnen:

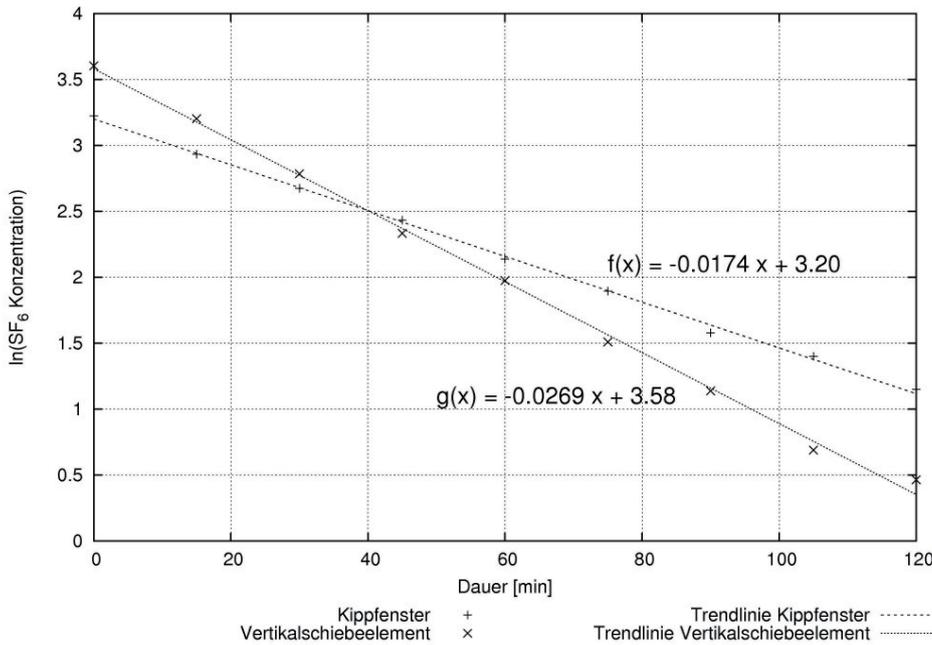


Abbildung 10: Abnahme der SF₆-Konzentrationen während Messkampagne 1

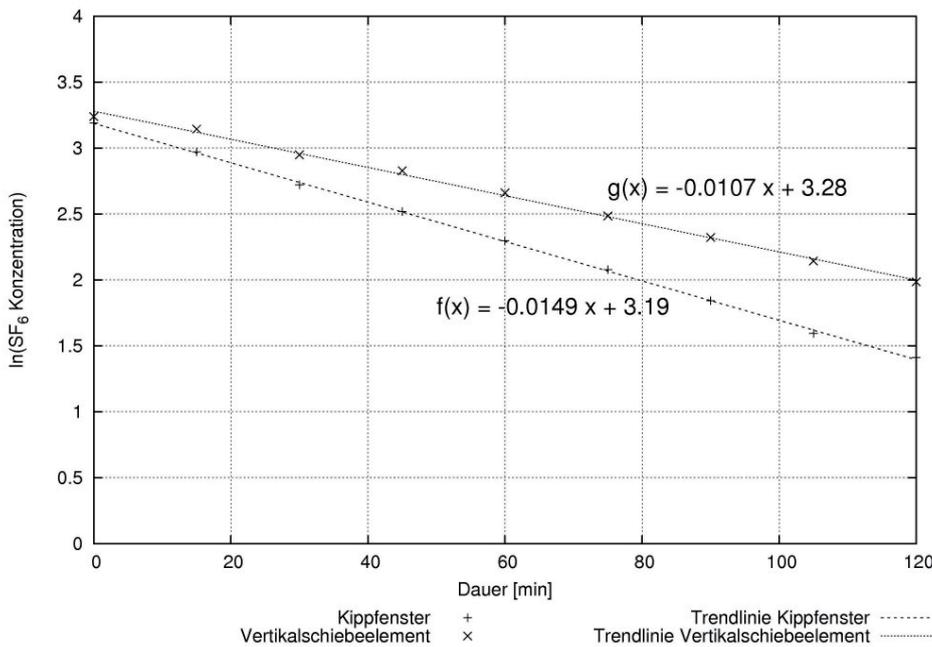


Abbildung 11: Abnahme der SF₆-Konzentrationen während Messkampagne 2

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Deutlich wird hier die langsamere Abnahme der Konzentration bei den Vertikalschiebeelementen in der zweiten Messkampagne, die in diesem Fall aber eine geringere freie Querschnittsfläche besaßen als die Kippflügel. Diese wurden mit derselben (maximalen) Kippstellung geöffnet wie im ersten Versuch.

Bei den Temperaturdifferenzen $\Delta\vartheta$ zwischen innen und außen und den herrschenden mittleren Windgeschwindigkeiten u während der Versuche:

	Messkampagne 1	Messkampagne 2
Raum G 0.02 (Kippfenster)	$\Delta\vartheta = 16,5 \text{ K}$	$\Delta\vartheta = 16,5 \text{ K}$
Raum G 0.03 (Schiebeelemente)	$\Delta\vartheta = 13,1 \text{ K}$	$\Delta\vartheta = 15,5 \text{ K}$
Windgeschwindigkeiten:	$u = 0,65 \text{ m/s}$	$u = 1,73 \text{ m/s}$

ergab sich für die Luftwechselzahlen folgendes Bild:

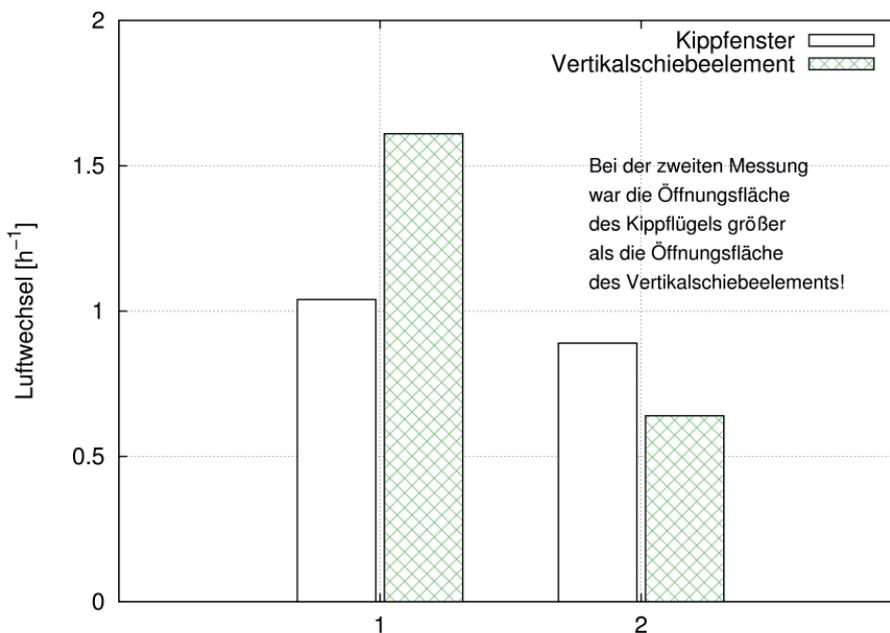


Abbildung 12: Gegenüberstellung der Gesamt-Luftwechselzahlen in den Versuchsräumen

Im Fall gleicher Öffnungsquerschnittsflächen (Messkampagne 1) wurde mit den Vertikalschiebeelementen (VSE) ein Luftwechsel von $1,61 \text{ h}^{-1}$ erreicht, mit den Kippflügelfenstern nur einer von $1,04 \text{ h}^{-1}$.

Im Fall geringerer Spalthöhe der Vertikalschiebeelemente wurde mit $0,64 \text{ h}^{-1}$ ein geringerer stündlicher Luftwechsel erreicht als bei den Kippflügelfenstern mit unveränderter Querschnittsfläche (hier

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



0,89 h⁻¹, was im Rahmen der Wiederholgenauigkeit einer derartigen Messung mit dem Wert von 1,04 h⁻¹ der ersten Messung übereinstimmt).

Diese zunächst ermittelten Luftwechselzahlen enthalten neben dem Luftaustausch durch die geöffneten Lüftungsöffnungen auch einen Grund- oder Infiltrationsluftwechsel, der durch Undichtigkeiten der Versuchsräume nach außen und gegen Nachbarräume im Gebäude bedingt ist. In einem zusätzlichen Versuch am 14.02.2008 (Tracergasmessung) wurden diese Infiltrationsraten bei geschlossenen Lüftungsöffnungen gleichzeitig in beiden Räumen ermittelt (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14). Die Auswertung ergibt für den Raum G 0.02 (Kippfenster) $n_0 = 0,05 \text{ h}^{-1}$ sowie im Raum G 0.03 $n_0 = 0,11 \text{ h}^{-1}$. Diese Werte sind von den Messergebnissen aus Abb. 12 abzuziehen, um die ausschließlich durch die Lüftungsöffnungen bedingten Luftwechselraten zu bestimmen. Diese resultierenden Luftwechselraten sind in Abbildung 15 dargestellt.

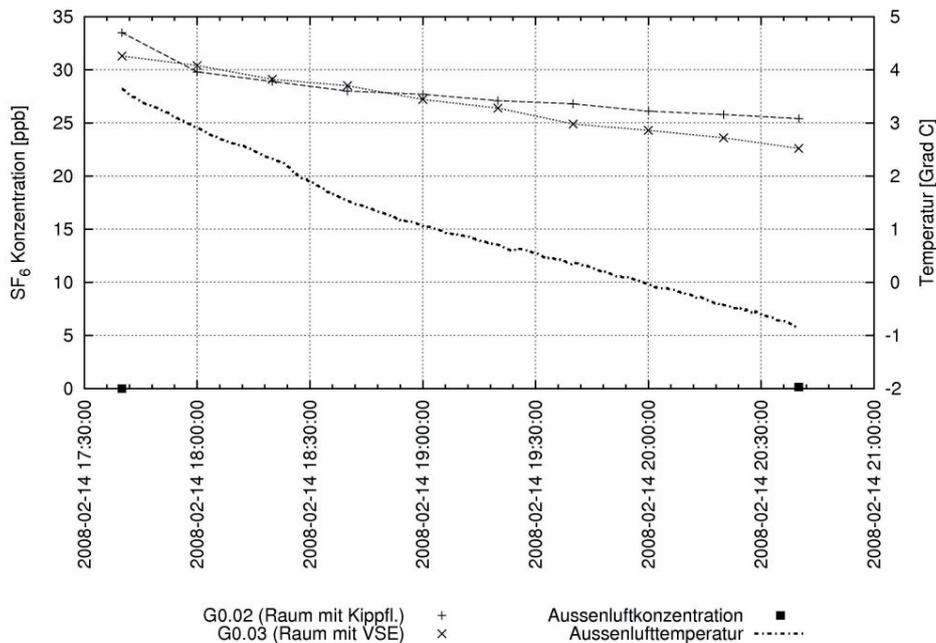


Abbildung 13: Konzentrationsabfall in beiden Räumen während der Infiltrationsmessung

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

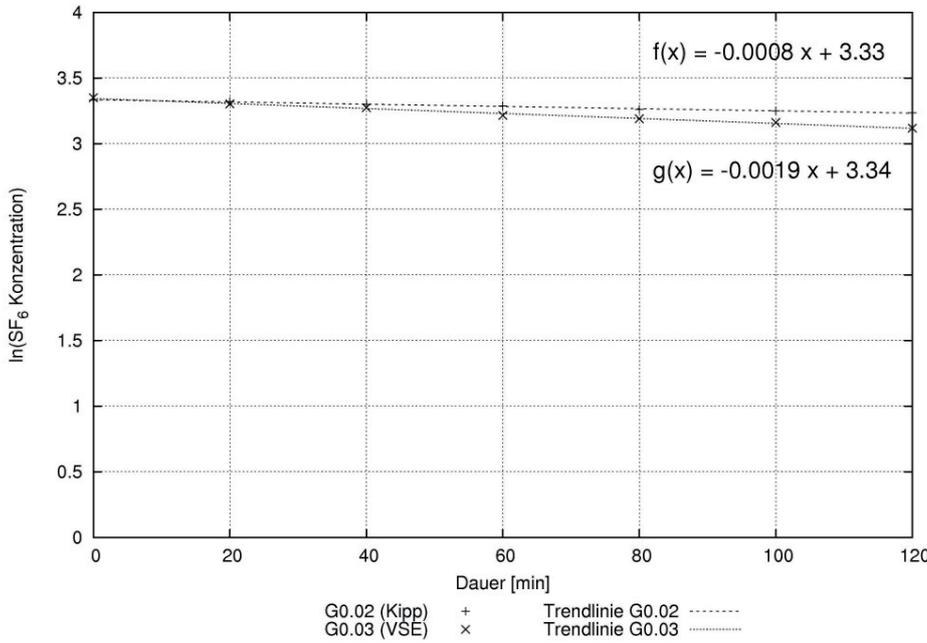


Abbildung 14: Logarithmische Darstellung zur Bestimmung der Infiltrationsluftwechselraten

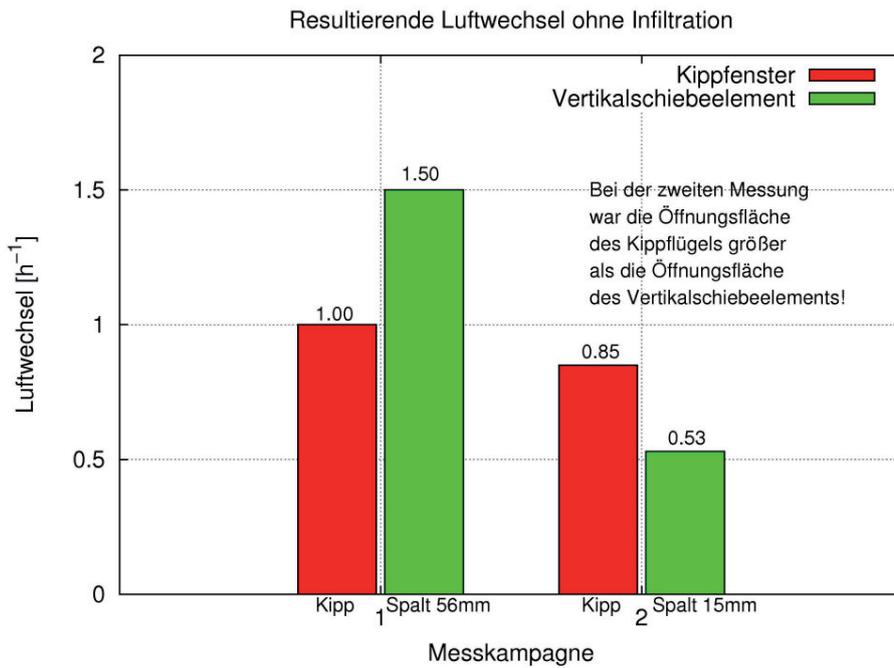


Abbildung 15: Resultierende Luftwechsel durch die Lüftungsöffnungen (ohne Infiltration)

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Die so korrigierten Luftwechselraten der Vertikalschiebelemente stehen bei den beiden untersuchten Spalthöhen im Verhältnis 1:2,83 ($0,53 \text{ h}^{-1}$ zu $1,5 \text{ h}^{-1}$), während die Spalthöhen selbst und damit die Öffnungsflächen ein Verhältnis von 1:3,73 (15 mm zu 56 mm) aufweisen. Aus dem Flächenverhältnis würde zunächst folgen, dass die Luftwechselrate bei den größeren Spalten um den Faktor 3,73 größer sein müsste als bei der geringen Spalthöhe. Diese scheinbare Diskrepanz lässt sich mit Hilfe der geltenden physikalischen Grundlagen auflösen.

Bei Windstille ist die Geschwindigkeit der in einen Raum einströmenden Luft - und damit die Luftwechselrate durch paarweise Lüftungsspalte - proportional zur Höhendifferenz zwischen den Spalten sowie zu den Spaltflächen selbst und zur Wurzel aus der Temperaturdifferenz zwischen dem Raum und der Umgebung:

$$n \sim \Delta h \cdot A \cdot \sqrt{\Delta \vartheta}$$

Die Höhendifferenz zwischen der Mitte des oberen und der des unteren Spaltes ist mit 1,724 m (Spalthöhe 56 mm) bzw. 1,765 m (Spalthöhe 15 mm) in beiden Fällen nahezu gleich. Die treibende Temperaturdifferenz weist dagegen einen größeren Unterschied auf: 13,1 K bei Messkampagne 1 (Spalthöhe 56 mm) und 15,5 K bei Messkampagne 2 (Spalthöhe 15 mm). Rechnet man dies alles mit ein, ergibt sich ein rechnerisches Verhältnis der Luftwechselraten der beiden Versuche von 1:3,35 (Messergebnis: 1:2,83). Die verbleibende Abweichung zwischen Theorie und Experiment lässt sich auf die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten während der Messkampagnen zurückführen (s. obige Tabelle). Die an einer Wetterstation auf einem Gebäudedach in Biberach gemessene Windgeschwindigkeit war während der zweiten Messkampagne signifikant höher als bei Messkampagne 1. Ein einfacher Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Luftwechselrate existiert unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht, so dass auch keine einfache Umrechnung dafür angegeben werden kann.

Die Ergebnisse der Messkampagne 1 können in guter Näherung als für Windstille gültig betrachtet werden und lassen sich mit Hilfe der oben angegebenen Proportionalität auf andere Verhältnisse umrechnen. Die Umrechnung auf andere Raumvolumina erfolgt mittels Dreisatz: Luftwechselrate und Raumvolumen sind einander umgekehrt proportional, dieselben Lüftungsöffnungen würden in einem Raum halben Volumens zu einer doppelten Luftwechselrate führen und umgekehrt, solange vergleichbare Durchmischungsverhältnisse vorliegen.

TUM

Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



4 Fazit

Anhand der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass die Lüftungseffektivität des zu untersuchenden Vertikalschiebeelementes unter den gegebenen Randbedingungen ca. 50 % größer ist als die eines entsprechenden Kippfensters bei gleicher geöffneter Fläche. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass beim Vertikalschiebeelement die Öffnungsfläche auf zwei Spalte verteilt ist, die in der Höhe weitest möglich auseinander liegen. Dadurch ergibt sich bei gegebenen Einbaumaßen des Elementes nahezu die maximal mögliche treibende Höhendifferenz.

Obwohl beim Vertikalschiebeelement größere Luftmengen und damit größere Strömungsgeschwindigkeiten auftreten als bei einem Kippfenster gleicher Öffnungsgröße, ist die Lüftung mit den Schiebelementen zumindest unter den hier vorliegenden Randbedingungen hinsichtlich der Luftgeschwindigkeiten keinesfalls weniger behaglich als eine Lüftung mit Kippfenstern.

Die Messergebnisse für unterschiedliche Spalthöhen (15 & 56 mm) lassen sich durch physikalische Betrachtungen ineinander überführen, womit die Ergebnisse auch als physikalisch untermauert gelten können.

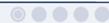
Dieser Bericht umfasst 33 Seiten inkl. Anhang und enthält eine CD als Anlage.

Hochschule Biberach

Prof. Dr.-Ing. Roland Koenigsdorff

Dipl.-Ing. Alexander Sperr

Stefan Hudjetz MSc



5 Anhang

5.1 Filme

Filme 1-4 siehe beigefügte CD.

5.2 Diagramme der Luftgeschwindigkeiten

5.2.1 Messkampagne 1, Raum G 0.02 (Kippfenster)

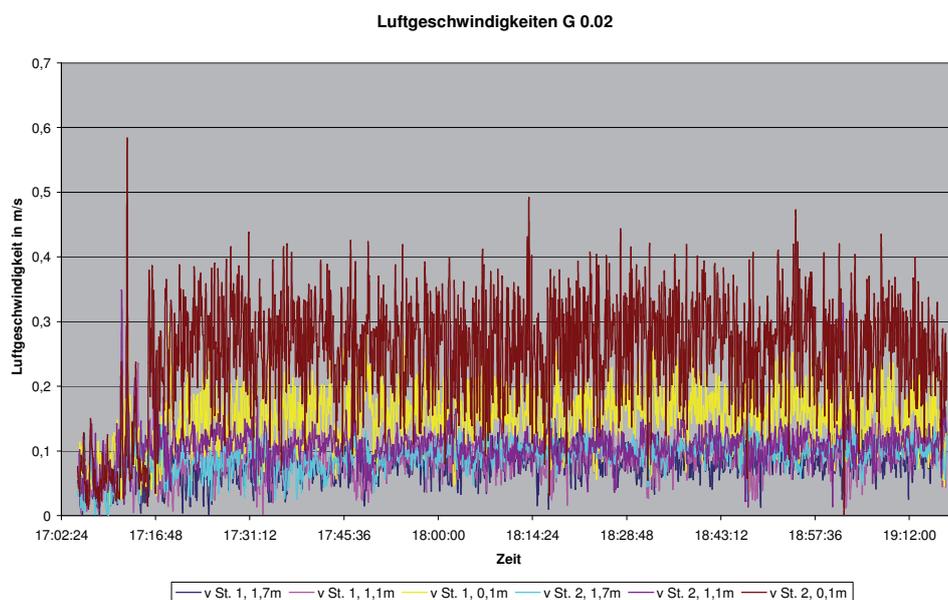


Abbildung 16: sämtliche Luftgeschwindigkeiten im Raum G 0.02

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Luftgeschwindigkeiten G 0.02

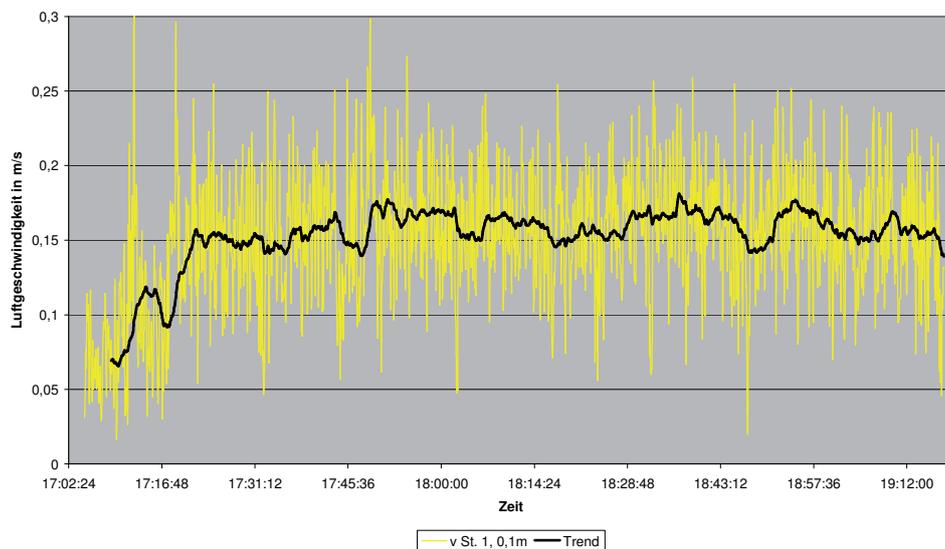


Abbildung 17: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 0,1 m Höhe

Luftgeschwindigkeiten G 0.02

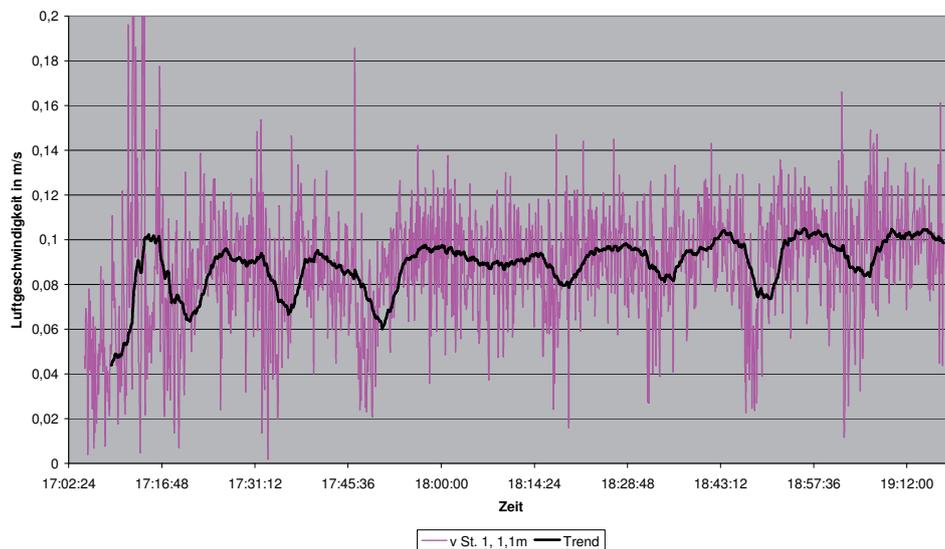


Abbildung 18: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,1 m Höhe



Luftgeschwindigkeiten G 0.02

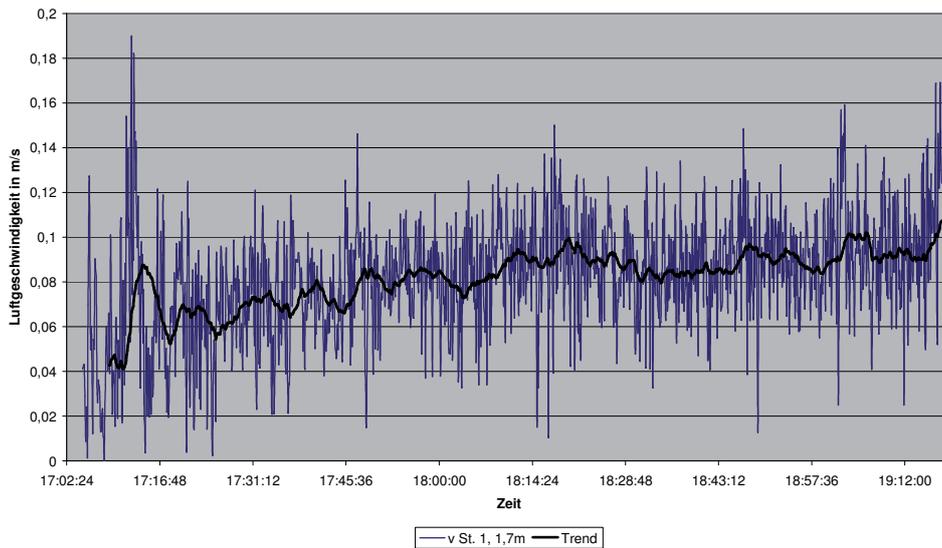


Abbildung 19: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,7 m Höhe

Luftgeschwindigkeiten G 0.02

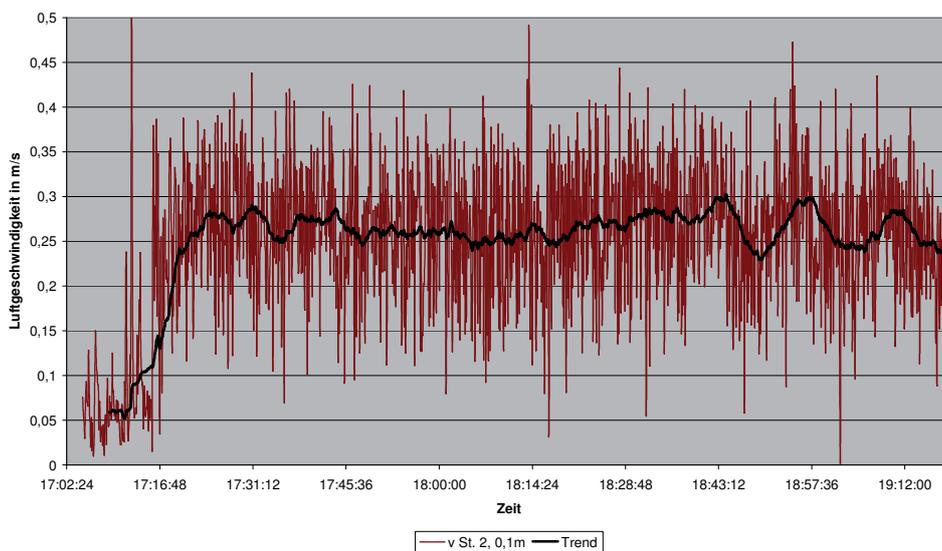


Abbildung 20: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 0,1 m Höhe



Luftgeschwindigkeiten G 0.02

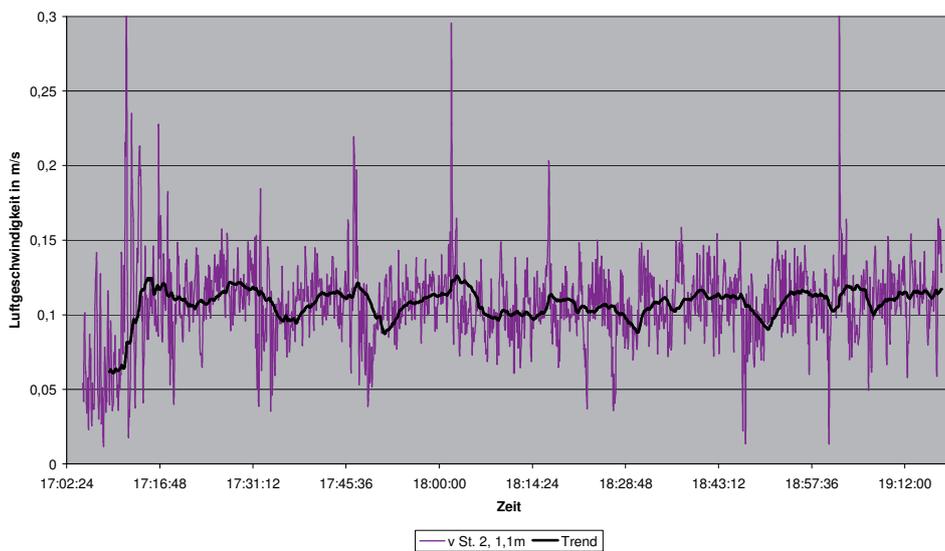


Abbildung 21: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,1 m Höhe

Luftgeschwindigkeiten G 0.02

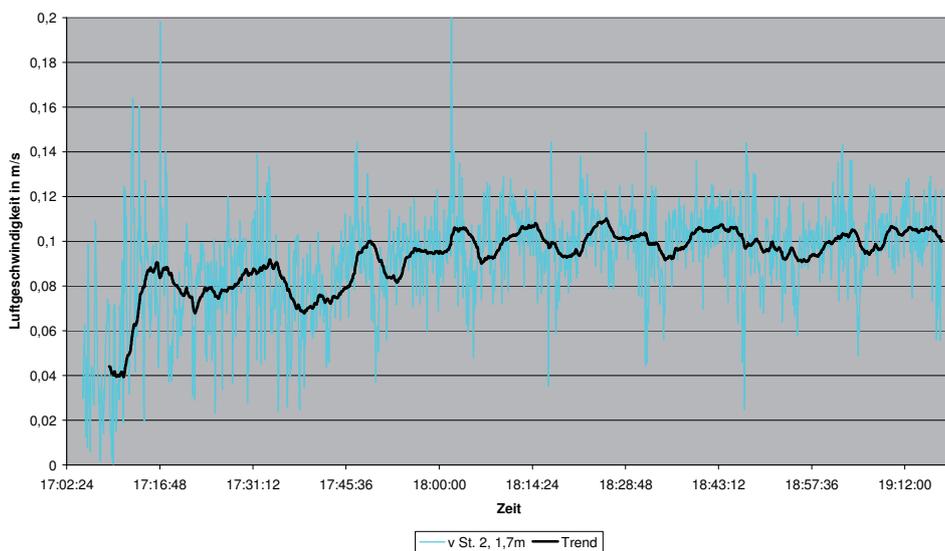


Abbildung 22: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,7 m Höhe



5.2.2 Messkampagne 1, Raum G 0.03 (Schiebeelemente)

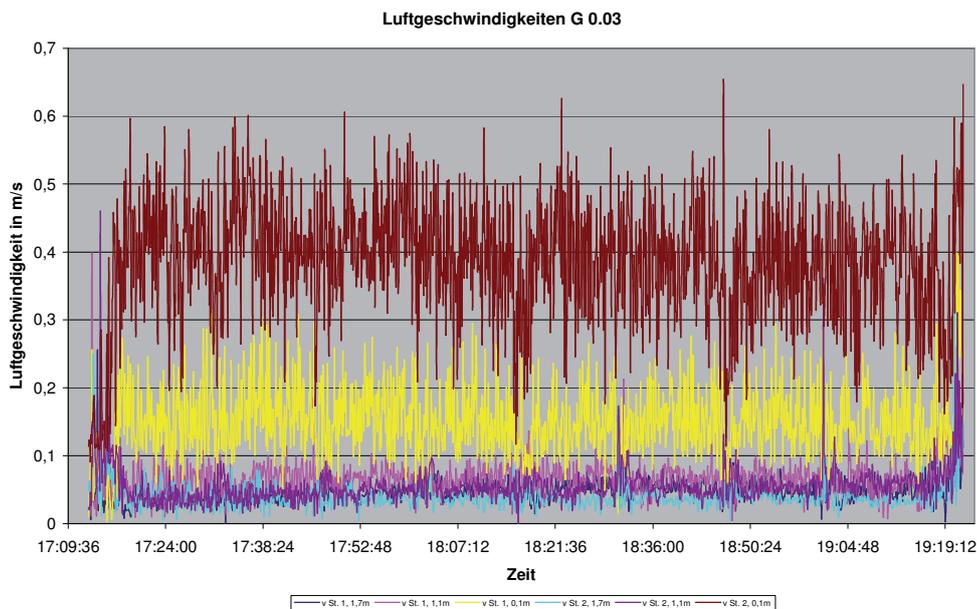


Abbildung 23: sämtliche Luftgeschwindigkeit im Raum G 0.03

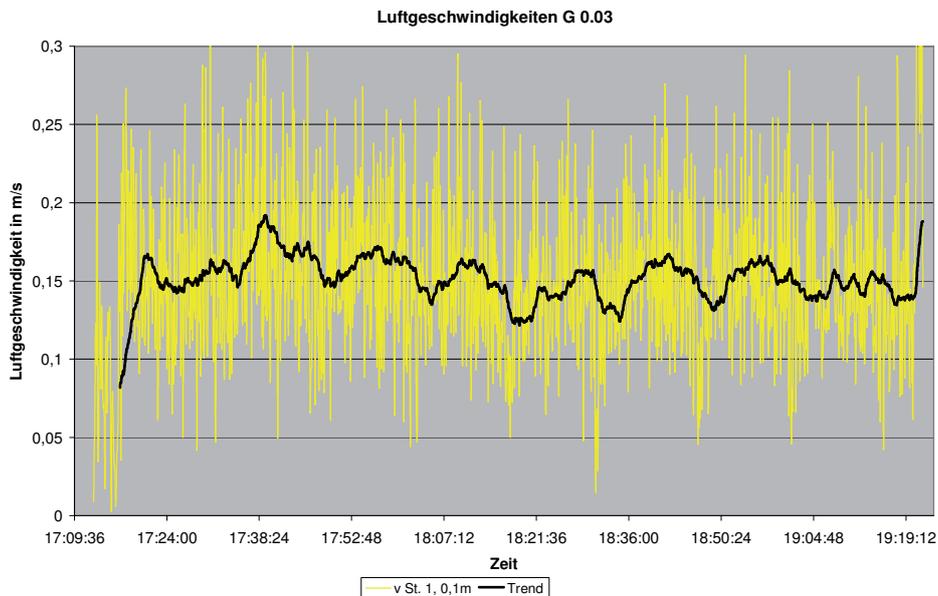


Abbildung 24: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 0,1 m Höhe

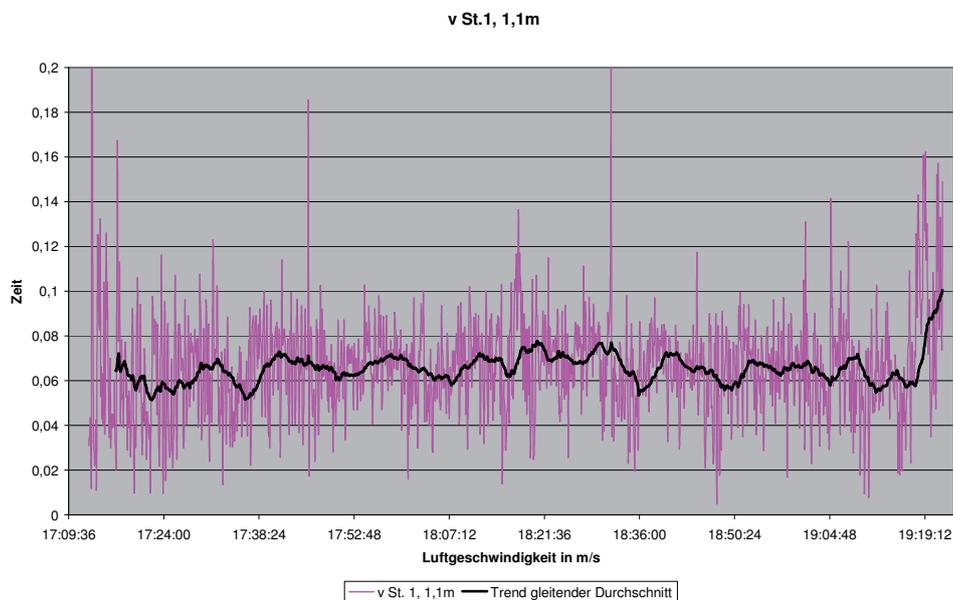


Abbildung 25: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,1 m Höhe

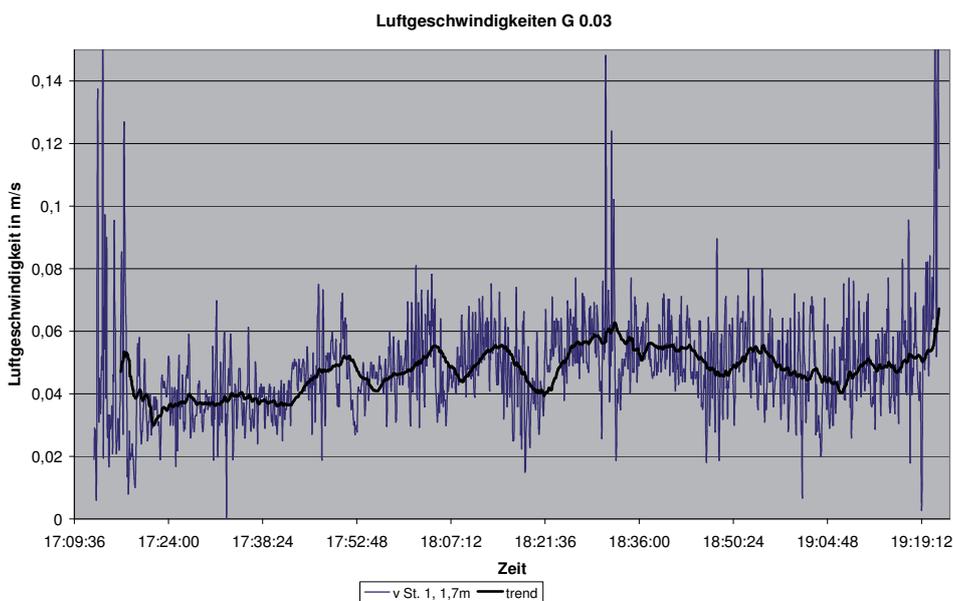


Abbildung 26: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,7 m Höhe

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

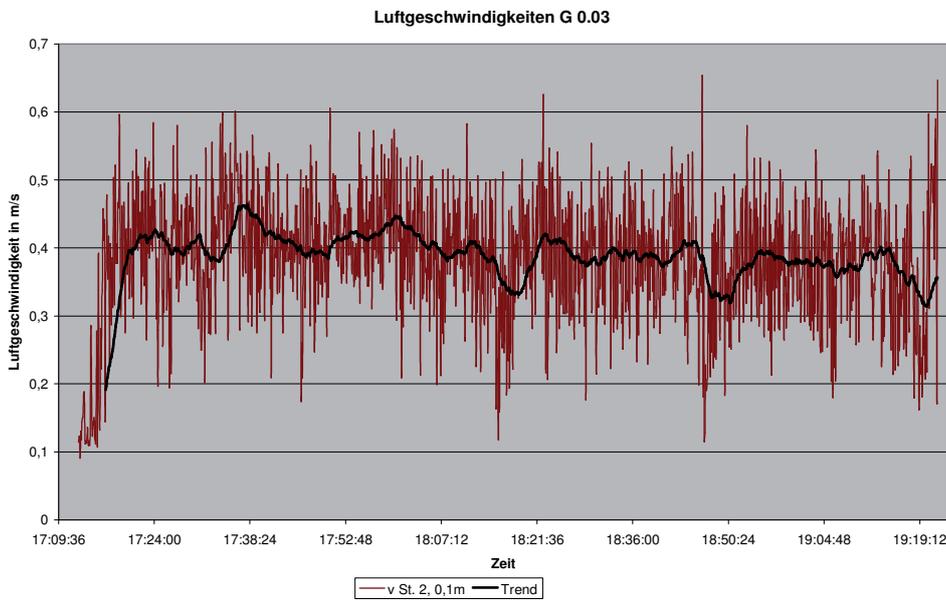


Abbildung 27: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 0,1 m Höhe

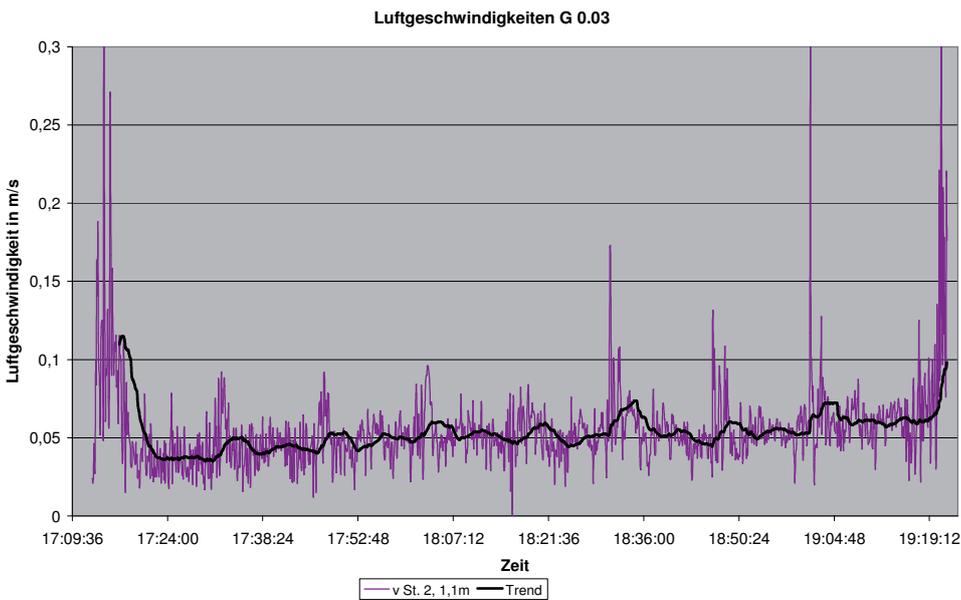


Abbildung 28: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,1 m Höhe

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

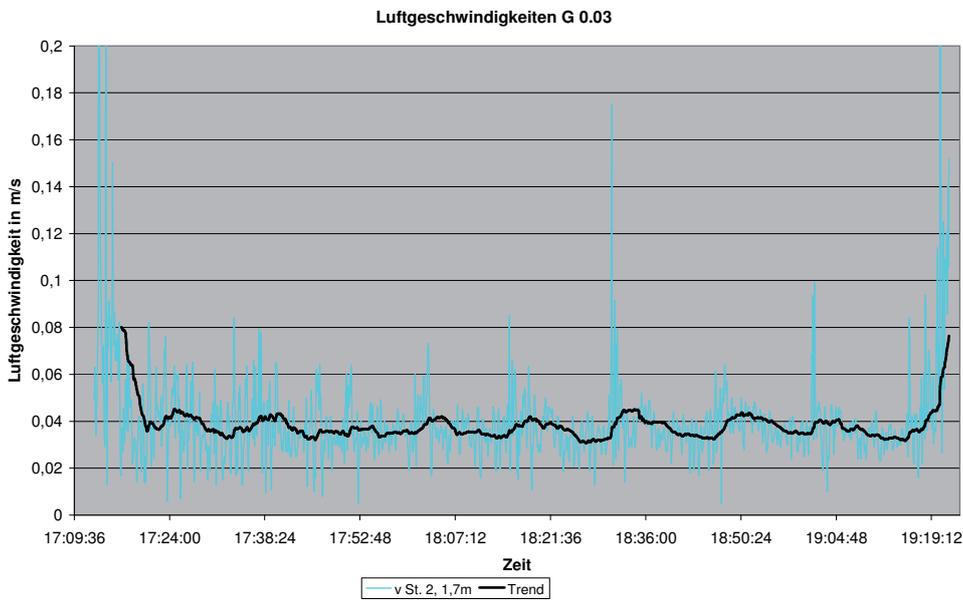


Abbildung 29: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,7 m Höhe

5.2.3 Messkampagne 2, Raum G 0.03 (Schiebeelemente)

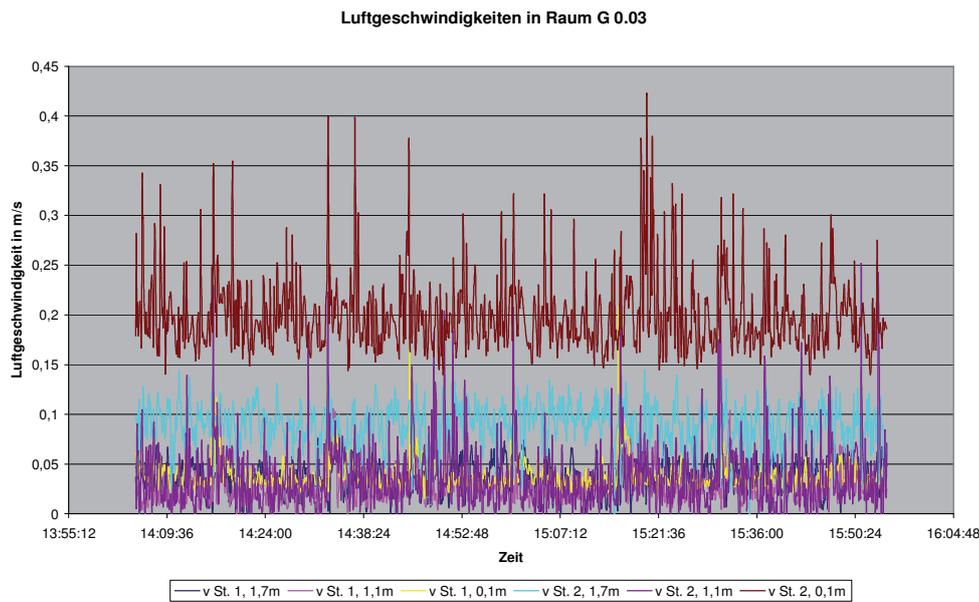


Abbildung 30: sämtliche Luftgeschwindigkeit im Raum G 0.03

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

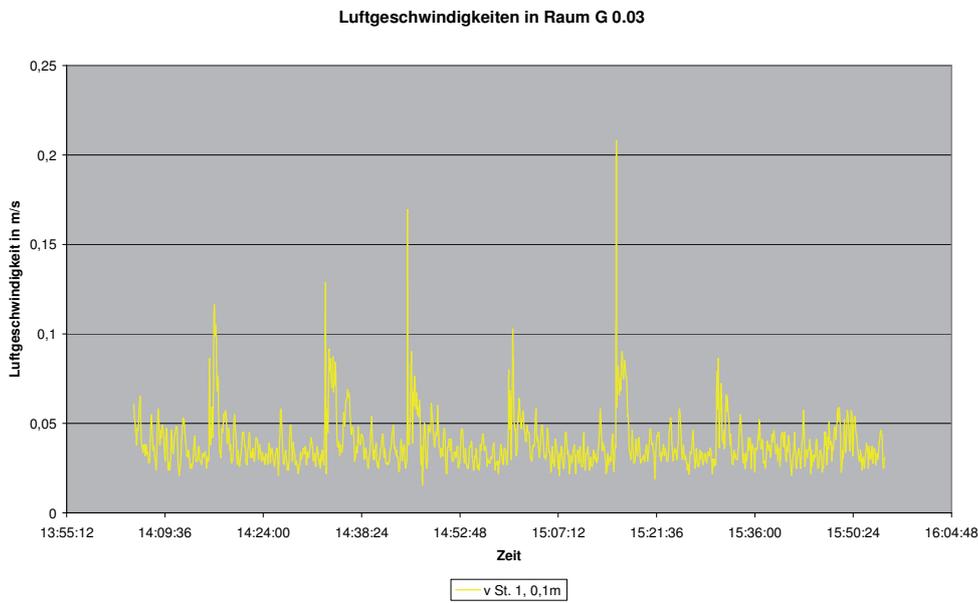


Abbildung 31: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 0,1 m Höhe

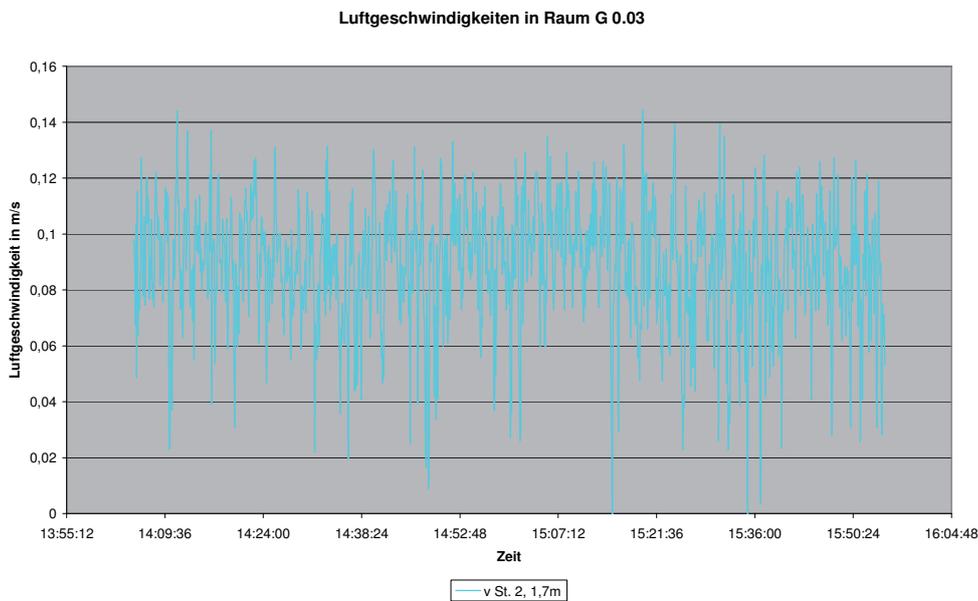


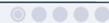
Abbildung 32: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,1 m Höhe

TUM
Lüftungseffektivität
Vertikalschiebeelemente
 Januar 2008



HOCHSCHULE BIBERACH

BIBERACH UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Luftgeschwindigkeiten in Raum G 0.03

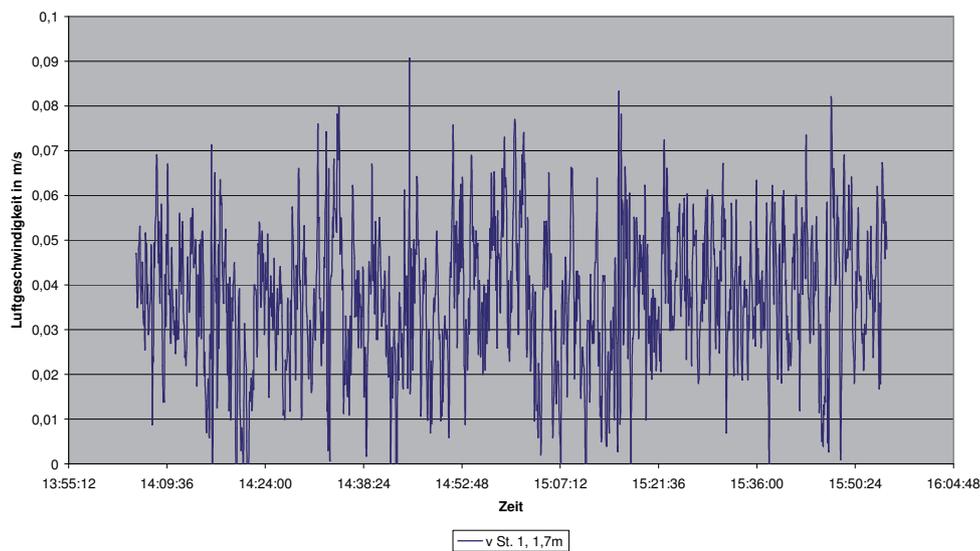


Abbildung 33: Luftgeschwindigkeit Stativ 1, 1,7 m Höhe

Luftgeschwindigkeiten in Raum G 0.03

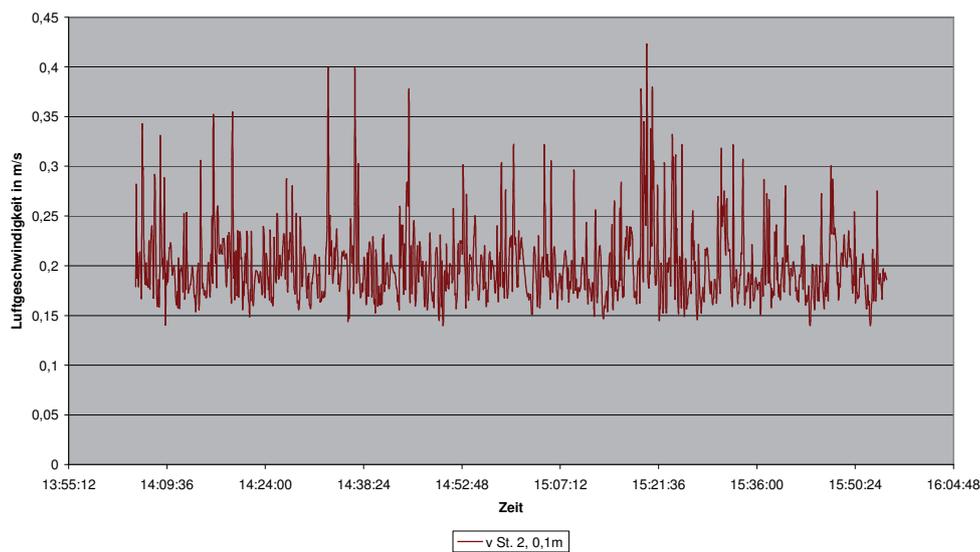


Abbildung 34: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 0,1 m Höhe



Luftgeschwindigkeiten in Raum G 0.03

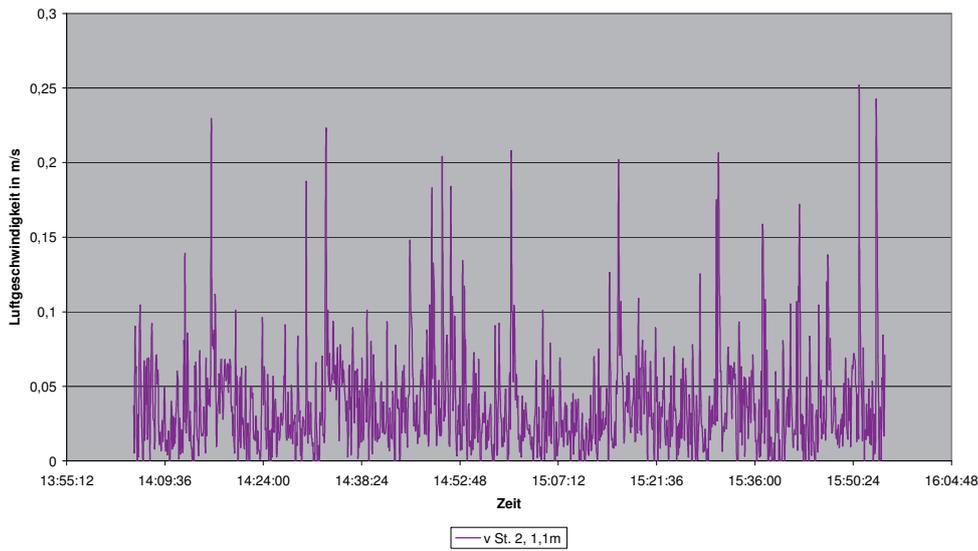


Abbildung 35: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,1 m Höhe

Luftgeschwindigkeiten in Raum G 0.03

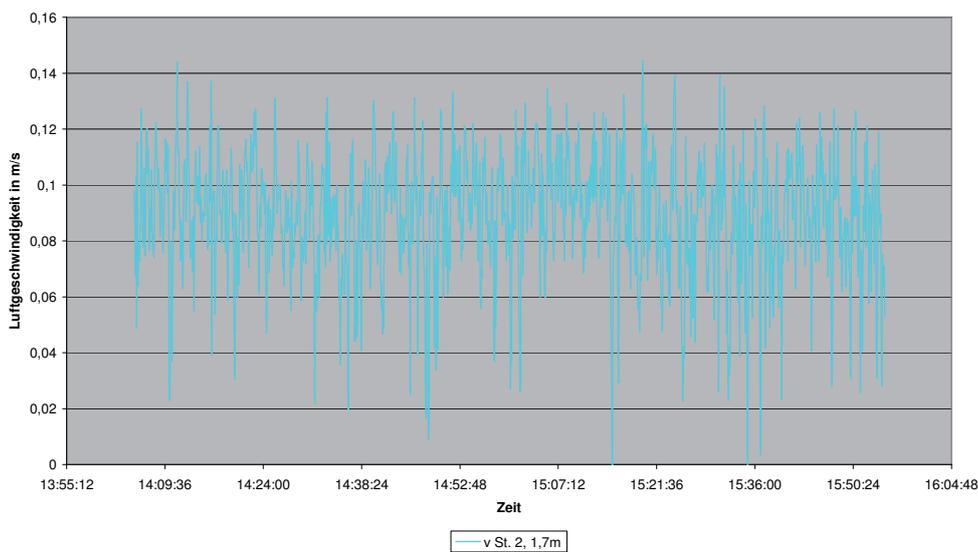


Abbildung 36: Luftgeschwindigkeit Stativ 2, 1,7 m Höhe

**SCHINDLER GMBH & CO.
FENSTER - FASSADEN - INNENAUSBAU KG**

Mauthstraße 15
93426 Roding/Germany
Telefon +49 9461 409-0
Telefax +49 9461 409-100
mail@schindler-roding.de
www.schindler-roding.de



Prüfbericht Nr. 07/07/H06 **(Eigendokumentation)**

Probekörper: Holz-Vertikal-Schiebefenster-Element

Bauvorhaben: Forschungs- und Kooperationsvereinbarung
zwischen Fa. Schindler und TU München

Auftragsnummer: 99680

Auftraggeber: Fa. Schindler und TU München

Ort der Prüfung: Schindler GmbH & Co.KG
Mauthstr. 15
93426 Roding/Germany

Tag der Prüfung: 24.05.2007 bis 12.07.2007

Dieser Versuchsbericht wurde von der Schindler GmbH selbst verfasst und dient der Eigendokumentation.

Der Bericht besteht aus 6 Seiten, zuzüglich der Anlagen D001 und D002

Die mitgelieferten Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Bauteile.

Seite 2 zum Schreiben vom 17.07.07

SCHINDLER GMBH & CO. KG

Aufgabenstellung:

Ermitteln der Gebrauchstauglichkeit für neuentwickelte Beschlags- und Antriebsteile, sowie die Dauerfunktion der neukonstruierten Öffnungs - Verfahrenswege.

Prüfverfahren:

Aufstellung und Anbindung des Prüfelements an eine elektronische Steuerung, die über einen Elektromotor das Öffnen und Schließen der beiden übereinander liegenden Öffnungsflügel betätigt. Eine automatische Umschaltung vom Öffnen zum Schließen wird mit Hilfe einer Zeitschaltung und über elektronische Endabschalter geregelt. Die Aufzählung der Öffnungszyklen ist über eine digitale Steuerung ablesbar.

Technische Beschreibung des Prüfelements:

- Holzart: Fichte massiv, mit überfurnierten Füllungselementen
- Rahmengröße: RAH 1883 mm (h) x RAH 550 mm (b) x 206 mm (d)
- Flügelgröße: FAH 910 mm (h) x FAH 474 mm (b) x 96 mm (d)
- Profilsystem: Sonderprofilsystem mit Führungsschiene aus PE im Blendrahmen zur Führung des oberen Öffnungsflügel. Unterer Öffnungsflügel wird über eine eingefräste Nutbahn in der inneren Aufdopplung geführt.
- Antrieb: Beide Öffnungsflügel sind an einer obenliegenden Metallwelle aufgehängt, die über ein Getriebe an einem Elektromotor angetrieben wird.

Prüfablauf:

Der antreibende Elektromotor wird über eine elektronische Steuerung täglich über mehrere Stunden im Dauerbetrieb eingeschaltet. Somit kann ein Dauerfunktionstest durchgeführt werden. Auf eine komplette Schließung und Verriegelung des Beschlages wurde wegen des damit verbundenen, sehr komplizierten Prüfablaufes verzichtet. Eine Schließung und eine Öffnung wurde nachfolgend als 1 Prüfzyklus bezeichnet.

Prüffolge:

Nr.	Datum	Zyklen	Nr.	Datum	Zyklen
1	24.05.2007	Beginn	5	25.06.2007	6900
2	05.06.2007	3050	6	02.07.2007	8700
3	11.06.2007	3750	7	09.07.2007	10130
4	18.06.2007	5400	8	12.07.2007	11010

Prüfelement war nach 11010 Prüfzyklen noch voll funktionsfähig !

Seite 3 zum Schreiben vom 17.07.07

SCHINDLER GMBH & CO. KG

Prüfaufbau:



Prüfensteraufbau mit beiden Flügeln in geöffneter Stellung



Prüfenster mit unterer und oberer Spaltlüftungsstellung



Endabschaltung oben



Elektromotorischer Antrieb oben

Seite 4 zum Schreiben vom 17.07.07

SCHINDLER GMBH & CO. KG

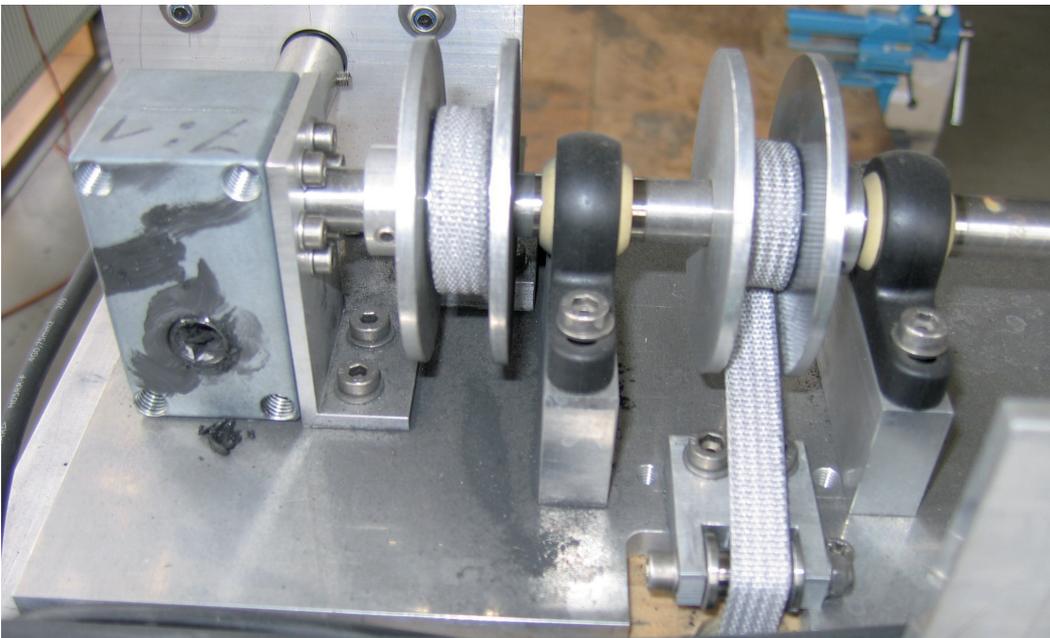


Elektronische Steuerung mit Aufzeichnung der Öffnungszyklen



Prüfaufbau, Ansicht von außen

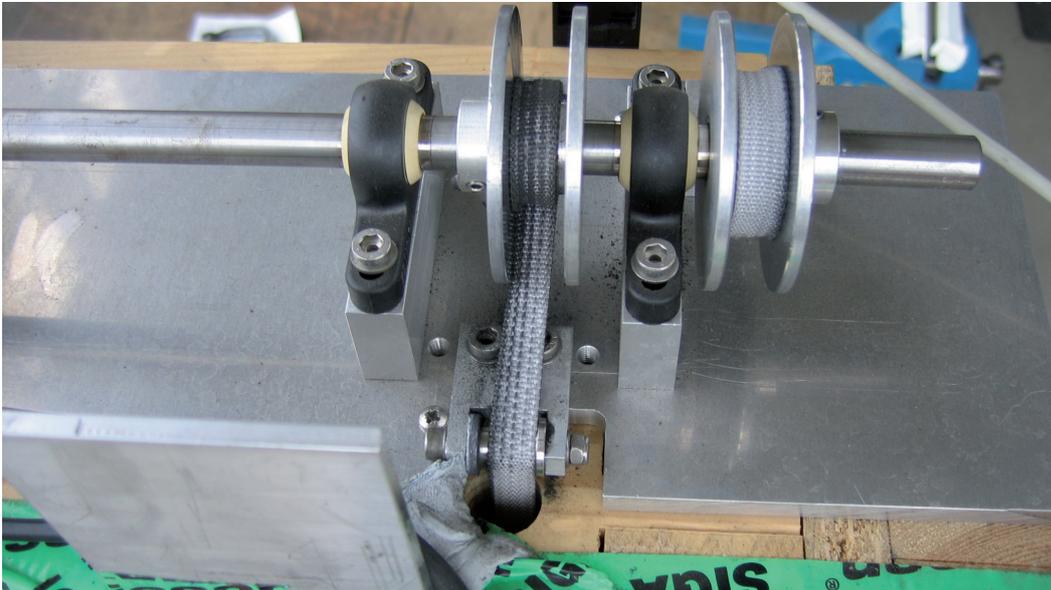
Fotodokumentation nach 11.000 Zyklen:



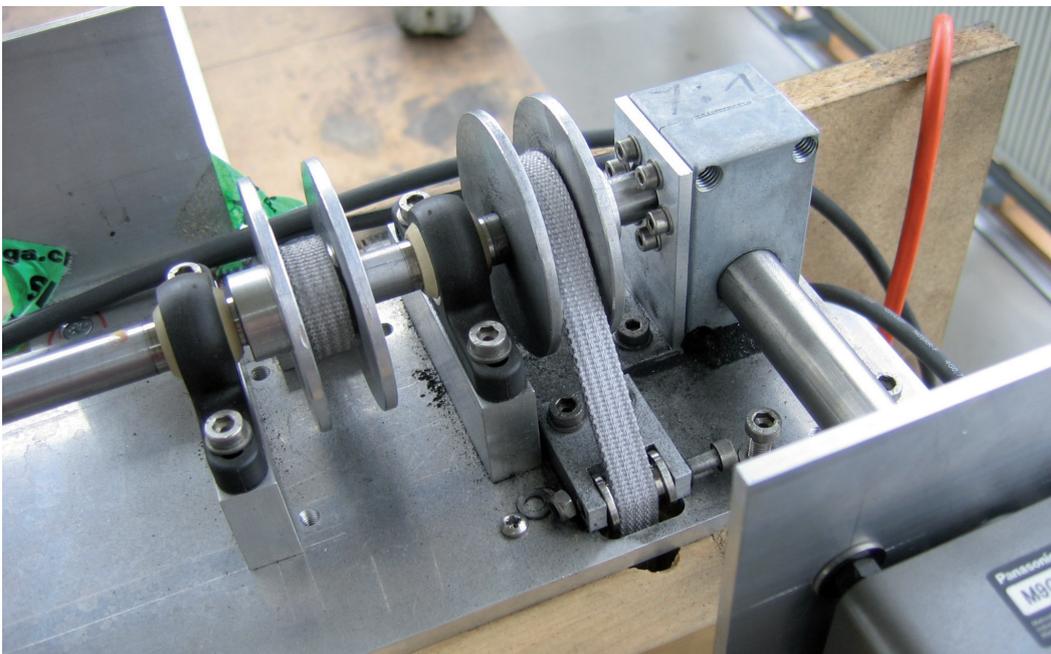
Leichte Abnutzungsspuren (Fett- und sehr kleine Metallspäne) am Getriebe feststellbar.

Seite 5 zum Schreiben vom 17.07.07

SCHINDLER GMBH & CO. KG



Komplette Antriebswelle hat sich um ca. 5 mm nach rechts verschoben, keine optimale Gurtaufwicklung mehr gewährleistet.



Ansicht von Innen: bei der Gurtumlenrolle für den unteren Flügel hat sich die Sicherungsschraube gelöst.

Seite 6 zum Schreiben vom 17.07.07

SCHINDLER GMBH & CO. KG

Beurteilung / Feststellungen:

- Prüfelement noch voll funktionsfähig
- Keine komplette Verriegelung während des kompl. Prüfablauf
- Am selbsthemmenden Getriebemotor konnten Abnutzungserscheinungen durch Fettaustritt und Metallabsonderungen festgestellt werden.
- Antriebswelle hat sich um ca. 5 mm vom Getriebe weg verschoben, dadurch war keine optimale Gurtaufwicklung mehr gegeben.
- An den Gurtumlenkrollen haben sich die Sicherungsmuttern teilweise gelockert und an einer sogar gelöst.
- Keine Einrissspuren an den Gurtbefestigungen feststellbar
- Keine Verformungen an den Lauflagern sowie Einlaufspuren an den Führungsnuten feststellbar.
- Gebrauchsspuren (Verfärbungen durch Metallabrieb) an den Gurten feststellbar

Wiesing, 17.07.2007

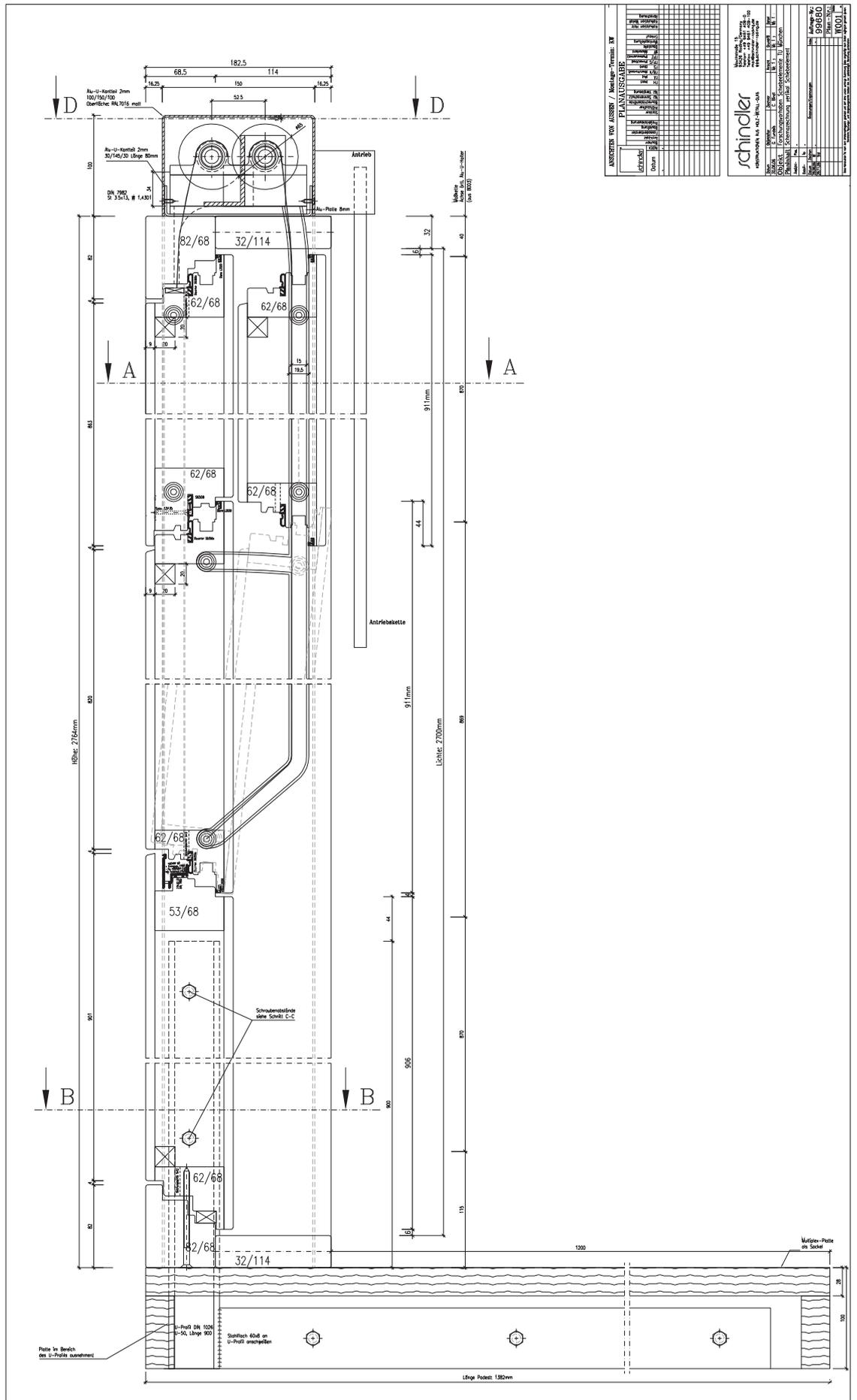
Dieser Prüfbericht wurde erstellt von:



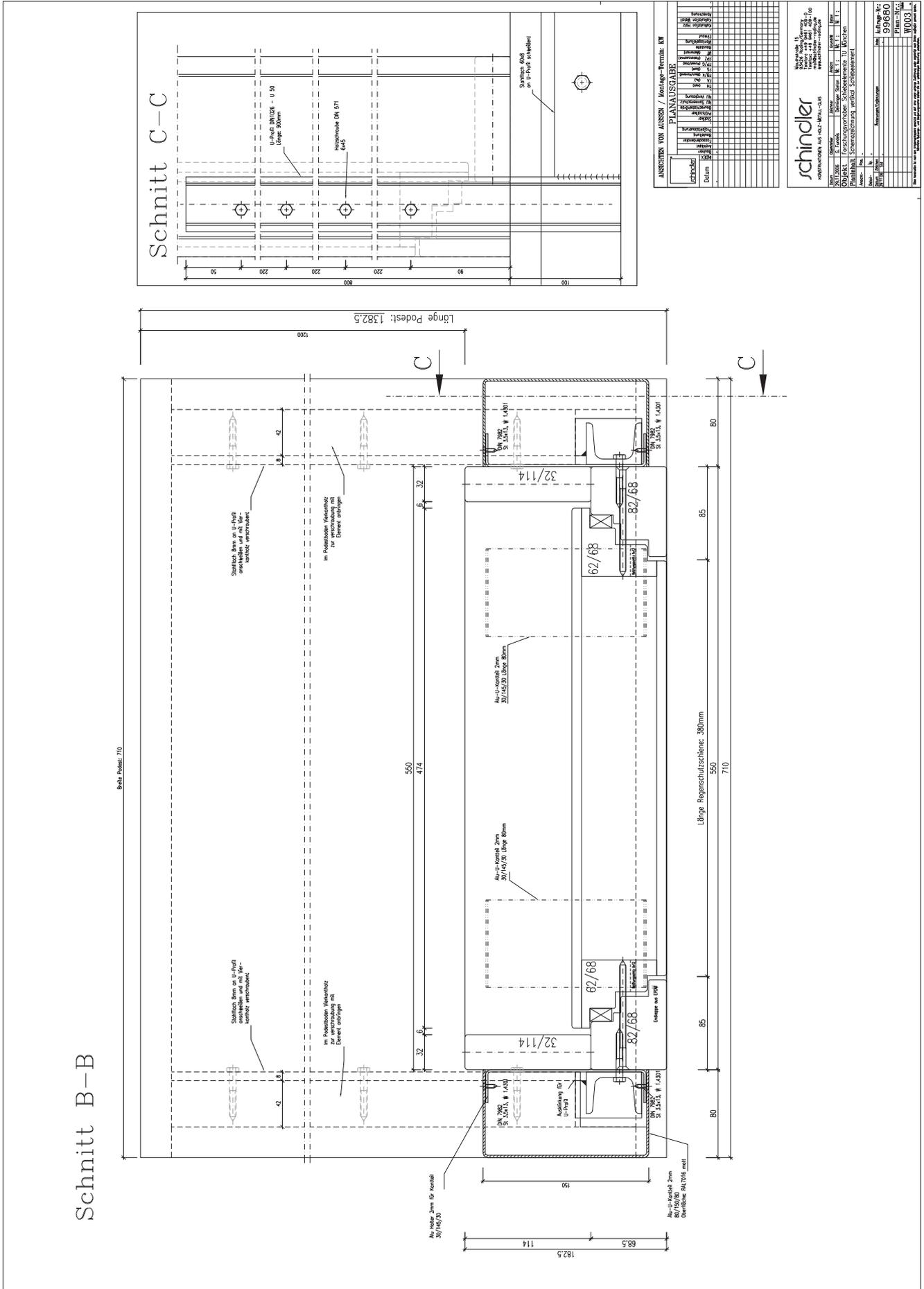
Karl-Heinz Schlecht
SCHINDLER GMBH & CO. KG

Verteiler: Hr. Lankes G.
Fr. Bindl C.

Vertikalschnitt Prototyp Messe Bau 2007



Schnitte B-B und C-C Prototyp Messe Bau 2007



Schnitt B-B

Schnitt C-C

Natürliche Lüftung

Bei der freien oder natürlichen Lüftung entsteht die erforderliche Luftströmung durch den Temperaturunterschied zwischen Raum- und Außenluft oder durch Windeinwirkung. Man unterscheidet:

- Fugenlüftung
- Fensterlüftung
- Schachtlüftung
- Dachaufsatzlüftung

Antriebskräfte für Lüftung

Grundsätzlich unterscheidet man mechanische von natürlicher oder auch so genannter freier Lüftung.

Klammert man mechanische Kräfte als Antriebskräfte für Luftbewegungen aus, so findet man als weitere Antriebskraft Druckunterschiede zwischen Innen- und Außenraum, resultierend aus folgenden, sich natürlich ergebenden Kräften.

- Windkräfte:
durch Wind im Bereich der Fassade induzierte Druckdifferenzen zwischen Innen und Außen, die einen Luftaustausch bewirken.
- thermische Auftriebskräfte:
Kräfte, die durch unterschiedliche Dichten aufgrund von Temperaturunterschieden (Temperaturschichtung) entstehen. Die thermischen Auftriebskräfte werden mit zunehmendem Winddruck von diesem überlagert. Im Bereich der gedachten Ebene N (neutrale Zone) findet keine Luftbewegung statt. Durch Änderung der vertikalen Lage der Öffnung verschiebt sich diese Ebene in der Vertikalen.

Lüftungsintensität

Die Intensität des Luftaustausches in einem Raum wird in der Luftwechselrate mit der Einheit 1/h ausgedrückt. Für Büroräume wird während der Arbeitszeit eine mindestens 1,1-fache Luftwechselrate pro Stunde und Person gefordert. Dieser Wert entspricht einem erforderlichen Außenluftvolumenstrom, von 40-60 m³/h pro Person [7.2]. Zur Berechnung des Volumenstroms wird die Luftwechselrate mit dem Raumvolumen multipliziert. Bei einer Luftwechselrate von beispielsweise 1,1 1/h für ein Einzelbüro mit 45 m³ Raumvolumen ergibt sich also ein notwendiger Außenluftvolumenstrom von 49,5 m³/h. Zur hygienischen Mindestlüftung wird abhängig von der Raumnutzung von einem Luftwechsel pro Stunde zwischen 0,5 – 3 1/h ausgegangen. Sollen dem Raum Wärmelasten durch Lüftung entzogen werden, ist ein 5 bis 25-facher Luftwechsel pro Stunde nötig [7.3].

Lüftungseffektivität

Verhältnis der mittleren Schadstoffkonzentration in der Abluft zur mittleren Schadstoffkonzentration im Aufenthaltsbereich [7.4]. Bezogen auf die mittlere Schadstoffkonzentration im Raum wird die Lüftungseffektivität auch als Lüftungswirksamkeit bezeichnet.

Lüftungswärmebedarf

Den Anteil der Wärmeenergie, der über die Lüftung vom Gebäude an die Außenluft abgegeben wird und der zur Erwärmung der zugeführten Luft während der Heizperiode notwendig ist, bezeichnet man als Lüftungswärmebedarf [7.5].

Lüftungsstrategien und -bedingungen

Unterscheidung in folgende Lüftungsarten:

- Dauerlüftung
- Stoßlüftung

sowie folgende Lüftungsbedingungen:

- einseitige Lüftung
- Querlüftung

Für eine Dauerlüftung sind kleine und gut dosierbare Lüftungsöffnungen erforderlich. Die Luftführung im Raum ist dabei besonders zu beachten, da diese Lüftungsart über einen längeren Zeitabschnitt erfolgt. Bei einseitiger Lüftung sollen zur effizienten Nutzung des thermischen Auftriebs zwei Öffnungen mit möglichst großem vertikalem Abstand zueinander angeordnet sein. Eine gut einstellbare Dosierung verhindert un-

Anmerkungen zur Lüftung

erwünschte Abkühlung und Zegerscheinungen. Um aussagekräftige Ergebnisse für die in dieser Arbeit angestellten Simulationen und Messungen zu erzielen, wurden Windeinflüsse von der Betrachtung ausgeschlossen. Gegenüber der Dauerlüftung erfordert die Stoßlüftung generell Öffnungen mit möglichst großem Lüftungsquerschnitt. Bei einseitiger Lüftung kann aufgrund der neutralen Zone in der Mitte der Öffnung die Fläche zweigeteilt mit vertikalem Abstand zueinander angeordnet sein. Bei der Querlüftung findet der Luftdurchgang nur in eine Richtung statt. Überschlägig gilt, dass Räume im Fall einer Querlüftung dann „natürlich belüftbar“ sind, wenn ihre Raumtiefe maximal 5-mal ihre lichte Höhe (H) beträgt [7.6]. Da die Querlüftung spezielle Anforderungen an Grundrissorganisation und Sicherheit stellt, wird dieser Lüftungsfall in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Bei einer einseitigen Belüftungsmöglichkeit gilt $2,5 H$ als maximale Raumtiefe. Bei einer im unteren und oberen Bereich angeordneten Öffnung erhöht sich die Wirksamkeit auf bis zu $3 H$ [7.7].

Thermische Behaglichkeit

Als thermisch behaglich wird ein Zustand beschrieben, bei dem der Mensch mit seiner thermischen Umgebung zufrieden ist und sich weder eine wärmere noch eine kältere Umgebung wünscht. Neben dem Aktivitätsgrad einer Person, deren Bekleidung, der herrschenden Luftfeuchte-, -temperatur, und -geschwindigkeit ist die Oberflächentemperatur der Umschließungsflächen ein relevanter Kennwert.

Die Bewertung der Behaglichkeit unterliegt immer einer gewissen Unschärfe, da sie der individuell unterschiedlichen Empfindung unterliegt. Für die Zustandswerte der Luft lässt sich daher ein so genannter Behaglichkeitsbereich angeben [7.8]. Mit dem Einsatz des neu entwickelten Vertikalschiebeelements wird gezeigt, wie mit einfachen Mitteln die Behaglichkeit im Vergleich zum Kippflügel verbessert werden kann.

Luftgeschwindigkeit

Für die Behaglichkeit ist neben der Lufttemperatur vor allem die Luftgeschwindigkeit relevant. Als oberster Grenzwert für die Behaglichkeit gilt für die Luftgeschwindigkeit ein Wert von $0,2 \text{ m/s}$. [7.9 und 7.10]. Dieser Wert erhöht sich mit steigender Raumtemperatur z.B. $0,3 \text{ m/s}$ bei 27° C [7.11]. Bezogen auf die Behaglichkeit im Raum ist die Betrachtung der Luftgeschwindigkeiten an folgenden Stellen relevant:

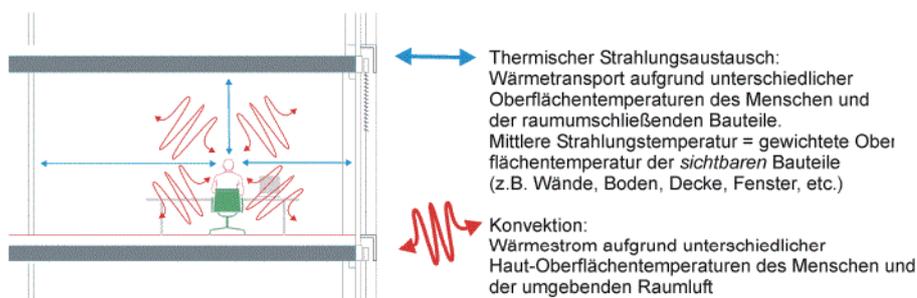
- Luftgeschwindigkeit an Lufteintrittsstelle
- maximale im Raum auftretende Luftgeschwindigkeiten
- Durchschnittsgeschwindigkeit der Luft im Raum
- Durchschnittsgeschwindigkeit der Luft in der Ebene des Nutzers (ca. 1 m über dem Fußboden)

Zugluft

Als Zugluft wird die durch einen Luftstrom „unerwünschte lokale Abkühlung des menschlichen Körpers“ [7.12 und 7.13] bezeichnet. Es handelt sich dabei um keinen absoluten Wert. Man spricht deshalb auch von einem Zugluftrisiko [7.14].

Empfundene Raumtemperatur

Zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit wird meist die empfundene Raumtemperatur herangezogen. Diese wird auch als gefühlte oder operative Temperatur bezeichnet. Die folgende Abbildung zeigt, wie die empfundene Raumtemperatur aus der Lufttemperatur und der Oberflächentemperatur ermittelt werden kann.



Definition für die „empfundene Temperatur“, „Raumtemperatur“, „gefühlte Temperatur“ oder „operative Temperatur“:

$$T_{\text{Raum}} = 0,5 \cdot T_{\text{Luft}} + 0,5 \cdot T_{\text{Strahlung}}$$

Abb. 6.1 empfundene Raumtemperatur

Thermische Speicherfähigkeit und Nachtauskühlung

Je nach Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherkapazität (in Relation zur Dichte) kann über Konvektion Wärmeenergie der Luft an die umgebenden Hüllflächen abgegeben werden und umgekehrt. Wie groß der Einfluss des Luftwechsels auf den Wärmehaushalt des Raumes ist, wird durch den Aufbau der Umgebungsflächen bestimmt. Durch thermische Speicherfähigkeit kann Wärmeenergie in der Gebäudemasse eingelagert werden und zeitlich versetzt durch Nachtauskühlung abgeführt werden. Thermisch aktive Speichermassen (Wirksamkeit bis zu einer Tiefe von 10 cm) entziehen der Raumluft tagsüber Wärmeenergie und geben diese an die auf Grund des Temperaturabfalls nachts kühlere Raumluft wieder ab. Wirksam ist die Nachtauskühlung bereits ab einer Differenz von 5 K zwischen den Außentemperaturen tags und nachts. Für die Nachtlüftung sind effizient wirkende Öffnungen in der Fassade notwendig, die genau regelbar sein müssen. Der Regen-, Insekten-, und Einbruchschutz muss entweder vom Fenster selbst oder von sekundären Maßnahmen gewährleistet werden. Neben dem Einsatz zur Pufferung von Temperaturspitzen kann die Nachtlüftung auch bei Gebäuden eingesetzt werden, bei denen die Lüftung während der Betriebszeiten limitiert ist. Zum Beispiel durch störende Lärm-, Staub- oder Geruchseinwirkung von Außen, oder das individuelle Bedürfnis nach konzentriertem Arbeiten bei geschlossenem Fenster. Der positive Effekt der Nachtauskühlung bezieht sich nicht nur auf die Kühlung der Speichermassen sondern auch auf die direkte Verbesserung des Raumklimas durch den Austausch von warmer Raumluft durch kühlere Nachtluft [7.15 und 7.16].

Fußnoten

- [1.1] Die Bezeichnung des Begriffs Manipulator für im Bereich der Gebäudehülle bewegliche Elemente basiert auf einer von Thomas Herzog betreuten Dissertation von Waldemar Jaensch. (Jaensch, 1981, S.28)
- [2.1] Die historische Entwicklung des Vertikalschiebefensters ist ausführlich dargestellt in einer von Thomas Herzog betreuten Dissertation von Daniel Westenberger. (Westenberger, 2005, Teil 3, S. 33ff)
- [2.2] Estrich, 1959;
Schneck, 1963;
Wickop, 1949
- [2.3] Beim Fassadenbau Schweizer, Oerlikon CH, vermutet man als Ursache des Verschwindens der kleineren Hersteller von Vertikalschiebefenstern das Aufkommen der großen Fenstersystem-Anbieter, die sich auf gut zu vermarktende Massenprodukte konzentrieren.
- [2.4] Baier GmbH, www.baier-gmbh.de
Esco GmbH, www.esco-online.de
Düpmann, www.duepmann-alu.de
Gretsch-Unitas GmbH, www.g-u.de
Häfele AG, www.haefele.de
Hawa AG, www.hawa.ch
Hartmann+Co AG, www.hartmanncoag.ch
Hirsch GmbH, www.hirschag.ch
Josef Gartner GmbH, www.josef-gartner.de
Schüco International KG, www.schueco.de
Ernst Schweizer AG, www.schweizer-metallbau.ch
Sorpetaler fensterbau, www.sorpetaler.de
Vrogum Vinduer A/S, www.vrogum.dk
WSS GmbH & Co KG, www.wss.de
- [3.1] Pültz, Bericht Nr. M66 371/1
- [3.2] Meyer, Bericht vom 12.03.2007
- [3.3] Pültz, Bericht Nr. M66 371/2
- [4.1] Haibel, Bericht vom Januar 2008
- [5.1] Hier sollen hochwertige Rahmenkonstruktionen -z. B. von der Tischlerei Sigg GmbH & Co KG, Allgäustrasse 155, A-6912 Hörbranz- zum Einsatz kommen.
- [5.2] Hier sollen die Erkenntnisse aus den Teilprojekten 19 und 20 einfließen.
- [6.1] Meyers Lexikon online, <http://lexikon.meyers.de/meyers/Lüftung>
- [6.2] Daniels, 1995, S.39
- [6.3] Baker; Steemers, 2000, S. 54ff
- [6.4] TU-Dresden online, <http://mlu.mw.tu-dresden.de/module/m005/raumluftechnik/fensterlueftung/kriterien.htm>

- [6.5] Dauer- und Stosslüftung lassen sich bezogen auf den entstehenden Wärmebedarf dann vergleichen, wenn in beiden Fällen die gleiche Luftmenge ausgetauscht wird. Hierbei ist die Bauart entscheidend (schwere und leichte Bauart). Bei schwerer Bauart liegt ein thermisches Speicherverhalten mit großer Trägheit zugrunde. Bei leichter Bauart wird weniger thermische Masse aktiviert. (siehe auch Gertis; Hauser, 1979, S. 89ff.)
- [6.6] Hartmann, 1999
- [6.7] Recknagel et al., 2001, S. 1061ff
- [6.8] Recknagel et al., 2001, S. 50ff
- [6.9] „Bis zu einer Temperatur von 20°C tritt bei einer Luftgeschwindigkeit unter 0,2 m/s üblicherweise keine Zugluft auf.“ (Arbeitsstätten-Richtlinie ASR 5)
- [6.10] In der Literatur findet sich abweichend dazu auch die Angabe von 0,15 m/s als Wert für maximale Luftgeschwindigkeiten für Bereiche, in denen sich Personen aufhalten (RWE Energie Bau- Handbuch, 1993, S. 16/7)
- [6.11] Bei Neufert wird z. B. für eine Raumlufttemperatur von 27° C eine Raumluftgeschwindigkeit von über 0,3 m/s angegeben. (Neufert, 2000, S. 119)
- [6.12] Fanger, 1994, S. 217
- [6.13] Je größer die Untertemperatur der zugeführten Luft gegenüber der Raumluft ist, desto größer ist das Zugluftisiko. Ein Vorwärmen der in den Raum eintretenden Außenluft kann durch die Anordnung der Zuluftöffnungen in Kombination mit Wärmequellen erfolgen. Im Zuge der Überlegungen zur sehr hohen Dichtigkeit von Fenstern wurden daher die Zuluftöffnungen zur Gewährleistung der Mindestluftzufuhr über Heizkörpern angebracht.
- [6.14] Zuluft gilt neben Geräuschbelastungen als eine der hauptsächlichen Gründe für Unzufriedenheit mit Klima- und Lüftungsanlagen. (Recknagel et al., 2001, S.59)
- [6.15] Analog zu den thermischen gibt es auch eine hygrische Speicherfähigkeit: Die Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit wird analog den Temperaturschwankungen von den Umgebungsflächen durch Speicherung nachvollzogen und gedämpft. Die hygrischen Speicherwirkungen erfolgen bei Lastfällen in einer nur geringen Dicke der Konstruktion (Tagesgang nur wenige mm). Die Dicke der thermischen Speicherwirkung liegt dagegen im Tagesgang bei 6 bis 10 cm. Für das Raumklima wird aufgrund der unterschiedlichen Ergiebigkeit die hygrische Speicherwirkung an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. (Petzold; Martin, 2000)
- [6.16] Zu beachten ist dabei, dass der Taupunkt der Luft unter der tiefsten Temperatur der Flächen im Raum liegt, damit keine Kondensation eintritt. Für ein Standardbürogebäude lässt sich angeben, dass die Nachtlüftung im Sommer das Kühllastmaximum um ca. 10% reduziert; niedrigere Außentemperaturen können bis zu einer Reduktion von 30% führen. (Konrad; Güttler, 1997, S. 75)

Literaturnachweis

- Arbeitsstätten-Richtlinien ASR, Stand: Mai 2000. In: Opfermann, Rainer: Arbeitsstätten. Forkel Verlag, Heidelberg, 2003, S. 208ff
- Baker, Nick; Steemers, Koen: Energy and environment in architecture - a technical design guide. Taylor & Francis, London, 2000
- Daniels, Klaus et. al.: Technologie des Ökologischen Bauens. Birkhäuser Verlag, Basel, 1995
- Estrich, Jürgen: Beschläge für Fenster, Türen und Möbel. Konradin-Verlag Robert Kohlhammer, Stuttgart, 1959
- Fanger, Ole et al.: Behagliche Innenwelt. In: Uhlig, 1994
- Gertis, Karl; Hauser, Gerd: Energieeinsparung durch Stoßlüftung? In: Heizung Lüftung Klima Haustechnik, Jh. 30, Nr. 3, 1979, S. 89ff
- Hartmann, Thomas: Energetische Effizienz von Wohnungslüftungsanlagen. In: HLH, 3/1999
- Jaensch, Waldemar: Veränderbare Oberflächen - Verfahren zur Beurteilung kinetischer Manipulatoren im Bereich der Gebäudehülle als Maßnahme zur regulierung des Gebäudeklimas. Kassel, 1981
- Konradt, Oliver; Güttler, Gerhard: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen eines Bürogebäudes und Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit bei Einsatz von Solarenergie. In: Bauphysik, 3/1997
- Neufert, Ernst: Bauentwurfslehre. 36. Auflage. Vieweg Verlagsgesellschaft, Braunschweig und Wiesbaden, 2000
- Petzold, Karl; Martin, Roland: Wechselwirkungen zwischen Außenwandkonstruktion und sich frei einstellendes Raumklima. In: Bauphysik der Außenwände. Schlußbericht DFG-Forschungsschwerpunktprogramm. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2000
- Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik einschl. Warmwasser- und Kältetechnik. 70. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, München, 2001
- RWE Energie Aktiengesellschaft (Hrsg.): RWE Energie Bau-Handbuch. 11. Auflage. Energie Verlag, Heidelberg, 1994
- Schneck, Adolf G.: Fenster aus Holz und Metall. Julius Hoffmann Verlag, Stuttgart, 1963
- TU-Dresden online, <http://mlu.mw.tu-dresden.de/module/m005/raumlufttechnik/fensterlueftung/kriterien.htm>
- Westenberger, Daniel: Untersuchungen zu Vertikalschiebefenstern. München, 2005
- Wickop, Walther: Fenster, Türen, Tore aus Holz und Eisen. Eine Anleitung zu ihrer guten Gestaltung, wirtschaftlichen Bemessung und handwerksgerechten Konstruktion. Walter de Gruyter & Co, Berlin, 1949

(die übrigen Abbildungen stammen von den Autoren)

Abbildungsnachweis

- [1] siehe [1.1]
- [2] siehe [1.2]
- [4] siehe [3.8]
- [5] siehe [3.9]
- [6] siehe [3.16]
- [7] siehe [3.17]

- [1.1] nach Westenberger, Daniel: Untersuchungen zu Vertikalschiebefenstern. Dissertation, Institut für Entwerfen und Bautechnik, Fakultät für Architektur der Technischen Universität München, 2005, aus Abb. 2.06
- [1.2] ebd. [1.1], Abb. 5.01

- [3.1] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, Anhang S.3
- [3.2] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, Anhang S.4
- [3.3] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, Anhang S.4
- [3.4] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.6 ff
- [3.5] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.6 ff
- [3.6] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.7 ff
- [3.7] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.7 ff
- [3.8] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.8 ff
- [3.9] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.8 ff

- [3.10] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.13
- [3.11] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.13
- [3.12] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.11

- [3.13] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.11
- [3.14] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.5 ff
- [3.15] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S.5 ff
- [3.16] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, Anhang Daten CD
- [3.17] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, Anhang Daten CD
- [3.18] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S. 9
- [3.19] Meyer, Christoph: Bericht vom 12.03.2007. Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel, 12.03.2007, S. 9
- [3.20] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 2
- [3.21] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 3
- [3.22] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 10
- [3.23] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 10
- [3.24] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 13
- [3.25] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 13
- [3.26] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 12
- [6.1] Pültz, Gunter: Bericht Nr. M66 371/1. Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg, 29.12.2006, S.5

(die übrigen Bilder stammen von den Autoren)

Bildnachweis

- [1.1] Schittich; Staib; Balkov; Schuler; Sobek: Glasbau Atlas. Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH. München, 1998, S.12
- [1.2] Flagge; Herzog-Loibl; Meseure: Thomas Herzog – Architektur+Technologie. Prestel Verlag, München, 2001, S.143
- [2.1] English Heritage (Hrsg.): Timber sash windows. In: Framing options Leaflet 4 (Broschüre). London 1997
- [2.2] Fa. Schüco, Bielefeld, Firmenunterlagen
- [3.1] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 4
- [3.2] Haibel, Michael: Bericht vom Januar 2008, Hochschule Biberach, Biberach/Riß, 2008, S. 6
- [4.1] www.wikipedia.de
- [4.2] www.wikipedia.de
- [4.4] Fasel, Hermann; Meerkamp, Manfred: Firmenkatalog FK 1 WSS, Wilh. Schlechtendahl & Söhne GmbH & Co.KG, Heiligenhaus, S. 347
- [4.25] Schlecht, Karl-Heinz: Prüfbericht 07/07/H06, Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding, 17.07.2007, S. 6
- [4.26] Schlecht, Karl-Heinz: Prüfbericht 07/07/H06, Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding, 17.07.2007, S. 6

Impressum

Technische Universität München
Institut für Entwerfen und Bautechnik
Fachgebiet Holzbau
Univ. Prof. DI Hermann Kaufmann

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Architekt Philipp Donath
Dipl.-Ing. Architekt Carl Magnus Bickel

Projektbearbeitung:

Dipl.-Ing. Architektin Dina Hilliges

Kooperationspartner:

Firma Schindler GmbH & Co. KG, Roding

fachliche Beratung:

Ingenieurbüro Müller-BBM GmbH, Planegg
Ingenieurbüro Hausladen + Meyer GbR, Kassel
Hochschule Biberach, Biberach/Riß
Firma B. Ketterer Söhne GmbH & Co. KG, Furtwangen

gefördert aus Mitteln:

des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kunst
des Verbandes öffentlicher Versicherer
der Versicherungskammer Bayern

München, im Juni 2008