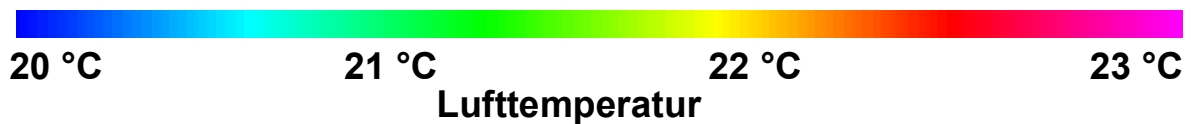
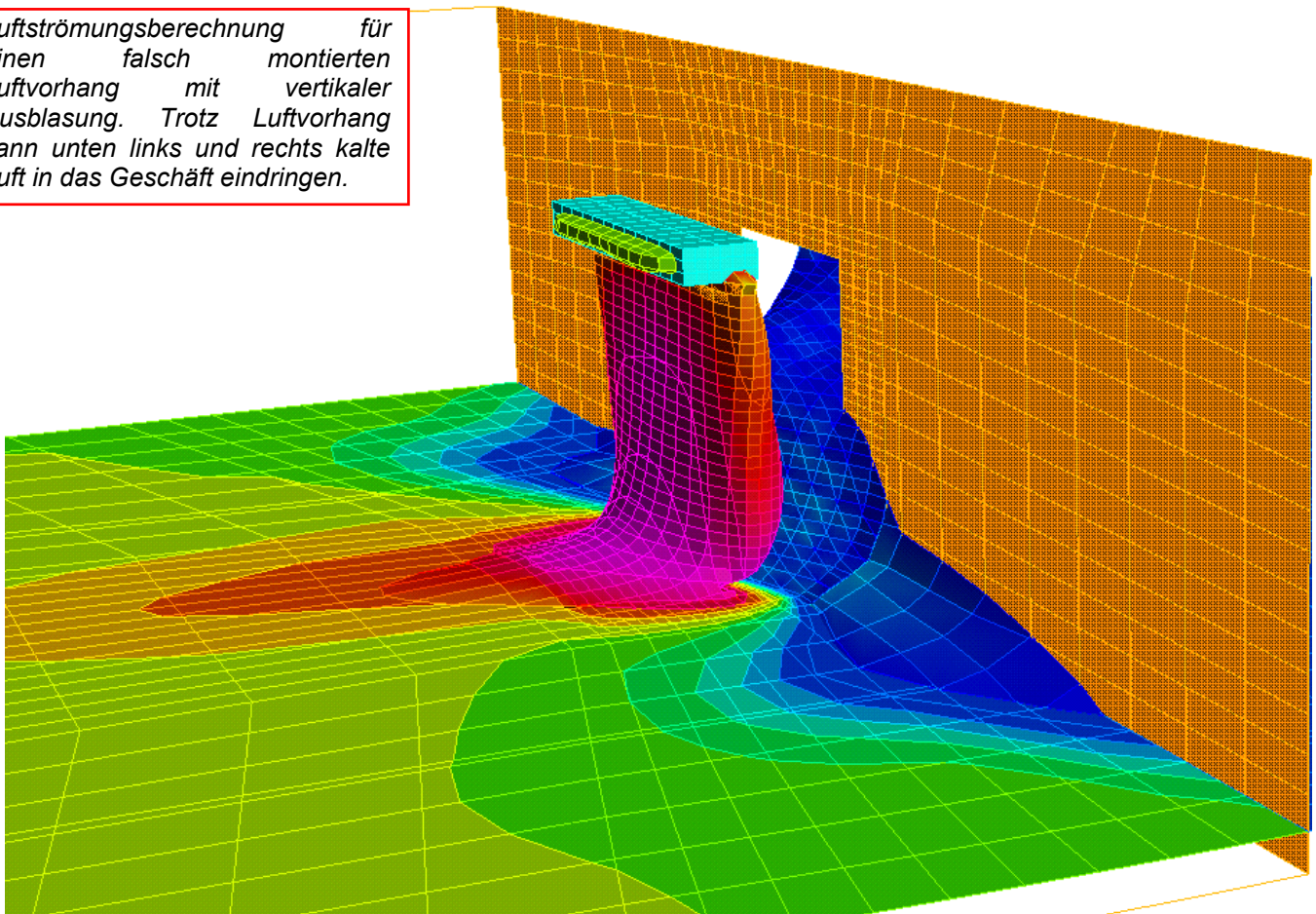


Gebäudeeingänge mit grossem Publikumsverkehr

April 1998

Luftströmungsberechnung für einen falsch montierten Luftvorhang mit vertikaler Ausblasung. Trotz Luftvorhang kann unten links und rechts kalte Luft in das Geschäft eindringen.



Gebäudeeingänge mit grossem Publikumsverkehr

Alois Schälin, AFC Air Flow Consulting

Weinbergstr. 72, 8006 Zürich

Tel. 044-350-3595, Fax 044-350-3596

E-mail schaelin@afc.ch , Internet-Website www.afc.ch

April 1998

(unverändert, Adressen-Update Dez. 2005)

**im Auftrag der Zürcher Energieberatung mit Unterstützung der
Energiefachstelle des Kantons Zürich und des Bundesamtes
für Energie**

Begleitgruppe

Dr. M. Lenzlinger, Energiebeauftragter der Stadt Zürich

Christoph Gmür, Amt für technische Anlagen und Lufthygiene des Kantons Zürich (ATAL)

Martin Stettler, Bundesamt für Energie, Rationelle Energienutzung

Bezug

AFC oder für die Begleitgruppe:

Christoph Gmür, AWEL, Abteilung Energie, CH-8090 Zürich

Tel. 043-259-4266, E-mail: energie@bd.zh.ch

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Studie "Gebäudeeingänge bei Verkaufsgeschäften"	1
1.3 Aufbau des Berichtes über die Ergebnisse	2
2 Überblick der Untersuchungen	2
2.1 Luftströmungen bei einem Eingang	2
Komfortauswirkungen.....	3
2.2 Einflüsse auf die Klimatrennung Innen-Aussen bei einem Eingang.....	4
2.3 Untersuchte Lösungen für einen Eingang:	4
Betriebsarten	5
Referenzeingang in einem Testgeschäft.....	5
3 Resultate.....	7
Grundregeln.....	7
3.1 Einfacher Eingang ohne besondere Massnahmen.....	7
3.1.1 Geschlossener Eingang	7
3.1.2 Offener Eingang	8
3.2 Drehtür	11
3.3 Windfang (Schleuse).....	12
3.4 Eingänge mit Luftvorhang	13
3.4.1 Rahmenbedingungen	13
3.4.2 Optimierung des Luftvorhanges	15
4 Fazit	20
4.1 Einflüsse auf die Luftströmung in Eingangsnähe	20
4.2 Empfehlungen zur Eingangsgestaltung	21
4.3 Praktische Hinweise.....	21
4.4 Zusammenstellung einiger Energieverlustwerte.....	22
Literaturangaben	22
Anhang A: Freie Strömung durch grosse Öffnungen	
Anhang B Detaillierte Strömungsberechnungen	
Anhang C: Übersicht über die Felduntersuchungen	
Anhang D: Detaillierte Messberichte	

Die Anhänge A-C sind gemeinsam in einem separaten Band enthalten. Anhang D kann bei der Zürcher Energieberatung eingesehen werden.

Titelbild

Beispiel eines falsch montierten Luftvorhanges mit vertikaler Ausblasung. Das Modul ist zurückgesetzt im Raum über der Tür montiert. Trotz Luftvorhang kann unten links und rechts kalte Luft in das Geschäft eindringen.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Eingangsgestaltung von Geschäften ist schon lange ein sehr umstrittenes Thema, da von mindestens drei Seiten sehr unterschiedliche Anforderungen aufeinandertreffen.

1. **Attraktivität:** Von der betriebswirtschaftlichen Seite soll ein möglichst offener ungehinderter Zugang möglichst viele Kunden anziehen, vor allem zusätzlich jene Kunden, die zufällig vorbeigehen und durch den Blick in den offenen Laden verlockt werden einzutreten.
2. **Komfort:** Ein solcher offener Eingang führt in unseren Breiten bei kühleren Aussenbedingungen ohne besondere Massnahmen zu unerwünschtem Eindringen von Aussenluft durch den Eingang in den Laden. Das Innenklima wird durch Kaltluft und Luftzug empfindlich gestört, und beeinträchtigt die Arbeitsbedingungen des Personals. Für die Kunden ist diese Anforderung weniger kritisch, da sie von aussen kommen, winterlich bekleidet sind und meist auch nur kurze Zeit im Laden verbringen. Das Verkaufspersonal hingegen arbeitet ganztags innen und sollte darum idealerweise Innenraumbedingungen haben.
3. **Energie:** Das Eindringen von Aussenluft geht mit einem Verlust von warmer Innenluft einher und führt so zu einem erhöhten Energieaufwand, um die Soll-Betriebsbedingungen wiederherzustellen. Für minimalen Energieverbrauch soll der Eingang ebenfalls entsprechend optimiert werden.

Die betriebliche Wunschvorstellung der Eingangsgestaltung, nämlich ein offener, freier, möglichst grosser Eingang, ist unvereinbar mit den Anforderungen 2 und 3, die dann optimal erfüllt werden, wenn es keinen Eingang gibt. Nur mit unerwünschten Massnahmen wie Verzicht auf direkte Zugänge von aussen ins Geschäft wäre es möglich, an allen Stunden des Jahres gute Bedingungen im Ladeninnern fürs Verkaufspersonal und für die Kunden zu schaffen.

Bei gegebenen Rahmenbedingungen sollte man nun nicht einfach gerade die erstbeste Idee realisieren, sondern die Lösung des Eingangsproblems optimieren; die beste Lösung kann dabei je nach konkreter Situation ganz unterschiedlich ausfallen.

Primäres Designziel ist es, trotz Eingang möglichst gute Temperatur- und Komfortbedingungen im Geschäft zu realisieren. Die Anforderungen "Komfort" und "Energie" führen dabei im allgemeinen zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Je nach Gewichtung der beiden Anforderungen wird dann z.B. noch etwas mehr oder weniger Wärme im Eingangsbereich hinzugeführt. Investitions- und Betriebskosten spielen im Vergleich zu Umsatzsteigerungen durch attraktive Eingänge eine geringere Rolle.

Ziel dieser Untersuchungen war es nun, Grundlagen und Wege zur Optimierung aufzuzeigen. Dazu wurden Messreihen an mehreren unterschiedlichen bestehenden Eingangslösungen durchgeführt, die in Kombination mit theoretischen Untersuchungen und Computersimulationen mit numerischer Strömungsberechnung als Grundlage für die hier vorgestellten Ergebnisse und Empfehlungen dienten.

1.2 Studie "Gebäudeeingänge bei Verkaufsgeschäften"

Im Rahmen der Studie "Gebäudeeingänge bei Verkaufsgeschäften", welche von der Stadt Zürich in Auftrag gegeben und vom Kanton Zürich und dem Bundesamt für Energie unterstützt wird, sollen Empfehlungen für die optimale Gestaltung von Gebäudeeingängen ausgearbeitet werden.

Neben theoretischen Untersuchungen sollen Felduntersuchungen in Geschäften mit bestehenden unterschiedlichen Eingangsanlagen wie Drehtüren, Schiebetüren mit Luftvorhängen und anderen Aufschlüsse auf besondere Probleme wie Eindringen von kalter Luft oder Zugserscheinungen an den Arbeitsplätzen geben.

1.3 Aufbau des Berichtes über die Ergebnisse

In diesem Hauptteil des Berichtes sind die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu verschiedenen Bereichen sind wie folgt in den Anhängen zu finden:

- Anhang A Analytische einfache Modelle für Luftströmungen durch grosse Öffnungen mit Anwendungsbeispielen (inkl. Drehtüren)
- Anhang B Detaillierte Strömungsberechnungen für verschiedene Eingänge mit Schleuse und Luftvorhängen
- Anhang C Beschreibung der Felduntersuchungen
- Anhang D Detaillierte Messberichte zu den Felduntersuchungen

2 Überblick der Untersuchungen

Hauptziel ist die Erfüllung der Anforderungen "Komfort im Innenraum" und "Minimierung des Energieaufwandes" bei einem attraktiven Eingang. Der Weg führt dazu führt jedenfalls über eine möglichst gute Abtrennung zwischen Innen- und Aussenklima.

Nebst grundsätzlichen Überlegungen haben es vor allem die Felduntersuchungen an den ausgewählten Objekten ermöglicht, die Einflüsse auf diese Klimatrennung, bzw. auf den Luftaustausch zwischen innen und aussen, zu erfassen und in ihrer praktischen Bedeutung auch zu werten.

Die Analyse der strömungstechnischen Vorgänge rund um die Eingänge und der damit verbundenen Probleme hat ergeben, dass folgende Einflüsse eine relevante Rolle bei der optimalen Eingangsgestaltung spielen:

Rahmensituation Geschäft	Kombination mit weiteren Eingängen, Dichtheit des Gebäudes, Abstimmung mit HLK
Lage des Eingangs	Position am Gebäude, Umgebung (Windexposition)
Geometrie des Eingangs	Eingangsbreite, Eingangshöhe
Bauliche Massnahmen	Schleusen, Drehtür, Ausführungsqualität
Lokale Lüftungsmassnahmen	Luftvorhänge, Warmluftbeimischung
Betrieb des Eingangs	Schliessmechanismus, Regelung

2.1 Luftströmungen bei einem Eingang

Ein offener Eingang stellt eine Verbindung dar zwischen einem Innenraum und der Aussenumgebung. Dies führt zu einer gegenseitigen Beeinflussung von Innen- und Aussenklima, mindestens in der Nähe des Eingangs, und hat damit auch Auswirkungen auf den Komfort der sich dort aufhaltenden Personen.

Folgende Luftströmungen sind bei einem offenen Eingang möglich (siehe Anhang A1):

1. Bei Temperaturunterschieden zwischen innen und aussen (bei den hier interessierenden Fällen ist es innen wärmer als aussen):
 - Falls dies der einzige Eingang ist, gibt es Ausgleichsströmungen zwischen der kalten und warmen Seite innerhalb dieser Öffnung; oben fliesst warme Luft nach aussen, unten kalte Luft herein (Bild 1a). Die Geschwindigkeiten liegen maximal im Bereich 0.5–1m/s. Dieser Fall ist der **Referenzfall**, bezüglich welchem die Energieverluste in den verschiedenen Fällen verglichen werden.
 - Wenn es noch andere Eingänge oder Öffnungen (Fenster, Lecke) auf unterschiedlichen Höhen gibt, stellt sich eine Strömung durch das Gebäude ein, und kalte Luft fliesst durch die unteren Öffnungen herein, warme Luft durch die oberen Öffnungen nach aussen (Bild 1b und c). Die Geschwindigkeiten können bei grossen Höhenunterschieden auch bei kleinen Öffnungen

gen sogar 5m/s erreichen! Wie die praktischen Untersuchungen zeigen, gibt es häufig eine solche Konstellation (offene Treppenhäuser, Liftschachte).

2. Bei Windeinfluss:

- Falls dies der einzige Eingang ist, ist folgendes möglich:
 - * bei einem kleinen, geschützt liegenden Eingang gibt es wenig Beeinflussung in den Innenraum ausser gewisse kurzzeitige Zugserscheinungen infolge von Böen
 - * bei einem grösseren, exponiert gelegenen Eingang kann es durch einen Teil des Eingang hereinziehen, wobei entsprechend Luft durch einen andern Eingangsbereich verlässt (ähnlich Bild 1a, aber mit höheren Geschwindigkeiten).
- Wenn es noch andere Eingänge oder Öffnungen (Fenster, Lecke) gibt, stellt sich eine starke Strömung durch das ganze Gebäude ein, je nachdem wie gross der Strömungswiderstand durch Hindernisse ist (Bilder 1d und 1e).

3. Wenn die Lüftungsanlagen nicht mit neutralem Massenfluss arbeitet (unterschiedliche Luftströme Zuluft/Abluft, bzw. Über- oder Unterdruck), fliesst ein Nettoluftstrom durch die Öffnung, bzw. die Öffnungen, nach innen oder aussen (Bild 1f).

4. Kombinationen dieser Möglichkeiten

Bild 1 zeigt einige dieser möglichen Luftströmungen.

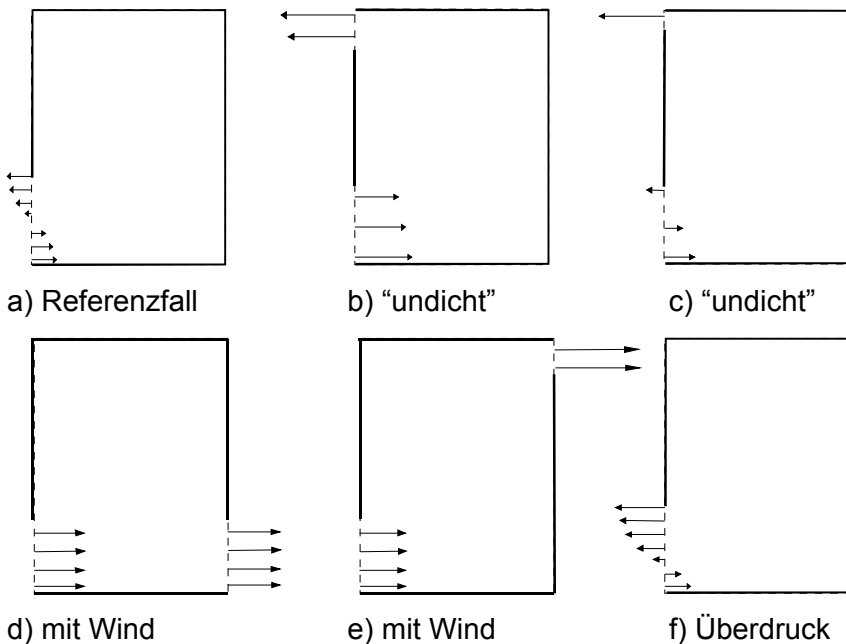


Bild 1: Luftströmungen im offenen Eingang.

a) nur thermisch bei dichtem Gebäude.

b) und c) nur thermisch mit weiterer kleiner und grosser Öffnung in oberer Etage.

d) und e) nur mit Wind von links. e) ähnlich b), nur verstärkt, falls Temperaturunterschied vorhanden.

f) wie a), aber mit Überdruck innen.

Komfortauswirkungen

Die thermische Strömung wirkt beim Normalfall vorwiegend in Eingangsnähe, und stört nur in der kühlen Jahreszeit, wo sie aber auch stärker ist. Die störende Wirkung ist vor allem auf die kalte Luft zurückzuführen, da die Geschwindigkeiten eher gering sind.

Durchzug durchs ganze Gebäude ist wesentlich schlimmer, da einerseits die Geschwindigkeiten meist höher sind, und damit andererseits kalte Luft weiter transportiert wird, bis sie wieder aufgewärmt wird.

Mit den verschiedenen im folgenden untersuchten Massnahmen wird versucht, diese Luftströmungen möglichst einzuschränken und damit eine Klimatrennung zwischen innen und aussen zu erreichen.

2.2 Einflüsse auf die Klimatrennung Innen-Aussen bei einem Eingang

Die Einflüsse auf die Klimatrennung zwischen innen und aussen und damit ebenso auf die optimale Eingangsgestaltung, sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Art	Parameter	Bedingung für bessere Abtrennung
Lage	Position am Gebäude	Eingang nicht an Ecke
	Umgebung	möglichst windgeschützt
Geometrisch	Eingangsbreite B	kleiner (Verlust prop. B)
	Eingangshöhe H	kleiner (Verlust prop. $H^{1.5}$)
Bauliche Massnahmen	Ausführungsqualität	Möglichst dicht (Ritzen!)
	Schleusen, Drehtür	möglichst nie offen
Lokale Lüftungsmassnahmen	Luftvorhang	optimieren
Betrieb des Eingangs	automatische Schiebetüren	nur offen, wenn nötig
	Regelung der Lüftungsparameter am Eingang	Anpassung an ändernde Aussenbedingungen
Rahmensituation Geschäft	Weitere Eingänge	möglichst wenig
	Dichtheit, auch in höheren Geschossen (Lift- und Installationsschächte)	möglichst dicht
	Abstimmung mit HLK	Zuluftstrom=Fortluftstrom
Allgemeines	wenn die Tür zu ist, soll sie auch dicht sein!	

Tabelle 1: Einflüsse auf die Klimatrennung zwischen innen und aussen.

Im folgenden werden verschiedene Massnahmen in ihren Auswirkungen auf die folgenden Aspekte untersucht:

- Komfortparameter im Geschäft (Temperatur, Luftzug)
Diese Parameter (Temperatur, Luftzug) haben einen Einfluss auf das Wohlbefinden sowohl des arbeitenden Personals als auch der Kunden. Die arbeitenden Personen sind bei ungünstigen Werten allerdings viel stärker betroffen, da sich die Kunden im Winter für die Aussenbedingungen bekleiden, und so viel unempfindlicher auf Zug oder Kaltluft sind. In Extremfällen kann es aber durchaus (vor allem bei Windeinfluss) so unangenehm in einem Teil des Geschäft sein, dass kein Kunde in diesem Bereich stehenbleibt.
- Energieaufwand (zur Kompensation der Wärmeverluste durch den Eingang)
Durch Optimierung der Eingangsgestaltung und des Betriebes bei verschiedenen Aussenbedingungen kann der Energieaufwand minimiert werden.

2.3 Untersuchte Lösungen für einen Eingang:

Es sind verschiedene Methoden entwickelt worden (und werden immer noch entwickelt), um die Eingangsproblematik in den Griff zu bekommen. Einige häufige von diesen Lösungen wurden ausgewählt, und an bestehenden Objekten und theoretisch näher untersucht.

Folgende Lösungen für den Eingang wurden grundsätzlich in Betracht bezogen und detailliert untersucht:

Tür ohne besondere Lüftungsmassnahmen (Normaltür, Schiebetür)

Betriebsmöglichkeiten:	<ul style="list-style-type: none"> • permanent offen • mit automatischem Schliessmechanismus
------------------------	--

Drehtür:

Betriebsmöglichkeiten:	<ul style="list-style-type: none"> • permanent drehend • mit automatischem Personensensor (dreht nur bei Personendurchgang)
Detail:	<ul style="list-style-type: none"> • mit Warmluftbeimischung

Schleuse mit 2 Türen, mit oder ohne Luftvorhang

Betriebsmöglichkeiten:	<ul style="list-style-type: none"> • mit automatischem Schliessmechanismus
Detail:	<ul style="list-style-type: none"> • mit Luftvorhang innen/aussen

Schiebetür mit Luftvorhang

Betrieb der Tür:	<ul style="list-style-type: none"> • permanent offen • mit automatischem Schliessmechanismus
Detail:	<ul style="list-style-type: none"> • Luftvorhang von oben • Luftvorhang seitlich • Mit Absaugung unten

Tabelle 2: Untersuchte Lösungen für die Eingangsgestaltung.

Betriebsarten

Die Anforderungen an den Eingang sind je nach Betriebsart unterschiedlich. Meist müssen alle Betriebsarten berücksichtigt werden.

- Nichtbetrieb (Nacht, Wochenende). Der Zeitanteil dieses Betriebszustandes ist am grössten. Wichtig sind daher Dichtheit und guter k-Wert (in dieser Reihenfolge!).
- Teillastbetrieb. Bei diesem Betrieb lohnt sich die Schliessautomatik von Schiebetüren jedenfalls.
- Vollastbetrieb
- Spitzenlast

Bei Voll- und Spitzenlast kommen schmale Eingänge, wie sie im Winter empfohlen werden, oft an ihre Förderkapazitätsgrenze. Dies gilt noch stärker für Drehtüren.

Referenzeingang in einem Testgeschäft

Für die Vergleichsrechnungen wurde ein Computermodell eines Geschäftes mit Möblierung erzeugt, in welchem Luftströmungen für verschiedene Eingangsgestaltungen und Gebäudedichtheiten berechnet werden können, nach Wunsch auch mit Windeinfluss (siehe Bild 2).

Für den Eingang wurde eine einheitliche, praktisch sinnvolle, nicht allzu grosse Eingangsgrösse gewählt von **1.6m Breite und 2.08m Höhe**. Diese Grösse entspricht einer vernünftigen Winterbreite; im Sommer kann der Eingang 2-3 mal breiter sein. Für die Berechnungen der Wärmeverluste

wurden eine Innentemperatur von 20°C und eine Aussentemperatur von 0°C angenommen, d.h. eine Temperaturdifferenz von $\Delta T=20K$ zwischen innen und aussen.

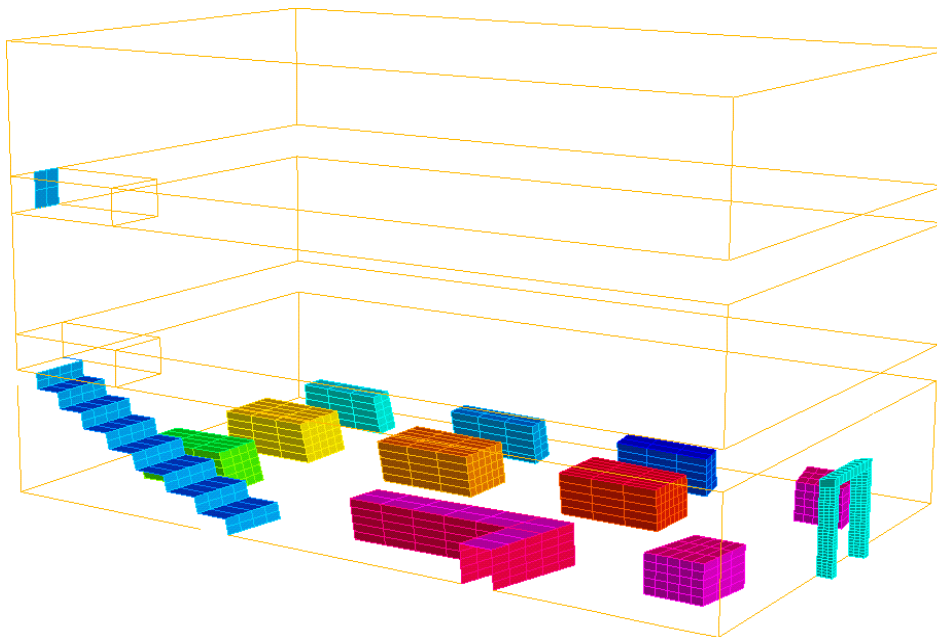


Bild 2: Computermodell des Testgeschäftes mit 3 Stöcken, Möblierung und Eingang rechts unten (Details siehe Bild 3).

Oben links (blau) zwischen 2. und 3. Stock befindet sich die Öffnung, die in einigen Fällen ein undichtes Gebäude simuliert.

Bild 3 zeigt den Referenzeingang pur, mit Luftvorhang und mit einem Windfang, als Bestandteile verschiedener Rechenmodelle. Bei den meisten Modelle wurde eine Möblierung im Innern angenommen.

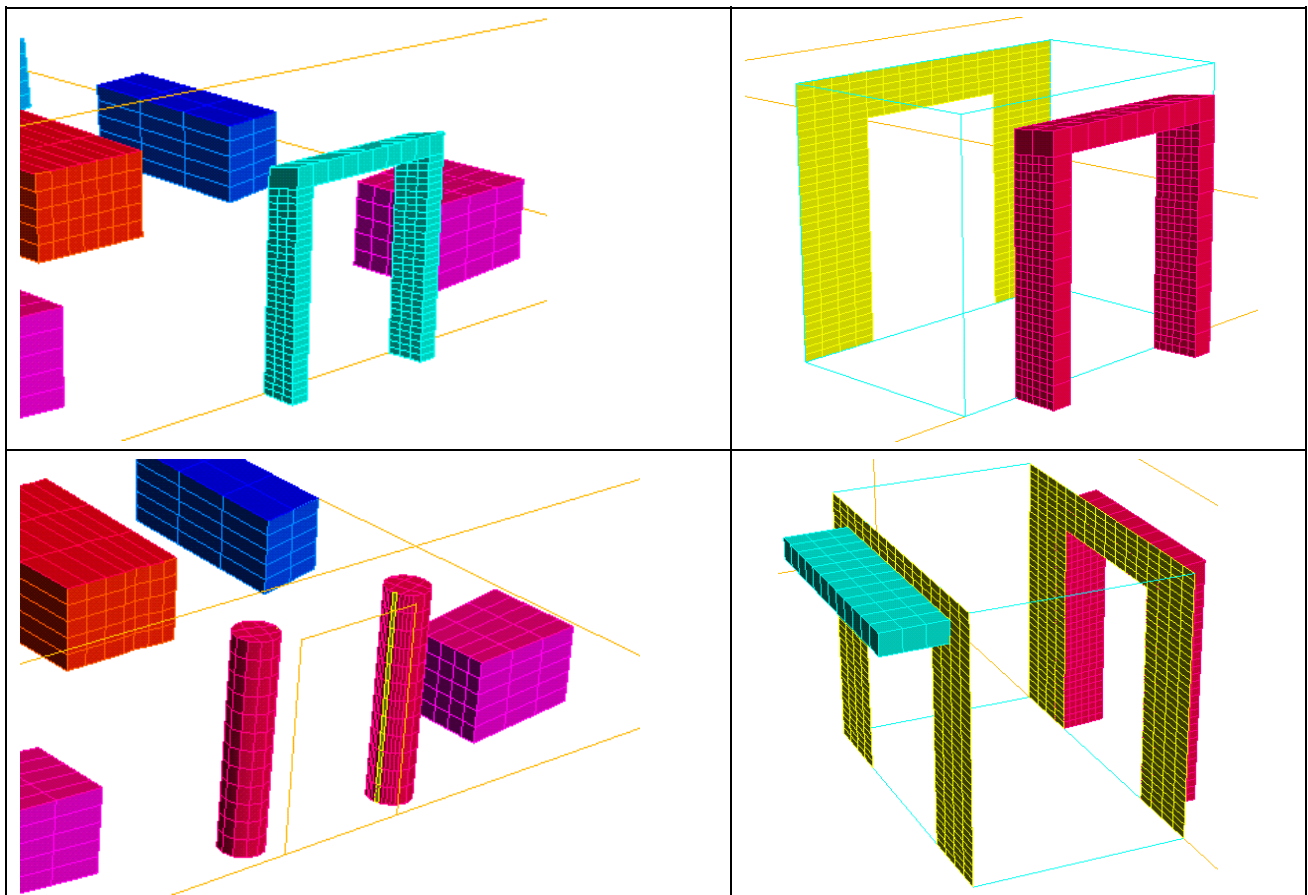


Bild 3 Verschiedene Gestaltungen des Referenzeinganges (Breite 1.6m, Höhe 2.08m).

Oben links: Einfacher Eingang. Oben rechts: Mit Windfang, Tiefe 2m.

Unten links: Mit horizontalem Luftvorhang. Unten rechts: Mit Windfang und vertikalem Luftvorhang.

3 Resultate

In diesem Kapitel sind die Resultate aus den theoretischen Untersuchungen (siehe Anhänge A und B) in einem Überblick dargestellt. Dabei sind die Resultate aus den Feldmessungen (Anhang C) miteingeflossen. Folgende Fälle wurden behandelt:

- Einfacher Eingang
- Drehtür
- Windfang (Schleuse, Zwischenraum mit 2 Türen)
- Einfacher Eingang oder Windfang, mit verschiedenen Luftvorhängen

Grundregeln

Einige einfache Grundregeln, die für den Design und den Betrieb eines Einganges unbedingt beachtet werden sollen, gelten für alle Lösungen.

- Der Eingang sollte so klein wie möglich gehalten werden (so niedrig wie möglich, so schmal wie möglich), der Verlust ist immer mindestens zur Fläche proportional. Niedriger ist noch wichtiger als schmal bezüglich Abkühlung und Energieverlust.
- Eingang so lange geschlossen halten wie möglich (automatische Schiebetüren zu, Drehtür nicht in Rotation ohne Personendurchgang), Abkühlung und Energieverlust sind immer wesentlich höher im offenen Zustand.
- Türen in geschlossenem Zustand so dicht wie möglich (während der meisten Zeit ist das Geschäft sowieso geschlossen, vor allem zur kältesten Zeit in der Nacht).
- Glastüren und Glaswände vor allem auch in diesem Eingangsbereich mit möglichst guten Isoliereigenschaften, d.h. möglichst niedriger k-Wert (während der meisten Zeit ist das Geschäft sowieso geschlossen, vor allem zur kältesten Zeit in der Nacht).

3.1 Einfacher Eingang ohne besondere Massnahmen

An diesem häufigsten Fall werden die Grundphänomene aufgezeigt. Der eigentliche Öffnungsvorgang wird nicht näher betrachtet, da dieser einerseits nur sehr aufwendig zu untersuchen ist, andererseits die genaue Kenntnis dieses Vorgangs als Übergang zwischen dem offenen und geschlossenen Zustand auch nicht sehr relevant ist. Daher wird auch nicht zwischen der normalen Flügeltür und einer Schiebetür unterschieden.

3.1.1 Geschlossener Eingang

Dichtheit und guter k-Wert sind Grundanforderungen an die verwendeten Materialien und Lösungen, da während dem grössten Zeitanteil (nachts, Wochenende) und auch während der kältesten Zeit (nachts) die Läden geschlossen sind. Der Energieverlust kann in der Summe recht bedeutend sein.

Wärmeleitung

Türen aus Glas, dicht: Energieverlustrate durch Wärmeleitung

$$\text{Mit } k = 5 \text{ W/m}^2 \quad Q = k \Delta T A = 5 \cdot 20 \text{ W/m}^2 \cdot 2.08 \cdot 1.6 \text{ m}^2 = 333 \text{ W} = 0.33 \text{ kW.}$$

$$\text{Mit } k = 2 \text{ W/m}^2 \quad Q = k \Delta T A = 2 \cdot 20 \text{ W/m}^2 \cdot 2.08 \cdot 1.6 \text{ m}^2 = 133 \text{ W} = 0.13 \text{ kW.}$$

Undichtheiten in Türen

Beispiel einer real angetroffenen Tür, die einen 2cm breiten Spalt aufweist, durch den im Winter mit bis 2m/s Luft strömt (Bei Drehtüren wurden ähnliche Spaltbreiten beobachtet, die permanent Luft durchlassen), welche das Gebäude irgendwo in einem oberen Stock wieder verlässt:

$$Q = \rho v A \cdot c_p \cdot \Delta T = 1.16 \cdot 2 \cdot (0.02 \cdot 2) \cdot 1000 \cdot 20 \text{ W} = 1900 \text{ W} = 1.9 \text{ kW}$$

Undichtheiten in Gebäuden

Undichtheiten in diesem oder grösserem Ausmass können oft beobachtet werden. Ein Gebäude mit vielen Fenstern weist viele kleine Lecke auf, die sich auf eine stattliche Zahl summieren können. Mit dem Grenzwert nach SIA 380/1 (S. 12, Tabelle 7) für Fugenverluste a_F bei Fenstern ergibt sich für ein Beispiel folgender Volumenstrom und Wärmeverlust:

Grenzwert $a_F = 0.2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}/\text{Pa}^{2/3}$, 200 m Fugenlänge (z.B. 20 Fenster mit je 10 m Fugen), Druckdifferenz 10 Pa (thermisch wird dies schon bei 10 m Höhe und $\Delta T = 20 \text{ K}$ erreicht)

$$\dot{V} = a_F L \Delta p^{2/3} = 0.2 \cdot 200 \cdot 5 = 200 \text{ m}^3/\text{h} = 0.055 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q = \rho \dot{V} c_p \Delta T = 1.2 \cdot 0.055 \cdot 20000 \text{ W} = 1.3 \text{ kW}$$

Weit markantere Verlustöffnungen können bei Liftschächten oder Treppenhäusern auftreten, oder natürlich bei offenen Fenstern in oberen Geschossen (siehe nächster Abschnitt).

3.1.2 Offener Eingang

Dies ist der normale Betriebsfall jeder Tür. Solange sie offensteht, wird der Innenraum aus einem unerschöpflichen Reservoir kalter Aussenluft geflutet. Wenn das Gebäude dicht ist und die Lüftung neutral, ist der Nettofluss durch die Tür 0. Im oberen Teil der Tür fliesst warme Luft nach aussen (Wärmeverlust), im unteren Teil strömt kalte Luft hinein (siehe Bild 1a).

Die auftretenden Strömungen können mit guter Näherung mittels einfacher Formeln berechnet werden (siehe Anhang A1). Für die Strömung in zwei Richtungen durch eine einzige Öffnung der Türbreite B , Türhöhe H und Temperaturunterschied ΔT gilt:

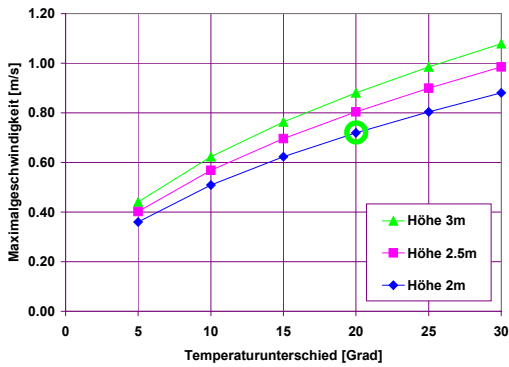
maximal auftretende Geschwindigkeit [m/s]	$u_{\max} = 0.6 \sqrt{20(H/2) \frac{\Delta T}{273}}$
Volumenstrom [m ³ /h] in jede Richtung	$\dot{V} = 0.2 \sqrt{\frac{10}{273}} B H^{1.5} \Delta T^{0.5}$
Wärmeverlust [W]	$Q = 230 \sqrt{\frac{10}{273}} B H^{1.5} \Delta T^{1.5}$

Die Darstellung der Gleichungen in dieser Form zeigt folgendes:

- Die Geschwindigkeit (und damit der primäre Luftzugfaktor im Türbereich) ist in der Wurzelfunktion (d.h. schwächer als linear) von der Höhe und dem Temperaturunterschied abhängig. Bei geringeren Temperaturunterschieden nimmt die Geschwindigkeit daher nur wenig ab (siehe Bild 4a). Je kälter die Luft aber ist, umso drastischer sind die Komfortauswirkungen.
- Der Luftvolumenstrom \dot{V} ist linear von der Breite abhängig, und von der Höhe stärker als linear ($\propto H^{1.5}$). Eine unnötig hohe Tür führt zu einem höheren Energieverlust Q als eine unnötig breite Tür (siehe Bilder 4b und 4d).
- Der Energieverlust Q ist zusätzlich überproportional vom Temperaturunterschied abhängig (prop. $T^{1.5}$), siehe Bild 4c. Bei tieferer Aussentemperatur nimmt der Energieverlust überproportional zu (Transmissionsverluste verhalten sich linear zu den Temperaturdifferenzen). Umso wichtiger sind rigorose Massnahmen bei kalten Aussentemperaturen.

Die Graphiken in Bild 4 veranschaulichen diese Zusammenhänge.

Die praktischen Untersuchungen haben gezeigt, **dass beim Eingang oft nur kalte Luft einströmt**, und dass entsprechend Luft irgendwo im Gebäude entweichen muss. Meist ist dies bei mehrstöckigen älteren Gebäude der Fall. Die Lecke können offene oder undichte Fenster, Liftschächte, usw. oder eine Kombination davon sein. In solchen Fällen können die Verluste noch viel massiver sein, wenn die wirksame Höhe sich über mehrere Stockwerke erstreckt.



○ Referenzeingang

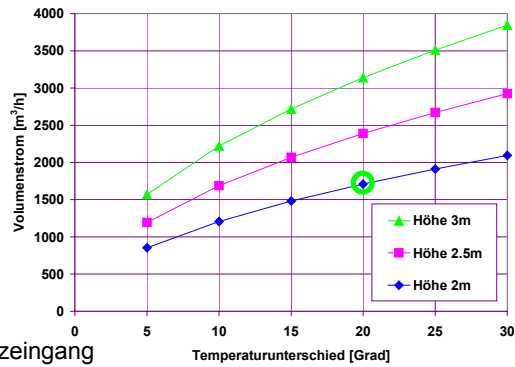
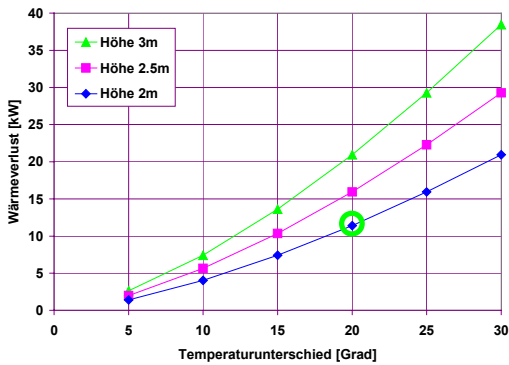


Bild 4a: Strömung durch eine Tür. Die maximale Geschwindigkeit im Türbereich nimmt mit dem Temperaturunterschied und mit der Türhöhe zu, aber weniger als linear ($\propto H^{0.5} \Delta T^{0.5}$).

Bild 4b: Strömung durch eine Tür. Der Volumenstrom (pro m Türbreite) in jede Richtung durch die Tür nimmt mit dem Temperaturunterschied und mit der Türhöhe zu, gemäss $\propto H^{1.5} \Delta T^{0.5}$.



○ Referenzeingang

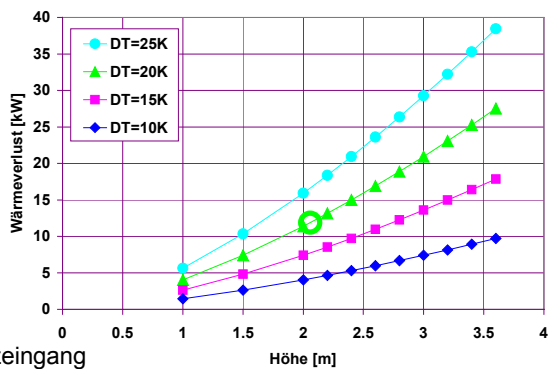


Bild 4c und 4d: Strömung durch eine Tür. Der Wärmeverlust (pro m Türbreite) nimmt stärker als linear mit der Türhöhe und dem Temperaturunterschied zu, gemäss $\propto H^{1.5} \Delta T^{1.5}$. Der Eingang sollte darum nicht unnötig hoch sein.

Bild 5 zeigt für ein Beispiel (2m² Öffnung unten, 1m² Öffnung oben) den Luftstrom und den Wärmeverlust durch die obere Öffnung, ohne Reibungsverluste durch Strömungshindernisse zwischen den Öffnungen, welche diesen Effekt dämpfen. In diesem Beispiel fliesst bei Totalhöhen von 12m oder weniger zusätzlich noch Luft durch die untere Öffnung nach aussen (siehe Bild 1c).

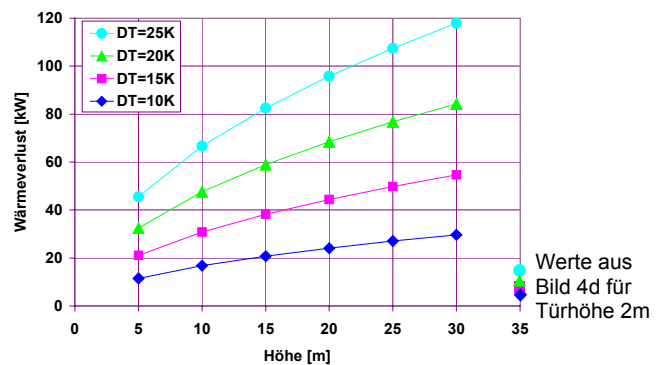
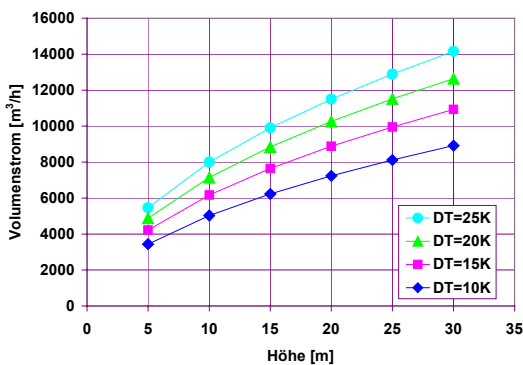


Bild 5a: Strömung durch zwei Öffnungen bei konstanter Öffnungsgrösse. Der Volumenstrom nimmt in Wurzelabhängigkeit mit dem Temperaturunterschied und dem Höhenabstand der beiden Öffnungen zu. (2m² Öffnung unten, 1m² Öffnung oben).

Bild 5b: Strömung durch zwei Öffnungen bei konstanter Öffnungsgrösse. Der Wärmeverlust nimmt weniger als linear mit der Höhe und stärker als linear mit dem Temperaturunterschied zu. (2m² Öffnung unten, 1m² Öffnung oben). Zum Vergleich sind die Verlustwerte aus Bild 4d angegeben.

Komfortauswirkungen bei offener Tür:

Solange die Tür offensteht, „überflutet“ eine kalte Luftwelle (Höhe ca. 1m beim Eintritt, ca. 0.5m nach 5m) mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. 0.5-0.8 m/s den ganzen Boden (siehe Anhang B). Je länger die Tür offensteht, umso weiter breitet die kalte Luft sich aus. Die Mischung mit der warmen Luft erfolgt allmählich.

Wenn das Gebäude undicht ist, sind die Geschwindigkeit wesentlich höher (bis 2 m/s oder mehr an engen Stellen oder in Eingangsnähe). Mit Wind und Durchzugsmöglichkeit können die Auswirkungen noch drastischer sein.

Energieverlust beim Referenzeingang

Wenn das Gebäude dicht ist (dies wird hier als Normalfall bezeichnet), geschieht folgendes: Kalte Luft strömt im unteren Türteil nach innen, warme Luft im oberen Türteil nach aussen. Bild 6 gibt einen Eindruck von diesem Vorgang.

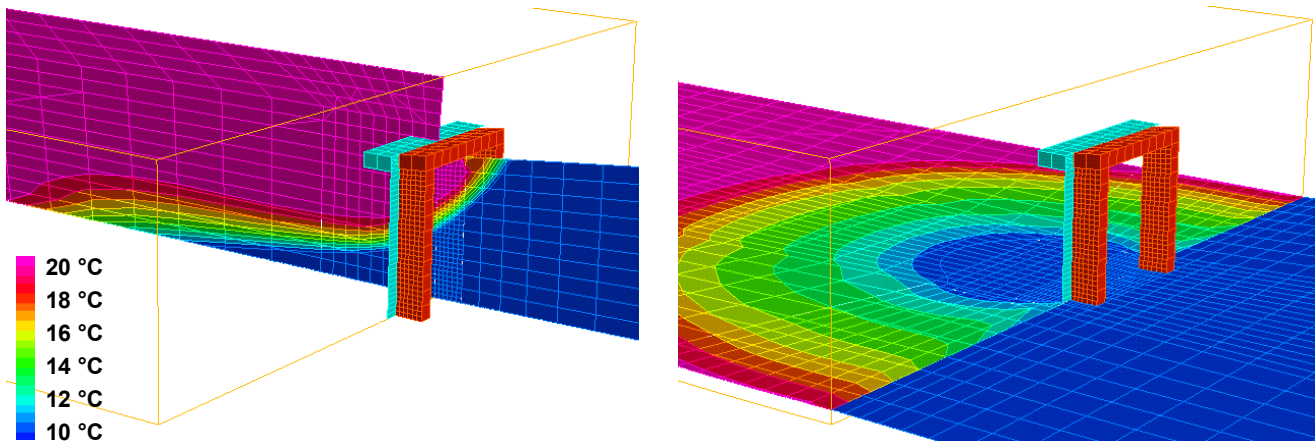


Bild 6: Luftaustausch durch offene Tür, 20s nach Öffnung. Links im Querschnitt, rechts ca. 0.2m über Boden.

Die Energieverlustrate beträgt beim Referenzeingang **bei konstant offener Tür ≈ 19.3 kW** (siehe Anhang A2.1.2). Dies ist ein sehr hoher Energieverlust, den es zu vermeiden gilt, mindestens dadurch, dass die Tür so kurz wie möglich offen ist (nebst dem, dass sie so klein wie möglich ist).

Der Energieverlust beim Durchgang einer einzelnen Person hängt von der totalen Öffnungszeit der Tür ab. Diese hängt von Türtyp, Schliessmechanismus und Benutzerverhalten ab.

Beispiele von Schiebetüren in der Praxis haben gezeigt, dass es vom Beginn der Öffnung bis zum Schliessen durchaus 6-8 s dauern kann bei einer einzigen Person. Wenn die Tür blitzartig offen wäre, dauert es ca. 1 s, bis die Strömung auf die hier berechneten Werte beschleunigt (siehe Berechnungen bei Anhang B). Zusammen mit dem langsamen Öffnen und Schliessen kann man ca. 2-3 s von dieser maximalen Zeit abziehen.

Es wird hier eine **effektive Zeit von 4s** angenommen, während der die berechneten Verlustraten wirken (Dies ist eine eher optimistische Schätzung). Der Energieverlust beträgt dann beim Durchgang einer einzelnen Person $\Delta E = Q \Delta t = 19.3\text{kW} \cdot 4\text{s} \approx 80$ kJ.

Bei undichtem Gebäude kann der Verlust massiv mehr betragen. Für das Beispiel Referenzeingang unten und eine Öffnung von 1.4m^2 ist die Energieverlustrate 100 kW, anstelle 19.3 kW, siehe Bild 5b. Die Luftgeschwindigkeit unten beträgt etwa 1.25m/s, und die Gebäudedurchströmung ca. $15000\text{ m}^3/\text{h}$. Beim Eintreten einer Einzelperson beträgt der Verlust dann 400 kJ statt 80 kJ.

Eine Normaltür mit Schliesser ist deutlich weniger lang offen als eine Schiebetür. Unter günstigen Bedingungen ist eine solche Normaltür effektiv nur ca. 2s offen; da sie nur ca. halb so breit wie der Referenzeingang ist, ist der geschätzte Energieverlust $\Delta E = Q \Delta t = 10\text{kW} \cdot 2\text{s} \approx 20$ kJ (bei dichtem Gebäude).

3.2 Drehtür

Der grosse Vorteil einer Drehtür liegt darin, dass sie als einzige Lösung starken Durchzug infolge Thermik (bei mehreren Öffnungen auf verschiedenen Höhen) oder Wind (ebenfalls bei mehreren Öffnungen oder infolge transienter Böeneffekte) ganz verhindert. Dazu muss natürlich die seitliche Abdeckung auch bei einer Drehtür mit nur 2 Segmenten so gross sein, dass zu keinem Zeitpunkt eine direkte Verbindung zwischen innen und aussen besteht (siehe Bild 7a).

Leider sind bei den meisten Modellen oft grosse Luftspalte am Boden oder an der Decke vorhanden, die ein Durchströmen von Luft (bei oft grossen Geschwindigkeiten je nach Wind oder thermischem Auftrieb) erlauben und so die optimale Wirksamkeit schmälern. Trotz dieses grundsätzlichen Vorteils weist die Drehtür den Nachteil auf, dass sie während dem Betrieb kalte Luft von aussen nach innen und warme Luft nach aussen fördert. Die damit verbundene Komforteinbusse und der Energieverlust sind beträchtlich und höher als oft angenommen.

Komfortauswirkungen bei Drehtür:

Eine Drehtür fördert wie erwähnt im Betrieb kalte Luft von aussen nach innen, die sich im Laden-innen mit der vorhandenen Warmluft langsam vermischt. Vor allem in Bodennähe kann sich aber kalte Luft sehr weit im Laden ausbreiten. Dies hat sich an den praktischen Beispielen eindrücklich bestätigt.

Je nach Komfortanforderungen sind daher zusätzliche Massnahmen angezeigt, vor allem aber, wenn Kassenarbeitsplätze in Eingangsnähe angeordnet sind. Es wird dringend empfohlen, **warme Luft beizumischen**, entweder durch die Wand der Drehtür, oder innerhalb des Ladens mit auf der unteren Eingangshälfte seitlich einblasenden Luftschleiern (siehe Bild 7b). Eine gute Lösung ist ein gebogener vertikaler Luftvorhang an der inneren Öffnung.

Genügende Luftmengen und eine gute Mischung sind jedenfalls vorzusehen; bei den untersuchten Lösungen wurden Untertemperaturen von $0.4 \cdot \Delta T$ (40% des Temperaturunterschiedes innen – aussen, bei 20 Grad also 8 Grad kälter als normal im Laden) bis in eine Distanz von 4m vorgefunden, trotz Warmluftbeimischung.

Zu beachten sind ferner der nicht vernachlässigbare Heizeffekt einer solchen lokalen Anlage auf das Innenklima, und die Tatsache, dass in unmittelbarer Nähe der Drehtür (bis ca. 2m) die Tür infolge der Rotation spürbar hohe Geschwindigkeiten induziert (je nach Konstruktion bis 1 m/s). Diese stören allerdings hier niemanden, da der Platz in Tüرنähe für den Personenverkehr freigelassen wird.

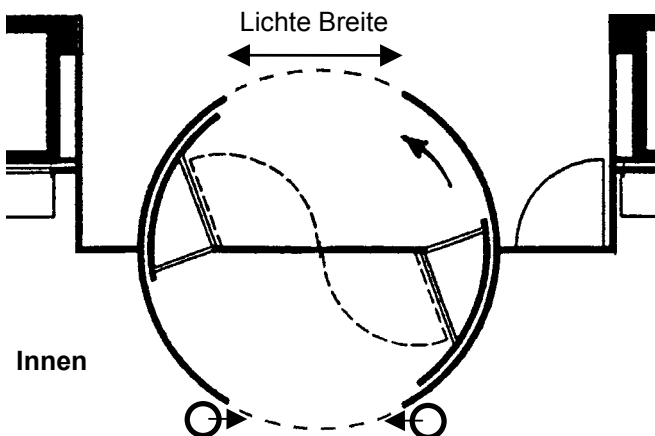


Bild 7: Links: Grundriss einer Drehtür mit 2 Segmenten. Die S-förmige gestrichelte Linie zeigt Einklappmöglichkeiten. Rechts: Innenseite dieser Drehtür mit seitlich einblasenden Luftvorhang in der unteren Türhälfte. Dies ist eine von verschiedenen Möglichkeiten, der "geförderten" Aussenluft warme Luft beizumischen.

Energieverluste

Für den Vergleich des Energieverlustes der Drehtür mit den anderen Lösungen muss berücksichtigt werden, dass für Geschäftseingänge eher grössere Modelle in Frage kommen, die aber kapazitäts-

mässig einem normalen Eingang gleicher Durchgangsbreite (siehe "lichte Breite" in Bild 7) unterlegen sind.

Der Energieverlust ist beim Durchgang einer Einzelperson relativ hoch, da im allgemeinen Fall ein Segment der Tür mit dem Aussenklima in Kontakt kommt, das vorher ans Innenklima angrenzte. Für eine zweiflügelige Drehtür mit Durchmesser 4.75m, wie sie auch in der Feldmessung untersucht wurde (siehe Bild 7), wurde der Energieverlust beim Durchgang einer einzelnen Person zu ca. 300-400 kJ abgeschätzt (siehe Anhang A2.3.2).

Dieser Wert kann unter günstigen Umständen geringer sein (etwa, wenn das gleiche Segment wieder aussen anhält, das vorher schon aussen war), aber auch höher, wenn z.B. die Tür noch lange weiterläuft oder noch warme Luft in die Segmente eingeblasen wird. In der Vergleichstabelle wird für den Energieverlust beim Durchgang einer Einzelperson daher **350kJ** eingesetzt (wenn die Tür noch weiterläuft, wird der Verlust noch grösser). Dieser Verlustwert liegt für Einzelpersonen wesentlich höher als beim Referenzeingang bei dichtem Gebäude, aber niedriger als bei undichtem Gebäude.

Verschiedene Abschätzungen führen zu einem Verlustwert von 15-20kW im Vollbetrieb einer Drehtür dieser Grösse (siehe Anhang A2.3.2). Die sicherste Angabe basiert auf einer Messung an einer grossen Drehtür und führt zu einem Verlust von **17kW**.

Für eine 4.2m durchmessende 4-flügelige Drehtür wurde ein mittlerer Verlustwert von **150kJ** für den Durchgang einer Einzelperson ermittelt, und **13 kW** für den Vollbetrieb (Messwert). Kleinere Drehtüren mit besseren Werten sind eng und eher für vereinzelt Personendurchtritte geeignet (z.B. Bankschalter).

Besondere Empfehlungen

Die Untersuchungen an bestehenden Anlagen haben verschiedene Mängel aufgezeigt. Besonders ist daher zu beachten:

- Die nach aussen offene Eingangsbreite sollte daher so klein wie möglich sein.
- Die Drehtür sollte so wenig wie möglich unnötig drehen (möglichst schnell halten nach Personendurchgang, kein Leerlaufdrehen auf langsamerer Stufe).
- Eine Drehtür ohne Warmluftbeimischung führt zu recht tiefen Innentemperaturen im Eingangsbereich vor allem in Bodennähe, ähnlich wie ein überhaupt offener Eingang. Genügende Warmluftzufuhr mit guter Durchmischung wird sehr empfohlen!
- Auf die Dichtheit der Ritzen, vor allem oben und unten, ist besonders Wert zu legen.
- Drehtüren weisen oft aus sicherheitstechnischen Gründen daneben einen Normaleingang auf. Werden diese Eingänge sehr häufig benutzt, wie die Praxis zeigt, entfällt der Vorteil der Drehtür weitgehend.

Laboruntersuchungen an der Fachhochschule Giessen (siehe Literaturangaben) an einer kleinen Drehtür (Durchmesser 1.6m) zeigen, dass mit einem Luftvorhang auf der Innenseite die Verlust bei konstant drehender Tür um ca. 10% reduziert werden können, bei guten Komfortbedingungen im Innenraum.

3.3 Windfang (Schleuse)

Eine rein bauliche Massnahme zur Verbesserung der Eingangssituation besteht aus einer Schleuse mit (meist) automatischen Schiebetüren innen und aussen.

Eine Schleuse weist im Prinzip 2 Vorteile auf:

1. Im Normalbetrieb wirkt die Schleuse als Puffer zwischen innen und aussen, mit einer mittleren Temperatur zwischen der Innentemperatur und der Aussentemperatur. Beim idealen Durchgang einer Person steht zuerst die Aussentür offen (mit Luftaustausch Aussen-Schleuse), dann die Innentür (mit Luftaustausch Schleuse-Innen). Der Innenraum wird dann im Unterschied zum Fall Normaltür nicht direkt mit der Aussenluft geflutet.

Wenn die Lufttemperatur in der Schleuse niedriger als die Innentemperatur ist, wird auch der Energieverlust beim Personendurchgang geringer; bei $\Delta T=13\text{K}$ (Schleuse 13°C , aussen 0°C) halbiert sich der Energieverlust im Vergleich mit der Normaltür (siehe Bild 3c oder Formeln im Anhang A) und beträgt 9.5kW .

Der Verlust hängt von der Schleusentemperatur ab, und diese unter anderem von der Benutzerfrequenz. Wird der Schleusenraum aber geheizt, gibt es natürlich keine Verlustreduktion, sondern, je nach Temperatur, ein grösserer Verlust.

2. Sie verhindert die Gebäudedurchströmung durch Thermik und Wind, wenn immer mindestens eine der beiden Türen geschlossen ist.

Eine Schleuse erfüllt ihren Zweck allerdings nur, wenn beim Durchgang einer Person nie eine durchgehende Verbindung zwischen innen und aussen besteht. Leider zeigt sich in der Praxis, dass auch bei einer Schleuse mit einem Abstand von 3m zwischen der äusseren und inneren Türebene schon beim Durchgang einer einzigen Person die inneren und äusseren Türen kurze Zeit gemeinsam offenstehen.

Beim Durchgang mehrerer Personen verschlimmert sich die Situation, und **bei kontinuierlichem Offenstehen gibt es nur noch einen kleinen Unterschied zur Normaltür**; der im Vergleich zur Normaltür erhöhte Strömungswiderstand führt zu einem Verlust von 17.8kW bei vollem Offenstehen, einer Reduktion von 8% , verglichen mit 19.3kW .

Der mittlere Verlust beträgt damit ca. $10\text{-}18\text{kW}$, je nach Benutzerfrequenz. Ab mittlerer Benutzerfrequenz nähert sich die Zahl aber dem oberen Grenzwert, da mindestens 10s für einen kompletten Einzelpersonendurchgang vergehen.

Etwas nachteilig wirkt sich der Platzbedarf einer Schleuse aus. In einer wirksamen Grösse (mindestens 3m Länge; 2m sind jedenfalls zuwenig) benötigt sie eine beträchtliche Ladenfläche.

3.4 Eingänge mit Luftvorhang

Oft wird bei Eingängen ein Luftvorhang eingesetzt. Sie weisen bei richtiger Auslegung zwei Hauptvorteile auf:

1. Luftstrahlen mit hohem Impuls errichten eine Strömungsbarriere gegen eindringende Kaltluft
2. warme Luft wird der eindringenden Kaltluft beigemischt und verhindert störende Kälte im Innern des Geschäftes.

Leider werden diese Erwartungen oft nicht erfüllt. Die Gründe dafür liegen einerseits bei den Rahmenbedingungen des ganzen Geschäftes, andererseits an den Betriebseinstellungen der Anlagen selbst, wie im folgenden erläutert wird.

3.4.1 Rahmenbedingungen

Die Wirksamkeit der Strömungsbarriere ist relativ schwach und nur dann gewährleistet, wenn ohne Luftvorhang ein weitgehend massenneutraler Luftaustausch durch den Eingang wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben erfolgt. Die Untersuchungen an den realisierten Anlagen haben insbesondere gezeigt, dass nur unter folgenden Bedingungen eine optimale Funktionalität möglich ist:

1. Es darf keine weiteren offenen Eingänge haben
2. Das Gebäude muss dicht sein
3. Die Lüftung des Geschäftes muss weitgehend massenneutral sein
4. Kein direkter Windeinfall (Böen, Exponiertheit des Eingangs)

Zu Punkt 1: Wenn es weitere Eingänge auf dem gleichen Niveau gibt, wird es erst im Fall von Wind kritisch. Ohne Wind passiert bei beiden Eingängen das gleiche wie beim normalen Eingang (bidirektionale Luftströmung ohne Luftvorhang, Abschirmung mit Luftvorhang). Beim Auftreten von Wind einer grösseren Geschwindigkeit als der kleinsten Geschwindigkeit im Luftschleier beginnt sich eine Querströmung einzustellen.

Zu Punkt 2: Gebäude sind oft undicht (dies gilt vor allem für ältere Bauten). Dies führt zu stark erhöhten Verlusten. Im Beispiel von Bild 8 tritt ein Verlust von 36.5kW auf ohne Luftvorhang und 29kW mit Luftvorhang. Der Luftvorhang kann den Verlust nur zu einem kleinen Anteil reduzieren.

Zu Punkt 3: Es scheint oft der Versuch unternommen worden zu sein, mit einem Zuluftüberschuss die kalte Luft draussen halten zu wollen. Dies kann die Funktion des Luftvorhangs ebenso beeinträchtigen oder sogar aufheben. Wenn der Zuluftüberschuss fast so gross ist wie der Luftvolumenstrom des Luftvorhanges oder höher, wird der Luftvorhang nach aussen weggedrückt.

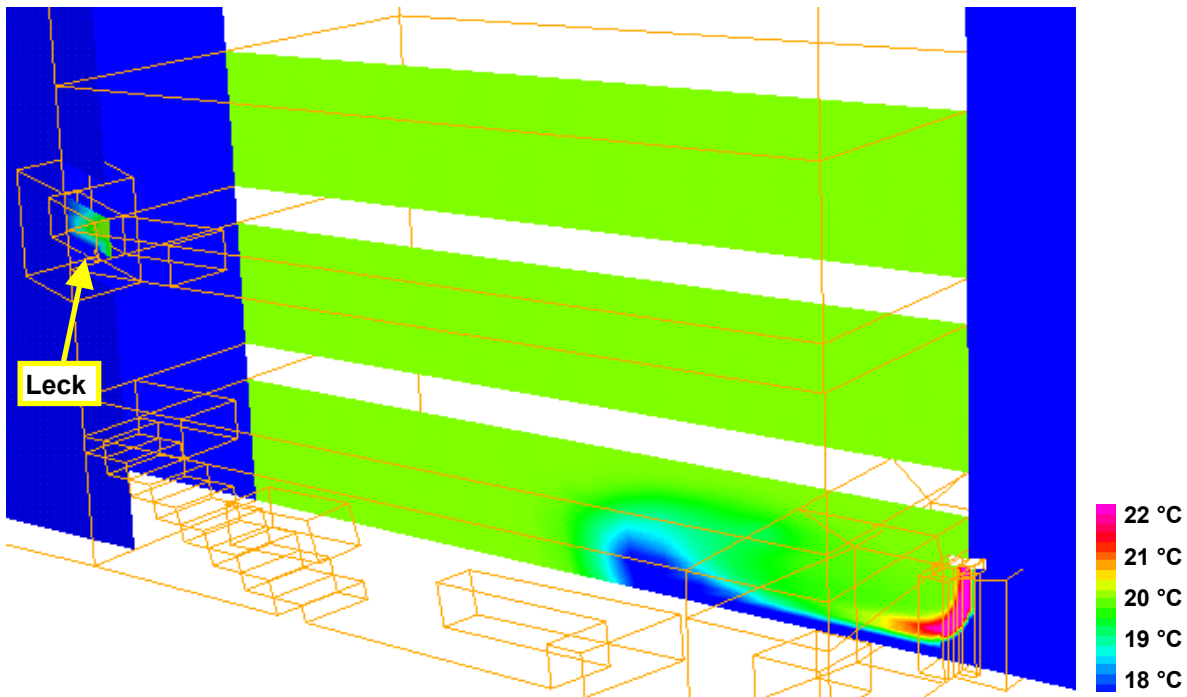


Bild 8: Trotz Luftvorhang (mit $6000 \text{ m}^3/\text{h}$) dringt kalte Luft in grösserem Ausmass mit Geschwindigkeiten über 1 m/s in das Geschäft ein. Ein Luftstrom von $4200 \text{ m}^3/\text{h}$ verlässt links oben das Gebäude und wird durch soviel kalte Luft beim Eingang ersetzt. Der Verlust beträgt 29 kW . Ohne Luftvorhang beträgt der Leckstrom $5300 \text{ m}^3/\text{h}$ mit einem Verlust von 36.5 kW .

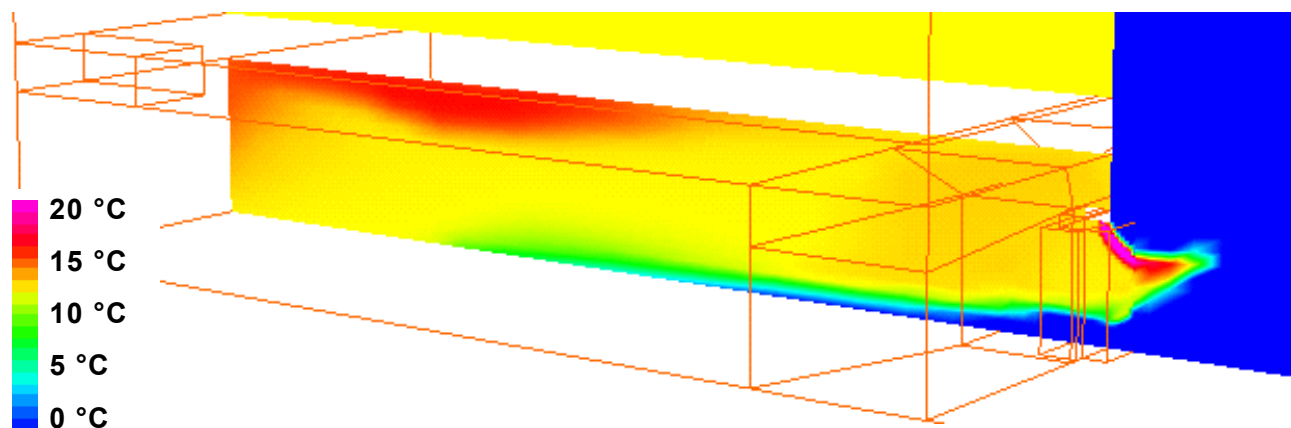
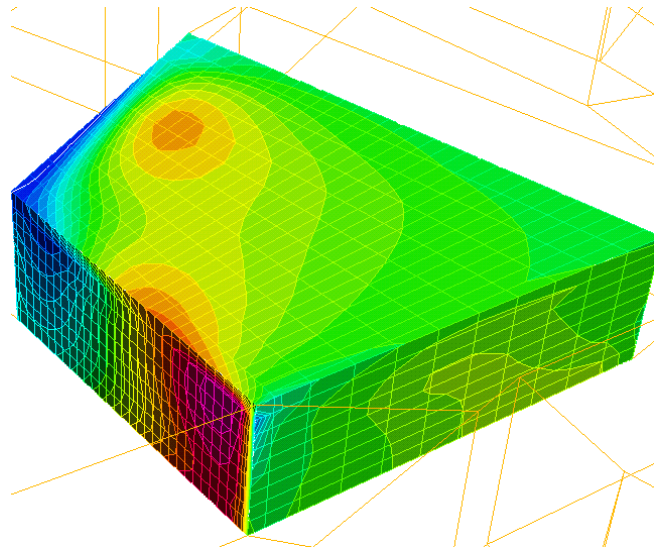


Bild 9: Luftvorhang von oben mit $3000 \text{ m}^3/\text{h}$, Überschuss im Geschäft $6000 \text{ m}^3/\text{h}$. Dies führt dazu, dass der Luftvorhang sozusagen nach aussen weggeblasen wird. Dennoch oder gerade deswegen kann dem Boden entlang kalte Luft eindringen und zu extremer Kälte im Laden führen. Genau eine solche Situation wurde in einem Geschäft vorgefunden.

Dies führt dann sogar dazu, dass wiederum dem Boden entlang kalte Luft in den Laden eindringen kann. Dies wurde in einem Fall beobachtet und auch im Computermodell nachvollzogen (Bild 9).

Zu Punkt 4: Windexponiertheit des Eingangs sollte nach Möglichkeit vermieden werden. Dies ist natürlich oft nicht zu ändern. Zu beachten ist aber die Tatsache, dass ein Eingang an einer Ecke eines Gebäudes grundsätzlich eine höhere Windanfälligkeit aufweist, da vor allem an Ecken die höchsten Windgeschwindigkeiten auftreten (siehe Bild 10).

Bild 10: Druckverhältnisse an einem Gebäude. Die höchsten Druckdifferenzen treten an den Ecken auf.



In zwei Fällen, wo der Eingang von der Ecke um nur ca. 4m in die Seite versetzt wurde, hat sich gezeigt, dass der Eckeingang wesentlich stärkere Luftzugsprobleme im Geschäft aufweist. In den meisten Fällen ist es günstiger, den Eingang nicht an die Ecke zu plazieren.

Nur wenn die genannten Bedingungen weitgehend erfüllt sind, können die eingangs erwähnten Vorteile tatsächlich realisiert werden. Die im folgenden beschriebenen Optimierungen bleiben sonst unter Umständen ohne Wirkung.

3.4.2 Optimierung des Luftvorhanges

Mittels Parametervariationen von Strömungsberechnungen wurden vertikal von oben nach unten ausblasende und seitlich ausblasende Luftvorhänge näher untersucht, um allgemeine Aussagen treffen zu können. Variiert wurden geometrische Position, Luftmengen, Breite des Luftvorhangs, Ausblaswinkel, Temperatur der ausgeblasenen Luft, Ausblasbreite, Platzierung der Absaugung.

Es ist nicht möglich, mit einem vernünftigen Zeitaufwand alle denkbaren Kombinationen zu variieren. Ausgehend von einer Standardsituation wurde die Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht, um Anhaltspunkte für Optimierungen in der Praxis geben zu können.

Für beide Typen sind folgende Punkte besonders wichtig:

- Der ausgeblasene Luftstrom, bzw. die Austrittsgeschwindigkeit in Kombination mit der Breite des austretenden Luftstrahles, muss so stark sein, dass an jedem Ort in der Tür eine Geschwindigkeit sich einstellt, die grösser als ungefähr die Geschwindigkeit der thermischen Ausgleichsströmung ist (diese ist für den Referenzeingang im dichten Gebäude ca. 0.7m/s). Dies ergibt für den Referenzeingang Luftvolumenströme im Bereich 2000-3000m³/h, Austrittsgeschwindigkeiten von ca. 4-7m/s, je nach Türhöhe, und Ausblasbreiten von ca. 5-10cm.

Bei nicht balancierten Lüftungssystemen, leicht undichten Gebäuden oder etwas Wind kann man mit höheren Werten (3000-6000m³/h) eine gewisse Abdichtung, bzw. eine Komfortverbesserung erreichen. Bei stärkeren Ausseneinflüssen oder stark undichten Gebäuden können befriedigende Ergebnisse unter Umständen nicht mehr erzielt werden.

- Die Temperatur der ausgeblasenen Luft ist wichtig für den fühlbaren thermischen Komfort, da die Luftvorhänge notgedrungen mit grösseren Geschwindigkeiten im Innern des Geschäftes verbunden sind. Luft, die sich mit 1m/s ausbreitet, kann bei Temperaturen über 25°C noch als angenehm empfunden werden. Die Praxis zeigt, dass Ausblastemperaturen bis 35°C eingesetzt werden.

- Der Luftvorhang muss den offenen Eingang seitlich, unten und oben lückenlos abdecken, damit nicht Kaltluft am Rand eindringen kann (siehe Bild 11). Vertikal nach unten ausblasende Module dürfen nicht vom Eingang entfernt frei im Raum an der Decke montiert werden (siehe Bild 12).
- Der Austrittsstrahl ist leicht nach aussen zu richten (ca. 10-20°). Der optimale Winkel hängt etwas von den Geschäftsrahmenbedingungen ab (siehe oben). Bei den meisten Geräten kann die Austrittsrichtung eingestellt werden, sodass eine Optimierung vor Ort möglich ist.

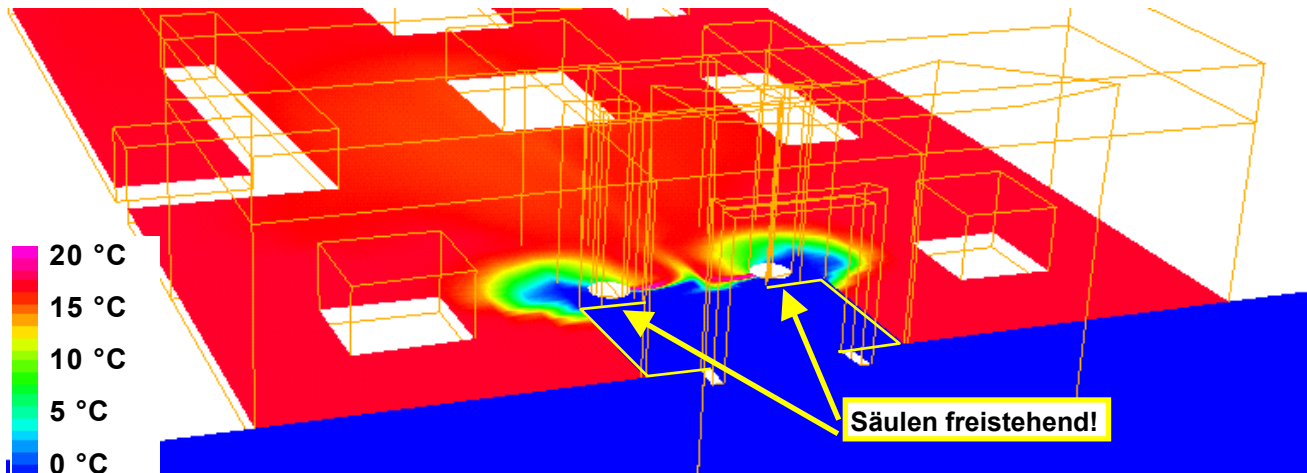


Bild 11: Beispiel eines Luftvorhanges mit horizontaler Ausblasung ohne seitliche Abdichtung

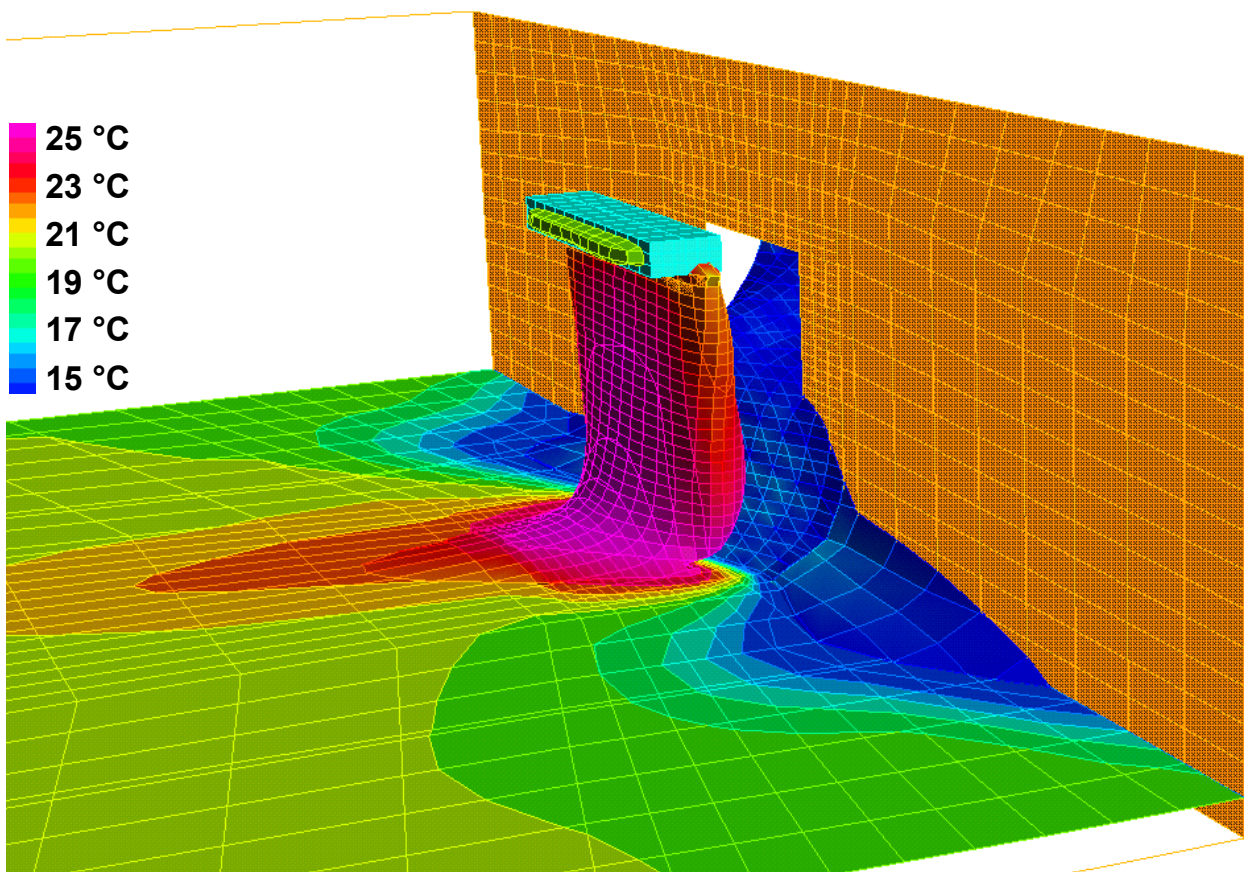


Bild 12: Beispiel eines flasch montierten Luftvorhanges mit vertikaler Ausblasung. Das Modul ist zurückgesetzt im Raum über der Tür montiert. Trotz Luftvorhang kann unten links und rechts kalte Luft in das Geschäft eindringen.

Bei beiden untersuchten Typen lassen sich gute Abschirmeffekte bei dichtem Gebäude mit Volumenströmen von 2000-3000m³/h erzielen.

Vertikal nach unten ausblasender Luftvorhang

Bei diesem klassischen Typ sind mehr freie Parameter einstellbar. Normalerweise wird auch im Eingangsbereich (im Deckenbereich innerhalb oder ausserhalb der Warmluftausblasung oder im Boden) Luft angesaugt, die meist lokal erwärmt und wieder ausgeblasen wird. Einige Parametervariationen mit einer Ausblastemperatur von 27°C zeigten folgende Ergebnisse:

- Die Luftansaugung im Boden bringt leichte Vorteile bezüglich Eindringen von Kaltluft und Energieverlust, nicht aber bezüglich Windstabilität des Luftvorhanges. In einem Fall (Ausblaswinkel 5°) verbesserte sich der Energieverlust von 11.9kW auf 9.8kW.

Normalerweise ist die Luftansaugung unten nur unter grossem Aufwand zu realisieren. Bei einfachen Modulen ist die Absaugung oben in der Nähe der Ausblasöffnung auf der Innenseite plaziert (wie in Bild 12). Wenn die Luftansaugung an der Decke ausserhalb der Warmluftausblasung gewählt wird, ist zu beachten, dass das erwartete Strömungsbild, nämlich das Umlenken der warmen Luft gegen aussen nach oben zur Absaugung hin nur eintreffen kann, wenn der Innenraum dicht ist, und auch kein Lüftungsüberschuss vorhanden ist.

Zu beachten ist ferner, dass bei Luftansaugung im Boden oder an der Decke ausserhalb der Warmluftausblasung deutlich mehr Heizleistung zur Verfügung gestellt werden muss, da vorwiegend kalte Luft (z.B. 5°C statt 20°C) angesaugt wird, und dadurch auch der Heizeinfluss auf das Ladeninnere stärker berücksichtigt werden muss.

- Ein Ausblaswinkel von 15-20° nach aussen ist optimal, wenn die Luftansaugöffnung nicht ausserhalb der Ausblasöffnung gewählt wurde. Bei 15° beträgt der Energieverlust 10.5kW statt 13kW bei 0° (berechnet mit Luftansaugung oben innen).

Horizontal seitlich ausblasender Luftvorhang

Bei diesem Typ kann der Volumenstrom stärker auf die untere Hälfte geleitet werden (und oben weniger stark). Dies ist von Vorteil, da die kalte Luft, die unten einströmen will, effizienter abgeblockt werden kann. Es gibt sogar Installationen, bei denen in der oberen Hälfte gar nicht ausgeblasen wird. Dies ist aber im allgemeinen nicht zu empfehlen, da durch diese obere Hälfte Kaltluft ausgetauscht wird, welche wiederum mit viel warmer Luft vermischt werden muss, um Komforteinbussen vorzubeugen.

Komfortauswirkungen bei Luftvorhang :

Die Bilder 13 und 14 zeigen Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen für beide Anlagentypen bei dichtem Gebäude und günstigen Parametereinstellungen. Grundsätzlich stellen sich ähnliche Bedingungen ein.

Der Luftvorhang treibt die Raumströmung in einem Umkreis von ca. 10m zusätzlich an, da die Luftstrahlen Raumströmungswalzen induzieren. Je nach Auslegung können in 5m Abstand noch Geschwindigkeiten von 1 m/s oder mehr auftreten. Bei gut gewählter Wärmebilanz sind diese Luftströmungen aber genügend warm, sodass komfortmässig akzeptable Bedingungen herrschen. Wie schon mehrmals erwähnt, kann dies nur funktionieren, wenn die Rahmenbedingungen stimmen.

Zusätzlicher Einfluss der Schleuse

Für die Kombination mit einer Schleuse gelten die ähnlichen Aussagen wie bei der Schleuse allein. Eine wirksame Verbesserung bezüglich Energieverbrauch und Kaltlufteinfall kann nur bei geringem Personendurchsatz erwartet werden aufgrund der Tatsache, dass die Türen weniger häufig offenstehen.

Wenn die Schiebetüren immer offenstehen, ergibt sich nur ein geringer Unterschied zum Fall, bei dem der Luftvorhang direkt hinter dem Ausseneingang montiert ist. Ohne Luftvorhang führt die Schleuse auch bei ständigem Offenstehen der Türen zu einer Verlustreduktion von 8%. Ein Unterschied im Verlust mit/ohne Schleuse kann bei Anwesenheit eines Luftvorhanges nicht festgestellt werden.

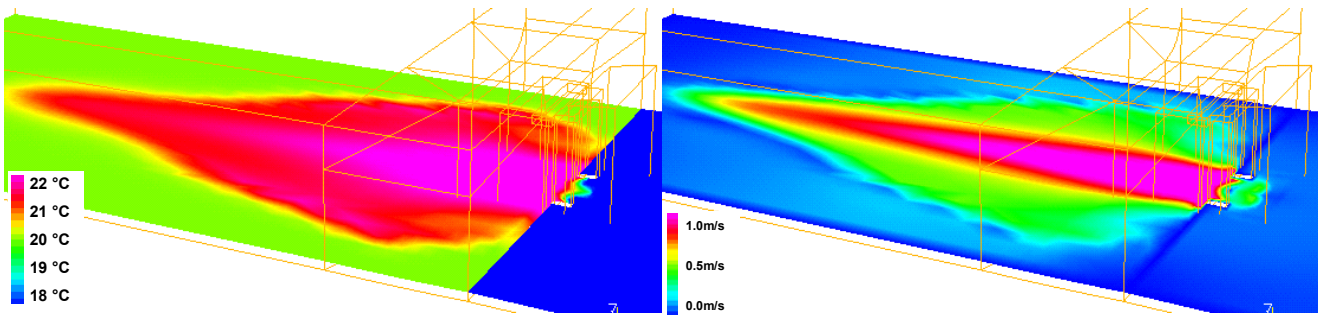


Bild 13: Vertikaler Luftvorhang. Links Temperatur (Farbskala 18-22°C) und rechts Luftgeschwindigkeiten (Farbskala 0–1m/s). Volumenstrom 3000m³/h auf Ausblasbreite 2m (Eingangsbreite 1.6m), 27°C, 15° nach aussen, Absaugung oben.

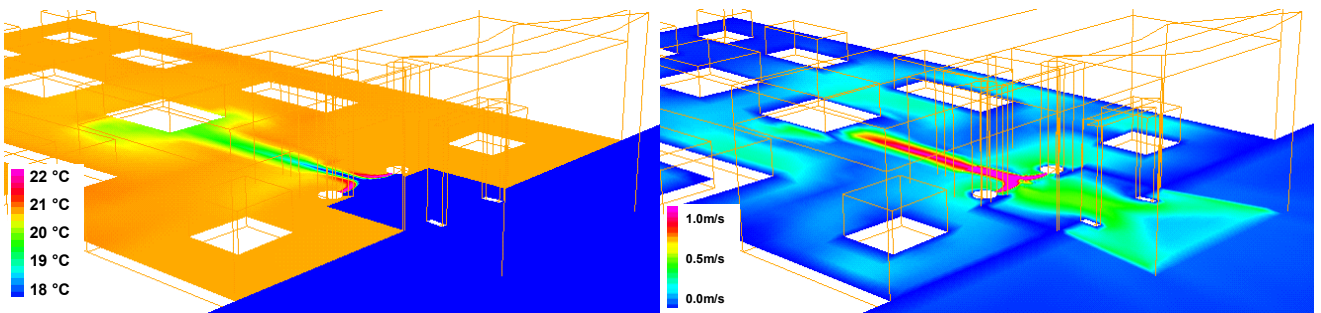


Bild 14: Horizontaler Luftvorhang. Links Temperatur (Farbskala 18-22°C) und rechts Luftgeschwindigkeiten (Farbskala 0–1m/s). Volumenstrom 3900m³/h, 27°C, 10° nach aussen, seitlich abgedichtet.

Wenn ein warmer Luftvorhang mit einer Schleuse kombiniert wird, sollte der Luftvorhang im allgemeinen im Innern des Geschäftes plziert sein (und nicht in der Schleuse), damit bei geschlossenen Türen der Laden beheizt wird und nicht der Schleusenraum.

In gewissen Fällen kann die Plzierung des Luftvorhanges in der Schleuse vorteilhaft sein. Bei stark undichtem Gebäude muss der Massenstrom des Luftvorhanges sehr hoch sein, um eine Untertemperatur im Ladenbereich zu verhindern. Der damit verbundene Luftzug kann dann für Kassenarbeitsplätze in Eingangsnähe doch sehr unangenehm sein, sodass eine Plzierung des Luftvorhanges in der Schleuse in Betracht Vorteile bringen kann. Der Geräuschpegel innen ist auch geringer.

Eine Temperaturregelung ist aber angeraten, damit die Schleuse bei geringer Frequentierung nicht zu stark beheizt wird.

Vorzüge der verschiedenen Typen

Die horizontale Anlage weist Vorteile auf, wenn der Eingang wesentlich höher als breit ist, da sie unten besser dichten kann. Die vertikale Anlage kann torbreitenunabhängig eingesetzt werden, muss aber bei stark ansteigenden Volumenströmen gefahren werden, wenn die Eingangshöhe ansteigt. Die vertikal nach unten ausblasende Anlage weist ein etwas stabileres Verhalten gegen Windböen auf, da die gegeneinander blasende Anlage zu leichten Schwankungen der Strahlen tendiert.

Es gibt noch weitere Typen oder Kombinationen von Eingangsgestaltungen. Eine neuere Entwicklungen, eine Kombination von einem ungeheizten äusseren Luftvorhang mit einem beheizten inneren mit gegenläufig drehenden Luftwalzen weist nach den erwähnten Laboruntersuchungen eine noch bessere Energieersparnis auf.

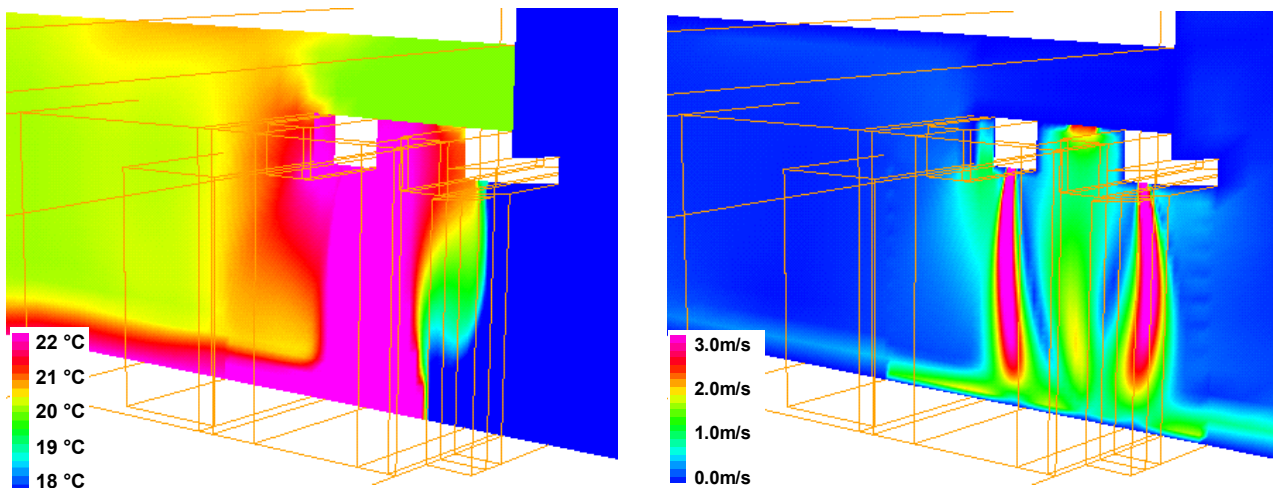


Bild 15: Kombiniertes Luftvorhang mit warmem (innen) und kaltem Luftstrahl. Links Temperatur (Farbskala 18-22°C) und rechts Luftgeschwindigkeiten (Farbskala 0–3m/s). Luftvorhänge je 3000m³/h.

Die in Bild 15 vorgestellte Konfiguration mit zwei Luftvorhängen in einer Schleuse weist einen Wärmeverlust von ca. 7kW auf (gegenüber 11 kW bei einem einfachen beheizten Luftvorhang). Der Aufwand dafür ist aber auch höher mit 2 Gebläsen statt einem wie beim einfachen Luftvorhang.

Energieverluste

Der Energieverlust ist unter anderem auch von der Temperatur der ausgeblasenen Luft abhängig. Hier wurde angenommen, dass diese Temperatur in den meisten Fällen 27°C beträgt. Diese muss aber entsprechend der benötigten Wärmeleistung auf die Gesamtbedingungen angepasst werden (d.h. abstimmen auf Leckageverlust usw.).

Für beide untersuchten Typen resultiert ein **Energieverlust von ca. 11kW** unter realistischen Parametereinstellungen mit permanent offenen Türen, verglichen mit 19.3kW bei offenem Eingang ohne Luftvorhang. Die Komfortbedingungen im Innern sind aber relativ gut bei dichtem Gebäude (siehe folgende Abschnitte). Bei einer Ausblastemperatur von 34°C erhöht sich der Verlust auf ca. 13kW.

Mit unbeheizter Ausblasung wurde für den vertikal ausblasenden Typ ein Verlust von ca. 7kW berechnet. Dies entspricht einer Verlustersparnis von ca. 43% für den beheizten Fall, und 64% für den unbeheizten Fall. Dies stimmt gut überein mit den entsprechenden Werten von 41% und 64% bei einer Laboruntersuchung der Fachhochschule Giessen für kleinere Eingänge.

Diese vorgenannten Zahlen gelten nur für ein dichtes Gebäude. Wie schon vorgestellt, können bei undichtem Gebäude die Verluste drastisch höher liegen. Eine Gebäudedurchströmung infolge Thermik oder Wind mit Verlusten bis 100kW oder mehr kann mit einem Luftvorhang nur wenig reduziert werden.

Die Abdichtung eines dichten Gebäudes mit zwei Eingängen auf gleicher Höhe und Luftvorhängen an beiden Eingängen funktioniert nur ohne Wind oder nur bei leichtem Wind.

Ein Luftvorhang sollte immer mit einer automatischen Schiebetür kombiniert werden, damit bei geringen Kundenfrequenzen der Eingang geschlossen ist und der Energieverlust praktisch 0 ist.

Zu beachten ist ferner die Heizwirkung des Luftvorhanges auf die Innentemperatur des Geschäftes. Bei hohen Massenströmen kann die Heizleistung sehr hoch sein. Bei einem Massenstrom von 1 kg/s ist die benötigte Heizleistung 1 kW pro Grad Temperaturunterschied; bei einer Erwärmung um 15 Grad sind dies also schon 15kW pro kg/s (1 kg/s entspricht ca. 3000 m³/h). Auch wenn ein Teil als Verlust nach aussen verloren geht, kann ein respektable Anteil für die Innenheizung zur Verfügung stehen.

4 Fazit

4.1 Einflüsse auf die Luftströmung in Eingangsnähe

Einige wichtige Kernpunkte zu den verschiedenen Einflüssen (siehe Seite 2) werden hier zusammengefasst.

Rahmensituation Geschäft

Die Dichtheit des Gebäudes hat den entscheidendsten Einfluss auf die Zugserscheinungen in Eingangsnähe und den durch die Öffnung verursachten Energieverlust. Bei einem mehrstöckigen undichten Gebäude kann der Energieverlust schon ohne Wind das 5fache des Wertes bei dichtem Gebäude oder mehr betragen.

Die Anwesenheit von mehreren Eingängen auf derselben Höhe verursacht zunehmende Zugprobleme und Energieverluste bei Windeinfluss. Sind die Eingänge auf verschiedenen Höhen, nehmen die Verluste auch ohne Wind aufgrund des Höhenunterschiedes zu, wie beim undichten Gebäude.

Ein Überdruck im Innern als Folge des Lüftungskonzeptes kann die Funktion eines Luftvorhanges entscheidend beeinträchtigen. Wenn der Zuluftüberschuss fast so gross ist wie der Luftvolumenstrom des Luftvorhanges oder höher, wird der Luftvorhang nach aussen weggedrückt.

Lage des Eingangs

Ein windexponierter Eingang sollte vermieden werden. Dies ist oft nicht zu ändern. Zu beachten ist aber die Tatsache, dass ein Eingang an einer Ecke eines Gebäudes grundsätzlich eine höhere Windanfälligkeit aufweist, da vor allem an Ecken die höchsten Windgeschwindigkeiten auftreten.

Geometrie des Eingangs

Der Luftvolumenstrom durch den Eingang ist bei dichtem Gebäude proportional zur Breite und überproportional zur Höhe des Eingangs ($\propto \text{Höhe}^{1.5}$). Eine unnötig hohe Tür führt zu einem höheren Energieverlust Q als eine unnötig breite Tür. Die Eingangsgrosse soll daher (auch bei undichtem Gebäude) so klein wie möglich gehalten werden, bei dichtem Gebäude aber besser zu breit als zu hoch.

Bauliche Massnahmen

Bei stark undichtem Gebäude kann nur mit einer Drehtür eine befriedigende Lösung bezüglich Komfort erzielt werden (Reduktion der Durchzugsströmung), allerdings nur in Kombination mit Warmluftbeimischung, da trotzdem kalte Luft ins Geschäft gefördert wird.

Ein Windfang mit automatischen Schiebetüren bietet deutliche Verbesserungen gegenüber einer einfachen Tür vor allem bei geringen und mittleren Personenfrequenzen, wenn die Türöffner richtig eingestellt sind. Die Praxis zeigt allerdings, dass die Türen unnötig lange offenbleiben.

Lokale Lüftungsmassnahmen

Mit einem Luftvorhang beim Eingang können bei dichtem Gebäude die Komfortbedingungen wesentlich verbessert werden. Das Eindringen von Kaltluft kann bei guter Auslegung des Luftvorhanges reduziert und die restliche Kaltluft mit dem warmen Luftvorhang vermischt werden.

Bei genügend hoher Temperatur können akzeptable Komfortbedingungen auch bei den unvermeidbaren hohen Geschwindigkeiten im Nahbereich des Luftvorhanges (bis ca. 10m) erreicht werden. Die Grösse des Energieverlustes hängt von der Auslegung der Parameter des Luftvorhanges ab (Volumenstrom, Lufttemperatur) und der effektiven Eingangsgrosse ab.

Zu beachten ist der unter Umständen hohe Heizeffekt des Luftvorhanges, der bei nicht-optimaler Abstimmung mit der normalen HLK-Anlage zu unerwartet hohen Temperaturen im Geschäft führen kann.

Betrieb des Eingangs

Die Eingänge sollten grundsätzlich mit automatischen Schiebtüren versehen sein, mit eingeschaltetem Schliessmechanismus, ausser bei sehr hohen Frequenzen. Drehtüren sollten keine Ruhedrehung aufweisen, und die Verzögerungen der Schliessautomatik sollten möglichst kurz sein.

Die Abschirmströmung muss bei der Türöffnung stehen, was in der Regel bedingt, dass der Luftvorhang permanent läuft, auch bei sich automatisch schliessenden Schiebetüren.

4.2 Empfehlungen zur Eingangsgestaltung

Ein Eingang führt zu Kälteeinfall und Luftzug, welche bei rein thermischem Durchzug durch das Gebäude oder mit Wind noch verstärkt werden. Eine rein bauliche oder mechanische Lösung (Türtyp, Windfang, Drehtür), wie sie für ein Geschäft in Frage kommt, vermag diese Probleme zu reduzieren, aber nicht befriedigend zu lösen. Zur wirksamen Verbesserung ist daher eine Kombination mit einer geeigneten lokalen Warmluftzufuhr notwendig.

Dichtes Gebäude

Ein Windfang mit automatischen Schiebetüren bietet gegenüber dem einfachen Eingang deutliche Verbesserungen bei geringen Personenfrequenzen, wenn die Türöffner richtig eingestellt sind.

Wenn das Gebäude dicht ist, können bei höheren Personenfrequenzen mit einem Luftvorhang am Eingang bei richtiger Auslegung gute Komfortbedingungen erzielt werden.

Undichtes Gebäude

Wenn stärkere Durchzugsmöglichkeit vorliegen (andere Eingänge, Lecke) oder die Windexponiertheit ausserordentlich hoch ist, dann ist die Drehtür das einzige wirksame Lösung für den eingangsnahen Bereich. Nur mit ihr lassen sich die Druckunterschiede auffangen, und damit die Zugerscheinungen massiv reduzieren, allerdings nur unter folgenden Einschränkungen:

- die Drehtür selber muss möglichst dicht sein. Die in der Praxis eingesetzten Drehtüren weisen alle verbesserungsfähige Dichtungen auf (bei den Bürstendichtungen oben und unten klaffen oft über zentimeterweite Spalten).
- Eine Drehtür fördert grössere Mengen kalter Luft nach innen, und ebenso grosse Menge warmer Luft nach aussen (Verlust). Um akzeptable Komfortbedingungen im Innern zu schaffen, ist die Kombination mit einer effizienten Warmluftbeimischung unumgänglich.

Nachteilig ist die beschränkte Förderkapazität für Personen.

Mit den anderen Lösungen bleibt der eingangsnaher Bereich problematisch. Arbeitsplätze sind dann möglichst entfernt von Zugbereichen zu platzieren, und möglicherweise sogar abzuschirmen.

4.3 Praktische Hinweise

Hinweise für das Ausrüsten eines bestehenden Einganges.

Für die Eingangsgestaltung sind insbesondere abzuklären:

- Dichtheit des Gebäudes
- Überschuss der Lüftung

Dies kann herausgefunden werden durch Bestimmen des neutralen Niveaus in der Eingangstür (siehe Anhang A). Bei dichtem Gebäude ist dieses neutrale Niveau etwa auf halber Höhe, und es fliesst gleich viel warme Luft oben hinaus wie unten herein. Mit kaltem Rauch (aus Strömungsprüfröhrchen) kann die Höhe ohne Geschwindigkeit bestimmt werden, bei Windstille und abgestelltem Lüftungssystem. Wenn diese Höhe in der Mitte liegt, ist das Gebäude dicht. Strömt die Luft nur hinein, ist das Gebäude mindestens so undicht, wie dies einem geöffneten Fenster im 2. Stock entspricht.

Wenn man das Lüftungssystem hinzuschaltet, erkennt man an der Verschiebung einen vorhandenen Unterschied zwischen Zuluft- und Abluftvolumenstrom. Wenn man die

Geschwindigkeiten an den verschiedenen Höhen messen kann, kann man diesen Unterschied abschätzen.

Allgemeine Checkpunkte:

Die Eingangsgestaltung muss unter Berücksichtigung aller Betriebszustände erfolgen, nämlich Nichtbetrieb, Teillastbetrieb, Vollastbetrieb und Spitzenlast.

4.4 Zusammenstellung einiger Energieverlustwerte

Die Tabellen und Darstellungen auf den folgenden beiden Seiten zeigen einige der beschriebenen Energieverlustwerte in einem Überblick. Auf der ersten Seite sind Vergleichswerte für ein dichtes Gebäude, auf der zweiten Seite für ein undichtes Gebäude. Die Tabellen 3 und 4 zeigen Verluste bei Vollbetrieb und beim Durchgang einer Einzelperson bei sich automatisch schliessenden Schiebetüren, die Bilder 16 und 17 zeigen die Abhängigkeit von der Personenfrequenz bei sich automatisch schliessenden Schiebetüren.

Kumulierter Energieverlust während kalter Jahreszeit:

Der gesamte Energieverlust während der kalten Jahreszeit wurde für den permanent offenen (d.h. während der Öffnungszeiten) Eingang mit 19.5 kW bei $\Delta T=20K$ mit den DRY-Wetterdaten für Zürich integriert: Während 1283 Std. ist der Temperaturunterschied $\Delta T>10K$ und der totale Energieverlust 19200 kWh. Diese Berechnung basiert auf der Formel auf Seite 8, und stimmt bei einer Innentemperatur von 20°C genau.

Mit den kW-Angaben aus den Tabellen 3 und 4 kann **näherungsweise** eine Angabe über den Energieverlust bei den andern Konfigurationen gemacht werden.

Beispiel 1: Permanent offener Eingang bei undichtem Gebäude gemäss Tabelle 4: Mit 100kW statt 19.5kW skaliert der Verlust näherungsweise auf: 98500kWh. Dieser Wert stimmt für die angenommene Undichtheit und einer Innentemperatur von 20°C gut.

Beispiel 2: Permanent offener Eingang mit Luftvorhang warm $\Delta T=7K$: 11 kW statt 19.5 kW: Verlust 10830 kWh: Ersparnis: 8370 kWh. Dieser Wert gilt nur ungefähr, da der Energieverlust mit Luftvorhang nicht in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes untersucht wurde, und die Abhängigkeit gemäss der Formel auf Seite 8 nicht gesichert ist.

Literaturangaben

“Lüftung von grossen Räumen - Handbuch für Planer”. BEW/Clima Suisse, Postfach 74, 8024 Zürich, Juni 1997.

F. Flourentzou, J. van der Maas, C.-A. Roulet. “Experiments in Natural Ventilation for Passive Cooling”. Proceedings 17. AIVC-Konferenz 1996, Göteborg, S. 121-134.

“Untersuchung des Abschirmvermögens von Drehtüren und Luftschleieranlagen”. Interner Bericht Fachhochschule Giessen, Prof. Dr.-Ing. Gräff, 1994.

“Studie über das energetische Verhalten einer Drehtüre D=4.2m”. Auftragsstudie Firma Rapp AG, Basel, 1985.

Vergleichswerte für ein dichtes Gebäude

	Breite des Durchgangs <i>m</i>	Verlustrate Vollbetrieb		Einzelperson		
		<i>kW</i>	%	Zeitbedarf		Energieverlust %
				<i>s</i>	<i>kJ</i>	
Normaltür (Breite 1m)	1	12	62	2	24	31
Autom. Schiebetür (AST)	1.6	19.5	100	4	78	100
Drehtür (4.2m, 4 Segmente)	1.6	13	67	-----	150	192
Drehtür (4.75m, 2 Segmente)	2.4	17	87	-----	350	449
Windfang mit 2 AST	1.6	18	92	2.5	45	58
LV horizontal, +14Grad, AST	1.6	13	67	4	52	67
LV vertikal, +7Grad, AST	1.6	10	51	4	40	51
LV vertikal, kalt, AST	1.6	7	36	4	28	36

Tabelle 3: Übersicht der Verluste im Vollbetrieb und beim Durchgang von Einzelpersonen bei verschiedenen Eingangslösungen. AST=Automatische Schiebetür, LV=Luftvorhang. Die Verlustwerte in Prozent werden auf die Eingangsbreite 1.6m (Schiebetür im Winter, 19.5 kW bzw. 78 kJ, markierte Reihe) bezogen. Der Energieverlust bei einem Einzelpersonendurchgang durch eine Drehtür basiert auf dem Luftaustausch in einem Segment.

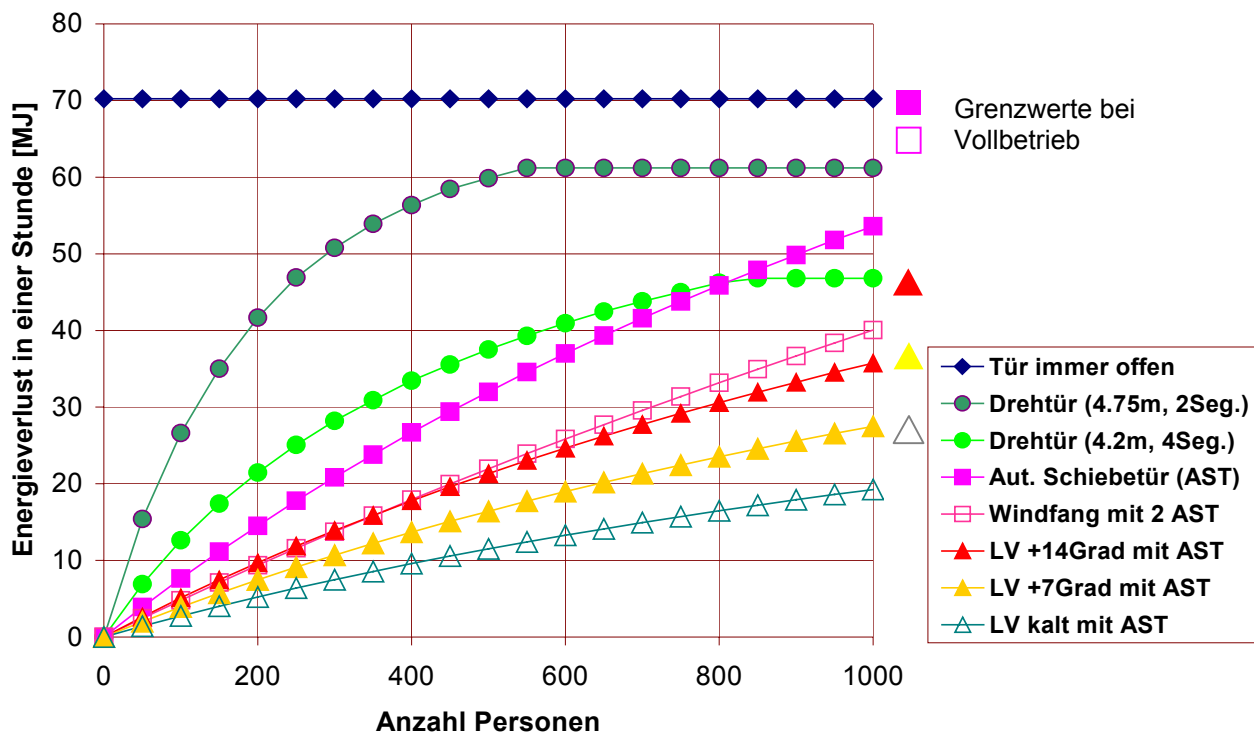


Bild 16: Übersicht der Verluste in einer Stunde bei verschiedenen Personenfrequenzen und verschiedenen Eingangslösungen. AST=Automatische Schiebetür, LV=Luftvorhang. Bei verschiedenen Personenfrequenzen ist der in einer Stunde summierte Verlust dargestellt. Die Werte nehmen nicht linear mit der Personenanzahl zu, weil eine zunehmende Gleichzeitigkeit von Personendurchgängen angenommen wurde. Bei Drehtüren ist der Einfluss der Gleichzeitigkeit stärker. Beim Windfang nimmt bei fast gleichzeitigen Personendurchgängen die Öffnungszeit zu. Die Drehtür wurde ohne Leerlaufdrehung, und alle Eingänge ohne Lecks angenommen.

Die Lösungen mit Schiebetüren und Luftvorhängen schneiden bei geringen und mittleren Personenfrequenzen besser ab als die Lösungen mit Drehtür; bei den Schiebetüren sind die Lösungen mit Luftvorhang energetisch (und komfortmässig) den vergleichbaren Lösungen ohne Luftvorhang überlegen.

Dieser Vergleich gilt allerdings nur für ein dichtes Gebäude; in der Praxis sind die Gebäude oft undicht. Die nächsten Darstellungen zeigen die Verhältnisse bei einem relativ stark undichten Gebäude.

Vergleichswerte für ein undichtes Gebäude

	Breite des Durchgangs <i>m</i>	Verlustrate Vollbetrieb		Einzelperson		
		<i>kW</i>	%	Zeitbedarf Energieverlust		
				<i>s</i>	<i>kJ</i>	%
Normaltür (Breite 1m)	1	90	90	2	180	45
Autom. Schiebetür (AST)	1.6	100	100	4	400	100
Drehtür (4.2m, 4 Segmente)	1.6	15	15	-----	170	43
Drehtür (4.75m, 2 Segmente)	2.4	19	19	-----	390	98
Windfang mit 2 AST	1.6	95	95	2.5	238	59
LV horizontal, +14Grad, AST	1.6	85	85	4	340	85
LV vertikal, +7Grad, AST	1.6	85	85	4	340	85
LV vertikal, kalt, AST	1.6	85	85	4	340	85

Tabelle 4. Verluste wie in Tabelle 3, aber mit offenem Fenster auf einer Höhe von 20m. Der Verlust des Referenzfalles beträgt 100kW statt 19.5kW. Es wurde angenommen, dass die Luftvorhänge ca. 15% der Durchströmung reduzieren, und dass die Drehtür 10% mehr Leckageverlust aufweist als im dichten Gebäude.

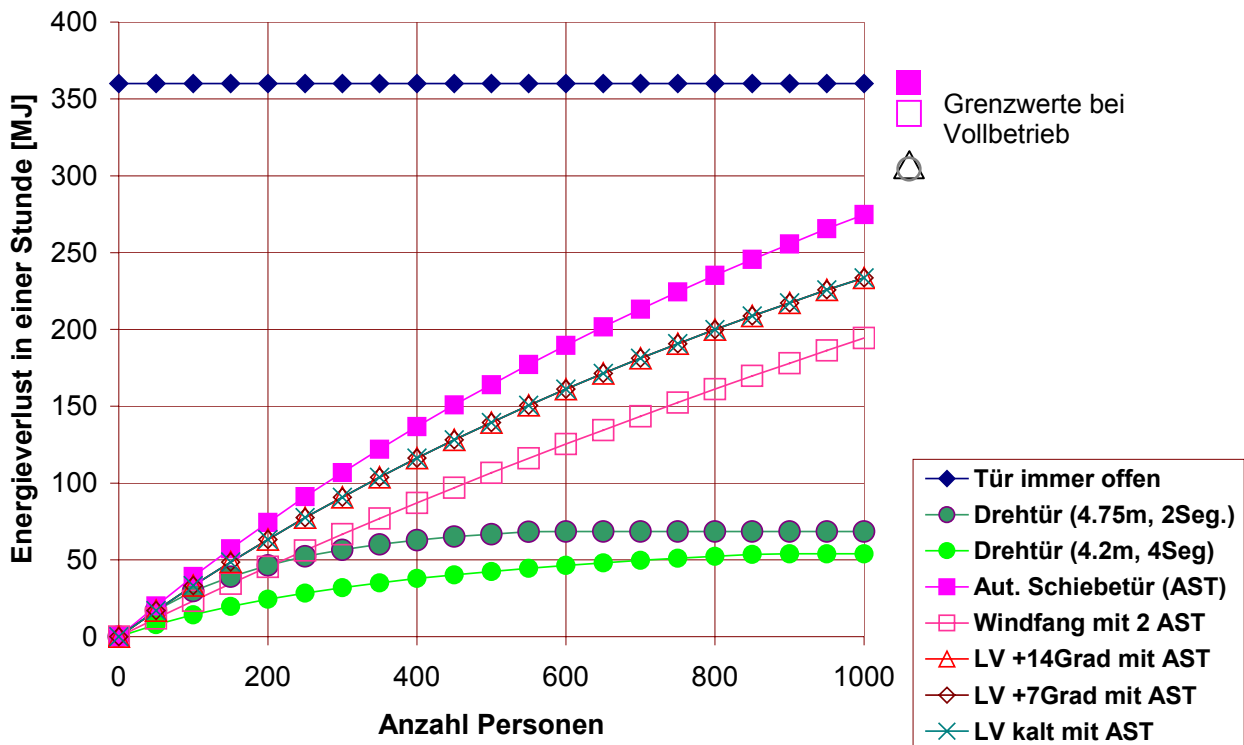


Bild 17: Übersicht der Verluste in einer Stunde mit verschiedenen Eingangslösungen bei undichtem Gebäude. LV=Luftvorhang. Bei verschiedenen Personenfrequenzen ist der in einer Stunde summierte Verlust dargestellt. Für weitere Bemerkungen siehe Bild 16.

Ab einer gewissen Personenfrequenz (300-400 Personen) ist die Drehtür allen anderen Lösungen überlegen. Der Windfang ist besser als die Lösungen mit Luftvorhang, da eine effektive Öffnungszeit von 2.5s statt 4s für den Durchgang einer Einzelperson angenommen wurde.

In allen Fällen nähert sich der Energieverlust bei Personenfrequenzen über 1000/Stunde dem Verlust bei Vollbetrieb der jeweiligen Lösung, d.h. bei permanent offenem Eingang.