

## Zur Problematik des Kaltluftabfalls bei hohen Glasfassaden und internen Lasten

Beat Frei, David Burkhardt

Aicher, De Martin, Zweng AG

Energie- und Gebäudetechnik-Ingenieure, Würzenbachstrasse 56, CH-6006 Luzern

++41 (0) 41 375 00 75, [beat.frei@adz.ch](mailto:beat.frei@adz.ch), [david.burkhardt@adz.ch](mailto:david.burkhardt@adz.ch), <http://www.adz.ch>

### Zusammenfassung

### Résumé

### Abstract

Dieser Übersichtsbeitrag vergleicht den Stand des Wissens zum Kaltluftabfall an hohen Glasfassaden mit der aktuellen Norm SIA 180:2014. Die Grundlage der verwendeten Formeln ohne interne konvektive Lasten sind frühere Untersuchungen von Heiselberg (1994). Von einem breiteren Fachpublikum weitgehend unbemerkt wurden auf CFD-Strömungssimulationen der Empa basierende Formeln mit Berücksichtigung interner konvektiver Lasten in die Norm SIA 180:2014 aufgenommen. Der Schweizer Ansatz wurde in diesem Beitrag mit Literaturwerten verglichen und kann als belastbar bezeichnet werden. Ausdrücklich ausgeschlossen wird in den Kaltluftabfall-Diagrammen der über Eck verglaste Bürobau. Hierzu werden im Beitrag Werte angegeben, welche die Superposition des Kaltluftabfalls aus den Eckflächen berücksichtigen. Es wurde erkannt, dass CFD-Strömungssimulationen noch Verbesserungspotenzial im Bereich Qualitätssicherung und korrekter Angabe des Turbulenzgrades haben. In der Standardliteratur sind Formeln aus der Quellenliteratur für die Grenzschicht des Kaltluftabfalls falsch publiziert worden. Gemäss derzeitigem Stand des Wissens ist ein neues Zugluftmodell zur Bewertung der lokalen thermischen Behaglichkeit auf Fussgelenkhöhe erforderlich, das auch weitere Parameter wie die Turbulenzfrequenz oder die Fussbodentemperatur berücksichtigt.

This survey article compares the state of the art of downdraft prediction on the inside of large glazed facades with the current Norm SIA 180:2014. Models for cases without internal convective thermal loads are based on equations proposed by Heiselberg (1994). It has gone widely unnoticed that formulas for flow *with* internal convective loads have been incorporated into the Norm SIA 180:2014 that are based on CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations by the Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Empa). In the present paper the Swiss approach is compared with models from literature and is found to be accurate and reliable. The downdraft graphs of the SIA Norm explicitly exclude the flow situation in corners where two glazed facades meet. In the present contribution we propose a model that uses superposition of the flows on both corner surfaces. CFD simulations still have some potential for improvement regarding quality assurance and prediction of turbulence intensity. In general literature, some formulas describing the free-convection boundary layers of downdraft have been quoted incorrectly from original sources. With today's knowledge, an improved formula for the quantification of the draft risk and local thermal comfort at ankle level is possible. It would account for additional parameters such as turbulence frequency or floor temperature.

## 1. Ausgangslage

Die lokale thermische Behaglichkeit kann das Komfortempfinden und die Zufriedenheit von Nutzern stark beeinflussen. Trotz technologisch fortschrittlichen Gebäudefassaden stellen sich dem Gebäudetechnik-Planer bereits in frühen Planungsphasen bei überhohen Glasfassaden drängende Fragen betreffend die Einhaltung der Komfortkriterien bei Kaltluftabfall und Strahlungsasymmetrie. Neben der lokalen thermischen Behaglichkeit steht immer auch die generelle Behaglichkeit im Zentrum. Aus aktuellen Studien lässt sich ableiten, dass das thermische Empfinden und das Zugluftrisiko in Zusammenhang stehen. Nachfolgend folgt eine Zusammenstellung der Planungsgrundlagen für die Problematik des Kaltluftabfalls an hohen Glasfassaden.

### Zugluftrisiko – Draught (Draft) Risk DR

Das Zugluftempfinden bei Kaltluftabfall wird in der Norm SIA 180:2014 [1] mit der standardmässigen Zugluftrisiko-Formel nach SN EN ISO 7730:2006 [2] berechnet. Diese empirisch abgestützte Formel berücksichtigt die Raumlufttemperatur, die Strömungsgeschwindigkeit und den Turbulenzgrad. Sie bezieht sich auf den Nackenbereich der stehenden oder sitzenden Person. Die grundlegenden Untersuchungen von Fanger, Melikov und Hanzawa [3] basieren auf einer kleinen Anzahl junger Versuchspersonen (19 bis 25 Jahre), die sitzend und normal bekleidet waren (0.6 clo).

Zugluft:

$$DR = (\theta_p - \theta_{a,l}) (v_{a,l} - 0.05)^{0.62} (37 v_{a,l} Tu + 3.14) \quad [\%] \quad (1)$$

für  $v_{a,l} < 0.05$  m/s ist  $v_{a,l} = 0.05$  m/s

für  $DR > 100$  % ist  $DR = 100$  %

$\theta_p$  Oberflächentemperatur der Haut [°C] (34 °C für sitzende Person, ideale Behaglichkeit)

$\theta_{a,l}$  lokale Raumlufttemperatur [°C] (Bereich 20 °C bis 26 °C)

$v_{a,l}$  lokale mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s] (Bereich < 0.5 m/s)

$Tu$  lokaler Turbulenzgrad [%] (Bereich 10 % bis 60 %, ohne andere Angaben ist  $Tu = 50$  %)

Es wird angegeben, dass das Zugluftrisiko an den unteren Gliedmassen mit der angegebenen, empirisch hergeleiteten Formel überschätzt wird. Beim Kaltluftabfall sind jedoch vor allem die unteren Gliedmassen von Zugluft betroffen. Weiterführende Untersuchungen hierzu fehlen in der Literatur weitgehend.

### Daumenregel von Olesen für das Zugluftrisiko an Glasfassaden

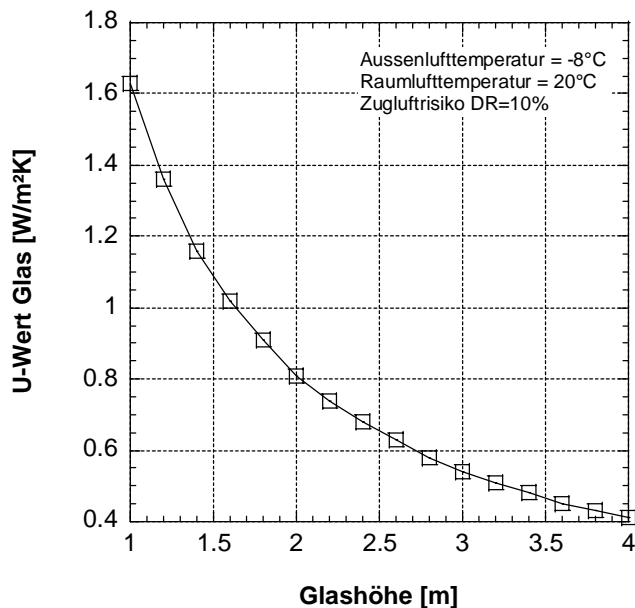
Im «Recknagel» – Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [4] wird für den Kaltluftabfall eine Daumenregel von Olesen [5] angegeben. Bei einer massgebenden Aussenlufttemperatur von -12 °C wird angenommen, dass die Raumlufttemperatur 1 K unter der operativen Temperatur von 22 °C liegt und dass der Turbulenzgrad  $Tu = 10$  bis 20 % beträgt (laminare Strömung). Bei einer vorgegebenen maximalen Strömungsgeschwindigkeit von 0.18 m/s im Aufenthaltsbereich soll das Produkt aus dem U-Wert des Glases und der Bauteilhöhe nicht mehr als 4.7 betragen.

$$U_G H < 4.7 \quad \left[ \frac{W}{m K} \right] \quad v_{max} = 0.18 \frac{m}{s} \quad (2)$$

### Kaltluftabfall gemäss Merkblatt SIA 2021:2002

Im nach wie vor gültigen Merkblatt SIA 2021:2002 *Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz* [6] werden die Ergebnisse der Dokumentation SIA D 0176 [7] zur Beschreibung der Kaltluftabfallproblematik zusammengefasst. Als Komfortgrenze wird ein PPD-Wert (sic!) von 10 % für den am Boden fliessenden Kaltluftstrom angegeben. Zur Ermittlung des maximal zulässigen U-Wertes des Glases in Abhängigkeit der Fensterglashöhe wird für das Schweizer Mittel-

land ( $\theta_e -8\text{ °C}$ ,  $\theta_i +20\text{ °C}$ ) im Abstand von 1 m bei normalen internen Lasten folgende *Abbildung 1* angeben:



*Abbildung 1* Maximal zulässiger U-Wert Glas in Abhängigkeit der Glashöhe zur Vermeidung von Behaglichkeitsproblemen bei Kaltluftabfall.

*Abbildung 1* gilt nicht für über Eck verglaste Räume und beinhaltet einen Sicherheitszuschlag für den Glasrandverbund von 0.6 m (siehe Dokumentation SIA D 0176:2002).

### Kaltluftabfall gemäss SIA 180:2014 mit internen Lasten

In der Norm SIA 180:2014 wird ein Berechnungsverfahren für den maximal zulässigen U-Wert bei Kaltluftabfall angegeben. Bei der Überarbeitung der Norm SIA 180:1999 wurden die Berechnungen von Manz und Frank [8] zur maximalen Strömungsgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich mit internen konvektiven Lasten berücksichtigt. Aufgrund von Strömungssimulationen mit *Computational Fluid Dynamics* (CFD) in einer Klimakammer der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa) wurde ein Korrekturfaktor von 1.5 bestimmt. Dieser Faktor berücksichtigt die Wirkung der internen konvektiven Lasten auf die Strömungsverhältnisse am unteren Rand des Aufenthaltsbereiches. Diese bedeutende Erweiterung wurde zwischen der zweiten Vernehmlassung und dem Einspruchsverfahren der Vernehmlassung der Norm vorgenommen.

Die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich lässt sich nach SIA 180:2014 wie folgt berechnen:

$$v_{max} = k (\Delta\theta H)^{0.5} \quad [\text{m/s}] \quad (3)$$

k Regressionskoeffizient aus Messungen oder Berechnungen [ $\text{m}^{0.5} \text{K}^{-0.5} \text{s}^{-1}$ ]

$\Delta\theta$  Temperaturdifferenz zwischen lokaler Raumluft und kalter Oberfläche [K]

H Bauteilhöhe [m]

Abstand von der Wand	Raum ohne Wärmelasten [9]	Raum mit Wärmelasten [8]
$x < 0.4\text{ m}$	0.055	0.083
$0.4 < x < 2.0\text{ m}$	$\frac{0.095}{(x + 1.32)}$	$\frac{0.143}{(x + 1.32)}$
$x > 2\text{ m}$	0.028	0.043

*Tabelle 1* Regressionskoeffizient k zur Bestimmung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich.

Die Regressionskoeffizienten für den Raum ohne Wärmelasten stammen von Heiselberg [9]. Jene für den Raum mit Wärmelasten wurden von Manz und Frank [8] publiziert. *Abbildung 2* zeigt den maximal zulässigen U-Wert des Bauteils in Funktion der Bauteilhöhe. Die Berücksichtigung der internen Lasten im Raum bedeutet eine erhebliche Verschärfung der Anforderung an den U-Wert.

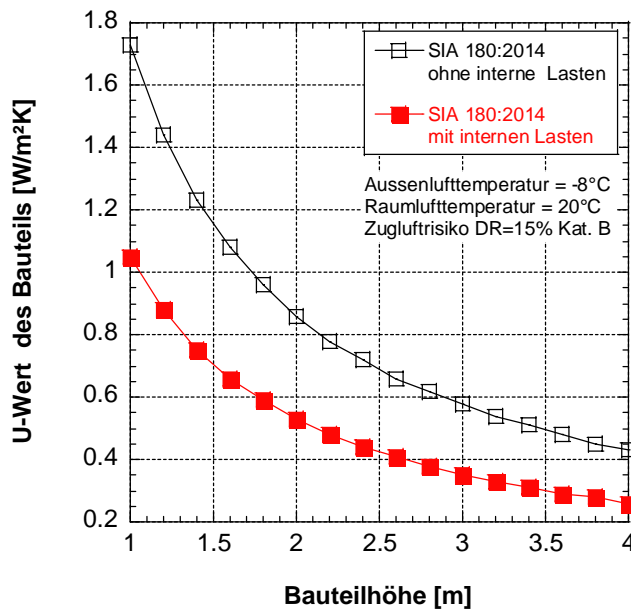


Abbildung 2 Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{max}$  eines Bauteils zur Vermeidung von Behaglichkeitsproblemen.

### Maximal zulässiger U-Wert des Bauteils für beliebige Randbedingungen

Die Temperaturdifferenz  $\Delta\theta$  zwischen der lokalen Raumlufthtemperatur und der kalten Wandoberfläche kann für ebene Bauteile nach Norm SIA 180:2014 mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\Delta\theta = \frac{U(\theta_i - \theta_e)}{h_i} - \frac{q_i I_s}{h_i} \quad [\text{K}] \quad (4)$$

- U Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils [W/m<sup>2</sup>K]
- $\theta_i$  Raumlufthtemperatur [°C]
- $\theta_e$  Aussenlufttemperatur [°C]
- $h_i$  Wärmeübergangskoeffizient innen (raumseitig) [W/m<sup>2</sup>K]
- $q_i$  sekundärer Wärmeabgabegrad [-]
- $I_s$  Globalstrahlungsintensität [W/m<sup>2</sup>]

Die Komfortanforderungen bezüglich Zugluft werden erfüllt, wenn die maximal zulässige Raumlufthgeschwindigkeit  $v_{max}$  infolge Kaltluftabfall nicht überschritten wird. Hieraus kann nach Norm SIA 180:2014 der maximal zulässige U-Wert des Bauteils  $U_{max}$  bei beliebigen Randbedingungen ermittelt werden:

$$U_{max} \leq \frac{v_{max}^2 h_i + q_i I_s}{k^2 H (\theta_i - \theta_e)} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (5)$$

- H Höhe des Bauteils [m]
- k Regressionskoeffizient [m<sup>0,5</sup> K<sup>-0,5</sup> s<sup>-1</sup>]

## **Über Eck verglaste Räume in Bürobauten**

In der Norm SIA 180:2014 und im Merkblatt SIA 2021:2002 wird die Gültigkeit des Kaltluftabfall-Diagramms für über Eck verglaste Räume ausdrücklich ausgeschlossen. Oft muss bereits in frühen Planungsphasen darüber entschieden werden, wie mit über Eck verglasten Räumen umgegangen werden soll.

## **CFD-Strömungssimulation und deren Ergebnisse**

Aufgrund nicht verfügbarer Angaben und fehlender Empfehlungen wird bei anspruchsvoller Gebäudegeometrie und über Eck verglasten Glasfassaden die Planungsunterstützung durch CFD-Strömungssimulationen erforderlich. Die Erfahrungen der Autoren mit externen Auftragsarbeiten zur CFD-Strömungssimulation zeigen, dass die kritische Bewertung von Ergebnissen erforderlich ist. Die Stichhaltigkeit der Ergebnisse und deren Dokumentation in Berichtsform waren mehrfach Grund für Nachbesserungen bei solchen Auftragsarbeiten.

## **Aufenthaltsbereich**

Die Gültigkeit des Aufenthaltsbereiches bei der Komfortbewertung ist immer wieder Gegenstand kontroverser Diskussionen. Häufig wird in der täglichen Praxis beobachtet, dass Belegungen von Bürobauten, Seminarräumen oder Restaurants nicht dem Aufenthaltsbereich nach Norm SIA 180:2014 entsprechen. Dadurch kann es zu einem höheren Risiko für Kaltluftabfall-Empfinden kommen. Wünschenswert wäre eine Eintragung des Aufenthaltsbereiches in CAD-Grundrisspläne. Aus grundsätzlichen Überlegungen gehört dies zu einer umfassenden BIM-Sichtweise auf das Gebäude.

Aufgrund der geschilderten Ausgangslage haben sich die Autoren entschieden, einige Punkte in einem Übersichtsartikel näher zu untersuchen.

## **2. Vorgehen**

Die Ingenieure der Aicher, De Martin, Zweng AG haben sich bereits seit längerer Zeit eingehend mit dem Kaltluftabfall an hohen Glasfassaden unter Berücksichtigung interner Lasten befasst. Ziel der Abklärungen war die Erhöhung der Planungssicherheit. Problematische Fälle sollten im Planungsprozess rasch erkannt werden und mittels empirischer Formeln und/oder CFD-Strömungssimulation genauer untersucht werden.

## **Literaturrecherche**

Hierzu wurde die in eigenen Beständen der Autoren zur Verfügung stehende Literatur eingehend gesichtet und die in *peer-reviewed* Journals publizierte Literatur einer Prüfung unterzogen.

## **Teilnahme an Vernehmlassungen und Wissensvermittlung im Unterricht**

Eine gute Möglichkeit zur Auseinandersetzung mit dem Stand des Wissens ist die Beteiligung an der Normen- und Richtlinienarbeit. Hier werden Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung in anwendbare Normen und Richtlinien umgesetzt. Die Autoren haben sich an beiden Vernehmlassungen zur Norm SIA 180:2014 beteiligt. Ein weiteres Betätigungsfeld mit Feedback ist der Unterricht auf Fachhochschulstufe.

## **Qualitätssicherung von CFD-Strömungssimulationen**

Die Qualitätssicherung von CFD-Strömungssimulationen ist ein wichtiger Bestandteil von externen Auftragsarbeiten, die jeweils von den Autoren begleitet wird. Hierzu wird das REHVA Guidebook *Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design* [11] und ein modifizierter Anhang C zur Richtlinie VDI 6019 Blatt 2 *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden – Ingenieurmethoden* [12] eingesetzt.

### 3. Resultate

Die erzielten Ergebnisse werden nachfolgend analog zur Ausgangslage gruppiert.

#### Vergleich zwischen der Norm SIA 180:2014 und dem Merkblatt SIA 2021:2002

Bei der Bewertung der Problematik des Kaltluftabfalls an hohen Glasfassaden können sowohl das Merkblatt SIA 2021:2002 als auch die Norm SIA 180:2014 zu Rate gezogen werden. Beim Vergleich der Ergebnisse in *Abbildung 3* fällt auf, dass die Kurve nach dem Merkblatt SIA 2021:2002 zwischen den beiden Kurven der Norm SIA 180:2014 liegt. Zu beachten ist, dass im Merkblatt ein kleineres Zugluftrisiko DR von 10 % zugelassen wird und lediglich von «normalen Lasten» ohne weitere Angaben die Rede ist. Eine Überprüfung der Kurvenwerte hat ergeben, dass die Kurve aus dem Merkblatt SIA 2021:2002 identisch mit der Kurve aus der Norm SIA 180:2014 ohne interne Lasten ist – aber mit verringertem Zugluftrisiko von DR = 10 %.

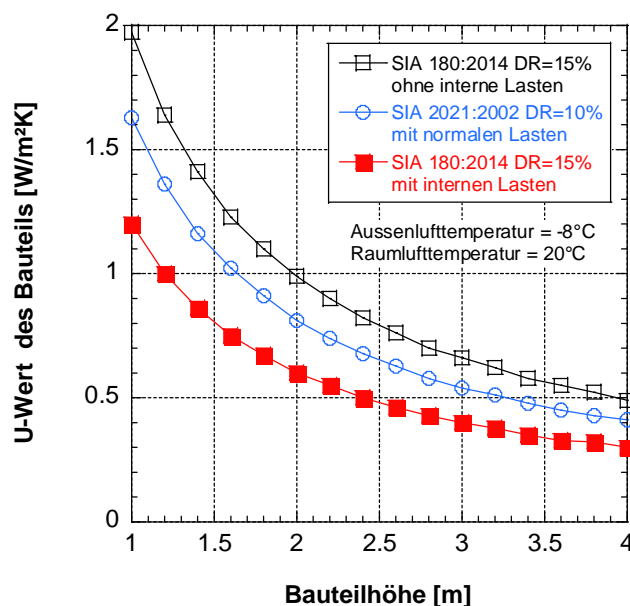


Abbildung 3 Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{max}$  eines Bauteils zur Vermeidung von Behaglichkeitsproblemen nach SIA 180:2014 und SIA 2021:2002.

#### Daumenregel von Olesen und deren Validierung durch Schellen, Timmers et al.

Die Gültigkeit der Daumenregel von Olesen wurde von Schellen, Timmers et al. [13] durch CFD-Strömungssimulationen und Versuche in Klimakammern untersucht. Die ursprünglichen CFD-Strömungssimulationen und experimentellen Versuche, die zur Ableitung der Daumenregel von Olesen führten, weisen nach Schellen et al. einige Einschränkungen auf. Es wurde damals lediglich die lokale thermische Unbehaglichkeit infolge Zugluft betrachtet, wogegen der Einfluss der Strahlungsasymmetrie nicht berücksichtigt wurde. Ebenso wurden in den Experimenten keine Probanden befragt.

Schellen et al. kommen zum Schluss, dass die Daumenregel für die untersuchten Fälle zu konservativ ist. Dies führe zu unnötigen Verschärfungen in der Planungspraxis. Sie weisen darauf hin, dass die CFD-Strömungssimulationen zeigen, dass interne Lasten die Strömungsverhältnisse im Aufenthaltsbereich negativ beeinflussen können. Die Daumenregel müsste konsequenterweise auch die Bodentemperatur des Raumes als beeinflussenden Faktor beinhalten. Zudem wird – einmal mehr – darauf hingewiesen, dass die Bestimmung des Zugluftrisikos auf Nackenhöhe erfolgt und nicht auf Fussgelenkhöhe. Die beobachteten Instabilitäten der Raumlufthöhe durch die internen Lasten werden angemerkt – mit dem Hinweis auf erhöhten Forschungsbedarf.

Die Daumenregel von Olesen kann wie folgt hergeleitet werden:

$$v_{max} = k (\Delta\theta H)^{0.5} \quad \Delta\theta = \theta_i - \theta_{s,i} = U_G R_i (\theta_i - \theta_e) \quad (6)$$

Mit  $R_i = 0.13 \text{ m}^2\text{K/W}$  und  $(\theta_i - \theta_e) = (22 - (-12)) = 34 \text{ K}$  wird (6)

$$v_{max} = 0.083 (U_G H)^{0.5} \quad (7)$$

Aufgelöst nach H ergibt (8):

$$H \leq \frac{(12.05 v_{max})^2}{U_G} \quad (8)$$

Und somit als Daumenregel aufgelöst:

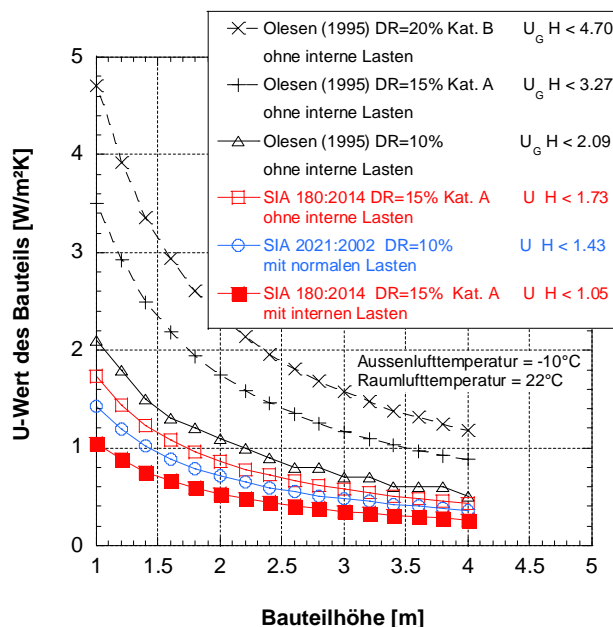
$$U_G H \leq (12.05 v_{max})^2 \quad (9)$$

Es werden zwei Kriterien zur Strömungsgeschwindigkeit bei einer Raumlufttemperatur von  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  und einer Aussenlufttemperatur von  $-12 \text{ }^\circ\text{C}$  angegeben, woraus sich für die beiden Daumenregeln folgende Werte ergeben:

$$v_{max} = 0.18 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad U_G H \leq 4.70 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (10)$$

$$v_{max} = 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad U_G H \leq 3.27 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \quad (11)$$

In *Abbildung 4* werden die Verfahren der Norm SIA 180:2014, des Merkblatts SIA 2021:2002 und der Daumenregel nach Olesen miteinander verglichen.



*Abbildung 4* Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient  $U_{max}$  eines Bauteils zur Vermeidung von Behaglichkeitsproblemen nach SIA 180:2014, SIA 2021:2002 und der Daumenregel von Olesen.

Zur besseren Vergleichbarkeit wurden identische Aussen- und Raumbedingungen gewählt. Die Schweizer Anforderungen sind bedeutend schärfer als jene von Olesen. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Daumenregel nach Olesen auf dem U-Wert Glas basiert.

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Schweizer Anforderungen an die U-Werte der Bauteile in den internationalen Kontext gestellt.

### Vergleich der SIA 180:2014 mit Literatur Schellen und Jurelionis

Mittlerweile werden bei der Beschreibung der Kaltluftabfall-Problematik interne Lasten – wie in der SIA 180:2014 – mitberücksichtigt. Entgegen früheren Ansichten kann die thermische Interaktion der Raumluftströmung mit der Gebäudehülle beim Kaltluftabfall nicht mehr vernachlässigt werden. Manz und Frank haben dies bereits 2004 durch CFD-Strömungssimulationen und Empa-Klimakammer Versuche gezeigt. Die Arbeiten an der Technischen Universität Eindhoven von Schellen, Timmers et al. [13] zeigten auf, wie interne Lasten die Strömungsverhältnisse an Glasfassaden beeinflussen. Die Berechnungen nach SIA 180:2014 erfolgten mit den Randbedingungen der Literaturquellen Schellen et al. und Jurelionis et al. [14].

In *Abbildung 5* sind die Ergebnisse dargestellt. Hieraus lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

Die CFD-Strömungssimulationen von Schellen und Timmers erfolgten mit erhöhten Bodentemperaturen, um interne Lasten zu simulieren. Die Ergebnisse ohne Last weichen von den Ergebnissen der Norm SIA 180:2014 recht deutlich ab. Die Verifikation mit Literaturwerten erfolgte in der Arbeit von Schellen, Timmers et al. nur oberflächlich. Beklagt wurden die grossen Differenzen zwischen simulierten und gemessenen Turbulenzgraden. Auf den Grund für diese Abweichungen gehen die Autoren in einem nachfolgenden Abschnitt ein.

Jurelionis und Isevicus [14] berücksichtigten in ihren CFD-Strömungssimulationen interne konvektive Lasten in Form von Dummies. Ihre Ergebnisse können den Fall ohne Lasten einigermaßen wiedergeben. Die Berechnungsformeln der SIA 180:2014 basieren für interne konvektive Lasten ebenfalls auf CFD-Strömungssimulationen, welche zuvor ohne interne Lasten mit den Ergebnissen von Heiselberg [9] kalibriert wurden. Aufgrund der dünnen publizierten Datenlage in Jurelionis und Isevicus konnten leider keine weiteren Vergleiche angestellt werden.

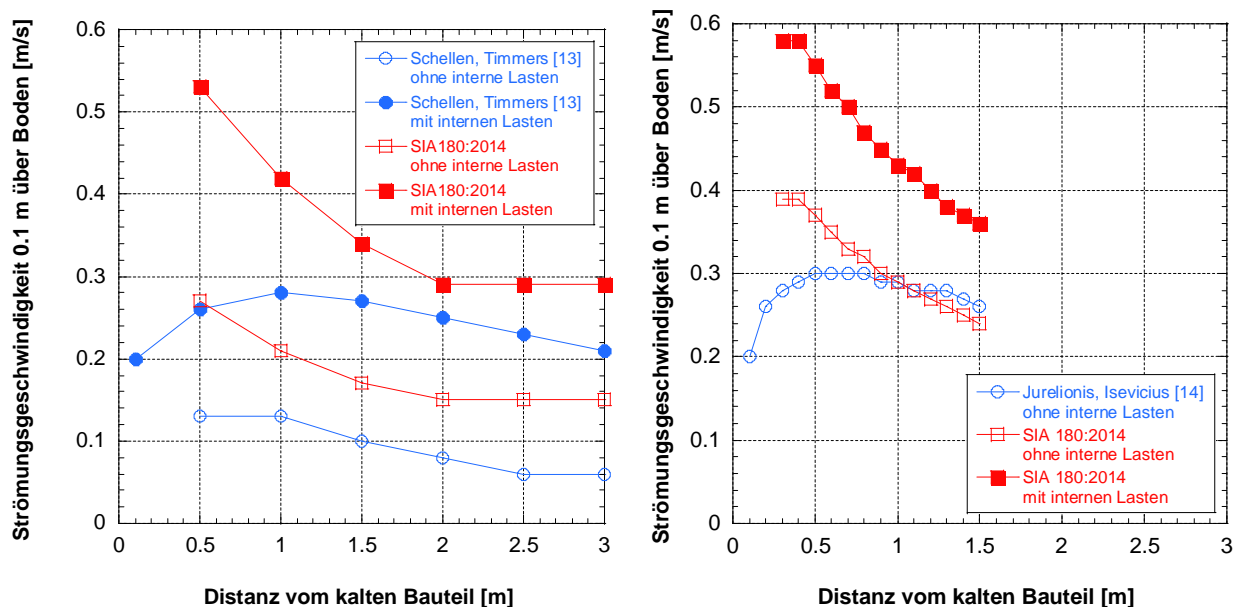


Abbildung 5 Vergleich der SIA 180:2014 mit Literaturquellen betreffend Strömungsgeschwindigkeit 0.1 m über Boden.

Im Vergleich erscheint der in der Norm SIA 180:2014 gewählte Ansatz für die Berücksichtigung der internen konvektiven Lasten pragmatisch und nachvollziehbar. Aufgrund der eigenen CFD-Strömungssimulationen wählten Manz und Frank einen Faktor von 1.5 bezogen auf die anerkannten Ergebnisse ohne konvektive Lasten von Heiselberg.



## Untersuchung des Zugluftrisikos auf Fussgelenkhöhe von Schiavon et al.

Alle Untersuchungen zum Kaltluftabfall basieren auf der standardmässigen Zugluftformel nach SN EN ISO 7730:2006. In der Vergangenheit wurden einige Anstrengungen unternommen, um diese Zugluftformel zu überprüfen und besser zu validieren. Die damaligen Untersuchungen zur Zugluft von Fanger, Melikov und Hanzawa basierten auf einer kleinen Anzahl junger Versuchspersonen (19 bis 25 Jahre), die sitzend und normal bekleidet waren (0.6 clo). Alle bisherigen Reviews zeigten, dass die standardmässige Zugluftformel immer noch als Referenz zu betrachten ist.

Schiavon, Rim, Pasut und Nazaroff [15] haben nun aufgezeigt, dass gemäss ihren Untersuchungen junge Frauen sensitiver auf Zugluft an unbedeckten Fussgelenken reagieren und das Zugluftempfinden auf Fussgelenkhöhe ausgeprägter ist als auf Nackenhöhe. Untersucht wurden Quellluft- und Unterflur-Lüftungssysteme. Die dreissig Probandinnen reagierten stärker als erwartet auf Zugluft im Fussgelenkbereich. Zwischen 20 und 37 % aller Probandinnen befanden die thermische Umgebung als unangenehm, währenddem das Zugluftempfinden von 23 bis 57 % aller Probandinnen als beklagenswert erachtet wurde. Eine wichtige Erkenntnis lag zudem darin, dass die Probandinnen dreissig Minuten benötigen, um die thermische Neutralität zu erreichen. In vielen vorangegangenen Studien wurde diese Randbedingung nicht beachtet. Zudem zeigte sich die hohe Korrelation zwischen thermischem Komfort und thermischer Akzeptanz. Je kühler die thermische Empfindung ist, desto unerwünschter ist eine Luftströmung. Schiavon et al. weisen auf die wichtige Erkenntnis hin, wonach die thermische Vorkonditionierung der Probandinnen die Mängel vieler vorangehender Studien (Fanger usw.) beheben konnte. Zudem wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass ein neues Modell für das Zugluftrisiko auf Fussgelenkhöhe erforderlich ist.

## Fehlerbehaftete Formeln im «Recknagel» – Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik

Bei Berechnungen für ein Engelberger Hotelprojekt haben die Autoren festgestellt, dass im «Recknagel» – Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik [4] fehlerbehaftete Formeln für die Kenngrössen der Grenzschicht an kalten Fenstern angegeben sind. Die Dicke der Grenzschicht, der resultierende Volumenstrom und der Kühleffekt können damit nicht korrekt berechnet werden (Abbildung 6). Diese Fehler bestehen seit über 10 Jahren und wurden dem Herausgeber mitgeteilt.

Parameter	Formeln	Einheit	
Maximale Luftgeschwindigkeit in der Grenzschicht entlang der kalten Fläche	$v_{\max} = 0,07 ( \theta_a - \theta_{s,W}  \cdot h)^{0,5}$	m/s	
Mittlere Luftgeschwindigkeit in der Grenzschicht entlang der kalten Fläche	$v_{\text{mit}} = 0,019 ( \theta_a - \theta_{s,W}  \cdot h)^{0,5}$	m/s	
Dicke der Grenzschicht	$\delta = 0,11 \cdot h^{0,7} \cdot ( \theta_a - \theta_{s,W}  \cdot h)^{-0,1}$	m	Korrektur: h streichen
Volumenstrom	$\dot{V} = 0,0021 \cdot h^{1,2} \cdot ( \theta_a - \theta_{s,W}  \cdot h)^{0,4} \cdot b$	m <sup>3</sup> /s	Korrektur: h streichen
Mittlere Temperatur in der Grenzschicht	$\theta_{\text{grenz}} = \theta_a - 0,25 (\theta_a - \theta_{s,W})$	<del>°C</del>	Korrektur: K ersetzen mit °C
Kühleffekt	$\dot{Q} = 0,64 \cdot h^{1,2} \cdot (\theta_a - \theta_{s,W})^{1,4} \cdot b$	W	Korrektur: 1,4 ersetzen mit ¼

$h$  = Höhe der kalten Fläche [m]       $\theta_{s,W}$  = Oberflächentemperatur des Fensters, °C  
 $b$  = Breite der kalten Fläche [m]       $\theta_a$  = Raumlufttemperatur, °C

Abbildung 6      Tafel 1.2.2-10 aus dem «Recknagel» [4] mit fehlerbehafteten Kenngrössen für die Grenzschicht an kalten Fenstern (Quelle Deutscher Industrieverlag)

## Turbulenzgrad aus CFD-Strömungssimulationen und erforderliche Korrektur

Der berechnete Turbulenzgrad aus CFD-Strömungssimulationen  $Tu_v$  kann nicht direkt mit dem berechneten Turbulenzgrad aus Strömungsmessungen  $Tu_o$  verglichen werden. Bei CFD-Strömungssimulationen wird der Turbulenzgrad als Verhältnis zwischen der turbulenten kinetischen Energie und der vektoriellen mittleren Strömungsgeschwindigkeit definiert.

$$Tu_v = \frac{\sqrt{\frac{2k}{3}}}{v_v} \quad (12)$$

k	turbulente kinetische Energie	[(kg m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )/kg]
v <sub>v</sub>	Magnitude des mittleren Strömungsvektors aus CFD-Simulation	[m/s]

$$Tu_o = \frac{S_o}{\bar{v}_o} \quad (13)$$

S <sub>o</sub>	Standardabweichung der omnidirektionalen Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
$\bar{v}_o$	Mittelwert der omnidirektionalen Strömungsgeschwindigkeit aus Messung	[m/s]

In den Untersuchungen zur Herleitung des Zugluft-Modells wurde der Turbulenzgrad als Verhältnis der Standardabweichung der omnidirektionalen Strömungsgeschwindigkeit zu deren zeitlichem Mittelwert definiert. Zudem werden meistens stationäre Situationen untersucht. Der Turbulenzgrad ist im Übergangsbereich zwischen Grenzschicht und Aufenthaltsbereich von zentraler Bedeutung und wird mittels CFD-Strömungssimulationen zu niedrig berechnet. Dies kann zusätzlich auch mit der Wahl des Turbulenzmodells zusammenhängen.

Deshalb müssen die Ergebnisse von CFD-Strömungssimulationen korrigiert werden, damit mit dem Zugluftmodell nach Fanger, Melikov und Hanzawa [3] normkonforme Aussagen über Unzufriedene infolge Zugluft gemacht werden können. Mehrere Arbeiten haben sich mit dieser Problematik befasst. Koskela et al. und Ruppenen et. al. [16 - 19] haben dargelegt, wie Ergebnisse aus CFD-Strömungssimulationen und experimentelle Ergebnisse zur Zugluft miteinander verglichen werden können.

$$\frac{v_o}{v_v} = 1 + Tu_v^2 \quad Tu_v \leq 0.45 \quad (14)$$

$$\frac{v_o}{v_v} = \frac{1.596 Tu_v^2 + 0.266 Tu_v + 0.308}{0.173 + Tu_v} \quad Tu_v > 0.45 \quad (15)$$

$$Tu_o = \sqrt{(1 + 3 Tu_v^2) \frac{v_v^2}{v_o^2} - 1} \quad (16)$$

In ihren Untersuchungen kommen sie zum Schluss, dass Ergebnisse von CFD-Strömungssimulationen in Publikationen mehrheitlich nicht richtig wiedergegeben werden. Insbesondere Popiolek [20] hat gezeigt, wie die damaligen experimentellen Turbulenzgrad-Untersuchungen von Fanger, Melikov und Hanzawa [3] mit korrigierten Turbulenzgraden aus CFD-Strömungssimulationen zur Übereinstimmung gebracht werden können.

$$v_o = v_v(1 - 0.044 Tu_v + 1.195 Tu_v^2 - 0.329 Tu_v^3) \quad Tu_v \leq 1.3 \quad (17)$$

$$v_o = v_v(0.287 + 1.502 Tu_v) \quad Tu_v > 1.3 \quad (18)$$

Die Abweichungen betragen dann lediglich noch wenige Prozentpunkte.

Die Autoren können diese Beobachtungen aus eigener Erfahrung aufgrund vorliegender Berichte von Auftragsarbeiten von CFD-Strömungssimulationen bestätigen. Dies ist mithin ein Grund für die angestrebten Massnahmen zur Qualitätssicherung von CFD-Strömungssimulationen, worüber in diesem Übersichtsbeitrag nachfolgend noch berichtet wird.

### Bedeutung des Turbulenzgrades und der Fluktuationsfrequenz

Die Untersuchungen von Melikov, Popiolek et al. [21], Jorgensen [22], und Goda [23] zeigen, wie schwierig die experimentelle Bestimmung des Turbulenzgrades unter 40 % ist. Bei niedrigen Turbulenzgraden nehmen die Einflüsse der Strömungsrichtung, des dynamischen Verhaltens des

Referenznormals und der Raumlufttemperaturschwankungen zu. Omnidirektionale Hitzdraht-Anemometer haben bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten ( $v_o < 0.05$  m/s) unerwünschte thermische Nebenwirkungen auf die Raumluftströmung. Die erweiterte Messunsicherheit der Zugluftrate DR wird mit  $\pm 5\%$  angegeben. Es ist daher sinnvoll, dass die Klassen A, B und C für die Zugluftrate DR auf 10 %, 20 % und 30 % festgelegt wurden. Ansonsten hätten sich die Klassengrenzen mit ihren Unsicherheitsgrenzen überlappt. Die Arbeiten von Zhu, Luo, Ooyang et al. [24] deuten darauf hin, dass der Einfluss des Turbulenzgrades und der Fluktuationsfrequenzen vermutlich unterschätzt wird. Auf den Unterschied zwischen mechanisch erzeugter Luftströmung und natürlich vorkommender Luftströmung wird hingewiesen. Verglichen mit konstanter mechanischer Luftströmung hat die dynamische natürliche Luftströmung einen grösseren Kühleffekt am menschlichen Körper, ohne eine spürbare Beeinträchtigung des thermischen Empfindens. Diese Erkenntnisse sind wichtig bei der Bewertung des thermischen Empfindens von zeitlich nicht konstanter Luftströmung (Impuls-Quelllüftung, intermittierende Luftströmung). Pauschale Annahmen bei fehlender Kenntnis für den Turbulenzgrad von 40 bis 50 %, wie in der SIA 180:2014 vorgeschrieben, werden der Problematik nicht mehr gerecht.

### Überlagerung des Kaltluftabfalls bei Eckflächen

In der Norm SIA 180:2014 und im Merkblatt SIA 2021:2002 wird die Gültigkeit der angegebenen Berechnungsformeln für über Eck verglaste Räume ausdrücklich ausgeschlossen. Das Handbuch für Planer zur Lüftung von grossen Räumen [25] enthält Informationen zum Vorgehen bei über Eck verglasten Räumen. Im damaligen Sulzer Infra Labor wurden solche Räume unter Laborbedingungen untersucht. *Tabelle 2* enthält die Regressionskoeffizienten im raumdiagonalen Abstand  $a$ .

Raumdiagonaler Abstand $a$	[m]	0.5	1	1.5	2	3
Regressionskoeffizient $k$	[-]	0.0695	0.052	0.0375	0.0282	0.019

*Tabelle 2* Regressionskoeffizient  $k$  zur Bestimmung der maximalen Strömungsgeschwindigkeit.

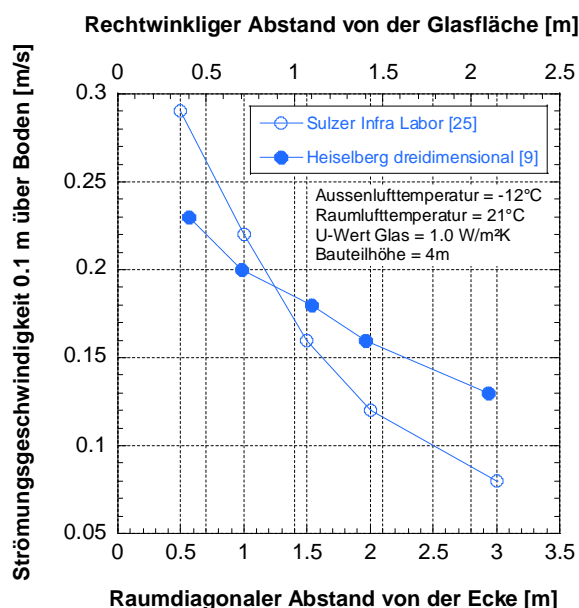
$$v_{max} = k(\Delta\theta H)^{0.5} \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$

Heiselberg [9] hat unter Laborbedingungen Untersuchungen für dreidimensionale Fälle durchgeführt. Es wird folgende Formel zur Anwendung für über Eck verglaste Räume angegeben:

$$v_{max} = \frac{0.134}{x+2.04} \sqrt{|\theta_i - \theta_{s,i}| H} \quad (20)$$

$\theta_{s,i}$  Oberflächentemperatur der kalten Bauteilfläche [°C]

$x$  Rechtwinkliger Abstand von der kalten Bauteilfläche [m]



*Abbildung 6* Strömungsgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich bei über Eck verglasten Räumen.

Die Randbedingungen bei den Versuchen im damaligen Sulzer Infra Labor konnten nicht überprüft werden. Die Autoren empfehlen den Ansatz von Heiselberg für über Eck verglaste Räume aufgrund der besser dokumentierten Versuchsreihen.

## 4. Diskussion

### Auswirkungen auf SIA 180:2014

Mittels verfügbarer Literatur konnte die in der Norm SIA 180:2014 enthaltene Berechnungsmethode für den Kaltluftabfall unter Berücksichtigung interner konvektiver Lasten verifiziert werden. Über einen weiten Einsatzbereich können belastbare Berechnungen für die Planung vorgenommen werden. Der Vergleich von CFD-Strömungssimulationen aus unterschiedlicher Literaturquellen bleibt mit einigen Unsicherheiten behaftet. Die experimentellen Untersuchungen von Heiselberg aus dem Jahre 1994 bleiben massgebend. Aufgrund der höheren thermischen Empfindlichkeit im Fussgelenkbereich wird die Festlegung auf DR = 10 % in der Planungspraxis erwogen.

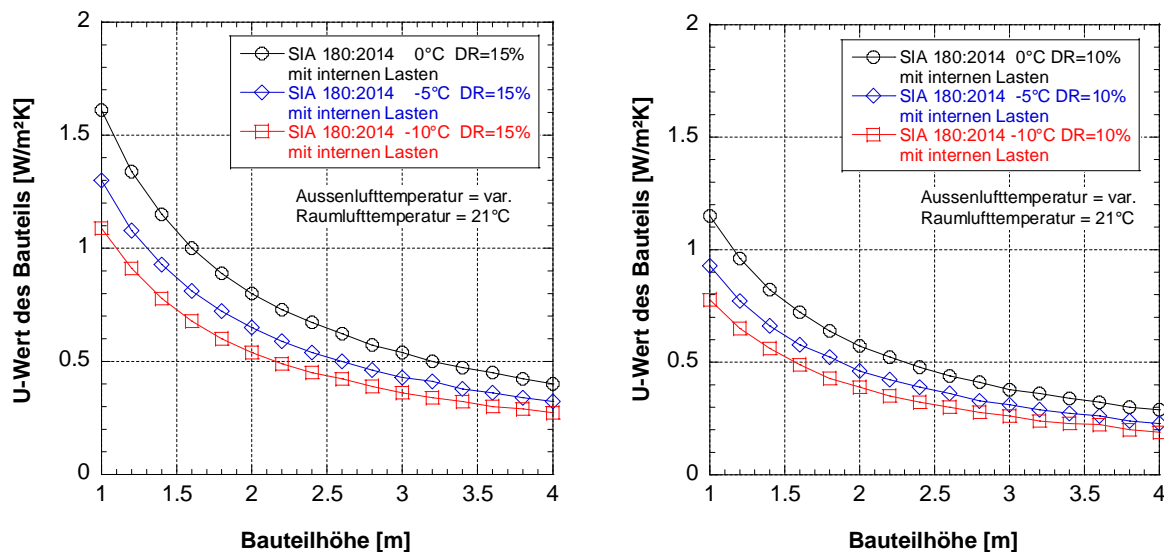


Abbildung 7 Maximal zulässiger Wärmedurchgangskoeffizient  $U$  eines Bauteils in Abhängigkeit der Bauteilhöhe, der Aussenlufttemperatur und des Zuglufttrisikos (Abstand 1 m vom kalten Bauteil).

### Qualitätssicherung von CFD-Strömungssimulationen

Vordringlich erscheint aufgrund der vorliegenden Berichte und Erfahrungen zur CFD-Strömungssimulation eine Qualitätssicherung derselben. Grundsätzlich geht es darum, die Dokumentation und Nachvollziehbarkeit von CFD-Strömungssimulationen zu verbessern. Das REHVA Guidebook No.10 [11] enthält eine Checkliste zur Qualitätssicherung:

Topic	Subtopic	Checks, advices
1. Definition of problem	Simulation method • Simplification • Step-by-step approach	Choose proper approach (2D/3D, steady/transient) • Choose proper solution domain (depends on question) • From coarse model to fine model
2. Grid	Number of cells • Distribution • Cell quality	Hexahedral cells are better than tetrahedral cells • Example for simple room problem (5 m x 5 m x 3 m): 30³ = 30k → coarse case, 60³ = 200k → medium case, 100³ = 1M → fine case (typically enough), 200³ = 8M → very fine case
3. Models	Buoyancy • Turbulence model • Wall treatment • Radiation	Boussinesq or variable density, check direction of gravity • SST model best choice of 2-eq models for indoor airflow • Wall functions, low Re-number wall treatment • Discrete ordinate, or surface-surface
4. Boundary conditions	Wall temperatures • Air supply parameters • Symmetry plane • Wind situation	Check assumptions (obtained from BEPS, building energy performance simulation) • Realistic, validated? • Hides asymmetric phenomena • Boundary layer profile, check domain extent (typically 10-100 times building size)
5. Numerical	Discretization scheme	2 <sup>nd</sup> order
6. Code		Latest version, updates, user forums
7. User errors		Training, experience, ask experts
8. Documentation		Full internal documentation of parameters • Readable scale, usually always the same

Tabelle 3 Checkliste für die Qualitätssicherung von Strömungssimulationen (Quelle: REHVA Guidebook No.10).

Die aus der Literatur bereits seit 2002 bekannte Korrektur des Turbulenzgrades zur Berechnung des Zuglufttrisikos DR aus CFD-Strömungssimulationen sollte eingefordert werden. Entsprechende Makros für das CFD-Post-Processing sind verfügbar. Bei Untersuchungen zur Problematik des Kaltluftabfalls ist die gleichzeitige Angabe der generellen thermischen Behaglichkeit (PMV-/PPD-Index) nach Stand des Wissens zwingend.

### **Zugluftmodell auf Fussgelenkhöhe und für instationäre Situationen**

Aufgrund neuer Untersuchungen und als Bestätigung früherer Erkenntnisse ist es erforderlich, ein neues Modell für das Zugluftempfinden auf Fussgelenkhöhe zu entwickeln. Diese Forderung besteht nicht nur für den Kaltluftabfall, sondern auch für intermittierende oder instationäre Luftströmungen aus Quelllüftungen oder Unterflurauslässen.

## **5. Ausblick**

Derzeit sind einige Entwicklungen im Gange, die auf die dynamische Betrachtung der Behaglichkeitsbewertung hinzielen (Zhou, Luo et. al [24]). Die Wirkungsweise von intermittierenden oder instationären Luftströmungen wird immer besser verstanden, was eine Anpassung der Behaglichkeitsbewertung erfordert. Etablierte und in Normen enthaltene Zugluft-Kriterien werden an diese neuen Entwicklungen angepasst werden müssen – dies gilt auch für die lokale Position der Bewertung (Schiavon et al. [15]).

Der Kaltluftabfall bei hohen Glasfassaden kann nicht ohne Berücksichtigung von internen konvektiven Lasten verstanden werden. Hierzu sind weitere experimentelle Studien in Klimakammern, CFD-Simulationen mit kalibrierten Modellen und qualitative Probandenbefragungen erforderlich. Zudem ist die Synthese mit Anlageerfahrungen erforderlich, um belastbare weitergehende Aussagen machen zu können.

Die Integration der CFD-Strömungssimulation in thermische Gebäudesimulationsprogramme wird es einem weiteren Kreis von fortgeschrittenen Anwendern ermöglichen, selbst CFD-Berechnungen mit Randbedingungen aus der thermischen Gebäudesimulation vorzunehmen (z.B. Integration von OpenFoam in IDA ICE). Umso wichtiger werden die Qualitätssicherung und die Plausibilitätsüberprüfung durch den Anwender oder andere Projektbeteiligte.

## **Anhang Literatur/Referenzen**

- [1] Norm SIA 180:2014 + Korrigendum C1:2015, *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [2] Norm SN EN ISO 7730:2006, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit, International Standardization Organisation, Genf
- [3] P.O. Fanger, A.K. Melikov, H. Hanzawa, *Air Turbulence and sensations of draught*, Energy and Buildings 12 (1988) S. 21-39
- [4] Recknagel, Sprenger, Albers, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, *Raumklimatische Grundlagen – thermisches Raumklima*, S. 139-145, 77. Auflage. 2015/2016, DIV Deutscher Industrie Verlag GmbH, München
- [5] B.W. Olesen, Vereinfachte Methode zur Vorausberechnung des thermischen Raumklimas, HLH 46(6) (1995), S. 219-225

- [6] Merkblatt SIA 2021:2002, *Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [7] Dokumentation SIA D 0176:2002, *Gebäude mit hohem Glasanteil – Behaglichkeit und Energieeffizienz*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [8] H. Manz, T. Frank, *Analysis of Thermal Comfort near cold surfaces by means of computational fluid dynamics*, Indoor and Built Environment 13 (2004), S. 233-242.
- [9] P. Heiselberg, *Draught Risk from Cold Vertical Surfaces*, Building and Environment 29 (1994), S. 297-301.
- [10] Merkblatt SIA 2028:2010 + Korrigendum C1:2015, *Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [11] P.V. Nielsen, F. Allard, H.B. Awbi et al., *Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design*, REHVA Guidebook No. 10 (2007), Federation of European Heating, Ventilation and Air-Conditioning Associations, Brüssel
- [12] Richtlinie VDI 6019 Blatt 2:2009, *Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden – Ingenieurmethoden*, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- [13] L. Schellen, S. Timmers, et al., *Downdraught assessment during design – experimental and numerical evaluation of a rule of thumb*, Building and Environment 57 (2012), S. 290-301
- [14] A. Jurelionis, E. Isevicius, *CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces*, J. Civil Eng. and Management 14:1 (2008), S. 29-38
- [15] S. Schiavon et al., *Sensation of draft at uncovered ankles for women exposed to displacement ventilation and air distribution systems*, Building and Environment 96 (2016) S. 228-236
- [16] H. Koskela et al., *Turbulence correction for thermal comfort calculation*, Building and Environment 36 (2001), S. 247-255
- [17] H. Koskela, J. Heikkinen, *Calculation of thermal comfort from CFD-simulation results*, Proceedings of Indoor Air 2002, S. 712-717, Monterey USA
- [18] M. Ruponen J.A. Tinker, *CFD validation of thermal comfort in a room using draft rates*, Proceedings of Clima 2007 WellBeing Indoors, Helsinki
- [19] S. Lestinen, et al., *CFD-simulation and measurement of indoor environment in a multipurpose arena*, Proceedings of Ventilation 2012 – 10<sup>th</sup> International Conference on Industrial Ventilation, Paris
- [20] Z. Popiolek, *Estimation of mean speed and speed standard deviation from CFD prediction*, Architecture Civil Engineering, Environment 1/2008 S. 141-146, Silesian University of Technology, Gliwice, PL
- [21] A.K. Melikov, Z. Popiolek et al., *Accuracy Limitations for Low-Velocity Measurements and Draft Assessment*, HVAC&R Research 13 (6) (2007), S. 971-986
- [22] F.E. Jorgensen, *How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a practical guide*, 2002, Dantec Dynamics, Skovlunde DK
- [23] R. Goda, *Turbulence intensity and air velocity characteristics in a slot ventilated space*, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 38 (1) 2014, S. 1-4
- [24] Y. Zhou, M. Luo, et al., *Dynamic characteristics and comfort assessment of airflows in indoor environments: A review*, Building and Environment 91 (2015), S. 5-14
- [25] *Lüftung von grossen Räumen – ein Handbuch für Planer*, Clima Suisse – Bundesamt für Energie, 1997