

**Autor**

Dr.-Ing. Eckehard Fiedler

Fa. Caverion, 52072 Aachen



Bild 1: In der Eisarena Wolfsburg wurde ein innovatives Lüftungskonzept realisiert

## Effiziente Schichtlüftung Klimatisierung von Eissporthallen

**Die Klimatisierung von Eissporthallen dient nicht allein dem Nutzerkomfort. Zu hohe Luftfeuchte führt durch Reifbildung zu einer schlechten Eisqualität, Nebelbildung kann den Spielbetrieb beeinträchtigen. Dauerhafte Kondensation im Dachbereich verursacht gravierende Gebäudeschäden und wird z. B. als eine Hauptursache für den Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall im Januar 2006 vermutet. In der Eisarena Wolfsburg wurde ein innovatives Lüftungskonzept für Eishallen realisiert, das auch weitergehende Nutzeranforderungen erfüllt und sich durch eine hohe Energieeffizienz auszeichnet.**

Der Betrieb von Eissporthallen ist sehr kostenintensiv. Nach einer Studie der Fachhochschule Erfurt [1] verursacht die Kälteerzeugung ca. 35 % der Betriebskosten, gefolgt von 32 % für die Beheizung der Halle. Der Wärmeaustausch zwischen Halle und Eis ist damit eine der Hauptursachen für den Energieverbrauch. Die Verteilung der Wärmeströme in das Eis ist nach [1] folgende:

- 44 % Konvektion,
- 19 % Strahlung,
- 16 % Reifbildung,
- 13 % Eispflege sowie
- 8 % Beleuchtung und Bodenwärmeleitung.

In doppelter Hinsicht bedeutsam ist der Feuchteausaustausch zwischen Hallenluft und Eis in der Form von Reifbildung. Reif bildet sich als weißlicher Belag auf dem Eis und macht die Oberfläche stumpf. Neben energetischen Aspekten besteht daher auch ein sportliches Interesse an einer Minimierung der Reifbildung.

Ein effizientes Mittel zur Senkung des Energieverbrauches ist die Absenkung der Hallenlufttemperatur. Eishockeyspieler bevorzugen Lufttemperaturen von +8 °C über dem Eis, für Zuschauer sind solche Temperaturen allerdings nur bedingt zumutbar. Niedrige Temperaturen

in der Halle können zudem weitere negative Folgen haben. So steht die Hallendecke in intensivem Strahlungsaustausch mit dem Eis. Bei einer Hallenlufttemperatur von +15 °C und einer Außentemperatur von +30 °C liegt die Temperatur der Dachinnenfläche bei +9,5 °C [1]. Der Strahlungswärmeaustausch zwischen Dach und Eis liegt bei 75 W/m<sup>2</sup>, die aus der Hallenluft nachgeliefert werden müssen. Infiltration im Dachbereich kann hier zur Tropfenkondensation (Schwitzwasserbildung) an der Dachkonstruktion führen, gelegentlich wird über die Bildung von Eisaufwachsungen (Stalakmiten) durch Tropfwasser auf der Eisfläche berichtet.

Von Lüftungsanlagen wird in Eishallen gefordert, dass sie eine Nebelbildung verhindern sollen. Nebel entsteht, wenn kalte mit feuchtwarme Luft gemischt wird und die Mischungsgerade im Mollier-h-x-Diagramm im Nebelgebiet liegt (Bild 2). Direkt an der Eisoberfläche liegt eine dünne Luftschicht, die bereits bei einer absoluten Feuchte von  $x = 2,2$  g/kg gesättigt ist. Kühlt sich im Hochsommer infiltrierte Außenluft am Hallendach ab, dann kommt es bei der Mischung fast zwangsläufig zur Nebelbildung. Nach Einschalten der Belüftung und zusätzlicher interner Wärmelasten wie Scheinwerfer verschwindet häufig der Nebel sehr schnell. Die Entfeuchtung der Hallenluft erfolgt

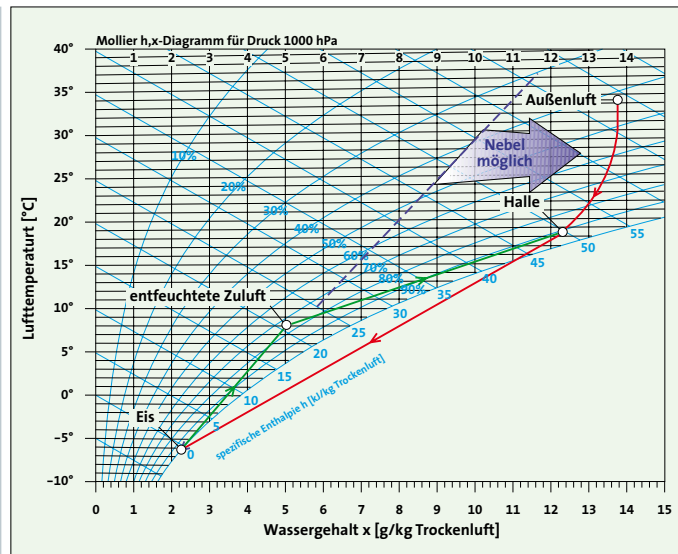


Bild 2: Mischungsgeraden in einer Eissporthalle

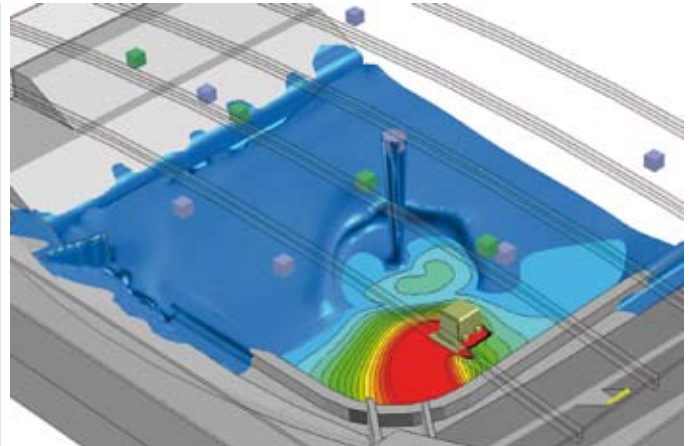


Bild 3: Numerische Simulation der Luftschichtung über dem Eis

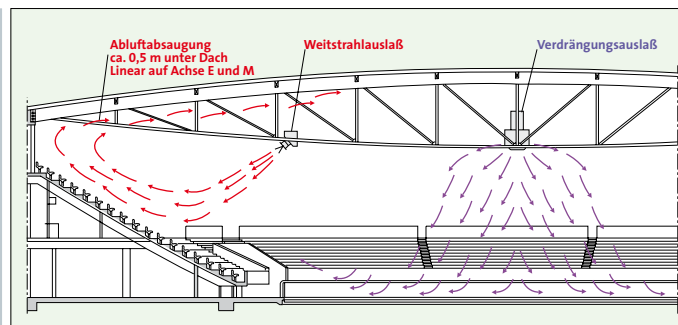


Bild 4: Luftführung in der Eisarena Wolfsburg



Bild 5: Kegelförmiger Verdrängungsauslass Typ Krantz-VAK

dabei allerdings vor allem durch Kondensation an der Eisfläche und weniger durch die Zuluft – mit den erwähnten negativen Folgen für die Eisqualität.

Zur Sicherung der Eisqualität bestand der Wunsch des Betreibers, die Eisfläche mit voll entfeuchteter Luft<sup>1</sup> ( $x = 5 \text{ g/kg}$ ) zu beaufschlagen.

#### Anmerkung

<sup>1</sup> Der Ausdruck „voll entfeuchtet“ bezieht sich darauf, dass eine weitere Entfeuchtung mit üblichen Mitteln der Klimatechnik nicht wirtschaftlich möglich ist. Die Sättigungstemperatur bei  $x = 5 \text{ g/kg}$  beträgt nur noch  $3,7 \text{ °C}$ , so dass im Kühler Vereisungsgefahr besteht.

#### Induktion von Hallenluft

Bei runden Strahldüsen nimmt das Strahlvolumen nach folgender Gleichung zu:

$$\frac{\dot{V}(x)}{\dot{V}_0} \approx \frac{2}{7} \cdot \frac{x}{s}$$

Bei einem Düsendurchmesser  $s = 250 \text{ mm}$  beträgt die Volumenzunahme nach einer Lauflänge von  $x = 10 \text{ m}$  bereits  $\dot{V}_x/\dot{V}_0 = 11,4$ . Der Strahl besteht also zu über 90% aus induzierter Hallenluft.

Für die Publikumsbereiche sollte die Entfeuchtung lediglich auf minimal  $12 \text{ g/kg}$  erfolgen, um hier die Betriebskosten zu senken.

Für die Realisierung eines solchen Konzeptes bietet sich grundsätzlich das Prinzip der Schichtlüftung an, bei dem die natürliche Tendenz der Luft zur Schichtbildung genutzt wird. Voraussetzung hierfür ist, dass die Luftschichten unterschiedlich temperiert sind, so dass sich warme Luft über kälterer aufschichten kann. Da Luft eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt kommt es zwischen den Schichten nur zu einem sehr geringen Wärmeaustausch. Im industriellen Sektor ist die Schichtlüftung ein häufig verwendetes Prinzip, allerdings muss kühle Zuluft vom Boden her eingebracht werden, z. B. durch Quell-Luftauslässe, damit es zu einer Schichtung kommt. Bei einer Einbringung unter dem Hallendach kommt es mit üblichen Luftauslässen zu einer Vermischung von kalter Zuluft und warmer Hallenluft, so dass sich keine Schichtung einstellt (Siehe Infokasten links). Für die Eisarena Wolfsburg wurden daher Spezialauslässe der Firma Krantz verwendet, mit denen eine Verdrängungslüftung auch von der Decke her möglich ist.

#### Numerische Simulation der Eisfläche

Zur Prüfung des Konzeptes wurde zunächst eine numerische Strömungssimulation durchgeführt.



Bild 6: Weitstrahlöse Typ Krantz-SW



Bild 7: Zunächst quillt die Zuluft fast impulsfrei aus dem Auslass, ...



Bild 8: ... und wird dann nach unten beschleunigt



Bild 9: Bei einer Höhe von 2 m über der Eisfläche ...

mungssimulation durchgeführt (Bild 3). Da die Entfeuchtung der Raumluft durch die Eisfläche einen gravierenden Einfluss auf das Hallenklima hat, mussten die Transportvorgänge der Feuchte im Modell mit abgebildet werden. Für die Eisoberfläche wurde eine konstante absolute Feuchte von  $x = 2,3 \text{ g/kg}$  festgelegt. Die Zuluftfeuchte wurde entsprechend der vorgegebenen Anlagendaten mit  $5 \text{ g/kg}$  bzw.  $12 \text{ g/kg}$  angesetzt. Für die Umrechnung der absoluten in relative Feuchte kann folgende Formel verwendet werden:

$$\Phi = \frac{168}{\left(\frac{615}{x} + 1\right) \cdot e^{\frac{17,9 \cdot t}{233 + t}}}$$

$\Phi$  ist relative Feuchte mit der Skalierung  $1 = 100 \%$ ,  $x$  die absolute Feuchte  $[\text{g/kg}]$  trockene Luft,  $t$  die Temperatur  $[\text{°C}]$ . Nebelbildung findet in Bereichen statt, in denen  $\Phi > 1$  ist.

Bei der Modellierung des Strahlungsaustausches wurde auf Messergebnisse aus vergleichbaren Hallen zurückgegriffen, mit denen die Oberflächentemperaturen realitätsnah dargestellt werden konnten.

Bei der Simulation zeigt sich, dass in der Halle mit dem vorgeschlagenen Konzept eine günstige Schichtung ohne Nebelbildung erreicht werden kann. Die Luftmengen und Auslassanordnungen konnten so im Vorfeld bereits geprüft und optimiert werden.

### Altes Eis in neuen Hallen

Bei der Sanierung der Eisarena Wolfsburg wurde die Halle komplett neu errichtet, Kälteanlage und Eisfläche wurden allerdings erhalten und lediglich modernisiert. Für die Klimatisierung kam daher nur eine Luftführung von oben in Frage, da Eingriffe in die bestehende Kälteverrohrung vermieden werden sollten.

In der Eisarena Wolfsburg musste die Zuluft in einer Höhe von 10 m eingebracht werden (Bild 4). Bei einer weiteren Absenkung der Luftauslässe wäre es zu Sichtbehinderungen der Zuschauer gekommen. Eine Lösung für die Zuluftbringung fand sich schließlich in einem Spezial-Luftauslass der Firma Krantz, der ursprünglich für Flugzeuglackierhallen entwickelt worden war. In solchen Hallen soll ebenfalls eine Schichtlüftung erfolgen, allerdings erfolgt hier die Lufteinbringung aus einer Höhe von bis zu 32 m. So genannte „Kegelförmige Verdrängungsauslässe“ vom Typ VA-K (Bild 5) mit Durchmessern bis zu 2,5 m werden hier eingesetzt, um eine Verdrängungslüftung von oben zu realisieren. Aufgrund der kleineren Luftmenge konnte die Lufteinbringung der voll entfeuchteten Luft in der Eisarena Wolfsburg über nur zwei Auslässe mit einem Durchmesser von 800 mm erfolgen. Jeder dieser Auslässe versorgt dabei eine Spielfeldhälfte. Bei einer Montagehöhe von 10 m erreicht die Zuluft die Eisfläche fast unvermischt und breitet sich dort als schützendes Luftpolster über dem Eis aus (Bild 4). Bei  $8 \text{ °C}$  Zulufttemperatur und einer relativen Zuluftfeuchte von 50 % werden in 2 m Höhe noch  $8,5 \text{ °C}$  und 55 % gemessen.



**Bild 10: ... trifft die Luft auf ein Kaltluftpolster und ...**



**Bild 11: ... wird von diesem abgebremst**



**Bild 12: Die Zuluft schichtet sich auf und fließt nach außen ab**

Für die Belüftung der Zuschauerreihen wurden sogenannte Weitstrahl- auslässe (Bild 6) mit einstellbarer Wurfcharakteristik eingesetzt, die schräg von oben die Zuschauerreihen beaufschlagen. Mit diesen Luft- auslässen kann den Zuschauern gezielt wärmere Luft zugeführt wer- den, ohne die Schichtung über dem Eis zu stören.

### Praktische Erfahrungen

Mittlerweile liegen Erfahrungen aus der ersten Betriebssaison der An- lage vor, die eine durchweg positive Bilanz zulassen. Insbesondere die unterschiedlichen Bedingungen, die gleichzeitig in der Halle herrschen, beeindruckten Betreiber und Zuschauer. Während am Eis frostige 8 °C herrschen (was insbesondere von den Hockeyspielern gewünscht wird), breitete sich auf den Rängen bei angenehmen 22 °C Picknickstimmung aus. Kondensatbildung an der Decke wurde nicht beobachtet.

Nebelversuche, die an der betriebsfertigen Anlage durchgeführt wur- den, zeigten eindrucksvoll die Wirkung der Anlage. Die mit 8 °C einge- brachte Zuluft quillt zunächst fast impulsfrei aus dem Auslass (Bild 7), bevor sie im Zeitlupentempo durch die Schwerkraft beschleunigt wird (Bilder 8 bis 10). Bei einer Höhe von ca. 2 m über der Eisfläche trifft die Zuluft auf ein Kaltluftpolster, das sich über der Eisfläche bildet und wird von diesem abgebremst. Diese Kaltluftschicht blieb auch nach ca. 15- minütiger Nebelbringung vollkommen ungestört, wie Bild 11 be- legt. Die Zuluft schichtet sich über dieser Kaltluftschicht auf und fließt schließlich über die Verglasung der Bande nach außen ab (Bild 12).

In Bild 11 ist unter dem Auftreffpunkt der Zuluft ein ringförmiger Bereich mit Reifbildung zu erkennen. Da im stationären Betrieb ein Kontakt der Zuluft mit dem Eis nicht erfolgt, besteht der begründe- te Verdacht, dass diese Reifbildung während der Wiederaufrierphase nach der Eisaufbereitung entsteht. In dieser Zeit ist das schützende Kaltluftpolster gestört und die Zuluft kann bis zum Eis vordringen. Eine Abschaltung der Zuluft während der Eisaufbereitung ist daher anzuraten. Die Luftschichtung über dem Eis hat neben dem Eisschutz einen weiteren positiven Aspekt, wie Bild 2 (grüne Linie) zeigt. Bei einem Zuluftzustand  $T = 8 \text{ °C}/x = 5 \text{ g/kg}$  liegen beide Mischungsgeraden (Eis/Zuluft, Zuluft/Halle) außerhalb des Nebelgebietes. Dies deckt sich mit Beobachtungen, dass Nebel auf der Eisfläche sich nach Einschalten der Anlage nach einer Verzögerung von wenigen Minu- ten plötzlich auflöst. Die sehr langsam strömende Zuluft benötigt ca. 3 bis 5 min, um sich über der Eisfläche vollständig auszubreiten. Erst danach kann sich die Pufferwirkung der Zuluft voll entfalten.

Als Fazit der wissenschaftlichen Begleitung konnte bei diesem Projekt festgehalten werden, dass die Schichtlüftung für Eishallen ideal geeig- net ist. Je weniger die natürliche Tendenz der Luft zur Schichtung gestört wird, desto wirksamer ist die Anlage. Ein effektiver Schutz der Eisfläche ist dabei schon mit geringen Luftmengen von 5 bis 7 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> möglich.

### Ausblick

Das in Wolfsburg realisierte Konzept hat sich sehr gut bewährt und kann insbesondere für den Umbau bestehender Hallen empfohlen werden. Die Luftzuführung von oben ist ohne Eingriffe in den Hal- lenboden realisierbar. Zur Vermeidung von lokaler Reifbildung unter ungünstigen Bedingungen sollten die Luftmengen je Auslass für die Verdrängungsauslässe auf 4000 bis 5000 m<sup>3</sup>/h reduziert werden. Dies ist leicht durch eine Erhöhung der Auslasszahl erreichbar, indem drei Luftauslässe entlang der Spielfeldachse positioniert werden.

Gegenüber einer Mischlüftung mit Weitwurfdüsen ist das vorge- stellte Konzept hinsichtlich Eisschutz und Zuschauerkomfort weit überlegen. Nach bisherigen Erfahrungen sind deutlich reduzierte En- ergieverbrauchswerte zu erwarten, konkrete Verbrauchszahlen liegen dazu aber bisher noch nicht vor.

### Literatur

- [1] Schnelles Eis – Untersuchung zur Beeinflussung von Qualität und Energieaufwand beim Sporteis, Wilhelm Wienrich, Marco Anhalt, FH Erfurt, herausgegeben durch Bundesinstitut für Sportwissen- schaft. Berichte B3/02, ISBN 3–89001–140–3