



# Betriebsverhalten von Torschleieranlagen

Durch den Einsatz von Torschleieranlagen zwischen zwei Zonen mit unterschiedlichen Temperaturen kann der Luftaustausch aufgrund freier Konvektion verhindert werden. Der Einfluß unterschiedlicher Betriebsfälle auf den Energieverbrauch und die thermische Behaglichkeit wurde im Labor untersucht. Die Effizienz von Torschleieranlagen wurde zusätzlich im Praxisbetrieb beim Einsatz an einer Kühlzelle überprüft. Bei diesem Anwendungsfall steht nicht die thermische Behaglichkeit sondern der Energieverbrauch, die Gefahr der Kühlguterwärmung und die der Eisbildung vor dem Kühllzeneingang im Vordergrund.

Prof. Dr.-Ing. Siegmund Hesslinger\*, Offenburg  
Dipl.-Ing. (FH) Michael Kuhn\*, Offenburg

## Versuchsaufbau der Laboruntersuchungen

Bei der untersuchten Torschleieranlage handelte es sich um ein Kompaktgerät mit der Breite 2 m. Es war auf der Innenseite über der Toröffnung mit den Maßen 2,5 x 2 m (Höhe x Breite) angebracht.

Das im Gerät integrierte Heizregister hatte eine Leistung von 33 kW. Beim maximalen Volumenstrom von 2500 m<sup>3</sup>/h trat die Luft mit einer Geschwindigkeit von ca. 7 m/s aus.

Die Temperatur im simulierten Außenbereich wurde durch Veränderung der Zulufttemperatur eingestellt.

Zur Regulierung des von außen nach innen strömenden Kaltluftstromes wurde die Drehzahl des Abluftventilators verstellt und damit ein Differenzdruck zwischen Außen- und Innenbereich erzeugt.

Für die Betriebsarten:

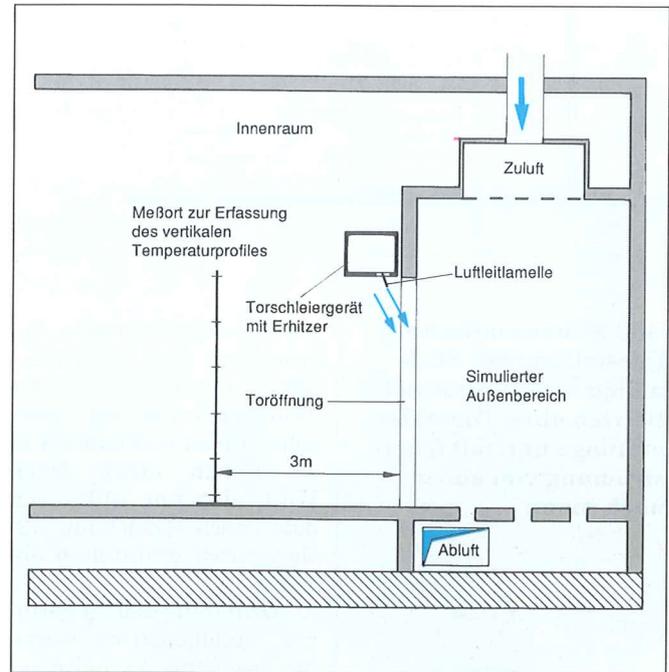
- ausgeschaltete Torschleieranlage (freie Konvektion)
- ausgeschaltete Torschleieranlage mit Querströmung von außen
- eingeschaltete Torschleieranlage mit Querströmung von außen und unterschiedliche Erhitzerleistungen

wurden die vertikalen Temperaturprofile im Innenraum in 3 m Abstand von der Toröffnung und die jeweiligen Wärmeverluste ermittelt. Zusätzlich wurde das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil im Bereich der Toröffnung bei eingeschalteter Torschleieranlage erfasst.

## Betrieb ohne Torluftschleier

Bei ausgeschalteter Torschleieranlage erhält man entsprechend der Temperaturdifferenz und den dadurch verursachten Dichteunterschieden zwischen Außen- und Innenluft den Konvektionsvolumenstrom  $\dot{V}_K$ .

Kalte (schwere) Luft des Außenbereiches dringt im unteren Teil der Toröffnung in den Innenraum ein und verdrängt dabei Warmluft, die im oberen Torbereich nach außen strömt.



**Bild 1: Schema des Versuchsaufbaus**

Der durch freie Konvektion verursachte Volumenstrom erzeugt einen Wärmeverluststrom von:

$$\dot{Q}_K = \dot{V}_K \cdot \rho_a \cdot c_{PL} \cdot (t_i - t_a) \quad (1)$$

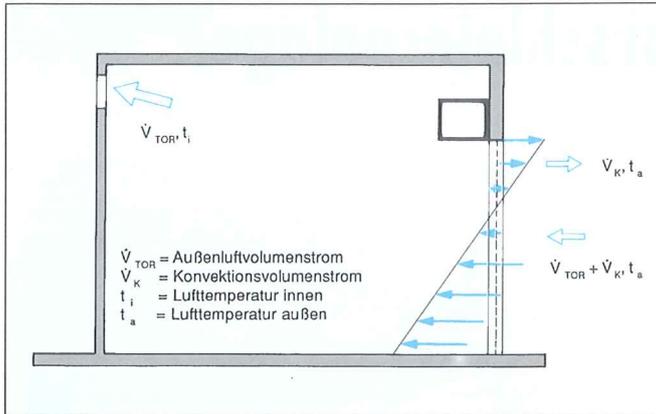
Detzer und Gersch [1] geben folgende Berechnungsgleichungen für den Volumenstrom bei freier Konvektion an, die auf analytischen Ansätzen von Brown [2] und Graf [3] beruhen:

$$\dot{V}_K = \frac{1}{3} \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_a}{T_i + T_a}} \quad (2)$$

(1)	mit $\dot{Q}_K$ Wärmeverluststrom durch freie Konvektion	in W
	$\rho_a$ Dichte der Außenluft	in kg/m <sup>3</sup>
	$c_{PL}$ spezifische Wärmekapazität von Luft	in kJ/kgK
	$t_i$ Raumlufttemperatur	in °C
	$t_a$ Außenlufttemperatur	in °C

(2)	mit b Breite der Toröffnung	in m
	h Höhe der Toröffnung	in m
	g Erdbeschleunigung	in m/s <sup>2</sup>
	$T_i$ Raumlufttemperatur (absolut)	in K
	$T_a$ Außenlufttemperatur (absolut)	in K

\* Steinbeis - TZ Energie- und Raumtechnik, 77652 Offenburg



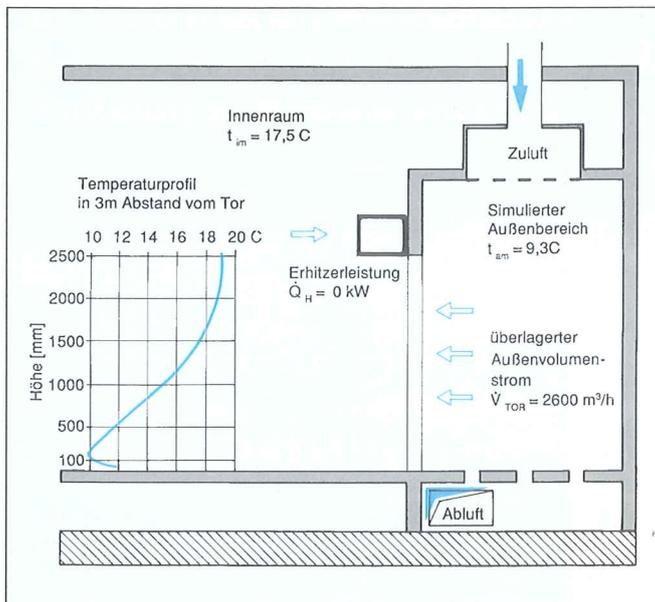
**Bild 2: Schematische Darstellung der Strömungsverhältnisse bei Betrieb ohne Torschleieranlage und mit Querströmung von außen nach innen**

Die experimentelle Bestimmung des Konvektionsvolumenstromes für die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen von 11 Kelvin ergab einen Wert, der um -10% von dem nach Gleichung (2) theoretisch ermittelten abweicht.

Grund für den zu geringen Volumenstrom waren die beengten Verhältnisse im simulierten Außenbereich des Versuchsstandes, wodurch die Abströmung des nach außen tretenden Warmluftstromes behindert wurde.

Mit dem im Versuch ermittelten Volumenstrom und den Randbedingungen nach Bild 7 ergibt sich der Wärmeverlust durch freie Konvektion zu 14,6 kW.

**Bild 3: Vertikales Temperaturprofil in 3 m Abstand vom Tor ohne Torluftschleierbetrieb mit Querströmung von außen nach innen**



**Betrieb ohne Torluftschleier mit Querströmung von außen nach innen**

Durch die, der freien Konvektion überlagerte Außenluftströmung, die aufgrund von Thermik, Winddruck und Abluftüberschuß entstehen kann, treten je nach Temperaturdifferenz und Größe des durch das Tor eintretenden Kaltluftstromes, zusätzlich zum Konvektionsvolumenstrom unterschiedlich große Wärmeverluste auf. Die bei dieser Betriebsweise vorliegenden Strömungsverhältnisse sind in Bild 2 schematisch dargestellt.

Der dem Konvektionsvolumenstrom  $\dot{V}_K$  überlagerte Außenluftstrom  $\dot{V}_{TOR}$  verursacht den Wärmeverluststrom

$$\dot{Q}_{TOR} = \dot{V}_{TOR} \cdot \rho_a \cdot c_{PL} \cdot (t_i - t_a) \quad (3)$$

Allerdings verringert sich durch die Querströmung der Kaltluftstrom, der durch die Konvektion in den Innenraum gelangt, und damit auch der Wärmeverlust  $\dot{Q}_K$ .

Für die Versuchsrandbedingungen nach Bild 7 ergaben sich die Energieverluste wie folgt:

$$\dot{Q}_K = 10,2 \text{ kW} \quad (14,6 \text{ kW bei freier Konvektion})$$

$$\dot{Q}_{TOR} = 9,5 \text{ kW}$$

Der Gesamtwärmeverlust von 19,7 kW stieg aufgrund des erhöhten Luftaustausches an der Toröffnung deutlich an. Die im unteren Teil des Tores eintretende Kaltluft strömte unvermischt in den Innenraum und verursachte dort je nach Außentemperatur starke Temperaturabsenkungen gegenüber der Raumtemperatur, besonders in einer Höhe von ca. 10 cm über dem Fußboden (Knöchelbereich). In Bild 3 ist beispielhaft ein solches Temperaturprofil dargestellt. Der Temperaturgradient über die Torhöhe beträgt 9 Kelvin. (Außenluft-

temperatur 9,3°C; Knöchelbereich 10,5°C).

Für Räume mit Behältnisanforderungen wie z.B. bei Warenhäusern sind diese Temperaturen unzulässig, so daß die Flächennutzung in der Nähe des Eingangsbereiches entfallen müßte.

**Betrieb mit Torluftschleieranlage und Querströmung von außen nach innen**

Die Strömungsverhältnisse beim Einsatz von Torschleieranlagen an Türen mit Querströmung sind in Bild 4 vereinfacht dargestellt. Durch den großen Strahlimpuls des Torschleiers in vertikaler Richtung kann der Luftaustausch aufgrund freier Konvektion zwischen Außen- und Innenbereich verhindert werden. Die (horizontalen) Außenluftströmung überlagert sich der vertikalen Luftschleierströmung, so daß der Torschleierfreistrahle zum Innenraum hin abgelenkt wird. Besonders deutlich gehen diese Vorgänge aus Bild 5 hervor. Dort ist das mit Hitzedrahtanemometern gemessene, vertikale Geschwindigkeitsprofil dargestellt. Der Geschwindigkeitsaufbau außerhalb des Kernstrahles hängt mit der Induktionswirkung des Freistrahles zusammen. Die gekennzeichnete »Durchbruchfläche« stellt den Bereich dar, in dem die Außenluft, ohne sich mit dem Luftschleierfreistrahle zu vermischen, in den Innenbereich (seitlich am Tor) »durchbricht«.

Diese Fläche nimmt mit größer werdendem Außenluftstrom - bei gleichbleibendem Ausblaswinkel zu. Aufgrund dieses Effektes, der auch durch Strömungssichtbarmachung nachgewiesen werden konnte, zeigt sich, daß die Abschirmung der Außenluftströmung mit dieser Luftschleierbauart nicht mög-



lich ist. Dazu wären Torschleieranlagen mit Luft-rückführung oder Wirbelschleier erforderlich [1].

Aufgrund der durchgeführten Messungen wurde ein neues Ausblasseystem mit zusätzlichen, seitlichen Lamellen entwickelt, bei dem die Durchmischung des seitlich am Tor eintretenden Außenluftstromes mit warmer Torschleierluft gewährleistet ist und dadurch die Zugbelastigungen deutlich reduziert werden.

### Energieverluste in Abhängigkeit von der Erhitzerleistung

Die Induktionswirkung des Freistrahles verursacht abhängig von der Außentemperatur einen unterschiedlich großen Temperaturabbau in der in den Innenbereich strömenden Luft. Zur Verhinderung niedriger Temperaturen am Fußboden ist je nach Außentemperatur die vom Torschleiergerät angesaugte Raumluft mehr oder weniger stark aufzuwärmen. Aus dem Temperaturverlauf in Bild 6 (siehe Seite 86) ist zu erkennen, daß bereits die Inbetriebnahme des Luftschleiers ohne Zufuhr von Erhitzerleistung zur deutlichen Anhebung der Temperatur im Fußbodenbereich gegenüber dem Betrieb ohne Torschleier (vgl. Bild 3) führt. Das vertikale Temperaturprofil ist wesentlich ausgeglichener, der Temperaturgradient ging von 9 Kelvin auf 3 Kelvin zurück (Außenlufttemperatur 7,5°C; Knöchelbereich 16,5°C).

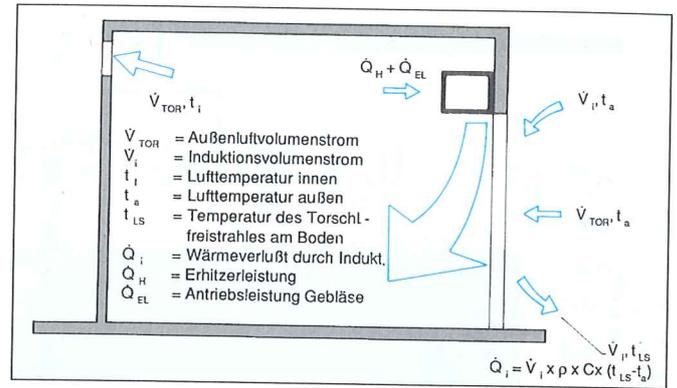
Der Betrieb der Torschleieranlage verursacht jedoch auch ohne Lufterhitzung Wärmeverluste.

Diese sind in Bild 7 (siehe Seite 86) mit  $\dot{Q}_I$  gekennzeichnet und werden durch den in Bild 4 dargestellten Induktionsvolumenstrom  $\dot{V}_I$  bewirkt. Da die Temperatur im Tor-

schleierfreistrahle mit zunehmender Erhitzerleistung ansteigt, nehmen die Wärmeverluste entsprechend zu. In Bild 6 ist diese Abhängigkeit für eine Außentemperatur von +9°C, eine Raumtemperatur von +20°C und für eine Querströmung von außen nach innen von 2600 m<sup>3</sup>/h abgebildet.

Zum Vergleich sind im Diagramm, links vom Nullpunkt der Abszisse, die Wärmeverluste ohne Torschleieranlage durch freie Konvektion und bei zusätzlicher Querströmung ( $\dot{V}_{TOR} = 2600 \text{ m}^3/\text{h}$ ) abgebildet. Man erkennt, daß der Induktionswärmeverlust  $\dot{Q}_I$  bei gleicher Außenluftstrate nur ca. 1/3 vom Konvektionswärmeverlust  $\dot{Q}_K$  beträgt.

Die gestrichelte Linie stellt den Leistungsaufwand für den Betrieb der Torschleieranlage dar. Diese beinhaltet die Antriebsleistung für das Gebläse (ca. 0,5 kW) und die Wärmeleistung für die Lufterhitzung. Wie zuvor beschrieben, ist die einzustellende Erhitzerleistung abhängig von der Außentemperatur und den Anforderungen an die Lufttemperaturen im Aufenthaltsbereich. Im Schnittpunkt der gestrichelten Linie mit der Linie für den Gesamtverlust erhält man die Erhitzerleistung, bei der die Torschleieranlage genau den zusätzlichen Lüftungswärmebedarf des Innenraumes deckt. Bei vollständiger Durchmischung von Außenluft und Luftschleierfreistrahle entspricht die Mischtemperatur der Raumtemperatur. Für Betriebsfälle links vom Schnittpunkt muß der zusätzliche Lüftungswärmebedarf durch andere Raumheizgeräte aufgebracht werden. Übersteigt die vom Torschleiergerät aufgewendete Leistung den Gesamtwärmeverlust, dann nimmt die Raumtemperatur zu, und es entstehen



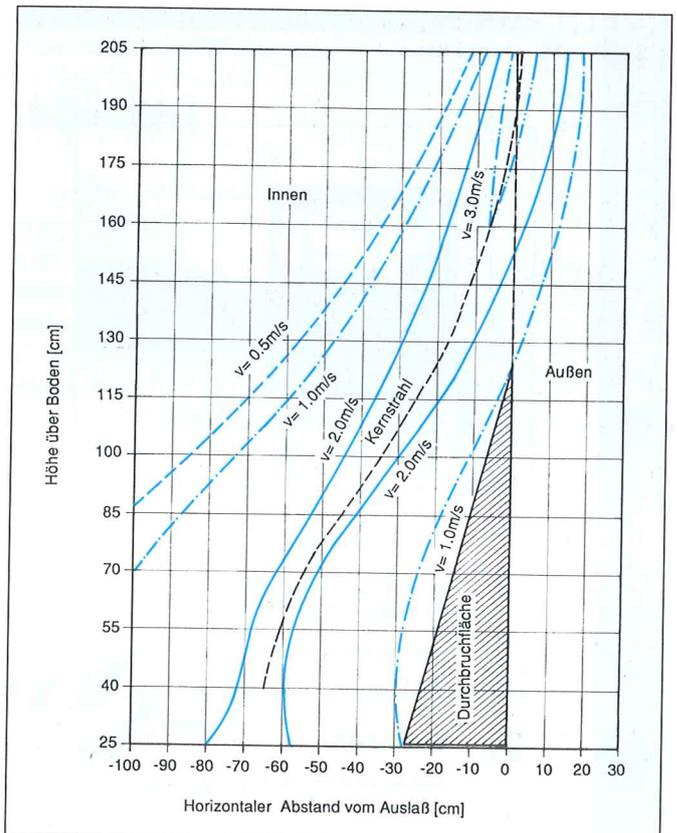
zusätzliche Energieverluste. Dies kann verhindert werden, wenn das parallel betriebene Heizsystem in der Lage ist, seine Leistung zu drosseln. Der Betrieb der Torschleieranlage mit Erhitzerleistungen rechts vom Schnittpunkt ist erforderlich, wenn hohe Behaglichkeitsanforderungen im Nahbereich der Toröffnung zu erfüllen sind.

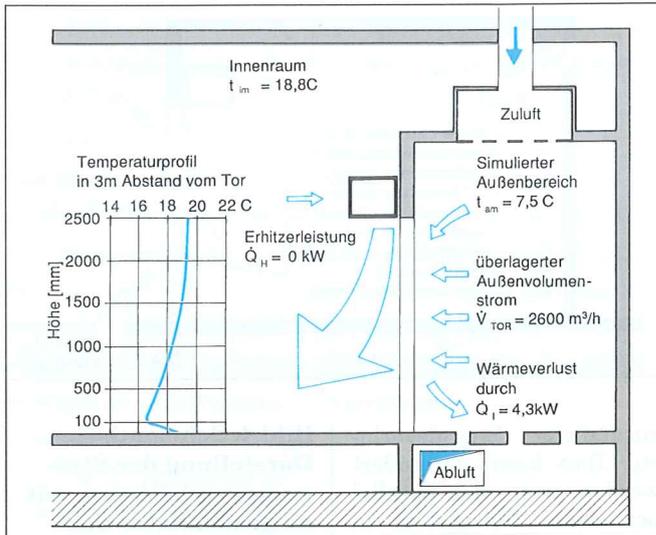
Die Energieverluste sind bei gleichbleibender Ausblasrichtung zudem von der Größe des von außen eindringenden Kaltluftstromes abhängig. Da mit zunehmendem Außen-

**Bild 4: Schematische Darstellung der Strömungsverhältnisse mit eingeschalteter Torschleieranlage und mit Querströmung von außen nach innen**

**Bild 5: Vertikales Strömungsprofil mit isokinetischen Linien**

Ausblasgeschwindigkeit: 7,0 m/s  
 Ausblastemperatur: 54°C  
 Außenvolumenstrom: 7000 m<sup>3</sup>/h  
 Meßebeine: seitlich am Tor;  
 Standardauslaß  
 Lamelleneinstellung: 18° nach außen

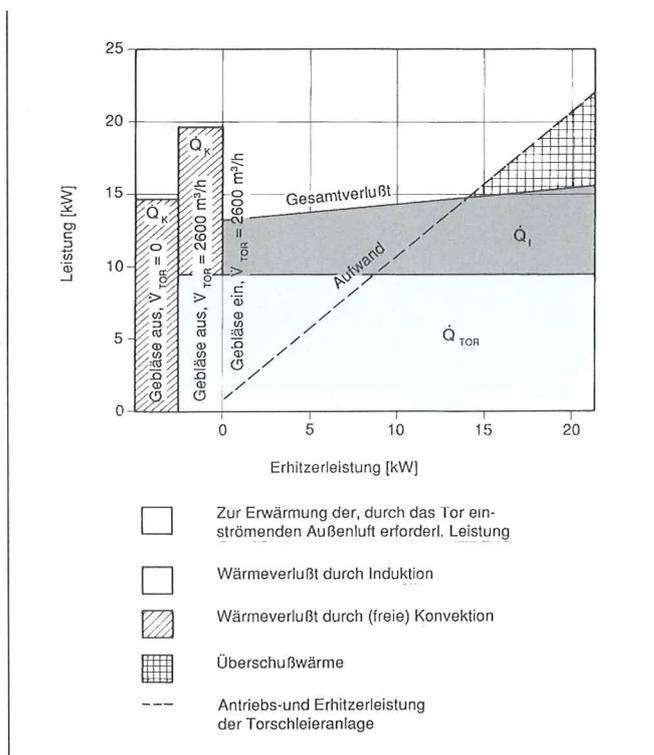




**Bild 6: Vertikales Temperaturprofil in 3 m Abstand vom Tor bei eingeschalteter Torschleieranlage mit Querströmung von außen nach innen**

**Bild 7: Energiebilanz der Torschleieranlage bei folgenden Randbedingungen:**

$t_a = 9^\circ\text{C}$ ;  $t_i = 20^\circ\text{C}$ ;  $\dot{V}_{\text{Tor}} = + 2600 \text{ m}^3/\text{h}$  (bzw. 0)



luftstrom der Freistrahler stärker zum Innenbereich hin abgelenkt wird, werden die Verluste entsprechend geringer. Bei sich ständig ändernden Betriebsverhältnissen (veränderliche Thermik und Winddrücke) mußte die Luftausblasrichtung durch Verstellung der Leitlamellen korrigiert werden, um zu verhindern, daß der Freistrahler nach außen abströmt. Dazu würde sich eine Steuerung mit der Störgröße »Differenzdruck innen – außen« (zeitlich gemittelte Werte) anbieten.

### Anwendungsfall Kühlzelle

Zur Überprüfung der Wirksamkeit von Torschleieranlagen beim Einsatz an Kühlzellen wurden folgende, vergleichende Untersuchungen jeweils mit und ohne Torschleierbetrieb durchgeführt:

- Strömungssichtbarmachung mittels Nebelgenerator und Dokumentation auf Videofilm
- Temperaturmessungen, u.a. Aufnahme des Temperaturprofils im Türbereich
- Spurengasmessung zur Ermittlung des Luftaustausches zwischen Kühlzelle und Umgebung.

Die Untersuchungen wurden bei der Firma BÄKO in Lichtenstein/Sachsen im Verteillager für die angeschlossenen Bäckereien und Konditoreien in der Region Westsachsen/Ostthüringen durchgeführt. Die Bäckereivorprodukte der einzelnen Hersteller, darunter auch Tiefkühlware, werden mit LKW angeliefert und im Verteillager entsprechend eingelagert. Für die Tiefkühlprodukte steht in der Lagerhalle eine Kühlzelle ( $-18^\circ\text{C}$ ) zur Verfügung. Der Grundrißplan geht aus Bild 8 hervor.

Entsprechend den Bestellungen der angeschlossenen Bäckereien und Konditoreien werden die Waren dem Lager entnommen und mit LKW zu den Kunden gebracht. Die Kühlzelle besteht aus zwei hintereinanderliegenden, durch eine Zwischenwand getrennten Räumen, die früher mit verschiedenen Tiefkühltemperaturen betrieben wurden (vorn  $-10^\circ\text{C}$ , hinten  $-18^\circ\text{C}$ ). Dies erklärt auch die unterschiedliche Größe der Verdampfer der beiden Kühlanlagen. Durch Entfernung der Trenntür und Absenkung des Raumtemperatursollwertes der vorderen Kühlanlage haben nun

beide Räume der Kühlzelle eine Temperatur von  $-18^\circ\text{C}$ . Die Befüllung und die Entnahme der Ware aus der Kühlzelle erfolgt mit Gabelhubwagen (sortenreine Befüllung bei Anlieferung und palettenweise Entnahme der in der Kühlzelle zusammengestellten Bestellung an Tiefkühlware).

Während des Befüll- oder Entnahmeproganges bleibt die Tür der Kühlzelle jeweils für etwa 2–3 Minuten geöffnet. Die über der Kühlzellentür angebrachte Luftschleieranlage wird über einen Kontakt beim Öffnen der Tür ein- und bei deren Schließen wieder ausgeschaltet.

### Durchgeführte Untersuchungen

Zur Verdeutlichung der Induktionswirkung des Luftschleierstrahles und der Warmlufteinströmung in der oberen Türhälfte bei ausgeschalteter Luftschleieranlage war die Erfassung der Strömungsvorgänge in der »Trennfläche« Warmluft/Kaltluft im Türquerschnitt erforderlich. Die Luftströmung beim Betrieb der Luftschleieranlage ist in dieser Ebene so stark, daß dort keine aussagefähigen Messungen vorgenommen werden konnten. Außerdem wirken sich die Lage der Türöffnung in der Kühlzellenwand, die Platzierung des Kühlgutes und die von den Ventilatoren der Verdampfer erzeugte Luftströmung auf die Strömungsvorgänge im Türquerschnitt erheblich aus. In der Kühlzelle wurde deshalb eine Trennwand so aufgestellt, daß sich mit der Seitenwand ein »Kanal« ergab (siehe Bild 11).

Die Meßebebene zur Erfassung des Temperaturprofils konnte somit außerhalb des direkten Luftschleier-Gebläseeinflusses im Kanalquerschnitt installiert werden.



### Strömungssichtbar- machung und Videodokumentation

Die nachfolgend aufgeführten Strömungsversuche wurden per Videokamera aufgezeichnet. Der Aufnahmestandort geht aus Bild 8 hervor. Von den Videoaufnahmen wurde eine Videodokumentation angefertigt.

Vor der Durchführung der eigentlichen Strömungsversuche wurde zuerst die Einstellung der Luftleitlamellen des Luftschleiers überprüft, um sicherzustellen, daß die aus der Halle angesaugte Warmluft, die über den Freistrahler mit hoher Geschwindigkeit auf dem Fußboden auftrifft, nicht in die Kühlzelle abgelenkt wird.

Durch Nebelaufgabe am Ansaugquerschnitt des Luftschleiers ergab sich ein Strömungsbild, das erkennen ließ, daß der Luftfreistrahler beim Auftreten am Fußboden zur Lagerhalle hin abströmt, was die richtige Einstellung der Luftleitlamellen bestätigt.

Nach dem Abschalten des Nebelgenerators konnte man eine deutliche Nebelanreicherung in der Kühlzelle feststellen. Dies beruht auf der Induktionswirkung des Freistrahles.

### Strömungsversuche

In Bild 9 (siehe Seite 90) ist deutlich der im Bodenbereich austretende Kaltluftstrom zu erkennen. Ab ca. halber Türhöhe strömt Warmluft aus der Lagerhalle in die Kühlzelle hinein. Die Strömungsvorgänge sind vergleichbar mit denen, die in Bild 2 schematisch dargestellt sind, mit dem Unterschied, daß der freien Konvektion keine Querströmung überlagert ist.

Die starke Induktionswirkung des Luftschleierfreistrahles geht aus Bild

10 (siehe Seite 90) hervor. Der Nebel aus dem Inneren der Kühlzelle wird im oberen Bereich der Tür induziert und dann (in verdünnter Form) mit dem Freistrahler in Bodennähe in die Lagerhalle geblasen. Es wird deutlich, daß gegenüber dem Betrieb ohne Luftschleier die Warmluft-einströmung im oberen Türbereich abgeschirmt wird.

Die Strömungssichtbar-machungen lassen alleine die Beurteilung der Effektivität des Luftschleiereinsatzes nicht zu, da keine Aussage über den tatsächlich ausgetauschten Luftstrom getroffen werden kann. Dazu dient insbesondere die Spurengasmessung, die noch in einem separaten Abschnitt beschrieben wird.

### Temperaturmessungen mit Aufnahme des Temperaturprofils im Innenbereich der Kühlzelle

Zur Erfassung des Temperaturprofils wurde ein Meßgitter aufgebaut, das in Bild 11 (siehe Seite 90) schematisch dargestellt ist. An den Meßachsen wurden insgesamt 20 Ni/NiCr-Thermoelemente angebracht und über Ausgleichsdrahte mit einem 30-Kanal-Schreiber verbunden.

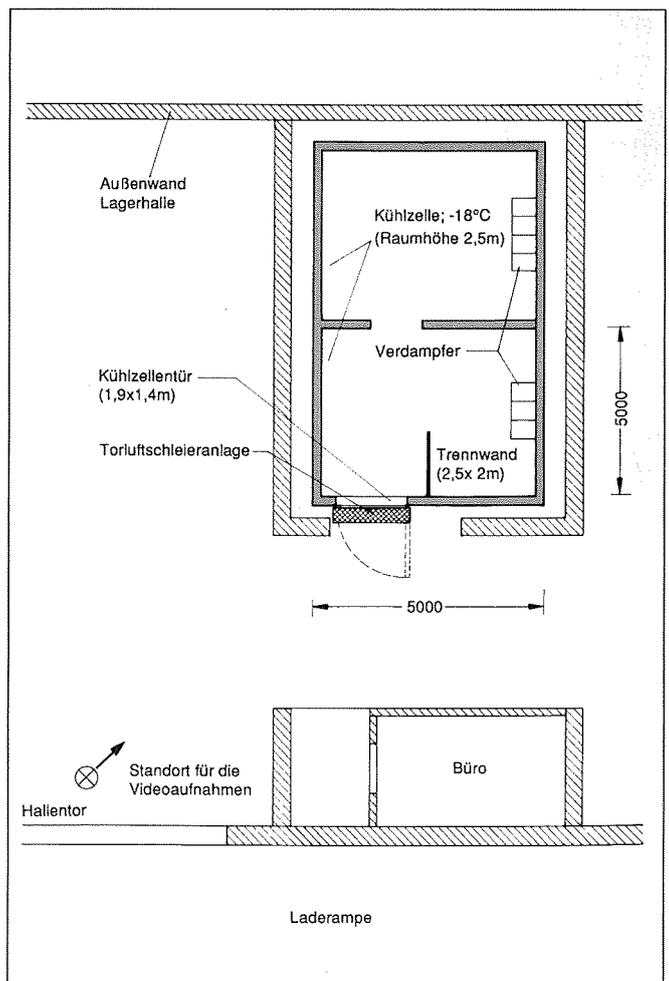
Weitere Temperaturmeßstellen wurden am Regelfühler des vorderen Kühlraumes (Kanal 30), in der Lagerhalle in 2,5 m Höhe (Kanal 29) und in ca. 3 m Abstand von der Kühlzellentür am Fußboden (Kanal 28) platziert.

Nach dem Erreichen der Kühlraum-Solltemperatur von  $-18^{\circ}\text{C}$  wurde die Kühlraumtür bei eingeschaltetem Luftschleier für 2,5 Minuten geöffnet und der Anstieg der Temperaturen in der Meße-bene bzw. der Temperaturabfall am Fußbodenfühler (Kanal 28) aufgezeichnet. An-

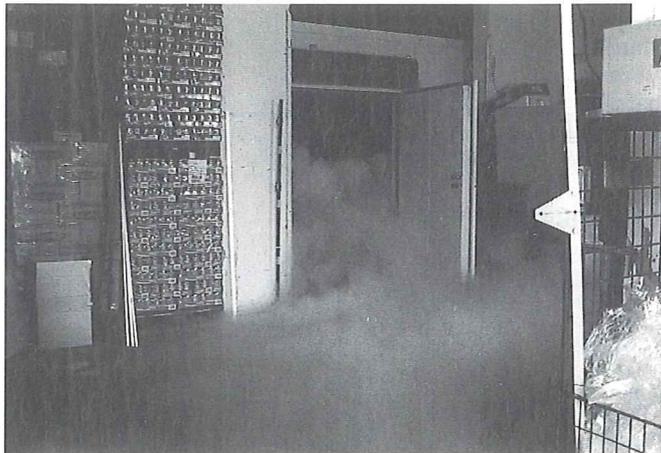
schließend erfolgte unter gleichen Bedingungen der Versuch ohne Luftschleierbetrieb. Die Meßergebnisse sind in Tabelle 1 (siehe Seite 91) zusammengestellt.

### Spurengasmessung

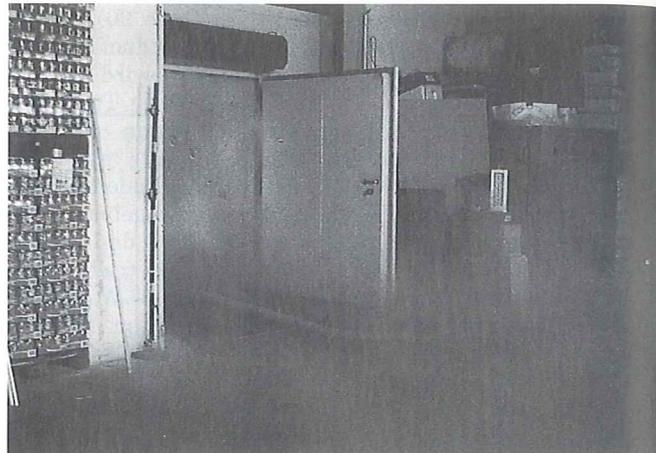
Die Spurengasmessung wird u.a. angewendet, um die Luftwechselrate von Räumen zu ermitteln. Bei der Abklümmethode wird der Raumluft ein Spurengas (Gas, das nicht in der Zuluft enthalten und ungefährlich ist, wie z.B.  $\text{N}_2\text{O}$  = Stickoxydul »Lachgas«) beigemischt. Nach vollständiger Durchmischung von Spurengas und Raumluft



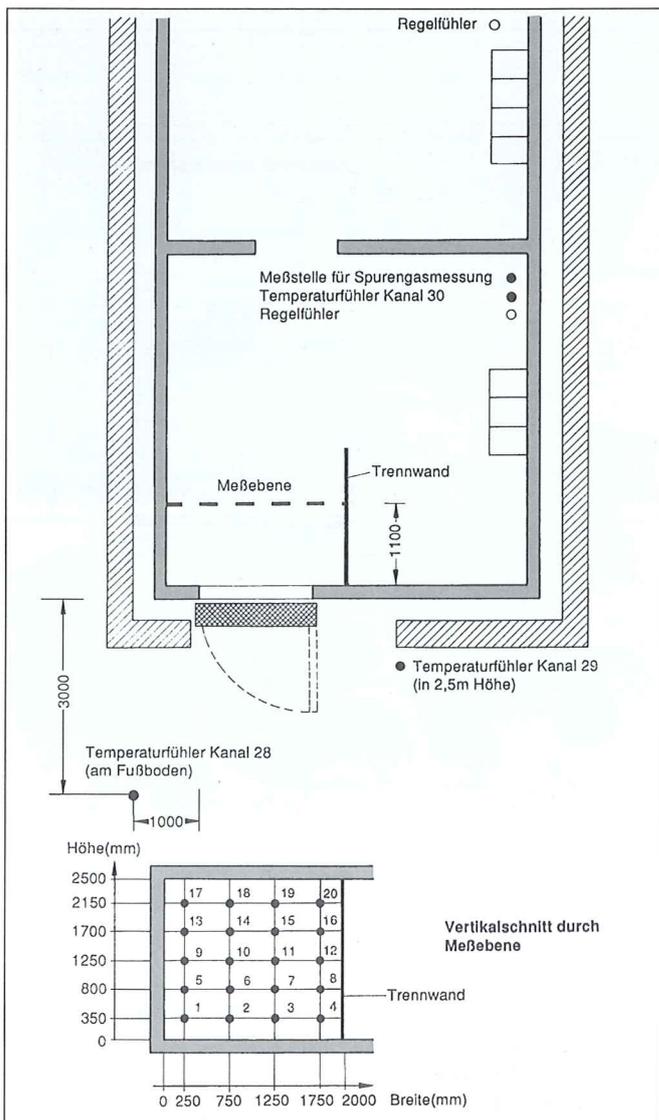
**Bild 8: Aufstellungsplan  
der Kühlzelle innerhalb  
der Lagerhalle**



**Bild 9:** Einbringung von Nebel in der Kühlzelle in ca. 2 m Abstand von der Tür; bei ausgeschalteter Torschleieranlage (Aufnahme ca. 90 s nach Türöffnung)



**Bild 10:** Einbringung von Nebel in der Kühlzelle in ca. 2 m Abstand von der Tür; bei eingeschalteter Torschleieranlage (Aufnahme ca. 90 s nach Türöffnung)



**Bild 11:** Anordnung der Meßstellen für die Temperatur- und Spurengasmessungen

ist die Anfangskonzentration zu messen. Danach wird die Luftzufuhr für eine bestimmte Zeit eingeschaltet.

Aus der Konzentrationsabnahme während der Durchmischungszeit kann das in den Raum eindringende Volumen der nicht mit Spurengas belasteten Zuluft nach Gleichung (4) bestimmt werden:

$$V_{ZU} = V_R \cdot \ln \frac{C_{RE}}{C_{RA}} \quad (4)$$

mit:  $V_{ZU}$  Zuluftvolumen,

das sich während der Meßdauer mit der Raumluft vermischt hat

$V_R$  Raumvolumen  
 $C_{RA}$  Konzentration des Spurengases in der Kühlraumluft zu Versuchsbeginn

$C_{RE}$  Konzentration des Spurengases in der Kühlraumluft zu Versuchsende

Voraussetzung: Vollständige Durchmischung von unbelasteter Zuluft ( $C_{ZU} = 0$ ) mit der Kühlraumluft

Die Anordnung der Meßstelle für die Spurengasmessung im vorderen Kühlraum neben dem Regelfühler geht aus Bild 11 hervor. Die Raumluft wur-

de durch die Meßgas-Pumpe im Spurengasanalysator über den unter der Kühlraumtürdichtung durchgeführten PVC-Schlauch angesaugt. In der Kühlzelle wurde mit einer  $N_2O$ -Flasche eine Konzentration von 480 ppm erzeugt. Die Durchmischung des Lachgases mit der Kühlraumluft war durch die laufenden Ventilatoren der Verdampfer gewährleistet.

Anschließend erfolgte der Versuch mit Luftschleierbetrieb, wobei für 2,5 Minuten die Kühlzelltür geöffnet blieb. Nach dem Schließen der Tür wurde abgewartet, bis sich die Konzentration an der Spurengasmeßstelle nicht mehr änderte.

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse mit denen des anschließend durchgeführten Versuches ohne Luftschleierbetrieb zeigt Tabelle 2.

### Beurteilung der Ergebnisse

Anhand der Strömungssichtbarmachung wurde deutlich, daß bei ausgeschalteter Luftschleieranlage ein großer Kaltluftstrom aus der Kühlzelle in die Lagerhalle gelangt. Das entsprechende Warmluftvolumen strömt aus Kontinuitätsgründen im oberen



Bereich der Kühlraumtür in die Kühlzelle und verursacht dort Energieverluste (Kühlung, Entfeuchtung, Vereisung des Kondensates und Kondensatabtauung).

Der Betrieb mit Luftschleier zeigte, daß der direkte Warmluft einfall verhindert wird. Aus den Strömungssichtbarmachungen geht jedoch nicht hervor, wieviel Umgebungsluft durch die Induktionswirkung des Freistrahles in die Kühlzelle gelangt.

Durch die Spurengasmessung konnte nachgewiesen werden, daß bei Betrieb ohne Luftschleier ein größerer Luftaustausch stattfindet.

Bei der untersuchten Anlagenkonfiguration beträgt das Verhältnis der während der Türöffnungszeit von 2,5 Minuten in die Kühlzelle einströmenden Warmluftvolumina ca. 1 : 3 (Betrieb mit Luftschleier zu Betrieb ohne Luftschleier, berechnet aus der prozentualen Konzentrationsaufnahme nach Tabelle 2).

Die gleiche Tendenz zeigt der Vergleich des Temperaturanstieges an der Meßstelle am Regelfühler des vorderen Kühlraumes (siehe Tabelle 1).

Das Verhältnis der Ausgleichszeiten nach Türschließung bis zum Erreichen der Kühlraumsolltemperatur beträgt nur ca. 1 : 2. Diese Abweichung ist dadurch zu erklären, daß die mittlere Verdampferleistung bei ausgeschaltetem Luftschleier (durch den stärkeren Anstieg der Kühlraumtemperatur) wesentlich größer ist.

Theoretisch ließe sich der in die Kühlzelle eintretende Warmluftstrom bei eingeschaltetem Luftschleier auf  $\frac{1}{4}$  des Luftvolumens verringern, das bei Betrieb ohne Luftschleier ausgetauscht wird (für vollständige Durchmischung, vergleiche Tabelle 2).

Das Verhältnis der Energieverluste kann vereinfachend dem Verhältnis,

das aus der prozentualen Konzentrationsabnahme ermittelt wurde (siehe Tabelle 2), gleichgesetzt werden. Damit kann jedoch keine Aussage über die quantitative Energieeinsparung (in kWh) getroffen werden, wovon der wirtschaftliche Einsatz des Luftschleiers im wesentlichen abhängig ist. Zur Ermittlung der tatsächlichen Energie- und Betriebskostensparnis müßten an einer bestehenden Anlage die elektrische Leistungsaufnahme von Kälteanlage und Luftschleier durch Langzeitmessungen unter gleichen Randbedingungen ermittelt werden.

Außer der Energieeinsparung hat der Einsatz von Luftschleieranlagen an Kühlzellen noch weitere Vorteile:

□ Verringerung der Kühlguterwärmung

Die Temperaturmessungen ergaben, daß im Bereich der Meßebebene über den gesamten Meßquerschnitt geringere Temperaturen (höchster Wert  $-5,3^{\circ}\text{C}$ ) auftreten als bei Betrieb ohne Luftschleier (siehe Tabelle 1). Dort stellten sich nach 2,5 Minuten Werte von bis zu  $+14,6^{\circ}\text{C}$  ein.

Das Problem der Erwärmung der Tiefkühlware verstärkt sich dadurch, daß die Zeitspanne (nach dem Schließen der Tür) bis zum Erreichen der Kühlraumsolltemperatur etwa doppelt so groß ist (s.o.).

□ Verhinderung der Eisbildung am Fußboden der Lagerhalle

Die Meßergebnisse des Temperaturfühlers am Fußboden der Lagerhalle in ca. 3 m Abstand von der Kühlzellentür zeigen deutlich die Gefahr der Eisbildung. Nach 2,5 Minuten sank bei abgeschalteter Luftschleieranlage die Temperatur auf  $-1,3^{\circ}\text{C}$  (siehe Tabelle 1). Mit Luftschleier lag sie um ca. 15 K höher.

Vergleichsgröße	Ergebnisse	
	mit Luftschleier	ohne Luftschleier
Temperatur Kanal 30	- 18,2°C	
vor Türöffnung	- 18,2°C	
nach 2,5 min	- 12,4°C	- 0,2°C
Temperaturanstieg	5,5 K	18 K
Ausgleichszeit <sup>1)</sup>	ca. 14 min	ca. 26 min <sup>2)</sup>
Temperatur Kanal 29	+ 18°C	
Temperatur Kanal 28	+ 16°C	
vor Türöffnung	+ 16°C	
nach 2,5 min	+ 13,8°C	- 1,3°C <sup>3)</sup>
Temperaturabsenk.	2,2 K	17,3 K
Mitteltemperatur i. d. Meßebebene nach 2,5 min		
Kanal 1 bis 4	- 15,4°C	- 11,2°C
Kanal 5 bis 8	- 11,4°C	- 0,7°C
Kanal 9 bis 12	- 8,0°C	+ 3,0°C
Kanal 13 bis 16	- 6,1°C	+ 6,9°C
Kanal 17 bis 20	- 5,3°C	+ 14,6°C

**Tabelle 1: Zusammenstellung der Meßergebnisse der Temperaturmessungen**

- 1) Zeit bis zum Erreichen der Starttemperatur nach Schließen der Tür  
 2) Die Ausgleichszeit wurde aus dem Meßschrieb ermittelt  
 3) Gefahr durch Fußbodenvereisung nach dem Schließen der Tür

Vergleichsgröße	Ergebnisse	
	mit Luftschleier	ohne Luftschleier
N <sub>2</sub> O-Konzentration		
vor Türöffnung	480 ppm	358 ppm
nach dem Schließen der Tür im Gleichgewichtszustand	358 ppm	110 ppm
Abnahme	~ 25%	~ 70%
nach Gleichung 4.1 theoretisch eingeströmtes Zuluftvolumen, bei vollständiger Durchmischung von Zuluft und Kühlraumluft (Nettoraumvolumen ca. 80 m <sup>3</sup> )	24 m <sup>3</sup>	96 m <sup>3</sup>

**Tabelle 2: Zusammenstellung der Meßergebnisse der Spurengasmessung**

### Literatur

- [1] Detzer, R. und Gersch, D.: Torschleieranlagen. KI 6/1984  
 [2] Brown, W.G.; Wilson, A.G.; Solvason K.R.: Heat and moisture flow through openings by convection. Ashrae-Trans. 1963  
 [3] Graf, A.: Theoretische Betrachtung über den Luftaustausch zwischen zwei Räumen. Schw. Bl., 31. Jhrg. 1964  
 [4] Steinbeis-Transferzentrum Energie- und Reinraumtechnik: Untersuchungen an Torschleieranlagen im Auftrag der Firma GELU. Bericht 3/1991  
 [5] Steinbeis-Transferzentrum Energie- und Reinraumtechnik: Vergleichende Untersuchungen zur Beurteilung der Effizienz der Luftschleieranlage an der Kühlzelle der Firma BÄKO in Lichtenstein/Sachsen mit und ohne Luftschleierbetrieb im Auftrag der Firma GELU. Bericht 6/1994