

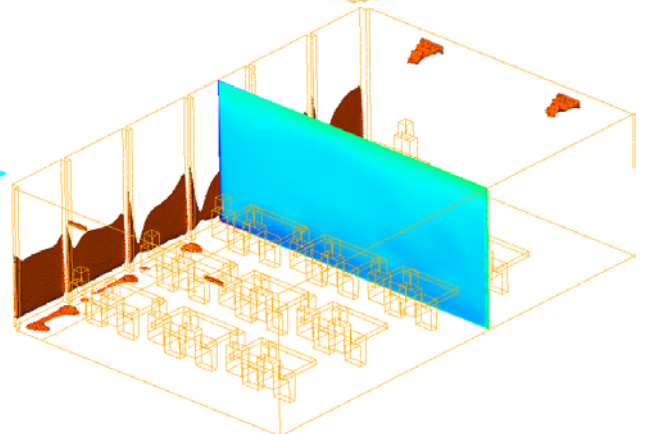
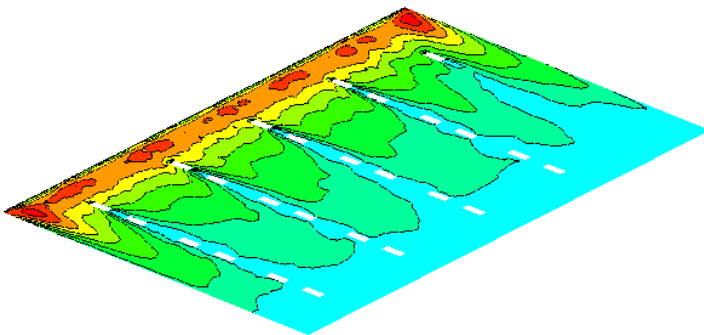
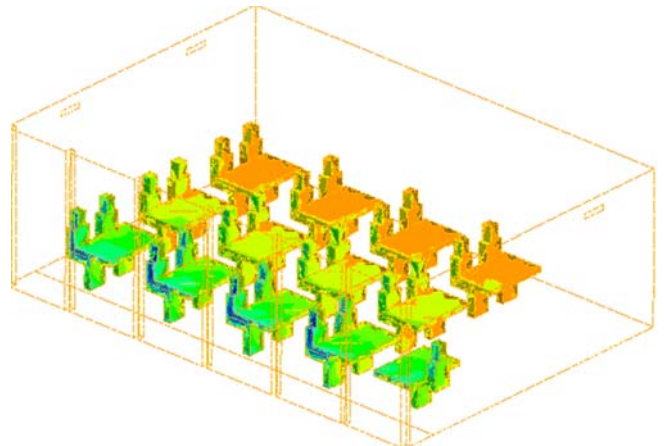


Komfortuntersuchungen an Schulbauten mit hohem Glasanteil

Projekt 04-001

Messungen Januar – März 2004

Simulationen/Komfortdiskussion/Bewertung



Komfortuntersuchungen an Schulbauten mit hohem Glasanteil

Messungen Januar – März 2004

Simulationen/Komfortdiskussion/Bewertung

Projekt 04-001

Berichtversion 2.5, 30. Oktober 2004

Adressen Auftraggeber

Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Lindenhofstr. 21, 8021 Zürich, www.hbd.stzh.ch

Dr. Heinrich Gugerli Fachstelle nachhaltiges Bauen,
Tel. 01 216 26 81, Fax 01 270 92 78, heinrich.gugerli@hbd.stzh.ch

Werner Kälin Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik.
Tel. 01 216 21 73, Fax 01 270 95 40, werner.kaelin@hbd.stzh.ch

Bearbeitung / Autor:

Dr. Alois Schälín Air Flow Consulting, Weinbergstr. 72, 8006 Zürich
Tel. 01-350-3595, Fax 01-350-3596; schaelin@afc.ch

Das Titelbild zeigt einige Bilder der Messungen und Rauchvisualisierungen und einige Ausschnitte der Simulationsergebnisse.

Umfang Dokumentation

Merkblatt

Bericht 2.4 Komfortuntersuchungen

 Anhang A Messungen Komfort

 Anhang B Strömungsberechnungen

 Anhang C Bestimmungsparameter Komfort

Inhalt

Zusammenfassung	1
Komfortanforderung	1
Luftströmungen im Fassadenbereich: Theorie und Messergebnisse	3
Resultate der Untersuchungen im Detail	3
Empfehlung	4
Hinweise auf allgemeine Fragen	5
1 Einleitung	6
2 Vorgehen	6
3 Theoretisch zu erwartende Ergebnisse	8
3.1 Primäres Strömungsbild	8
3.2 Direktvergleich mit Messungen	10
3.3 Direktvergleich mit Simulation	11
4 Übersicht Objekte	12
4.1 Primarschulhaus Schwerzenbach ZH	12
4.2 Primarschulhaus Eschenbach SG	12
4.3 Kantonsschule Chur	13
5 Ergebnisse Messungen	13
6 Strömungsberechnungen	17
6.1 Geometriemodell	17
6.2 Randbedingungen im Rechenmodell:	18
6.2 Resultate	20
Einflüsse auf Kaltluft/Komfort	24
Hinweise auf allgemeine Fragen	25
7 Bewertung Komfort	25
7.1 Allgemeines zum Komfort	25
7.2 Primärer Komfortfaktor PD-Skala für Luftzugsrisiko	25
7.3 Oberflächentemperatur der Fassade	26
7.4 Schwellwert für Akzeptanz	26
7.5 Diskussion 1 auf Basis der Messungen	28
7.6 Diskussion 2 auf Basis der Strömungsberechnungen	29
7.7 Statistische Bewertung über den Winterverlauf	29
7.8 Benutzeraussagen	30
Referenzen	31
Anhänge	31
A Messungen Komfort	31
B Strömungsberechnungen	31
C Bestimmungsparameter Komfort	31

Zusammenfassung

Hohe Verglasungsanteile beinhalten die Gefahr von Komfortproblemen. Eine Untersuchung der Komfortauswirkungen im Winterfall anhand von Messungen an realisierten Schulneubauten und ergänzenden Strömungsberechnungen soll verallgemeinerbare Grundlagen für Empfehlungen für Schulbauten liefern.

Speziell interessiert der Einfluss des U-Wertes der Verglasung für verschiedene Ausführungsvarianten der Fassade bei einer Verglasungshöhen von etwa 3m.

Auslöser der Studie ist die Diskussion um die Notwendigkeit einer 2-fach (typische U-Werte 1 W/m²K) oder 3-fach Verglasung (typische U-Werte 0.6 W/m²K). Da für die Komfortfrage im Winter nur die Innenoberflächentemperaturen eine Rolle spielt, und diese nur vom U-Wert abhängig ist, wird in diesem Bericht meist nur vom U-Wert gesprochen. In den Anwendungsbeispielen sind dann meist U-Werte von 1.0 W/m²K oder im Vergleich dazu 0.6 W/m²K angenommen. Wie dieser Wert technisch realisiert wird, ist hier sekundär.

Es wird auf verschiedene Nutzungen mit unterschiedlichen Komfortansprüchen (Schulräume, Pausenräume usw.), Fassadenausführungen (Rahmenanteile, Schwerter) und Heizmassnahmen eingegangen.

Die wichtigsten Resultate und die daraus abgeleiteten Empfehlungen werden später in einem Merkblatt zusammengefasst.

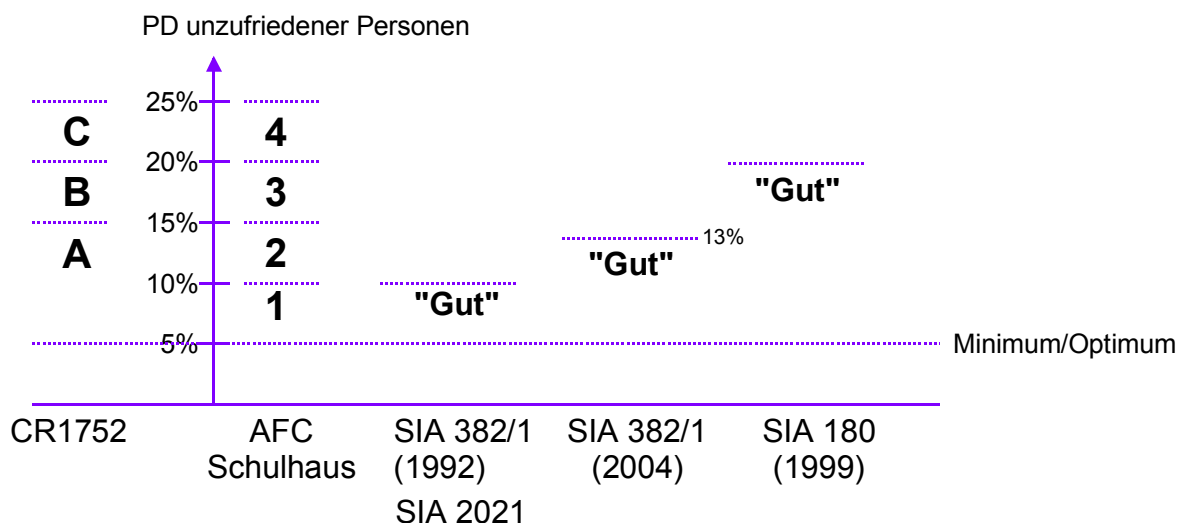
Komfortanforderung

Der Komfort wird von verschiedenen Faktoren wie Luftzug, Temperatur usw. beeinflusst, die durch verschiedene Formeln oder Diagrammen dargestellt werden. Für die Komfortbewertung wird als quantitative Aussage primär wie in SIA 2021 der Prozentsatz unzufriedener Personen aufgrund Luftzug beigezogen, welche von den verschiedenen Komfortfaktoren am schwierigsten zu erfüllen ist. Bei den PD-Werten wird davon ausgegangen, dass 5% der Personen immer unzufrieden sind (dies ist das Optimum).

Der Knackpunkt bei allen Komfortbewertungen ist die Frage des Massstabes, d.h. welcher Prozentsatz unzufriedener Personen akzeptiert wird. Hier sind verschiedene Werte schon angewendet worden.

Im europäischen CEN-Report CR 1752 ist ein Vorschlag mit 3 Komfortklassen A, B und C enthalten, wobei die beste Komfortklasse A mit PD=15% bestimmt ist.

Die Schweizer Normen sind teilweise wesentlich strenger, aber nicht konsistent: die SIA 382/1 (1992) hat 10% festgelegt. Das Merkblatt 2021 (Gebäude mit hohem Glasanteil) hat diesen Wert übernommen (2002). Die SIA 180 (von 1999) hat 20% (für „natürliche Lüftung“), der Entwurf der neuen 382/1 13%.



Wir schlagen daher zur Übersichtlichkeit eine Einteilung in Komfortstufen 1 bis 4 vor, die sich um je 5% unterscheiden. Komfortstufe 1 (am besten) bedingt einen PD-Wert von 10%.

Das Erreichen guter Komfortbedingungen ist einerseits technisch abhängig von den Eigenschaften der Verglasung, von Rahmenkonstruktion, flankierenden Heizmassnahmen und der Solltemperatur im Raum.

Andererseits muss die zu erreichende Komfortstufe bestimmt sowie die Frage entschieden werden, ob der höchste Komfort auch bei extremen Winterbedingungen (-10°C oder tiefer) gewährleistet werden soll.

Aufenthaltsbereich nach SIA 382/1 (2004)

Die Komfortanforderungen müssen im Aufenthaltsbereich nach SIA 382/1 (2004) gewährleistet werden, für jeden Platz **einzel**n, besonders auch die randnahen Plätze, s. Bild 1.

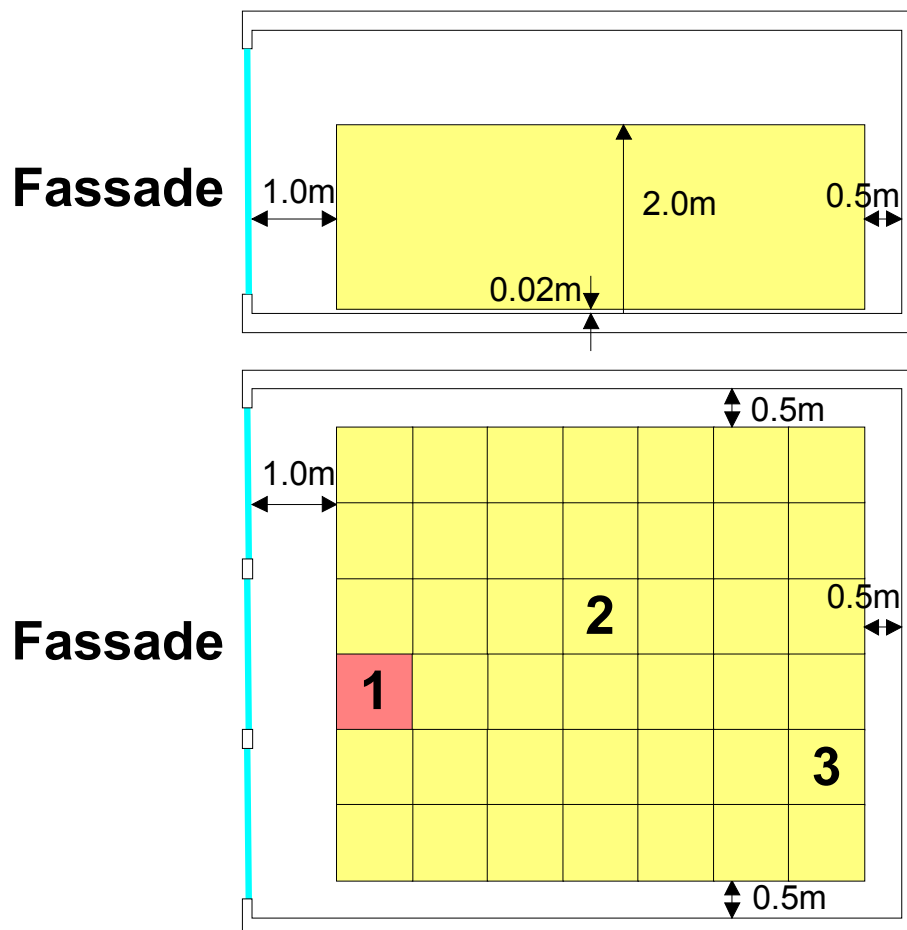


Bild 1: Aufenthaltszone für Komfortbedingungen mit Beispielplätzen 1, 2 und 3, nach SIA 382/1 (2004). Oben: Schnitt, unten Grundriss. Platz 1 ist wegen der Nähe zum Fenster am meisten gefährdet.

Luftströmungen im Fassadenbereich: Theorie und Messergebnisse

Aus einer Reihe von Versuchen an homogenen kalten Wänden in Laborräumen wurden in Aalborg, Dänemark, von Peter V. Nielsen und Per Heiselberg empirische Formeln ermittelt, die auch den Diagrammen und Auswertungen des SIA-Merkblatts 2021 zugrundeliegen.

Bei einer Temperaturdifferenz von 22 Grad zwischen Lufttemperatur innen und aussen (Typische Bedingungen bei Messkampagne dieser Studie) ergeben sich nach diesen Formeln Geschwindigkeiten von **0.125 m/s** in einem Abstand von 1m, und von **0.09 m/s** in einem Abstand von 2m.

Die tatsächlich gemessenen Werte liegen höher: Bis in 1m Abstand sind die Geschwindigkeiten im Bereich **0.2 m/s** und bis in 3m Abstand im Bereich **0.15 bis 0.16 m/s**, also wesentlich höher als im einfachen Modell.

Hauptgründe für diese Unterschiede zu den erwähnten Formeln sind Rahmengenometrie, weniger gute Dämmwerte des Rahmens an sich sowie der zusätzliche Wärmeverlust des Randverbunds des Glases, wie die ausführlichen Detailergebnisse der Strömungssimulationen zeigen.

Resultate der Untersuchungen im Detail

- Unter bestimmten Bedingungen (siehe folgende Punkte) kann mit einem U-Wert von ca. 1 W/m²K (2-fach-Verglasung) Komfortstufe 1 gehalten werden bei normalen Winterbedingungen (ca. 0°C); dies ist aber kaum zu erreichen bei extremen Winterbedingungen (ca. -10°C).
- Mit einem U-Wert von ca. 0.6 W/m²K (3-fach-Verglasung) können dieselben Komfortbedingungen bei -10°C erreicht werden, wie mit einem U-Wert von ca. 1 W/m²K bei 0°C.
- Für reduzierte Komfortansprüche (Komfortstufe 2-3: Pausenräume, Korridore) ist die 2-fach-Verglasung genügend.
- Eine Hauptvoraussetzung für guten Komfort besteht jedenfalls in einer günstigen Rahmenkonstruktion (minimaler Rahmenanteil, oder Rahmen hinter isolierten Elementen platziert).
- Mit einem U-Wert von ca. 0.6 W/m²K (3-fach-Verglasung) kann Komfortstufe 1 zwar erreicht werden; mit einer ungünstigen Rahmenkonstruktion kann jedoch der Vorteil wieder zunichte gemacht werden.
- Besonders ungünstig sind in den Raum auskragende Rahmen, die nicht isoliert sind. Wenn sie isoliert sind und Raumtemperatur aufweisen, sind sie soweit i.O. (obwohl die Ecksituation nie günstig ist und zu einer lokal stärkeren Strömung führt).
- Wir empfehlen daher einen flachen Rahmen, Breite max. 15 cm (Abwicklung in Fassadenlänge pro Rahmen, ca. 1 Rahmen pro Rasterlänge von 1.7-2m).
- Im Randbereich (bis 2m) ist jedenfalls mit einer deutlich schlechteren Komfertsituation zu rechnen, einerseits wegen der stärkeren Strömung, andererseits wegen der tieferen Strahlungstemperatur. Arbeitsplätze auf einer Fensterbank im Winter unter 0°C (U=0.6 W/m²K) oder unter 6°C (U=1 W/m²K) nicht akzeptabel.
- Einen wesentlichen Einfluss auf die zulässigen Geschwindigkeiten hat die Raumtemperatur. Wie die Bilder 12 und 13 zeigen, ist der Einfluss der Raumtemperatur zwischen 20°C und 24°C auf den Komfort bei gleicher Strömung gross.
- Eine verstärkte Randheizung ist jedenfalls zu empfehlen, die Geschwindigkeiten in der Aufenthaltszone werden reduziert. Wesentlich besser sind lokale Heizmassnahmen,

d.h. Konvektoren. Mit diesen können die Komfortprobleme kompensiert werden, solange sie eingeschaltet sind, d.h. nur bei geringen internen Lasten.

- Bei externen Lasten werden die Komfortprobleme eher kleiner, da die Scheiben erwärmt werden.
- Je höher die internen Lasten sind (Personen, Computer), umso weniger wird die geregelte Heizung laufen, da ein Heizbedarf nicht mehr nötig ist. Der Komfort in diesem Fall muss daher durch die Konstruktion allein gewährleistet werden.
- Die vorliegenden Aussagen gelten für die relativ niedrigen Turbulenzgrade von $\leq 20\%$. Je nach Nutzung und Lüftungskonzept können höhere Geschwindigkeiten und Turbulenzgrade auftreten, die erhöhte Anforderungen an die Fassade (z.B. besserer U-Wert) stellen.
- Im konkreten Einzelfall muss abgeklärt werden, ob die Komfortanforderungen eingehalten werden können.
- Für den Grundfall ohne besondere Abklärungen oder Massnahmen sind die Vorgaben von SIA 2021 gedacht (für Raumtemperatur 20°C , Aussentemperatur -8°C und PD 10%). Beim Rahmen ist aber die ganze Abwicklung der Innenoberfläche zu berücksichtigen.

Empfehlung

Vom Kosten/Nutzen-Verhältnis scheint es einerseits übertrieben, die Komfortstufe 1 für alle Aussenbedingungen, d.h. bis -10°C zu fordern, andererseits Komfortstufe 1 nur bis 0°C zu fordern (ca. 300 Std. ungenügend).

Grundsätzlich wird daher Komfortstufe 1 (PD max. 10%) bis zu einer Aussentemperatur von -4°C für die folgenden Nutzungsbedingungen empfohlen:

- Schulzimmer mit Voll-Last, eine ganze Schülerreihe und der Lehrer im Randbereich
- ohne Heizung (sonst wird es bei Voll-Last zu warm bei heutigen Bauten)
- maximale Raumtemperatur 23°C

Um diese Zielwerte zu erreichen, ist die Fassade entsprechend zu gestalten. Dies bedingt:

1. genügend gute U-Werte von Verglasung und Rahmen
2. eine geometrisch günstige Ausgestaltung des Rahmens, sodass die Rahmenfläche klein bleibt.

Die Verglasung wird im Vergleich mit SIA 2021 etwas weniger streng bewertet, hingegen ist in der Praxis der Einfluss des Rahmens auf den Kaltluftabfall meistens so gross, dass er gesondert berücksichtigt werden muss. Bei SIA 2021 ist ein Korrekturfaktor des Randverbunds eingeflossen, der Rahmen selbst wurde als Einflussfaktor auf die Kaltluftströmung nicht betrachtet.

Beim Rahmen, der in die Rechnung eingeht, ist aber die ganze Abwicklung der Innenoberfläche zu berücksichtigen. Bei den realen Fassaden hat die Rahmengestaltung einen unerwartet hohen Einfluss.

Im konkreten Einzelfall muss nachgewiesen werden, dass die Komfortanforderungen eingehalten werden können.

Hinweise auf allgemeine Fragen

Optimale Luftführung

- Eines der untersuchten Schulhaus weist eine Hygienelüftung auf. Die Luftführung hat eine gewisse Bedeutung, sie sollte nicht parallel zur bestehenden Kaltluftströmung verlaufen, damit diese Strömung nicht noch angetrieben wird. Am besten ist eine gegenläufige Bewegungsrichtung. Eine reine Hygienelüftung dürfte nicht problematisch sein, wenn nicht zu kleine Düsen verwendet werden und die Luft mit nicht zu grosser Geschwindigkeit (<0.15 m/s) in den Aufenthaltsbereich von Personen gelangt
- Die Zulufttemperatur darf keinesfalls zu tief sein (minimal 20°C), wenn die Luft ohne grössere Mischung in den Aufenthaltsbereich von Personen gelangt. Beim Schulhaus Schwerzenbach hörten wir Klagen über den Sommerfall, da kalte Luft über die Zuluftöffnungen oberhalb der Wandtafel unter der Decke in den Aufenthaltsbereich von Personen nach unten fällt. Hier sind die Luftgeschwindigkeiten beim Zuluftauslass zu klein, sodass zuwenig Mischung durch Induktion stattfinden kann.

Zur Frage nach dem optimalen Heizsystem

- Zwei der untersuchten Schulhausbauten weisen eine Bodenheizung auf. Dieses ist nicht unbedingt das beste Heizsystem für ein Schulhaus, allerdings spielen bei einer Beurteilung verschiedene Faktoren mit, die hier nicht alle erschöpfend dargestellt werden können. Nachteilig ist sicher die Trägheit, d.h. das langsame Ansprechen auf eine Änderung der Nutzungsbedingungen.
- Eines der untersuchten Schulhäuser weist einen Radiator mit hohem Konvektionsanteil unter der Wandtafel auf. Grundsätzlich wäre eine Heizmassnahme viel besser am Fassadenfuss platziert, damit dem Kaltluftabfall entgegengewirkt werden kann.
- Allerdings stellt sich bei jedem Heizsystem das Problem, dass bei Vollbesetzung und Erreichen der Solltemperatur die Heizung abgeschaltet wird und die Kaltluftströmung sich entwickeln kann.

1 Einleitung

Der zunehmende Trend zu hohen Verglasungsanteilen bei Fassaden führt infolge höherer U-Werte (schlechtere Isolation) und höherer g-Werte (höherer Energieeintrag bei Besonnung) zu ungünstigen Auswirkungen auf das Komfortempfinden.

Im Winter führt der erhöhte Verglasungsanteil zu grossflächig tieferen Oberflächentemperaturen (ausser bei Besonnung), und damit zu ungünstigeren Auswirkungen auf die Strahlungstemperatur sowie zu höheren Luftgeschwindigkeiten. Dies hat verstärkte Zugerscheinungen zur Folge.

Im Sommer führen die höheren U- und g-Werte zu einer erhöhten Wärmebelastung des Innenraumes und so zu höheren Innentemperaturen, soweit sie nicht durch Kühlung kompensiert werden.

Aufgrund von solchen Komfortproblemen speziell im Sommer bei diversen Bauten entstand das SIA-Merkblatt 2021 mit Empfehlungen für U- und g-Werte der Verglasungen. Diese Vorgaben sind für den Allgemeinfall ohne besondere Abklärungen oder Massnahmen gedacht.

Der Trend zu höherem Glasanteil ist auch bei Schulbauten festzustellen, z.B. Oberstufenschulhaus Albisriederplatz, bei dem von AFC Air Flow Consulting eine Strömungsberechnung für die spezielle Fassadenkonstruktion durchgeführt wurde.

Eine Untersuchung der Komfortauswirkungen anhand von Messungen an realisierten Schulneubauten und ergänzenden Strömungsberechnungen für verschiedene Fassadenausführungen soll nun verallgemeinerbare Grundlagen für Empfehlungen speziell für Schulbauten liefern, mit Bezug auf die Empfehlungen des SIA-Merkblatts 2021.

Speziell interessiert der Unterschied zwischen einem U-Wert von ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (typische/gute 2-fach-Verglasung) und einem U-Wert von ca. $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (gute 3-fach-Verglasung) für verschiedene Verglasungshöhen.

Dabei wird auch auf verschiedene Nutzungen mit unterschiedlichen Komfortansprüchen (Schulräume, Pausenräume, Korridore usw.), verschiedene Fassadenausführungen (Rahmenanteile, Schwerter) und weitere Massnahmen eingegangen.

Air Flow Consulting wurde vom Amt für Hochbauten der Stadt Zürich mit der Durchführung einer solchen Komfortuntersuchung im Winter in Schulhäusern beauftragt.

2 Vorgehen

Die Basis der Studie bildet die Erfassung der realen Verhältnisse in bestehenden Schulräumen mit neueren Fassadenkonstruktionen mit einem U-Wert der Verglasung von $1.0 - 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Alter der Gebäude maximal ca. 5 Jahre).

Dieser Teil wird ergänzt durch numerische 3-dimensionale Strömungssimulationen für einen typischen Schulraum, in dem auf einfache Art verschiedene Parameter wie Fassadenkonstruktion, interne Lasten, Heizmassnahmen usw. variiert werden können.

Teil 1 Visualisierung und Messung

An ausgewählten kalten Tagen wurden vor Ort in 3 Schulhäusern in einem Schulzimmer Messungen vorgenommen.

Einerseits wurden die Strömungsverhältnisse zunächst mit Rauch visualisiert und mit Videoaufnahmen dokumentiert, andererseits wurden ausführlichere Messungen der relevanten Komfortparameter in Bezug auf die Ausführung der Fassade durchgeführt.

Pro Objekt waren ca. 2 Messtage vorgesehen. Ziel wäre gewesen, eine Messung für den Winter-Normalfall bei 0°C Aussentemperatur, und eine für den Winter-Extremfall bei -10°C durchzuführen. Da der Zeitrahmen der Untersuchung gegeben war (Januar/Februar 2004), mussten die verfügbaren Messtage genommen werden. Die Aussentemperatur lagen zwischen -5°C und 0°C.

Es stellte sich aber dann heraus, dass in einigen Fällen ungeplant die Fussbodenheizung in Betrieb war. Dies ermöglichte als Vorteil die Erfassung der Auswirkung auf das Strömungsbild.

Die erfassten Parameter sind:

- Lufttemperaturen an verschiedenen Positionen
- Oberflächentemperaturen Verglasung, Rahmen, Boden, Decke, Wände
- Luftgeschwindigkeit an verschiedenen Positionen in Nähe Fassade und Boden
- Turbulenzgrad (näherungsweise)

Die Oberflächentemperaturen wurden mit einem Infrarot-Messgerät ermittelt, wobei die korrekte Messung der Glastemperatur sorgfältig überprüft wurde. Die Luftgeschwindigkeiten wurden mit einem fast unidirektionalen Anemometer bestimmt, wobei die Strömungsrichtung mittels Rauch permanent überprüft wurde.

Um den Unterricht einerseits und die Messungen andererseits nicht zu stören, konnten die Messungen nur in leeren Schulzimmern durchgeführt werden (leer abgesehen von 2 Experimentatoren):

Die Bedingungen für Vollbesetzung können daher gegenwärtig nur aus der Simulation abgeleitet werden. Für eine Teil- oder Minimalbesetzung, die aufgrund von Gruppenarbeiten, Wahlfach- oder Leistungsklassenunterteilungen häufig vorkommt, können näherungsweise die Ergebnissen der unbesetzten Räume herangezogen werden.

Teil 2 Berechnungen

Mithilfe numerischer Strömungsberechnung wird die Komfortsituation für verschiedene Fassadenausführungen analysiert und ebenfalls die Wirksamkeit diverser Massnahmen zur Behebung von Komfortproblemen bestimmt.

Für eine generische Untersuchung als Basis für verallgemeinerbare Empfehlungen wurden einige Varianten eines Klassenzimmer mit Möblierung, typischer Belegung, Lüftung usw., untersucht.

Teil 3 Komfortdiskussion

In der Komfortdiskussion wird ausführlich auf die Bewertung der gemessenen Ergebnisse eingegangen, vor dem Hintergrund der gängigen Normen.

Benutzerumfrage

Eine eigentliche Benutzumfrage war nicht vorgesehen; anlässlich der Messungen wurden jedoch die Lehrer und Abwarte auf Ihre Erfahrungen befragt.

Teil 4 Empfehlungen

Die Teile 1 bis 3 stellen die Basis dar für Empfehlungen speziell für Schulhausbauten, mit Bezug auf die Empfehlungen des SIA-Merkblatts 2021.

3 Theoretisch zu erwartende Ergebnisse

3.1 Primäres Strömungsbild

Grundsätzlich stellt sich an einer kühlen Fassade ein Strömungsbild wie folgt ein (s. Bild 1):

- Zunächst fließt die Luft der kalten Aussenwand nach senkrecht nach unten und beschleunigt auf hohe Geschwindigkeit (bis 0.25 m/s am Glas, bis 0.5 m/s bei Rahmenteilen).
- Die Luftströmung wird in Bodennähe abgebremst und umgelenkt.
- Die Strömung beschleunigt wieder und erreicht nach ca. 1-1.5m angenähert konstante Bedingungen (Dicke und Geschwindigkeit) wenn sie ungestört bleibt.

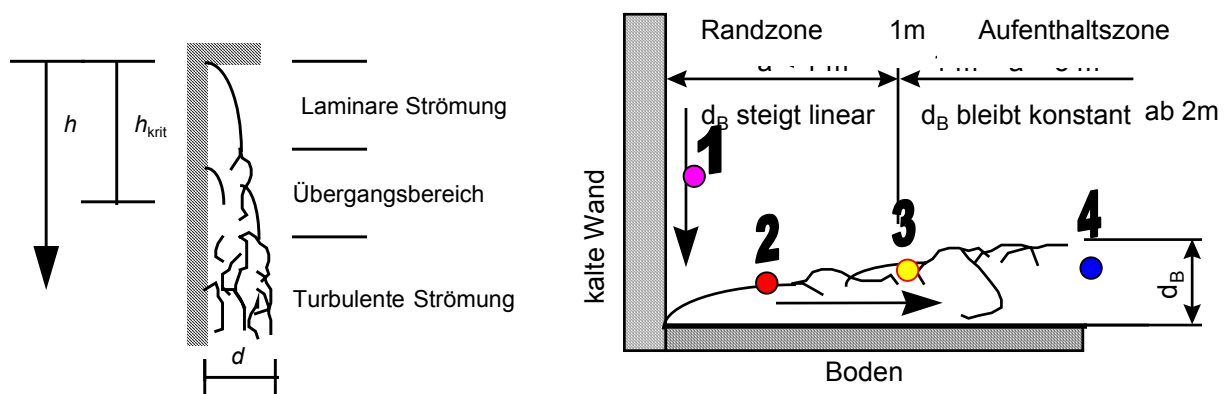


Bild 1: Prinzipbild Strömung: Links vertikal, rechts am Boden nach Umlenkung (Aus „Lüftungshandbuch für Planer“ 1998; nach Per Heiselberg 1994). Die Punkte 1 bis 4 zeigen die Orte der maximalen Geschwindigkeiten (horizontal in 0.4m, 1.0m und 2.0m Abstand), die in Bild 4b und 4c berechnet sind.

Aus einer Reihe von Versuchen an homogenen kalten Wänden in Laborräumen wurden in Aalborg, Dänemark, von Peter V. Nielsen und Per Heiselberg empirische Formeln ermittelt, die auch den Diagrammen und Auswertungen des SIA-Merkblatts 2021 zugrundeliegend.

Für den Kaltluftabfall können folgende einfache Berechnungsgleichungen angewendet werden („Lüftungshandbuch für Planer“ S. 73/74):

Vertikal	$w_{\max} = 0.1 \cdot \sqrt{h \cdot \Delta T}$	h Lauflänge [m], $\Delta T = T_{\text{Raum}} - T_{\text{Wand}}$
Horizontal $0.4 \text{ m} < a < 2 \text{ m}$	$w_{B\max} = 0.095 \cdot \frac{\sqrt{h \cdot \Delta T}}{a + 1.32}$	
Horizontal $a > 2 \text{ m}$	$w_{B\max} = 0.028 \cdot \sqrt{h \cdot \Delta T}$	

Die Bilder 2a-c zeigen die mit diesen Formeln ermittelten Werte an den Positionen 1-4 von Bild 1b, sowie die aus der Definition des U-Wertes bestimmte Temperaturdifferenz zwischen Raumtemperatur und Fassadenoberfläche für verschiedene Aussentemperaturen.

Bild 2a zeigt ein Diagramm für den U-Wert 0.6 W/m²K (gute 3-fach-Verglasung), Bild 2b für den U-Wert 1.1 W/m²K (typische 2-fach-Verglasung) und Bild 2c für den U-Wert 1.1 W/m²K (mittelguter Rahmen).

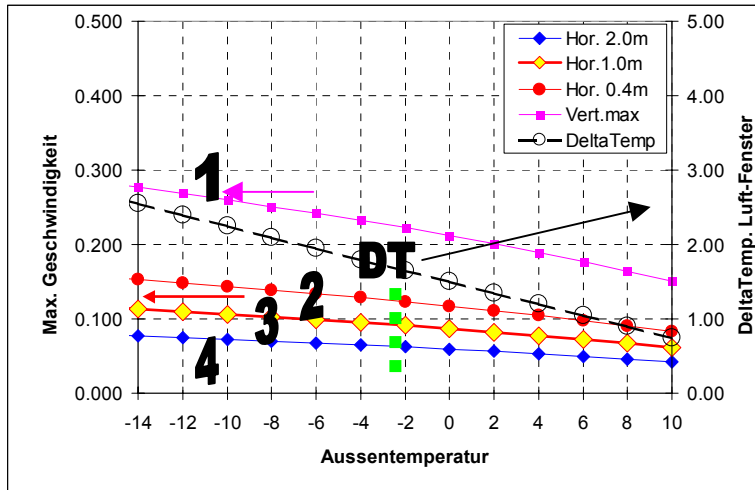


Bild 2a: Zu erwartende Geschwindigkeiten nach dem Modell von P. Heiselberg für **U-Wert 0.6 W/m²K** und Raumtemperatur 20°C.

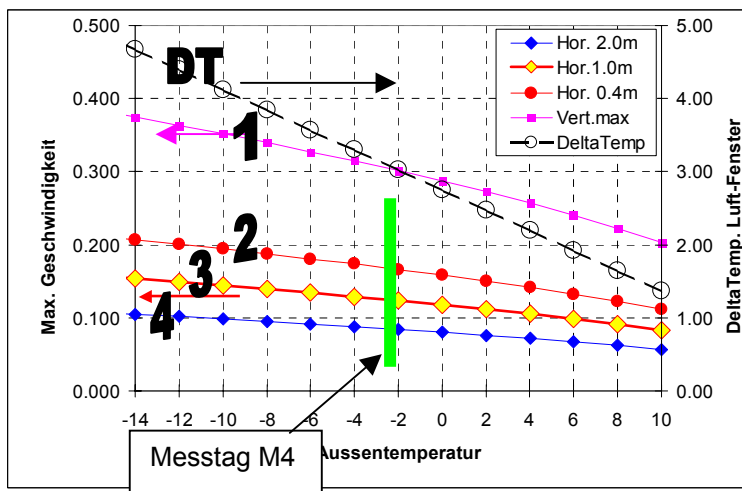


Bild 2b: Zu erwartende Geschwindigkeiten nach dem Modell von P. Heiselberg für **U-Wert 1.1 W/m²K** (Verglasung) und Raumtemperatur 20°C. Temperaturdifferenz 22 Grad am Messtag M4.

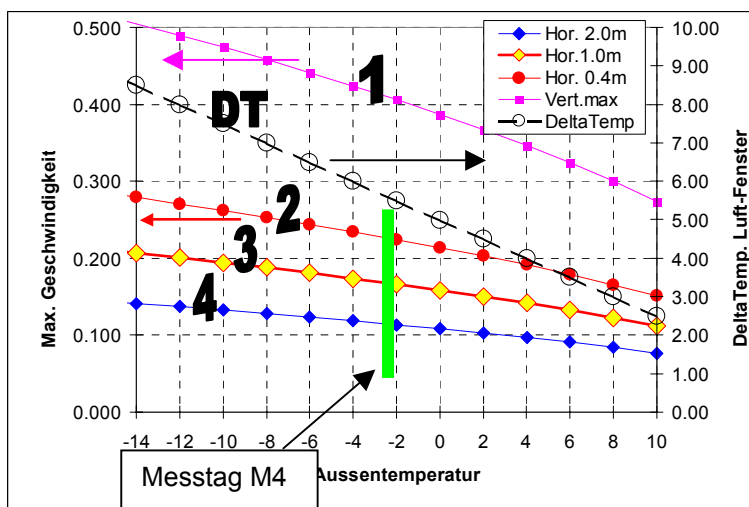


Bild 2c: Zu erwartende Geschwindigkeiten nach dem Modell von P. Heiselberg für **U-Wert 2.0 W/m²K** (Rahmen) und Raumtemperatur 20°C. Temperaturdifferenz 22 Grad am Messtag M4.

3.2 Direktvergleich mit Messungen

Für Messtag M4 ergeben sich Werte in diesen Diagrammen, die mit einem grünen Balken markiert sind für eine Temperaturdifferenz zwischen innen und aussen von ca. 22 Grad.

Für eine glatte homogene Wand mit dem U-Wert der Verglasung (ca. $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$) ergeben sich aus Bild 2b in einem Abstand von 1m eine Geschwindigkeit von **0.125 m/s** (Linie 3) und in einem Abstand von 2m etwa **0.09 m/s** (Linie 4).

Bild 3a zeigt die Strömungsvisualisierung und Bild 3b die Messwerte.

Die tatsächlich gemessenen Werte liegen bis in 1m Abstand im Bereich 0.2 m/s und bis in 3m Abstand im Bereich 0.15 bis 0.16 m/s, also wesentlich höher als im einfachen Modell.

Hauptgrund dürfte der Einfluss des Rahmens sein, der eine bedeutende Rolle spielt, wie die ausführlichen Detailergebnisse der Strömungssimulationen zeigen.

Aus Bild 2c ergeben sich für eine glatte homogene Wand mit dem U-Wert des Rahmens (ca. $2 \text{ W/m}^2\text{K}$) in einem Abstand von 1m eine Geschwindigkeit von **0.17m/s** (Linie 3) und in einem Abstand von 2m etwa **0.12 m/s** (Linie 4).

Diese Werte sind wesentlich höher, aber noch nicht einmal ganz so hoch wie die gemessenen Werte. Offensichtlich sind die realen Verhältnisse komplizierter als die Voraussetzungen für das einfache Modell.



Bild 3a: Strömungsvisualisierung mit Rauch an Fassade Eschenbach.

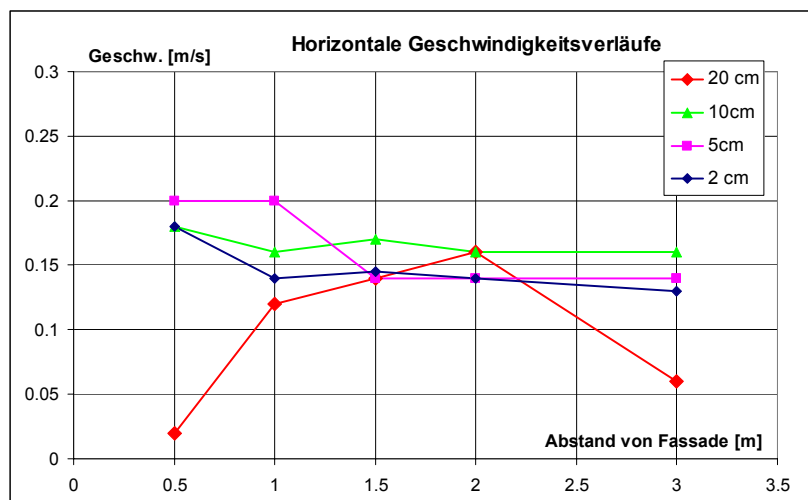


Bild 3b: Messungen auf verschiedenen Höhen am Messtag M4 im Schulhaus Eschenbach.

3.3 Direktvergleich mit Simulation

Bild 4a zeigt die Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs in einem Schnitt für eine Situation, die ähnlich ist wie bei Messtag M4 (Fall 8a, U-Wert Verglasung $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, U-Wert Rahmen $1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, Temperatur-Differenz 20 Grad).

Das Strömungsbild ist ähnlich dem theoretischen Grundverhalten, allerdings nimmt die Geschwindigkeit in der Tiefe des Raums wieder ab. Dies ist vorwiegend darauf zurückzuführen, dass an der Fassade nicht konstante Verhältnisse vorliegen, und die Geschwindigkeiten auch seitlich (d.h. in einer Richtung längs zur Fassade) nicht konstant sind, siehe Bild 4b.

Der mittlere Betrag der berechneten Geschwindigkeit stimmt mit den Messwerten gut überein.

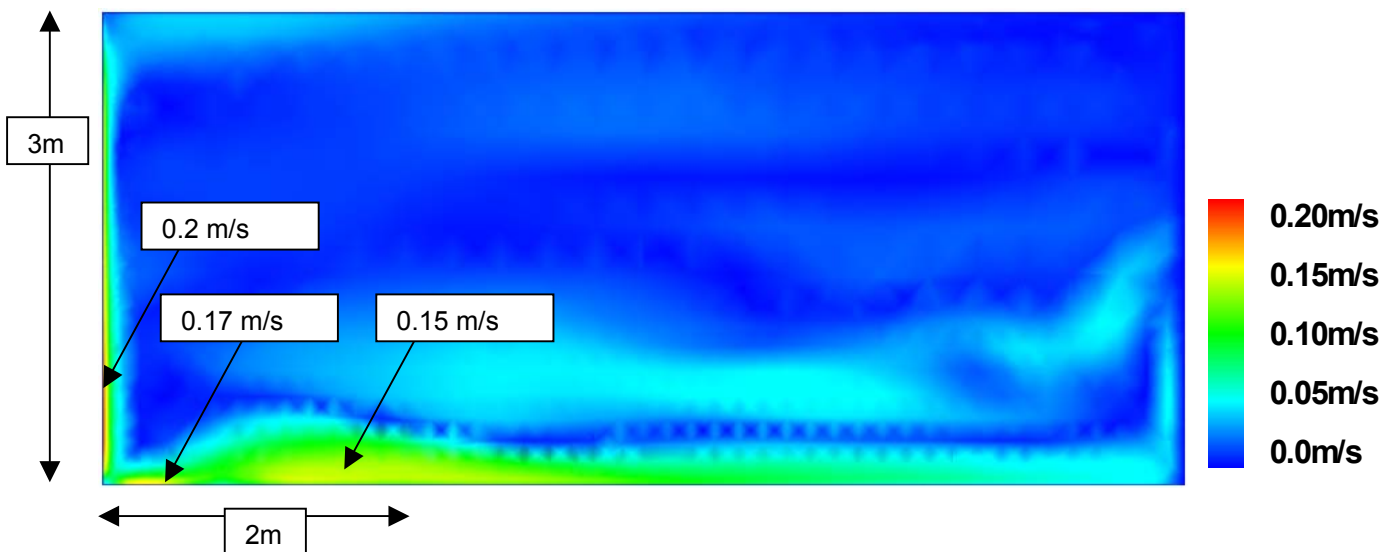


Bild 4a: Geschwindigkeitsverlauf in Schnitt vor dem Fenster (Fall 8a, U-Wert Verglasung $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, U-Wert Rahmen $1.7 \text{ W/m}^2\text{K}$, T-Differenz 20 Grad).

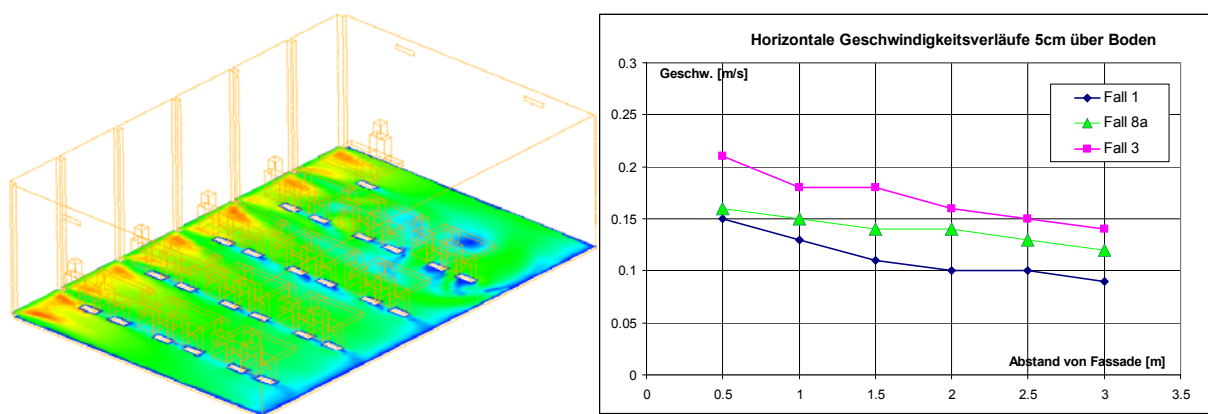


Bild 4b: Links: Inhomogene Geschwindigkeitsverteilung. Rechts: Geschwindigkeitsverlauf in verschiedenen Fassadenabständen für 3 Fälle, darunter Fall 8a (siehe Bild oben).

4 Übersicht Objekte

Die folgenden Objekte wurden für die Untersuchung ausgewählt:

4.1 Primarschulhaus Schwerzenbach ZH

Architekt: R. Leu, Wetzikon

HLK: Brunner Haustechnik, Wallisellen



Verglasung	Holzmetall Häring, Verglasung U-Wert 1.0 W/m ² K, g ca. 0.5
Höhen	Verglasung 2.93m, Raum 3.01m
Mech. Lüftung	Ersatzluftanlage (ca. 0.5-1-fach geschätzt)
Heizung	Bodenheizung, Konvektor unter Wandtafel

4.2 Primarschulhaus Eschenbach SG

Architekt: Chr. Kerez, Zürich

HLK: Kalberer & Partner, Bad Ragaz



Verglasung	U-Wert 1.1 W/m ² K, g=0.42 (Glas Trösch)
Höhen	Verglasung 2.86m, Raum 3.0m
Mech. Lüftung	keine (ausser in speziellen Räumen: Küche)
Heizung	Bodenheizung, etwas verstärkt vor Fassade

4.3 Kantonsschule Chur

Architekt: Bearth + Deplazes, ChurHLK:



Verglasung	Metallrahmen, Verglasung ca. $1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$, g ca. 0.5
Höhen	Verglasung 3.32m, Raum 3.32m
Mech. Lüftung	Keine
Heizung	Bodenheizung, etwas verstärkt vor Fassade

5 Ergebnisse Messungen

Strömungsverhältnisse wie nach Theorie wurden im ungestörten Fall (keine Besetzung, keine Heizmassnahmen) meistens auch vorgefunden. Unter diesen ungestörten Bedingungen sind auch die ungünstigen Auswirkungen auf den Komfort am grössten.

Heizmassnahmen führen allerdings zu Abweichungen von diesem Strömungsbild und weisen meist günstige Einflüsse auf den Komfort auf.

Generell gilt für die Messungen, dass es schwierig ist, einerseits gute und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen, andererseits auch quantitativ gut vergleichbare Ergebnisse in verschiedenen Räumen zu erreichen.

Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Strömungen doch relativ klein und von vielen Parametern stark abhängig sind, die im einfachen Modell nicht relevant sind. Dies sind:

- Einfluss der Rahmenkonstruktion, die von Fall zu Fall stark verschieden ist
- Nicht identische Aussentemperatur
- Nicht identische Innenbedingungen (Temperatur Boden, Wände)

Die Gründe für Abweichungen vom theoretisch zu erwartenden Strömungsbild sind vor allem bei geringen Temperaturunterschieden oft schwierig zu ermitteln.

Gemessen wurde aufgrund des Aufwandes in einer ausgewählten Messebene mitten vor einem Fenster; eine hohe Messdichte, um lokale Variationen im Rahmenbereich wie bei den Simulationen zu erfassen, lag ausserhalb des Möglichen.

5.1 Messungen Grundfall

Die folgenden Darstellungen zeigen Messungen (Messtag M4, Eschenbach) der Luftgeschwindigkeit vor der Fassade entlang der blauen Linie für ca. 22 Grad Temperaturunterschied zwischen innen und aussen.

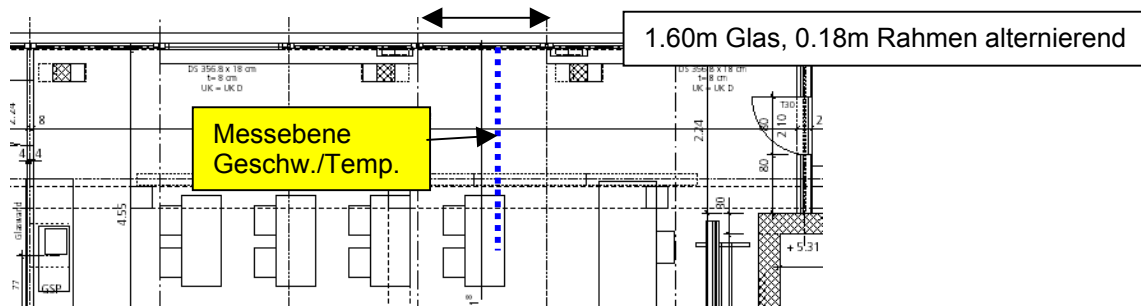


Bild 5: Schulzimmer Eschenbach: Raum 2.6.

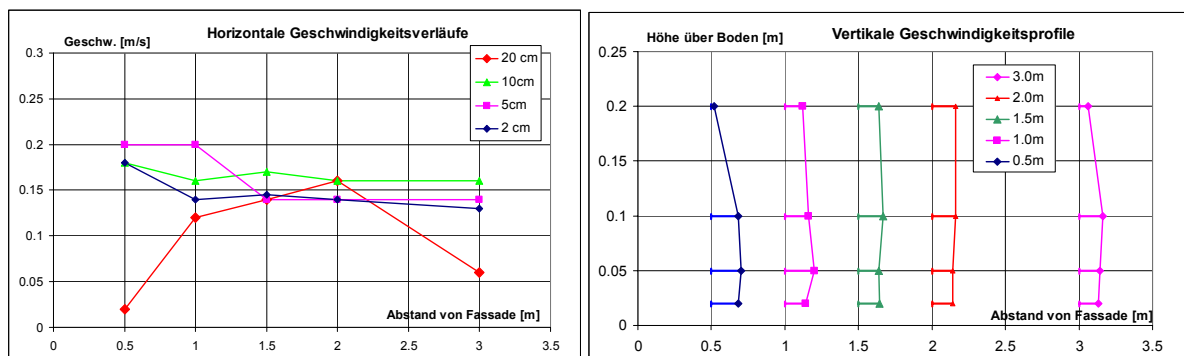


Bild 6: Links: Messungen auf verschiedenen Höhen. Rechts: Profile der Luftgeschwindigkeit in verschiedenen Abständen von der Verglasung. Messtag M4 Eschenbach.

Diese Werte sind höher als die theoretischen Werte für eine glatte homogene Wand: diese wären in einem Abstand von 1m 0.125 m/s und in einem Abstand von 2m etwa 0.09 m/s.

Die Werte sind teilweise über 0.15 m/s auch in einem Abstand von 2-3m und wären damit für hohe Ansprüche als nicht genügend zu taxieren, jedenfalls bei Temperaturen um 20°C. Die Unterschiede zum einfachen theoretischen Modell sind vermutlich hauptsächlich auf den Rahmenanteil zurückzuführen.

Der Turbulenzgrad war generell sehr gering (< ca.15%).

Diese Werte können als repräsentativ für eine Vollverglasung mit relativ guter Rahmenkonstruktion angesehen werden.

Bei noch tieferen Aussentemperatur (-10°C) sind noch etwas höhere Werte zu erwarten.

Mit ungünstigerer Rahmenkonstruktion sind deutlich höhere Werte zu erwarten.

5.2 Messungen mit schwacher Bodenheizung

Bei Aktivierung der Bodenheizung mit verstärkter Randzone (Raum 17-18°C, Randzone 21°C) waren die maximalen Geschwindigkeiten deutlich geringer: 0.1 – 0.12 m/s in 1-2m Abstand, kaum messbare weiter innen (Messtag M2, Eschenbach, Aussentemperatur ebenfalls -5°C).

5.3 Negativer Rahmeneffekt

Beim Schulhaus in Chur ist der Einfluss der Rahmenkonstruktion massiv. Die vorstehende Rahmenkonstruktion ist nicht von aussen isoliert, sondern weist durchwegs deutlich tiefere Oberflächentemperaturen auf.

So bilden sich auf Linie 2 in nebenstehendem Bild relativ starke Strömungen aus, die zwar im Messtag M3 wegen der aktivierten Bodenheizung (Raum 22°C, Randzone 24°C) nicht so stark ausfallen (max. 0.12-0.14 m/s, allerdings bis in 3m Abstand).

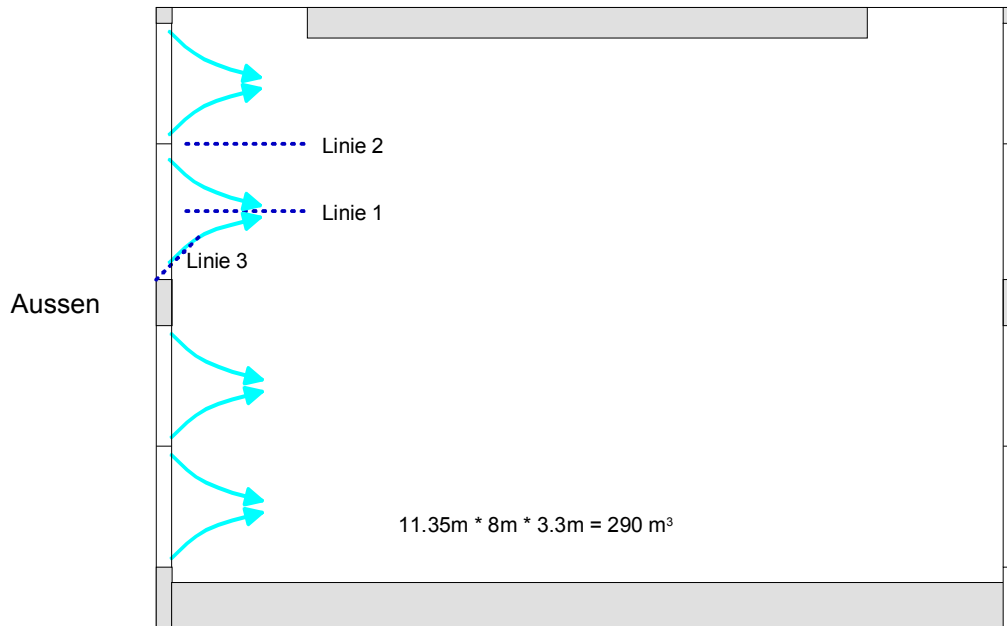


Bild 7: Verhältnisse Fassade in Schulhaus Chur, Grundriss.

5.4 Bei kleinem Temperaturunterschied nicht mehr relevante Strömungen

Am Messtag M6 bei einem Temperaturunterschied von nur noch 16 Grad, aber fast ohne Bodenheizung, waren die Geschwindigkeiten unter 0.05 m/s in Abständen > 1m, also problemlos.

5.5 Positiver Rahmeneffekt

Der Einfluss des Rahmens kann durchaus aus positiv sein. Für die Planung des neuen Schulhauses Albisriederplatz wurden Strömungsberechnungen durchgeführt, die zeigen, dass ein horizontales Schwert an der Fassade den Kaltluftabfall durch die Unterbrechung der vertikalen Strömung abmildern, und in Kombination mit einem vollbesetzten Schulzimmer sogar ganz gering wird (viele Wärmequellen führen zu einer Erwärmung der Glasoberfläche).

5.6 Verglasung übers Eck

Die Ecksituation mit lückenloser Verglasung oder sogar mit einem normalen Rahmen in der Ecke ist viel kritischer, und muss gesondert gelöst werden.

5.7 Besonderes aus der Praxis:

In der Praxis können auch Probleme auftreten, die mit den Fassadenparametern wenig zu tun haben, wie die folgenden Beispiele aus Schwerzenbach illustrieren.

- In einem Fall wurde der Fensteröffnungshebel als Taschenhalter zweckentfremdet benutzt. Dazu musste er allerdings umgelegt werden, sodass die Tür undicht wurde und durch den Spalt Kaltluft eintrat bei -5°C Aussentemperatur am Lehrerplatz!
- Weiter wurde von den Lehrern bemängelt, dass es im Sommer kalt sei. In diesem Fall ist das bestimmt darauf zurückzuführen, dass das Zuluftrohr vorn an der Decke angeordnet ist und im Sommer die kühle Frischluft nach unten fällt, direkt auf den Lehrerarbeitsplatz.

5.7 Einfluss interner Lasten

Interne Lasten (Personen, Computer) und Heizung haben verschiedene Einflüsse:

- Sie führen zu eigenen Auftriebsströmungen, die mit den andern Strömungen interagieren (Tendenz negativ für Komfort, da sie Luft ansaugen)
- Sie heben durch Strahlung die Fensteroberflächentemperatur an (positiv für Komfort)
- Sie erhöhen generell die Lufttemperatur an (positiv für Komfort)
- Wenn ein Radiator unten am Fenster platziert ist, kann er den Kaltluftstrom direkt beeinflussen (positiv für Komfort)

Die externe solare Last (direkt, aber auch indirekte Einstrahlung auf der Nordseite) wirkt im Winter positiv, da die Absorption die Oberflächentemperatur der Fenster anhebt.

Fazit Messungen

Die Messungen wurden in 3 unterschiedlichen Schulhäusern mit ca. 3m hohen Verglasungen (U-Wert 1-1.1 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) bei Temperaturdifferenzen zwischen 16 und 25 Grad zwischen innen und aussen durchgeführt.

- Die auftretenden Geschwindigkeiten aufgrund des Kaltluftabfalls an der Fassade sind etwas höher als die theoretischen Werte für glatte Wände mit der Temperatur der Glasoberfläche. Hauptverantwortlich dafür ist der Rahmenanteil, der sehr ungünstig sein kann.
- Schon eine Bodenheizung mit verstärkter Randzone bewirkt eine Reduktion der Luftgeschwindigkeiten.
- Problematischer als Fenster sind jedenfalls Rahmenkonstruktionen (typische U-Werte 1.7-2 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$), vor allem wenn sie eine Breite von 10cm oder mehr aufweisen.
- Bei 15 Grad Temperaturunterschied ohne Raumbesetzung ist die Kaltluftströmung von der Verglasung oft wenig ausgeprägt.
- Die Turbulenzgrade sind allgemein niedrig (<15-20%)
- Im Bereich von 1m Höhe sind die Geschwindigkeiten sehr gering (<0.05m/s), mit Schwankungen, da die Strömungen im Raum nicht stationär sind.

6 Strömungsberechnungen

Mithilfe numerischer Strömungsberechnung wurde die Komfortsituation für verschiedene Varianten analysiert und ebenfalls die Wirksamkeit diverser Massnahmen zur Behebung von Komfortproblemen bestimmt.

Für eine generische Untersuchung als Basis für verallgemeinerbare Empfehlungen wurden einige Varianten eines Klassenzimmer mit Möblierung, typischer Belegung, Lüftung usw., untersucht.

6.1 Geometriemodell

Das Bild 8a zeigt das Geometriemodell, welches anhand des untersuchten Schulraums im Schulhaus Schwerzenbach aufgebaut wurde. Es sind bei Vollbesetzung inkl. Lehrperson 25 Personen anwesend.

Raumgrösse 10.0m * 6.9m, Raumhöhe 3.01 m

Fläche 69 m² , Volumen 207 m³

Fensterhöhe 3.01 m, Rahmenbreite 0.10m, Rahmentiefe (in den Raum hinein) 0.15m

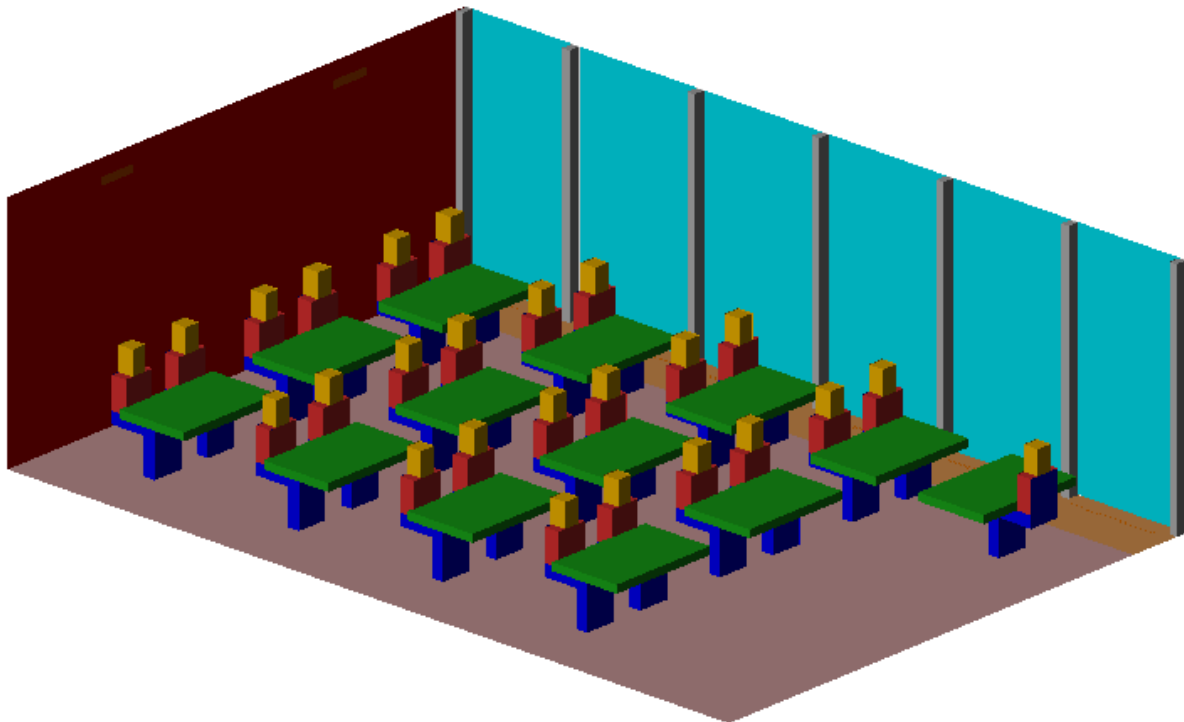



Bild 8a: Geometriemodell anhand Schulraum Schulhaus Schwerzenbach mit 25 Personen.

Bild 8b zeigt die 2 untersuchten Rahmenvarianten. Die Variante „Rahmen flach“ weist eine Fläche von 0.3 m² auf, die Variante „Rahmen eckig“ weist eine Fläche von 1.2 m² auf. Die U-Werte sind unterschiedlich angesetzt.

 Rahmen flach, 10cm breit


 Rahmen eckig, 10cm breit
15cm tief

Bild 8b: Rahmenvarianten flach oder eckig.

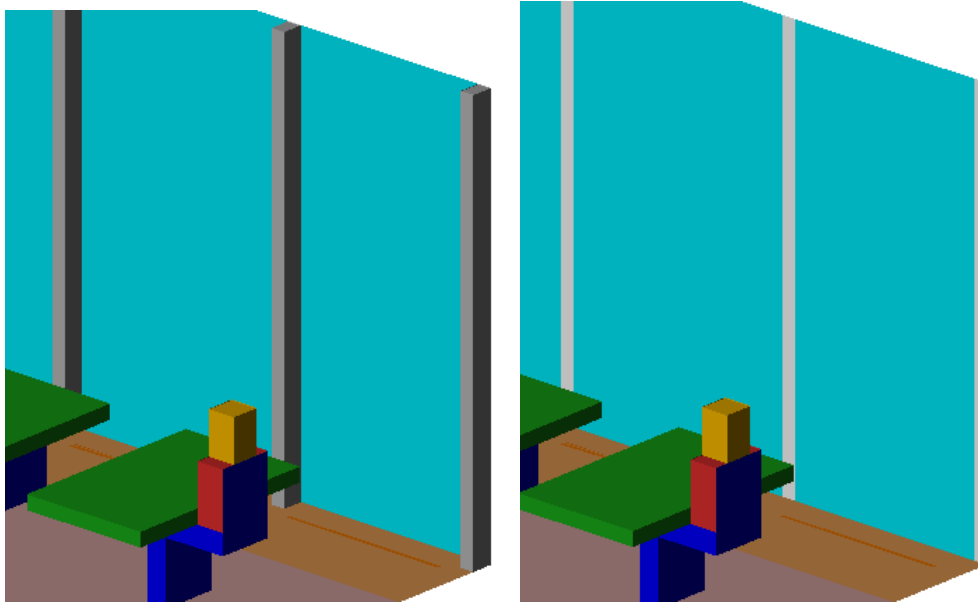


Bild 8c: Detail Fassade: Links mit quaderförmigem Rahmen in den Raum hinein, rechts flacher Rahmen.

6.2 Randbedingungen im Rechenmodell:

Untersuchte Einflussparameter

- Verlust Verglasung
- Verlust Rahmen
- Bodenheizung (allgemein, separat Streifen vor Fassade)
- Unbesetzter Raum, Vollbesetzung (0 oder 25 Personen)

Es wurden Fälle mit perfekt isoliertem Rahmen gerechnet, die den Einfluss der Verglasung allein aufzeigen. In der Realität sind natürlich immer die Kombinationen mit Rahmen relevant.

Fassadenparameter

Es wurden verschiedene Kombinationen der Eigenschaft der Verglasung und des Rahmens und der Aussentemperatur gerechnet.

Die folgenden Tabellen zeigen die Rechenparameter in der gelben Kolonne, sowie benachbart eine andere Parameterkombination mit demselben Wärmeverlust und demzufolge demselben Strömungsbild (dies gilt für die Fälle mit rechnerisch adiabatem, d.h. perfekt isoliertem Rahmen).

Das Rechenergebnis für die Variante $U=0.9 \text{ W/m}^2$ und einer Aussentemperatur von 0°C ist dasselbe wie für eine Verglasung von 0.62 W/m^2 bei einer Aussentemperatur von -10°C !!

	U-Wert/ATMP	U-Wert/ATMP	U-Wert/ATMP
Äquivalent:	2.0 / 10°C	1.1 / 0°C	0.7 / -10°C
Äquivalent:	1.65 / 10°C	0.9 / 0°C	0.62 / -10°C
Äquivalent:	1.5 / 0°C	1.1 / -10°C	
Äquivalent:	1.3 / 0°C	0.9 / -10°C	

Tabelle 1: Äquivalenz von Fassadenparametern und Aussentemperatur (=ATMP).

Typische Fassadenverluste mit Rahmen

Die folgenden ausgerechneten Beispiele zeigen, dass der Wärmeverlust des Rahmens ohne weiteres über 50% des Verlustes der Vollverglasung allein betragen kann.

Raumtemperatur 22.00 °C				
Verluste durch Fassade		Aussentemperatur		
		0	-10	
	Fläche	U-Wert	W	W
	m ²	W/m ² K		
Verglasung	27.9	1.1	675	982
Rahmen	2.1	2	92	134
Total			768	1116

Tabelle 2a: Beispiel für Fassadenverluste mit ebenem Rahmen, **Breite je 10cm**. Gesamtoberfläche bei 3m Höhe 0.3 m² pro Rahmen, total 2.1 m².

Raumtemperatur 22.00 °C					Raumtemperatur 22.00 °C				
Verluste durch Fassade		Aussentemperatur			Verluste durch Fassade		Aussentemperatur		
		0	-10				0	-10	
	Fläche	U-Wert	W	W		Fläche	U-Wert	W	W
	m ²	W/m ² K				m ²	W/m ² K		
Verglasung	27.9	1.1	675	982	Verglasung	27.9	1.1	675	982
Rahmen	8.4	2	370	538	Rahmen	8.4	1.7	314	457
Total			1045	1520	Total			989	1439

Tabelle 2b: Beispiel für Fassadenverluste mit quaderförmigem Rahmen, Breite je 10cm, Tiefe im Raum 15cm, Länge Abwicklung im Raum 0.4m, Gesamtoberfläche bei 3m Höhe 1.2 m² pro Rahmen. Links mit U-Wert Rahmen von 1.7 W/m²K, rechts mit 2.0 W/m²K.

Typische interne Lasten

Die internen Lasten sind unabhängig von der Aussentemperatur und können sehr hohe Werte erreichen. Dies hat im Sommer erhöhte Raumtemperatur zur Folge, ebenso im Winter, wenn die Raumheizung nicht abgestellt wird.

Nachteilig ist die Tatsache, dass bei abgestellter Fassadenheizung (falls vorhanden) der Kaltluftabfall wieder auftritt.

Interne Lasten (unabh. Von Aussentemperatur)				Interne Lasten (unabh. Von Aussentemperatur)			
	W	Anzahl		W	Anzahl		
Menschen	70	0	0	70	25	1750	
Computer	70	0	0	70	0	0	
Monitor	40	0	0	40	0	0	
Heizung	0	0	1000	0	0	0	
Licht	10 W/m ²	690	0	10 W/m ²	690	1	690
Total			1000	Total			2440

Tabelle 2c: Beispiele für interne Lasten

Weitere Einflussparameter:

Nicht speziell untersucht wurde

- Einfluss der Beleuchtungssysteme
- Einfluss des Lüftungssystems

6.2 Resultate

- Ohne Heizmassnahmen tritt ein Kaltluftabfall auf. Das Profil ist vergleichbar mit der theoretischen Form (Verdickung und Verlangsamung der sich dem Boden entlang bewegenden Schicht).
- Die Strömung ist aufgrund der Anwesenheit des Rahmens nicht homogen, sondern verstärkt im Rahmenbereich (Bild oben), schon bei isoliertem Rahmen.

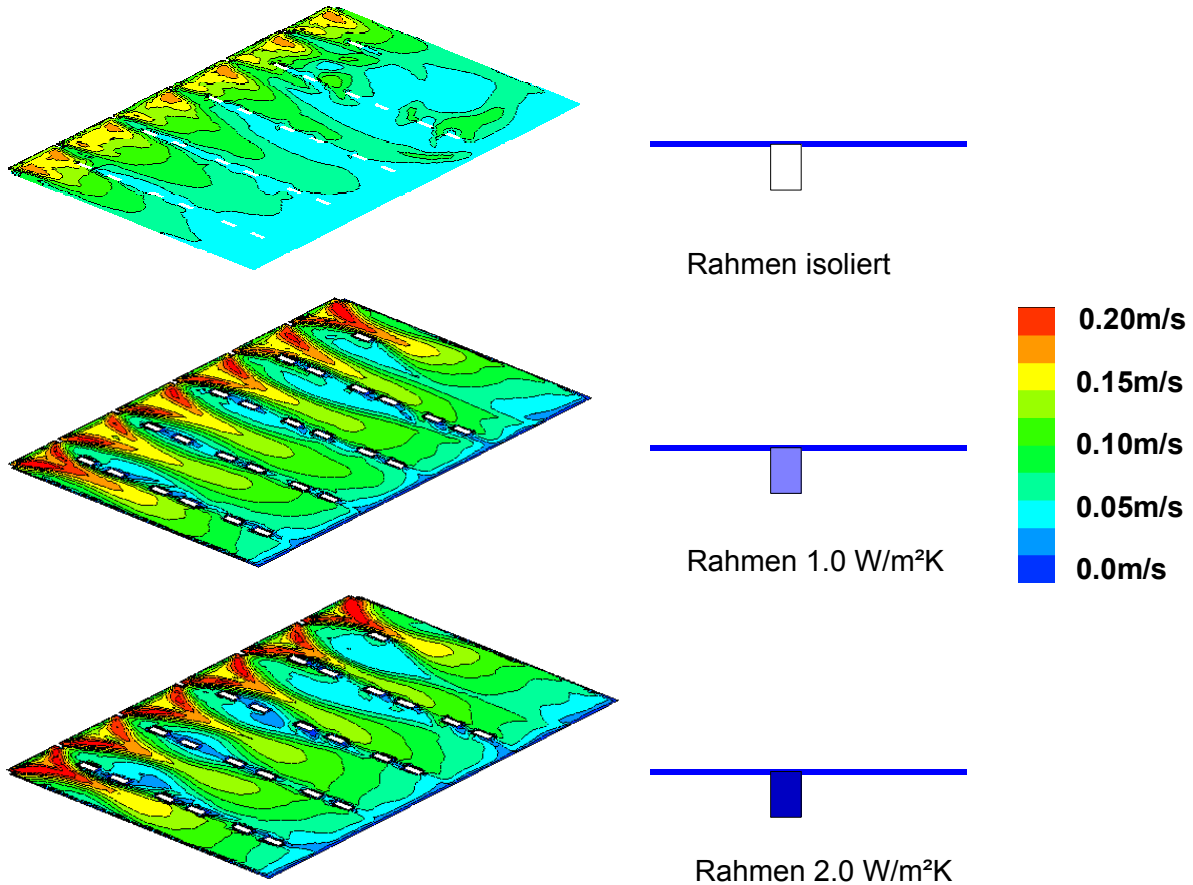


Bild 9: Geschwindigkeiten für Fassade mit verschiedenen Rahmenparametern (U-Wert Glas 1.1 W/m²K, Aussentemperatur -10°C).

- Das Strömungsbild ist ähnlich dem theoretischen Grundverhalten, allerdings nimmt die Geschwindigkeit in der Tiefe des Raums wieder ab. Dies ist vorwiegend darauf zurückzuführen, dass an der Fassade nicht konstante Verhältnisse vorliegen, und die Geschwindigkeiten auch seitlich (d.h. in einer Richtung längs zur Fassade) nicht konstant sind, siehe Bild 11.

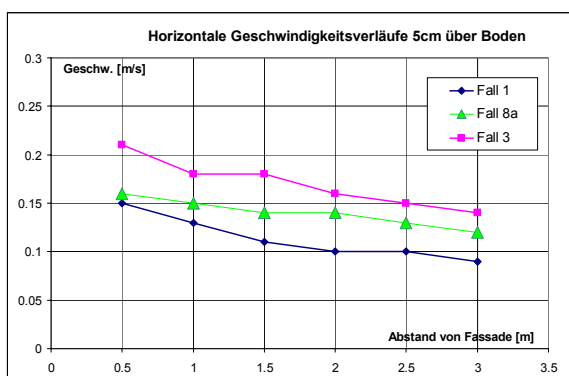


Bild 10: Geschwindigkeitsverlauf in verschiedenen Fassadenabständen für 3 Fälle.

- In Abhängigkeit von tieferer Aussentemperatur oder U-Wert der Verglasung ergibt sich eine Abhängigkeit, die gut mit dem einfachen Modell übereinstimmt. Der Absolutwert ist jedoch stark abhängig von der Wechselwirkung mit den Rahmenparametern. Hier kann keine allgemeine Regel abgeleitet werden.
- Für die Kombination verschiedener Effekte oder der Einfluss der geometrischen Anordnung (Rahmenkonstruktion), die von der glatten Wand abweicht, ist eine 3-dimensionale CFD-Simulation angebracht.
- Mit einem ungünstigen Rahmen kann der Kaltluftabfall geradezu dominiert werden (siehe Bild 11), wie folgende Gegenüberstellung einiger illustrativer Beispiele zeigt. Es ist jeweils eine mittlere Linie eines PD von 10% eingezeichnet (siehe dazu mehr im Abschnitt 7 Komfortdiskussion).

PD Prozentsatz Unzufriedener mit Berücksichtigung, dass PD minimal 5% ist.

Glas: $U=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$

Aussentemperatur 0°C

Aussentemperatur -10°C

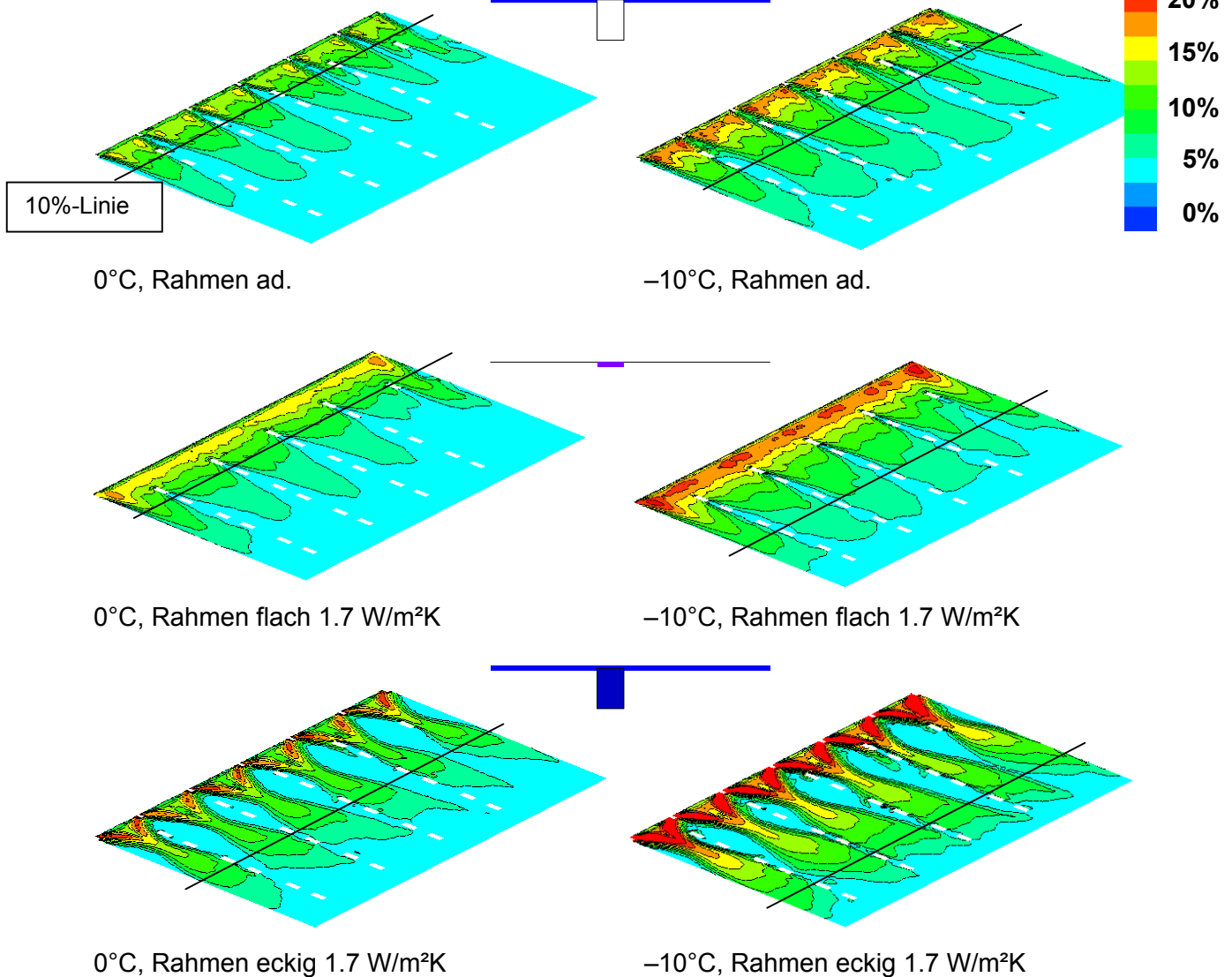


Bild 11: PD unzufriedener Personen für verschiedene Fälle, alle mit U-Wert Verglasung 1.1 W/m^2 . Rahmenfläche „flach“ 0.3 m^2 , „eckig“ 1.2 m^2 pro Rahmen. Raumtemperatur 20°C .

- Einen wesentlichen Einfluss auf die zulässigen Geschwindigkeiten hat die Raumtemperatur. Wie Bild 12 zeigt, ist der Unterschied zwischen Raumtemperatur 20°C und 24°C gross. Der Temperaturunterschied zwischen innen und aussen ist bei diesen Fällen gleich; so konnte dasselbe Berechnungsergebnis zugrundegelegt werden. Der dominante Einfluss auf den PD-Wert ist jedenfalls die Raumtemperatur.

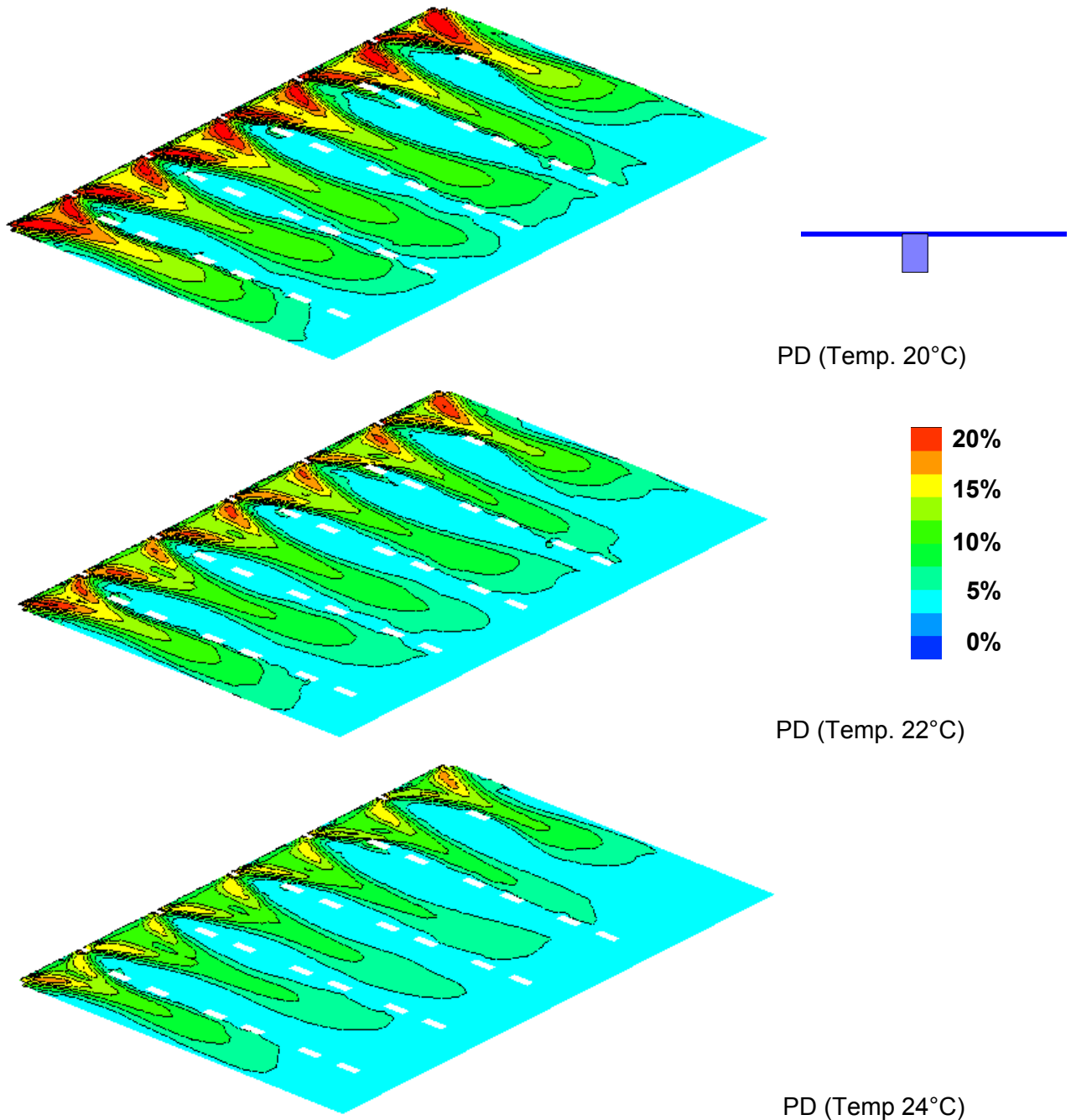
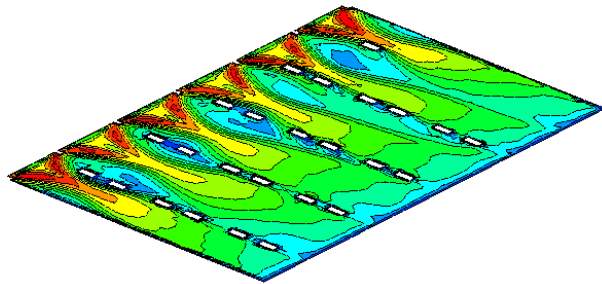


Bild 12: PD unzufriedener Personen bei gleichem Strömungsbild (Fall 3), aber um je 2 Grad unterschiedlicher Lufttemperatur.

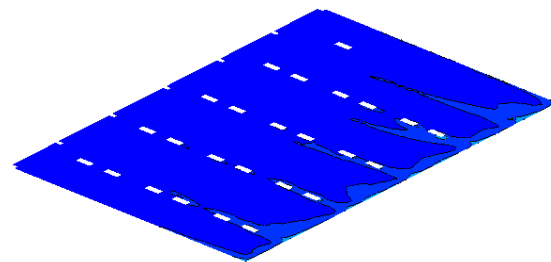
- Mit hohen internen Lasten (Personen, Computer usw.) wird die Kaltluftströmung nicht wesentlich reduziert. Sie wird ein wenig verändert, im Fensterbereich eher ein bisschen verstärkt. Es tritt zwar eine Erwärmung der Scheiben auf, allerdings steigt aber das gesamte Temperaturniveau. Die Temperaturdifferenzen werden dadurch nicht geringer. Die Wirkweite in den Raum hinein wird reduziert, da die internen Wärmelasten die Luft ansaugen.

Die Bildreihe unten zeigt den Einfluss auf den PD-Wert; die Komfortwerte sind etwas günstiger primär aufgrund der angestiegenen Temperatur.

Unbesetzt



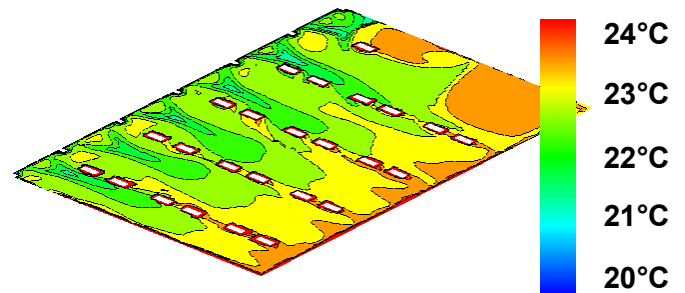
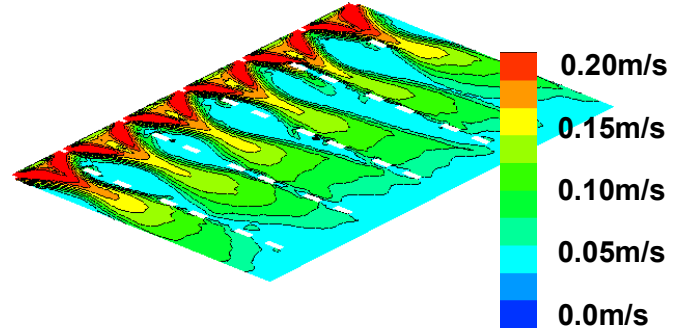
Geschwindigkeiten im Fussbereich



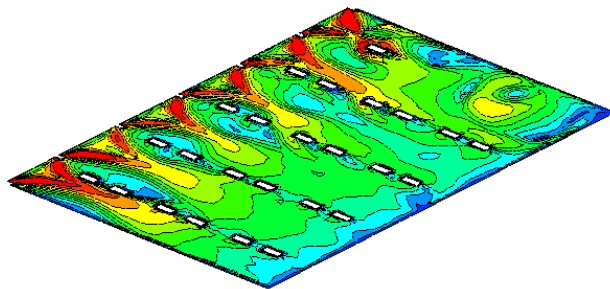
T=19-20°C

Temperaturen im Fussbereich

Mit Vollbesetzung/interne Wärmelasten (1750 W)



T=22-23.5°C



PD Unzufriedener im Fussbereich

Aussentemperatur -10°C, Rahmen 1.7 W/m²K eckig (Fläche 1.2 m² pro Rahmen)

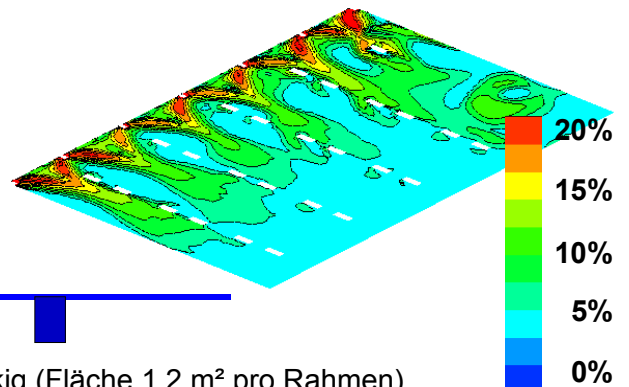


Bild 13: Geschwindigkeiten, Temperaturen und PD unzufriedener Personen bei gleicher Fassade, links ohne interne Wärmelasten (Fall 8c), rechts mit Vollbesetzung (1750 W, Fall 8d).

- Eine Bodenheizung mit einer Leistung von 50% des Fassadenverlusts reduziert den Kaltluftabfall auch nicht, trotz Beheizung der Scheiben bei verstärkter Heizung im Fensterbereich. Die gemessenen Phänomene können mit dem Rechenmodell nicht genau wiedergegeben werden. In der Realität sind möglicherweise die Temperatur-Randbedingungen im Raum komplexer.
- Fall 7 zeigt, dass die Bodenheizung in diesem Fall die Strömung umzukehren vermag (Verlust Fassade = -300 W, Heizleistung = ca. 390 W)

Bei Heizmassnahmen (Bodenkonvektor, freistehender Radiator) ist zu beachten, dass diese Massnahmen sehr oft nur beim Glasbereich angebracht werden, wo sie zwar nützlich sind, jedoch die grössten Verursacher des Kaltluftabfalls, nämlich den Rahmen nicht beeinflussen!

Am besten sind lokale Heizmassnahmen, d.h. Konvektoren. Die Problematik liegt darin, dass die Heizung umso weniger läuft, je höher die internen Lasten sind (Personen, Computer), da ein Heizbedarf nicht mehr nötig ist.

Einflüsse auf Kaltluft/Komfort

Primär PD aufgrund Luftzug mit Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Turbulenzgrad.

Sekundär Strahlungstemperatur der benachbarten Oberflächen. Bild 14 zeigt die um 2 Grad tiefere Strahlungstemperatur am Fenster für Fall 2 (-10°C , U-Wert $0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$).

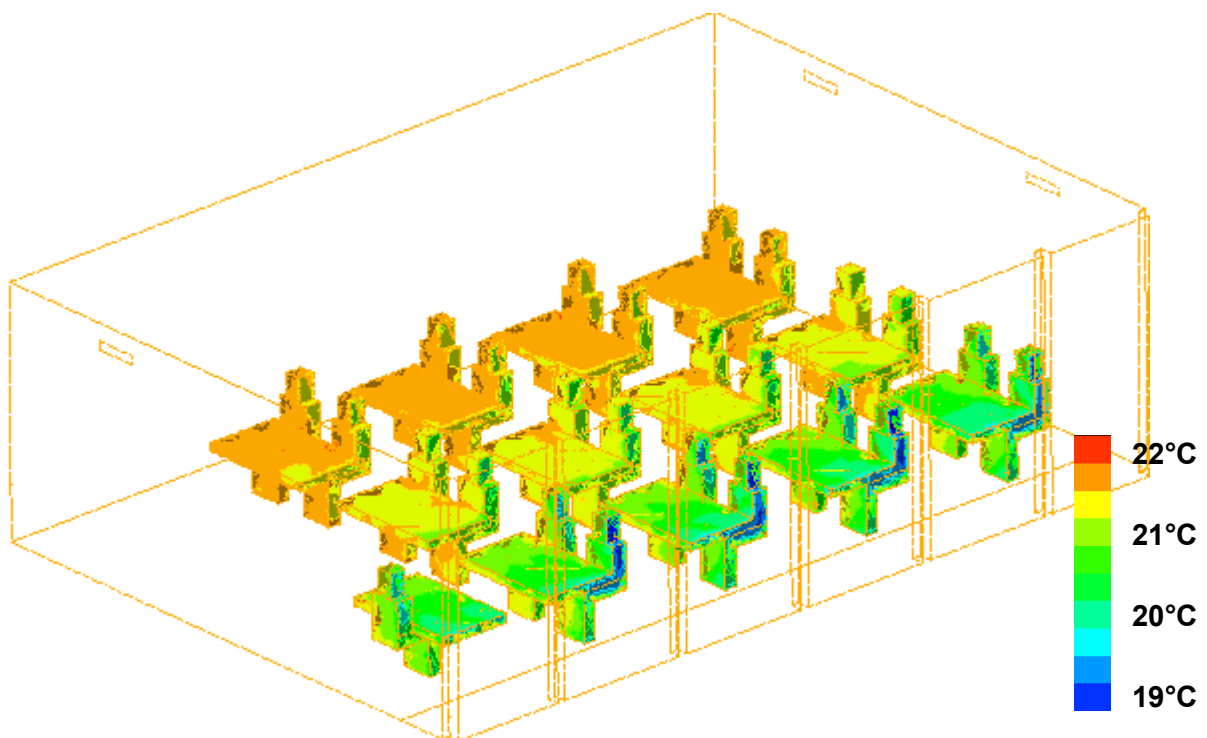


Bild 14: Oberflächentemperatur adiabater Körper = Mittlere Temperatur zwischen Strahlungstemperatur und Lufttemperatur (Fall 2) 19 .. 22°C. Fassade rechts.

Hinweise auf allgemeine Fragen

Optimale Luftführung

- Eines der untersuchten Schulhaus weist eine Hygienelüftung auf. Die Luftführung hat eine gewisse Bedeutung, sie sollte nicht parallel zur bestehenden Kaltluftströmung verlaufen, damit diese Strömung nicht noch angetrieben wird. Am besten ist eine gegenläufige Bewegungsrichtung. Eine reine Hygienelüftung dürfte nicht problematisch sein, wenn nicht zu kleine Düsen verwendet werden und die Luft mit nicht zu grosser Geschwindigkeit (<0.15 m/s) in den Aufenthaltsbereich von Personen gelangt
- Die Zulufttemperatur darf keinesfalls zu tief sein (minimal 20°C), wenn die Luft ohne grössere Mischung in den Aufenthaltsbereich von Personen gelangt. Beim Schulhaus Schwerzenbach hörten wir Klagen über den Sommerfall, da kalte Luft über die Zuluftöffnungen oberhalb der Wandtafel unter der Decke in den Aufenthaltsbereich von Personen nach unten fällt. Hier sind die Luftgeschwindigkeiten beim Zuluftauslass zu klein, sodass zuwenig Mischung durch Induktion stattfinden kann.

Optimales Heizsystem

- Zwei der untersuchten Schulhausbauten weisen eine Bodenheizung auf. Dieses ist nicht unbedingt das beste Heizsystem für ein Schulhaus, allerdings spielen bei einer Beurteilung verschiedene Faktoren mit, die hier nicht alle erschöpfend dargestellt werden können. Nachteilig ist sicher die Trägheit, d.h. das langsame Ansprechen auf eine Änderung. Aus diesem Grund musste auch die Bodenheizung 1-2 Tage vorher abgestellt werden, um ohne Heizeinfluss messen zu können.
- Eines der Schulhäuser weist einen Radiator mit hohem Konvektionsanteil unter der Wandtafel auf. Grundsätzlich wäre eine Heizmassnahme viel besser am Fassadenfuss platziert, damit den Kaltluftabfall entgegengewirkt werden kann.
- Generell sind lokale Heizmassnahmen an der Fassade am besten, d.h. Konvektoren. Die Problematik liegt darin, dass die Heizung umso weniger läuft, je höher die internen Lasten sind (Personen, Computer), da ein Heizbedarf nicht mehr nötig ist.

7 Bewertung Komfort

7.1 Allgemeines zum Komfort

Die Komfortbewertung auf Basis statistischer Auswertungen hat schon eine über 30-jährige Geschichte und geht auf die PMV/PPD-Bewertung nach ASHRAE zurück (Parameter: Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Geschwindigkeit, Bekleidung, Tätigkeit, Feuchte), aus der Zeit vor Fanger. Diese ist relativ einfach zu erfüllen.

Fanger hat wesentliche Erweiterungen entwickelt, vor allem die Berücksichtigung von Luftgeschwindigkeit, Turbulenz und Lufttemperatur in der PD-Skala für Luftzugsrisiko, die zusätzlich bewertet werden muss und strenger zu erfüllen ist als die PPD-Anforderung.

Weitere Komfortanforderungen sind vertikaler Gradient, Strahlungsasymmetrie u.a. (siehe Anhang Komfort).

Alle Komfortbedingungen müssen im Bereich des ganzen Körpers eingehalten werden, d.h. an Füssen, Beinen, Rumpf und Kopf. Bezüglich Kaltluftabfall sind die Füsse klar am kritischsten, weil im Fussbereich die tiefsten Temperaturen und die höchsten Geschwindigkeiten auftreten.

7.2 Primärer Komfortfaktor PD-Skala für Luftzugsrisiko

Primär wird diese PD-Skala für Luftzugsrisiko herangezogen zur Komfortbewertung. Folgender formelmässige Zusammenhang resultierte aus Fangers Untersuchungen:

$$PD [\%] = (34-T) (v-0.05)^{0.62} (0.37 v Tu + 3.14)$$

mit Lufttemperatur T , mittlerer Geschwindigkeit v und Turbulenzgrad Tu .

Der Turbulenzgrad Tu ist definiert als Verhältnis zwischen Standardabweichung S_v (mit fluktuierender Geschwindigkeit v') und Mittelwert der Geschwindigkeit $\langle v \rangle$:

$$Tu [\%] = 100 S_v / \langle v \rangle, \text{ mit } S_v = (v'^2)^{0.5}$$

Der Turbulenzgrad Tu kann auch durch die turbulente kinetische Energie k ausgedrückt werden, welche bei Strömungsberechnungsprogrammen benutzt wird:

$$Tu [\%] = 100 * (2k)^{0.5} / \langle v \rangle$$

7.3 Oberflächentemperatur der Fassade

Am zweitkritischsten ist die innere Oberflächentemperatur der Fassade (wegen den Strahlungsverlusten von Personen), die bei der 2-fach-Verglasung bei Aussentemperatur – 10°C auf max. 4 Grad unter der Raumtemperatur liegt, im Rahmenbereich bei einem U-Wert von 2 W/m²K jedoch 10 Grad unter der Raumtemperatur liegen kann. Die Verglasung ist bei Raumtemperaturen von 22°C oder höher weniger problematisch, mehr jedoch der Rahmen, vor allem wenn er grossflächig ist.

Es ist mehr das tiefere Temperaturniveau an sich, welches zu den beobachteten Komfortproblemen führt, als die Temperaturasymmetrie.

7.4 Schwellwert für Akzeptanz

Der Knackpunkt bei allen Komfortbewertungen ist aber die Frage des Massstabes, d.h. welcher Prozentsatz unzufriedener Personen akzeptiert wird, oder wo eben der Schwellwert gelegt wird.

Bekanntlich ist es ja nicht möglich, aufgrund unterschiedlicher Empfindungen von „warm“ und „kalt“ alle Personen zufriedenzustellen; dies ist im theoretischen Optimum, bzw. des Minimums des PPDs oder PDs von 5% (und nicht 0%) berücksichtigt.

Im CEN Report CR 1752 ist folgender Vorschlag mit 3 Komfortklassen A, B und C enthalten:

Komfortkategorie	PPD (Wärmezustand)	PD (Luftzugsrisiko)	PD (Vert. Gradient)	PD (Strahlungs- asymmetrie)
A (hoch)	< 6%	< 15%	< 3%	< 5%
B (mittel)	< 10%	< 20%	< 5%	< 5%
C (tief)	< 15%	< 25%	< 10%	< 10%

Tabelle 3a: Komfortklassen nach CR 1752.

Für die SIA-Norm 382/1 von 1999 wurde für höchste Ansprüche (z.B. Bürotätigkeit) ein **PD-Wert von 10%** angesetzt. Dies ist eine strengere Anforderung, der ebenfalls für das SIA-Merkblatt 2021 übernommen wurde.

Der Grund für die strengere Anforderung liegt in der folgenden Überlegung: Ein PD von 15% bedeutet, dass 3 von 20 Personen sich beklagen (oder 15 von 100). Dies ist ein hoher Wert, der von den meisten Bauherren nicht erwünscht ist. 10% heisst: 2 von 20 (oder 10 von 100) beklagen sich und ist ein wesentlich besserer Wert, faktisch sogar „doppelt so gut“, wenn man

bedenkt, dass ein besseres Ergebnis als 5% gar nicht erzielt werden kann (5% sind immer unzufrieden).

Im Entwurf der neuen SIA-Norm 382/1 (Juli 2004 in der Vernehmlassung) wird neu ein **PD-Wert von 13%** als Akzeptanzkriterium für höchste Ansprüche vorgeschlagen, als Kompromiss, da es oft sehr schwierig ist, ein PD von 10% zu erreichen.

Die SIA 180 (von 1999) hat hingegen nur einen relativ schlechten Wert von PD=20% gefordert.

Die Komfortfrage wird unter den beiden Kriterien 10% und 13% diskutiert. Bild 15 zeigt die zulässigen Geschwindigkeiten für PD 10% und 13% bei verschiedenen Turbulenzgraden und Raumtemperaturen. Die Diskussion bezieht sich immer auf einen angenommenen Turbulenzgrad von 20%.

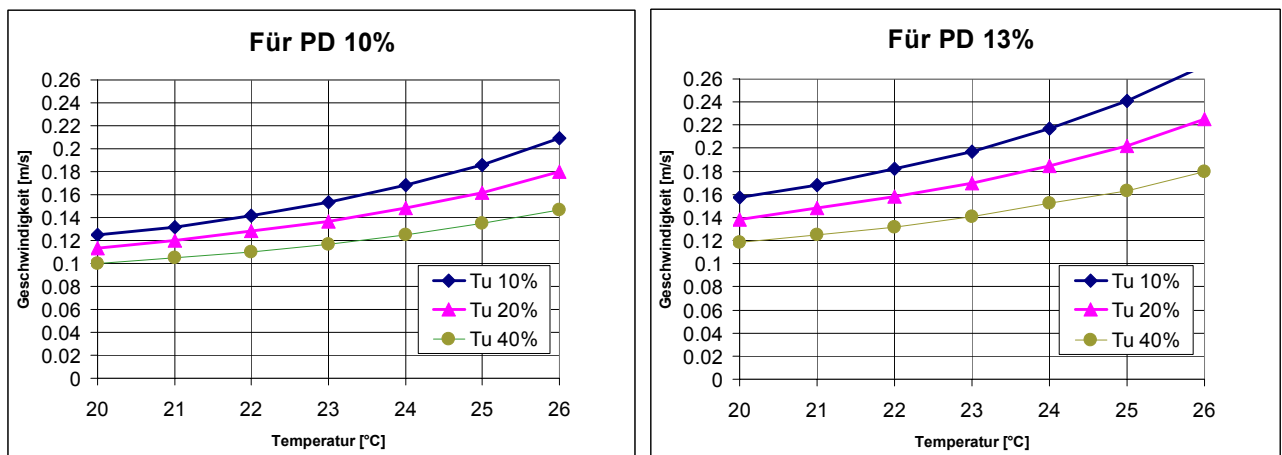


Bild 15: Zulässige Geschwindigkeiten bei Turbulenzgrad 20% und 40% für Komfortkriterium PD=10% (links) und PD=13% (rechts).

Dies bedeutet folgendes für die Luftgeschwindigkeiten im Bodenbereich:

Für eine Innentemperatur von 22°C erhalten wir bei einem Turbulenzgrad von 20% (mittlere Kurven) beim strengeren Kriterium **PD=10%** eine **zulässige Geschwindigkeit von 0.123 m/s** und beim Kriterium **PD=13%** eine **zulässige Geschwindigkeit von 0.16 m/s**.

Bei einer höheren Raumtemperatur werden die zulässigen Geschwindigkeiten grösser, bei tieferen kleiner. Das SIA-Merkblatt 2021 geht von einer Raumtemperatur von 20°C aus.

Der Unterschied zwischen 10% und 13% ist allerdings nicht zu vernachlässigen (10 oder 13 Klagen bei minimal 5 Klagen auf 100 Personen).

Ich schlage hier folgende Komfortbewertung vor, wobei nur der PD aufgrund Luftzug im vorliegenden Fall von Bedeutung ist, da die andern Komfortparameter problemlos eingehalten werden können:

Komfortstufe	PD (Luftzugsrisiko)	PPD (Wärmezustand)	PD (Vert. Gradient)	PD (Strahlungsasymmetrie)
1 Sehr gut	< 10%	< 6%	< 3%	< 5%
2 Mittel/gut	10–15%	< 8%	< 3%	< 5%
3 Mässig	15–20%	< 10%	< 5%	< 5%
4 Tief	>20%	< 15%	< 10%	< 10%

Tabelle 3b: Vorschlag Komfortklassen.

Man kann nun darüber diskutieren, ob in einem Schulzimmer die höchste Komfortstufe, die man sicher einem Büroarbeitsplatz zugesteht, gewährleistet werden soll, oder nur die

zweithöchste. Tatsache ist sicher, dass der Lehrerarbeitsplatz meist in Fensternähe angeordnet ist, und dass das Komfortgefühl des Lehrers oder der Lehrerin sicher einen wichtigen Einfluss auf die Meinungsbildung der Benutzerzufriedenheit hat.

Ich tendiere dazu, das Erreichen der Komfortstufe 1 gemäss obiger Tabelle anzustreben, einen PD-Wert von 12-13% minimal zu empfehlen, und PD-Werte von 15% oder höher für ein Schulzimmer als ungenügend zu bewerten.

7.5 Diskussion 1 auf Basis der Messungen

Die Werte von Messreihe M4 (bis 0.16 m/s) in Bild 6 liegen bei einer Raumtemperatur von 22°C (Messtag ohne Personen) damit beim PD-Kriterium von 13% gerade noch im akzeptablen Bereich (siehe Bild 8).

Bei einer Aussentemperatur von -10°C ist aber eine Geschwindigkeit von mindestens 0.2 m/s zu erwarten und damit wird der Komfort ziemlich schlecht (PD 17%)

Ebenso ist der Komfort klar ungenügend bei tieferen Raumtemperaturen. Bei 20°C sind nur noch 0.12 m/s zulässig und der PD wird 15.4% bei 0.16 m/s.

Zusatzmassnahmen führen hier zu Verbesserungen.

Erhöhung der Raumtemperatur

Dies verbessert das Komfortempfinden bei ansonsten gleicher Raumluftrömung mit Kaltluftabfall.

Heizung am Rand

Am wirksamsten ist eine lokale Heizung (freistehender Fensterradiator oder Bodenkonvektor). Damit kann der Kaltluftabfall selbst behoben werden.

Die Messungen bei Fussbodenheizung mit verstärkter Randheizung zeigen, dass bei Aussentemperaturen um 0°C die Randheizung je nach Stärke sogar ein lokales Aufsteigen der Luft bewirken kann und damit ein Ausbleiben kalter Bodenströmungen.

Der Einsatzbereich dieser Heizmassnahmen ist leider beschränkt, da bei Vollbesetzung schon ohne Heizung die Raumtemperatur ansteigt, und die Heizung eigentlich nicht läuft.

Effekt der Vollbesetzung

Bei Vollbesetzung sind günstigere Bedingungen zu erwarten, da das Raumtemperaturniveau generell leicht ansteigt. Zwar steigen auch die Temperaturen der Fassadenoberflächen durch Strahlungsaufnahme an, doch bleiben die Temperaturdifferenz und die Kaltluftströmungen im Fassadenbereich gleich. Die Wirkweite in den Raum hinein wird reduziert, da die internen Wärmelasten die Luft ansaugen. Eine Verstärkung des Kaltluftabfalls infolge verstärkter Raumwalze ist nicht eindeutig festzustellen.

Besserer Komfort wird primär durch die höhere Raumtemperatur erreicht.

Verbesserung der Fassade

Über U-Wert Verglasung, Konstruktion und U-Wert Rahmen, siehe Diskussion 2

7.6 Diskussion 2 auf Basis der Strömungsberechnungen

Die untersuchten Fälle zeigen einige Abhängigkeiten und Variationen, siehe Bild 11).

- Bei Berücksichtigung des Rahmens ist eine gute Übereinstimmung mit den Messungen vorhanden, besser als mit dem Heiselberg-Modell, welches für eine idealisierte Wand ohne Rahmeneffekte gilt.
- Ein U-Wert der Verglasung allein von ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ohne Einfluss des Rahmens) liefert gute Komfortbedingungen bei einer Aussentemperatur von 0°C , d.h. PD max. 10% für einen Abstand $> 1\text{m}$ (Komfortstufe 1).
- Für tiefere Aussentemperaturen und U-Wert von ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ wird der ungünstigere Komfortbereich zunehmend grösser. Bei -10°C ist bis mindestens 3m Abstand mit PD $>10\%$ zu rechnen (Komfortstufe 2).
- Ein U-Wert der Verglasung allein von ca. $0.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ (ohne Einfluss des Rahmens) liefert dieselben guten Komfortbedingungen bis zu einer Aussentemperatur von -10°C , d.h. PD max 10% für einen Abstand $> 1\text{m}$ (Komfortstufe 1).
- Der Rahmen führt je nach Ausführung zu stark ungünstigeren Bedingungen (Komfortstufe 2 bis 3).
- Direkte Einflussfaktoren, mit denen die Komfortbedingungen verbessert oder verschlechtert werden können, sind:
 - Der U-Wert an sich (Material, Aufbau); mit einem Holzrahmen für grosse Fenster ist ein Wert von $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ möglich, üblich sind 1.7 oder $2 \text{ W/m}^2\text{K}$.
 - Die Fläche des Rahmens, soll so klein sein wie möglich, damit der im Vergleich zum Glas ungünstigere Wert wenig Einfluss hat
 - Die dreidimensionale Ausgestaltung des Rahmens: oft ragt die Rahmenkonstruktion über 20cm in den Raum hinein, ist 50cm breit oder mehr und enthält noch einen Lüftungsflügel mit noch grösserem U-Wert als $2 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- Der Fall der Vollbesetzung wird etwas günstiger, primär aufgrund der erhöhten Raumtemperatur.
- Eine hohe Relevanz hat aber der untersuchte unbesetzte Fall jedenfalls, da der schwach besetzte Fall, der ähnlich dem unbesetzten ist, häufig vorkommt: Unterricht in Kleingruppen, Arbeitsgruppen, oder Vorbereitungsarbeiten des Lehrers allein.
- Lokale Heizmassnahmen an der Fassade ermöglichen gute Komfortwerte auch bei U-Wert von ca. $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ und tiefer Aussentemperatur (-10°C). Wie erwähnt kommt dieser Vorteil bei hohen internen Wärmelasten nicht zum Tragen, da die Heizung dann nicht mehr läuft.

7.7 Statistische Bewertung über den Winterverlauf

Die Resultate laufen tendenziell darauf hinaus, dass eine Verglasung im Bereich $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ genügende Komfortwerte bei ca. 0°C aufweist, hingegen deutlich ungenügend aber bei -10°C ist. Zur Bewertung ist es wichtig zu wissen, wie häufig diese kalten Situationen vorkommen.

Tabelle zeigt die entsprechende Auswertung der DRY-Daten der Meteostation Zürich-SMA. Dargestellt sind die Vorkommen verschiedener Temperaturbereiche jeweils von 8-18 Uhr über das ganze Jahr. Tage unter 0°C kommen in 5 Monaten vor, von November bis März.

335 Stunden sind unter 0°C . Die Prozentzahlen der Vorkommen kalter Tage sind bezogen auf alle Stunden von 8-18 Uhr in den erwähnten 5 Kältemonaten (150 Tage zu 10 Std. = 1500 Std.).

335 Stunden (22.3%) sind unter 0°C, davon 72 Stunden unter –4°C, davon wiederum 16 Stunden unter –8°C. Diese letzten 16 Stunden können an ganz unterschiedlichen Tagen sein (dies können 10 Tage sein), z.T. auch an Wochenenden (diese sind hier nicht ausgenommen). Weitere Detailzahlen sind aus der Tabelle ersichtlich.

Es gibt auch kalte Tage mit Sonnenschein, der dazu führt, dass sich die Gläser erwärmen und der Kaltluftabfall gemildert wird. Der Effekt wird hier nicht berücksichtigt, da auf der sonnenabgewandten Seite dieser Effekt nicht auftritt und dort auch Schulräume sind.

Zürich-SMA DRY 8-18 Uhr	Anzahl Stunden mit Temperatur kleiner als						Stunden mit Temperatur im Bereich				
	0	-2	-4	-6	-8	-10	-2/0	-4/-2	-4/-6	-6/-8	-8/-10
Jan	107	57	28	19	12	9	50	29	9	7	3
Feb	104	74	29	13	3	1	30	45	16	10	2
Mar	21	5	0	0	0	0	16	5	0	0	0
Apr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mai	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aug	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sep	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Okt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nov	27	9	1	0	0	0	18	8	1	0	0
Dez	76	38	14	6	1	0	38	24	8	5	1
Ganzes Jahr	335	183	72	38	16	10	152	111	34	22	6
% auf 335 Stunden		54.6%	21.5%	11.3%	4.8%	3.0%					
Bezug auf 5 Wintermonate zu 10Std./Tag											
% auf 1500 Std.	22.3%	12.2%	4.8%	2.5%	1.1%	0.7%					

Tabelle 4: Statistische Bewertung Kältestunden für die DRY-Daten der Meteostation Zürich-SMA.

Dies heisst, dass für eine Situation, die bei ca. 0°C gerade noch genügend gut ist, während ca. 200 Stunden im Winter mittlere bis grössere Komfortprobleme auftreten.

Vom Kosten/Nutzen-Verhältnis scheint es einerseits übertrieben, die Komfortstufe 1 für alle Aussenbedingungen, d.h. bis –10°C zu fordern, andererseits sich mit Komfortstufe 1 bei 0°C zufriedenzugeben (mit 200 Std. ungenügend).

Ein vernünftiger Kompromiss erscheint daher die Forderung nach Komfortstufe 1 bis –4°C. Es verbleiben dann 38 Stunden pro Winter mit etwas reduzierten Komfortbedingungen.

7.8 Benutzeraussagen

Laut Aussagen von Lehrern und Hauswarten der 3 Schulen ist man mit den Komfortverhältnissen im allgemeinen sehr zufrieden, obwohl die Messergebnisse zeigen, dass Komfortstufe 1 klar nicht erreicht wird, sondern auch Temperatur um 0°C.

Zu berücksichtigen ist aber sicher die Tatsache, dass die Bewertung meist im Vergleich mit den bestehenden Schulhausbauten entstanden ist, und eine starke Verbesserung gegenüber früher festgestellt worden ist.

Ferner ist es wahrscheinlich, dass bei extremen Aussentemperatur die Erwartungshaltung an den Innenkomfort auch nicht so hoch wie sonst sind, dass also Ausnahmbedingungen akzeptiert werden.

Die Klagen, die uns mitgeteilt wurden, sind auf Benutzerfehler oder auf die Lüftung zurückzuführen, nicht auf die Fassade (s. Abschnitt 5.7).

Referenzen

- [1] „Lüftung von grossen Räumen, Handbuch für Planer“, Clima Suisse, 1998. Heute zu beziehen bei Suissetec, Zürich.
- [2] „Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz“. SIA-Merkblatt 2021, Ausgabe 2002, und SIA-Dokumentation D 0176, Ausgabe 2001.
- [3] „Ventilation for Buildings – Design Criteria for Indoor Environment“. CEN Technical Report CR 1752, 1998.
- [4] „Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau“. SIA-Norm 180, Ausgabe 1999.
- [5] „Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen“. SIA-Norm 382/1, Entwurf 2004.

Anhänge

A Messungen Komfort

In separatem Dokument

B Strömungsberechnungen

In separatem Dokument

C Bestimmungsparameter Komfort

In separatem Dokument