

# Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern

Ausgearbeitet durch

**Fritz Gachnang, eta Energietechnik GmbH**

.....

Im Auftrag des

**Bundesamtes für Energie**

September 2005

**Auftraggeber:**

Bundesamtes für Energie  
Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden

**Auftragnehmer:**

ARGE eta Energietechnik GmbH; Gabathuler AG; Thomas Baumgartner & Partner AG; Zürcher Hochschule Winterthur  
Neustadtgasse 9, 8400 Winterthur

**Autoren:**

Fritz Gachnang, eta Energietechnik GmbH, Winterthur  
Hans Mayer, Gabathuler AG, Diessenhofen  
Andreas Schweizer, Baumgartner & Partner AG, Dübendorf  
Dr. Jürg Krieg, Zürcher Hochschule Winterthur, Winterthur

**Begleitgruppe:**

M. Zimmermann / H. Bertschinger, Programmleitung BFE, EMPA, Dübendorf

2005

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

**Bundesamt für Energie BFE**

Worbentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • [office@bfe.admin.ch](mailto:office@bfe.admin.ch) • [www.admin.ch/bfe](http://www.admin.ch/bfe)

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, [www.empa-ren.ch](http://www.empa-ren.ch)  
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, [enet@temas.ch](mailto:enet@temas.ch), [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
Durchgeführte Messprojekte	5
Erkenntnisse	5
Empfehlung	6
<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
Motivation	7
Projektstruktur	7
Systemgrenzen	7
Geschichte	8
Finanzierung	9
<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>10</b>
<b>Teilprojekt 1</b>	<b>11</b>
Zielsetzung	11
Vorgehen	11
Ausgangslage	11
Ermitteln der Kälte- und Wärmeenergieeinsparungen	12
Versuchsanordnung / Messverfahren	13
Messkonzept	14
Resultate	15
Allgemeines	15
Auswertung der direkten Kältemessungen	16
Auswertung der Wärmemessungen	17
Reduktion des Kältebedarfs	18
Reduktion des Wärmebedarfs	19
Wirtschaftlichkeit	20
<b>Teilprojekt 2</b>	<b>23</b>
Zielsetzung	23
Vorgehen / Versuchsanordnung	23
Messverfahren	24
Resultate	24
Messdaten	24
Interpretation	25
Fazit	26

<b>Teilprojekt 3</b>	<b>27</b>
Zielsetzung	27
Vorgehen	27
Versuchsanordnung / Messkonzept	28
Resultate	30
Messdaten	30
Interpretation	32
Fazit	35
<b>Anhang Teilprojekt 1</b>	<b>36</b>
Informationen zur Hallenklimatisierung	36
Hallenlüftungsanlage	36
Aussenklimateinflüsse	36
Messwertstreuung	37
Messungen der Kälteeinsparungen	37
Messungen der Kälteeinsparungen	38
Rahmenbedingungen	38
Interpretation der Messresultate	39
Fazit	44
Messungen des Wärmeleistungsbedarfs	45
Ungefilterte Daten ohne physikalischem Nullpunkt	45
Gefilterte Daten ohne physikalischem Nullpunkt	46
Gefilterte Daten mit physikalischem Nullpunkt (-4 °C / 0 kW)	47

## Zusammenfassung

### Durchgeführte Messprojekte

Das vorliegende P&D-Projekt ist ein reines Messprojekt und setzt sich themen- und objektbedingt aus drei Teilen zusammen:

- Teil 1: In der Hockeyhalle der Eissportanlage „Im Chreis“ in Dübendorf wurde durch Messungen vor und nach der Installation einer Aluminiumdeckenuntersicht untersucht, wie sich eine emissionsarme Deckenuntersicht in einer bestehenden Halle auf den Energiebedarf der installierten Kälte- und Klimatisierungsanlagen auswirkt. Auf der Basis dieser Messresultate konnte die Wirtschaftlichkeit des nachträglichen Einbaus emissionsarmer Deckenuntersichten für verschiedene Hallensysteme mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden.
- Teil 2: Die energetische Wirkung von grundsätzlich geeigneten Deckenuntersichtsmaterialien ist von der Verschmutzung und der Oxidation der gegen das Eisfeld gerichteten Bauteiloberflächen abhängig. Mit Materialproben, die an der Decke der Bodenseearena in Kreuzlingen montiert und damit realen klimatischen und Lufthygienischen Bedingungen ausgesetzt wurden, konnte messtechnisch untersucht werden, wie sich das Emissionsverhalten von Deckenuntersichtsmaterialien in Abhängigkeit der Alterung und der Verschmutzung verschlechtert. In Folge der für Langzeituntersuchungen zu kurzen Projektdauer liess sich nur der Alterungs- und Verschmutzungsverlauf der ersten zweieinhalb Betriebsjahre verbindlich aufgezeigt. Die Beurteilung des effektiven Langzeitverhalten musste mit Hilfe von Daten aus der Fachliteratur vorgenommen werden.
- Teil 3: An einer neu erstellten Ausseneisfeldüberdachung konnten zu Versuchszwecken drei unterschiedliche Überdachungskonstruktionen aus Eternit und Aluminium integriert und ausgemessen werden. Anhand der Messresultate wurde die Kondensatausfallhäufigkeit an den eisseitigen Deckenoberflächen und die Auswirkungen der unterschiedlichen Konstruktionen auf den Energie- und Leistungsbedarf der Kälteanlage untersucht. Die Versuchseinrichtung führte in Folge der dominierenden Eternitoberfläche, die das Klima unter der Überdachung bestimmte, zu einer für die Aluminiumkonstruktionen ungünstigen Beeinflussung der Messresultate. Trotz dieser Beeinträchtigung liessen sich aus den ermittelten Resultaten eindeutige Erkenntnisse ableiten.

## Erkenntnisse

### Teilprojekt 1

Mit Deckenuntersichten aus Aluminium wird gegenüber Holz-, Eternit- oder lackierten Metalldecken nachgewiesenermassen Energie für die Kälteerzeugung und die Hallenklimatisierung eingespart. Die erzielbare Reduktion des Energiebedarfs und die Wirtschaftlichkeit von nachträglich installierten Deckenuntersichten ist ausgesprochen stark von objektspezifischen Eigenschaften abhängig.

Bezogen auf eine Saisondauer von acht Monaten werden durch blanke Aluminiumdecken mit einer Bruttofläche von rund 2'000 m<sup>2</sup> je nach Halle und Klimatisierungsart allein zwischen 240 und 370 MWh Kälteenergie pro Jahr eingespart.

In hohem Masse abhängig von der Qualität des Kälteerzeugungssystems, entspricht dies einer Einsparung an Elektroenergie von 50 bis 170 MWh pro Jahr. Im Vergleich dazu wäre für die Erzeugung dieser Energiemenge eine Photovoltaikanlage mit einer Fläche von 500 bis 1700 m<sup>2</sup> erforderlich.

Im Falle von Hallenneubauten verursachen emissionsarme Deckenuntersichten gegenüber konventionellen Deckenmaterialien keine oder nur sehr geringe Mehrkosten, die über die energetischen Einsparungen innert Jahresfrist amortisiert werden können.

Die Kosten für den nachträglichen Einbau einer Aluminiumdeckenuntersicht in einer bestehenden Eishalle sind von den Gegebenheiten in der Halle abhängig. Inkl. Nebenarbeiten, Planung und Mehrwertsteuer müssen dafür Fr. 110'000.-- bis 160'000.-- aufgewendet werden. Eine energieäquivalente Photovoltaikanlage hingegen kostet je nach den energetischen Auswirkungen des Deckenprojekts, mit dem sie verglichen wird, zwischen Fr. 500'000 bis Fr. 2'000'000.--.

Moderne, kleinere und ausschliesslich entfeuchtete, aber unbeheizte Eishallen sind aus wirtschaftlicher Sicht für den nachträglichen Einbau emissionsarmer Deckenuntersichten eher weniger geeignet. Bei älteren oder

grossen und beheizten Hallen mit einem ineffizienten Kälte- und Wärmeerzeugungssystem kann hingegen grundsätzlich mit grossen Energiekosteneinsparungen und einer entsprechend hohen Wirtschaftlichkeit gerechnet werden.

Bezogen auf alle möglichen Nutzungs-, Hallen- und Systemvarianten resultieren Payback-Zeiten im Bereich von 3 bis 17 Jahren. Die objektspezifischen Gegebenheiten müssen in Anbetracht dieser grossen Bandbreite für jedes Optimierungs- oder Sanierungsprojekt separat abgeklärt und in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt werden.

Nebst den erwähnten energetischen Einsparungen lassen sich durch Aluminiumdecken auch die Beleuchtungsverhältnisse in einer Halle oder auf einer Aussenpiste verbessern. Die Kondensatausfallgefahr an der Deckenuntersicht wird durch den Einsatz emissionsarmer Materialien ebenfalls reduziert. Auf ein Klimatisierungssystem kann in einer Halle jedoch auch mit einer Aluminiumdecke nicht verzichtet werden.

## Teilprojekt 2

Polierte, gebeizte und blanke Aluminiumbleche oder Folien erwiesen sich erwartungsgemäss als die geeignetsten Deckenuntersichtsmaterialien. Sie verfügen im Neuzustand über hervorragende Emissionseigenschaften, die sich unter dem Einfluss der Alterung zwar leicht verschlechtern, aber gemäss Fachliteratur über lange Zeit auf hohem Niveau erhalten bleiben. Zu beachten ist, dass eloxiertes Aluminium bezüglich Strahlungsverhalten infolge der nichtmetallischen Oberflächeneigenschaften für Deckenuntersichten absolut ungeeignet ist.

Verzinkte Stahlbleche sollten wegen der zu erwartenden Alterung, die sich sowohl ungünstig auf den Emissionsgrad wie auch auf das Erscheinungsbild der Decke auswirkt, nicht im Zusammenhang mit energetischen Optimierungen eingesetzt werden. Höchstens in Neubauten, wo aus statischen Gründen kein Aluminium verwendet werden kann, stellt dieses Material eine kostengünstige, aber längerfristig vorallem aus ästhetischer Sicht eher ungünstige Minimallösung dar.

Alu-Zink beschichtete Stahlprofile weisen zwar Emissionseigenschaften aus, die gegenüber Aluminium oder neuen Zinkblechen einen reduzierten Einspareffekt bewirken und deshalb für Optimierungen ebenfalls ungeeignet sind. Sie bleiben aber unter dem Einfluss der Alterung länger hell als verzinkte Bleche und sollten deshalb in statisch problematischen Neubauten als Minimallösung anstelle der verzinkten Bleche eingesetzt werden.

Die Wirksamkeit einer emissionsarmen Deckenuntersicht wird durch Verschmutzungen je nach Intensität und Art der Nutzung früher oder später massgebend beeinträchtigt. Die Verschmutzung muss deshalb periodisch überprüft und die Deckenuntersicht gegebenenfalls gereinigt werden. Extrapolationen der vorgenommenen Messungen lassen darauf schliessen, dass eine erste Reinigung unter normalen Bedingungen wahrscheinlich frühestens nach 10 Jahren durchgeführt werden muss.

## Teilprojekt 3

Die Erstellung einer Aussenfeldüberdachung ist unabhängig von der Materialwahl der Deckenuntersicht mit Kosten verbunden, die nicht über die Energieeinsparungen amortisiert werden können. Ob sich für emissionsarme Aussenfeldüberdachungen eine vernünftige Wirtschaftlichkeit ausweisen lässt, wenn der durch die Überdachung reduzierte Aufwand für die Eispflege, die bessere Eisqualität und die erhöhte Nutz- und Verfügbarkeit der Piste mitberücksichtigt wird, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht werden.

Auf jeden Fall aus wirtschaftlichen Gründen, aber auch in Anbetracht der besseren Beleuchtungsverhältnisse und der hier nachgewiesenen, eindeutig reduzierten Betauungsdauer, sollten für neu zu erstellende Aussenpistenüberdachungen aber grundsätzlich Aluminiumkonstruktionen gewählt werden.

Die Nachrüstung einer bereits bestehenden Holz- oder Eternitüberdachung lässt sich aus wirtschaftlicher Sicht mit heutigen Energiepreisen nur mit gutem Willen rechtfertigen.

## Empfehlung

In Anbetracht des hohen Energiesparpotentials und der immer gegebenen Wirtschaftlichkeit, müssten emissionsarme, bevorzugterweise aus Aluminium gefertigte Deckenuntersichten für neu zu erstellenden Eissportanlagen aller Art zum verbindlichen Standard erklärt werden.

Im Falle von Umbauten oder energetischen Sanierungen in Eishallen stellt der Einbau einer Aluminiumdeckenuntersicht sicher eine seriös zu prüfende, in den meisten Fällen wirtschaftlich interessante Optimierungsmassnahme dar.

# Einleitung

## Motivation

Der Infrarot-Strahlungsaustausch zwischen einer Eishallendecke und dem darunterliegenden Eisfeld lässt sich durch blanke Metalldeckenuntersichten gegenüber Holzdecken oder lackierten Blechen um den Faktor 4 bis 10 reduzieren. Abhängig von der Hallentemperatur und dem Material der Metalldeckenuntersicht resultieren dadurch rechnerisch Wärme- und Kälteenergieeinsparungen zwischen 15 und 30%.

Im Gegensatz zu Neubauten, wo Deckenuntersichten mit den erwähnten Emissionseigenschaften ohne Mehrkosten realisiert werden können, stellt sich im Falle von bestehenden Anlagen die Frage nach der Wirtschaftlichkeit des nachträglichen Einbaus einer entsprechenden Deckenuntersicht.

Zum Zeitpunkt der Projekteingabe fehlten fundiert ermittelte Erfahrungswerte (Messungen), auf deren Basis die Wirksamkeit von blanken Metalldecken belegt werden konnte. Bauherrschaften oder Investoren alleine auf der Basis komplexer Berechnungen für die Finanzierung derartiger Projekte zu gewinnen, erwies sich deshalb in der Vergangenheit als schwieriges, nahezu aussichtsloses Unterfangen.

Der unsichtbare Infrarot-Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und der Eisfläche stellt nicht nur für Bauherrschaften, sondern auch für Baufachleute ein schwer durchschaubares Phänomen dar. In Anbetracht dieser Umstände musste davon ausgegangen werden, dass das wahrscheinlich relativ grosse, wirtschaftlich interessante Energiesparpotential in der Schweiz mit über 100 Eissportanlagen nur auf der Basis klarer Fakten erschlossen werden kann.

Mit dem Ziel, interessierten Betreibern, Investoren und Bauherrschaften diesbezüglich verbindlichere Entscheidungsgrundlagen liefern zu können, wurden im Rahmen dieses Projektes die energetischen und wirtschaftlichen Auswirkungen der nachträglichen Installation einer Aluminium-Deckenuntersicht in einer bestehenden Eishalle durch Messungen ermittelt.

## Projektstruktur

Das Pilot- und Demonstrationsprojekt „Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern“ ist ein reines Messprojekt und wird themenspezifisch in drei Teilprojekte aufgeteilt:

Teilprojekt 1:

Auswirkungen unterschiedlicher Deckenuntersichtsmaterialien auf den Kälte- und Wärmeenergiebedarf von aktiv klimatisierten Eishallen / Wirtschaftlichkeit nachträglicher installierter Aluminiumdeckenuntersichten in bestehenden Eishallen

Teilprojekt 2:

Emissionsverhalten geeigneter Deckenuntersichtsmaterialien in Abhängigkeit der Alterung und der Verschmutzung

Teilprojekt 3:

Oberflächentemperaturverlauf und Kondensatausfallrisiko unterschiedlicher Überdachungsmaterialien- und Konstruktionen an Aussenfeldüberdachungen / Energetische Auswirkungen von Aluminiumüberdachungen

## Systemgrenzen

Die Konstruktion von Deckenuntersichten in Eishallen oder im Falle von Aussenpistenüberdachungen erfordert nebst der Beachtung energetischer und bauphysikalischer Zusammenhänge auch die Berücksichtigung ästhetischer, statischer und akustischer Anforderungen.

Im Rahmen dieses Projekts wird in erster Linie der nachhaltige Einfluss unterschiedlicher Deckenuntersichtsmaterialien auf den Energiebedarf von Eishallen und überdachten Ausseneisfeldern untersucht.

## Geschichte

Der Einbau von strahlungsemissionsarmen Deckenuntersichten in Eissporthallen oder Ausseneisfeldüberdachungen wird interessierten Bauherrschaften durch den Bund und den Kanton Zürich als wirtschaftliche Energieoptimierungsmassnahme seit 1994 empfohlen.

Die Empfehlung bezog sich damals auf die in Skandinavien und Nordamerika vor allem im Zusammenhang mit Sanierungen eingesetzten Aluminiumfolien, die unter der Decke aufgespannt wurden. Da diese Foliensegel beschädigungsanfällig und aus ästhetischer Sicht umstritten sind, teilweise mit fatalen Folgen in ungenügend klimatisierten Hallen installiert wurden und generell immer mit Investitionen verbunden sind, konnten sie sich in der Schweiz nicht durchsetzen.

Nach dem Scheitern eines solchen Folienprojekts in der Eishalle Schluefweg 1995 in Kloten wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Aluisse untersucht, ob der Energiebedarf für die Kälteerzeugung und die Hallenklimatisierung mit einer Deckenuntersicht aus Aluminium im selben Mass reduziert werden kann, wie mit dem bekannten Aluminiumfoliensegel. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die energetischen Auswirkungen identisch sind und dass die Deckenstrahlung in Neubauten durch eine entsprechende Materialwahl, bzw. durch den Verzicht auf eine Lackierung der häufig eingesetzten Blechverkleidungen, ohne Mehrinvestitionen auf einen Bruchteil reduziert werden kann.

Im Rahmen einer Gesamtleistungssubmission wurde deshalb 1997 für den Neubau einer Trainingseishalle in Zug erstmals eine emissionsarme Deckenuntersicht als verbindliches Projektelement vorgegeben. Dank der diesbezüglich übereinstimmenden Ansichten mit dem beauftragten Generalunternehmer, konnte die Hallendeckenuntersicht anschliessend auch in Form einer verzinkten Trapezprofil-Blechdecke ausgeführt werden.

Nach weiteren Deckenprojekten, die letztlich am Fehlen verbindlicher, empirischer Daten scheiterten, konnte 2002 in Winterthur in der neu erstellten Eishalle Deutweg eine architektonisch hervorragend integrierte Aluminium-Deckenuntersicht realisiert werden. Auch hier wurde die emissionsarme Deckenuntersicht als verbindliche Systemanforderungen bereits im Submissionsprojekt vorgegeben.

Im Zusammenhang mit der geplanten Sanierung der Eissportanlage „Im Chreis“ in Dübendorf konnte die Bauherrschaft bereits in der Vorprojektphase dafür gewonnen werden, die Kosten für die nachträgliche Installation einer Aluminium-Deckenuntersicht und deren energetischen Auswirkungen ermitteln zu lassen. Dabei resultierten für die Deckenuntersicht der Hockeyhalle theoretisch ermittelte Einsparungen von jährlich rund 75'000 kWh Strom und ca. 180'000 kWh Wärme. Allein die berechnete Reduktion des Elektroenergiebedarfs für die Kälteerzeugung entsprach damit dem Ertrag einer Photovoltaikanlage mit einer Fläche von rund 750 m<sup>2</sup>.

Unter der Voraussetzung, dass die neue Deckenuntersicht für Fr. 165'000.-- (knapp 15% der Investitionen der erwähnten Solaranlage) realisiert werden konnte und die rechnerischen Prognosen in ihrer Grössenordnung zutrafen, konnte in der Folge davon ausgegangen werden, dass sich der nachträgliche Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht in Dübendorf auch aus wirtschaftlichen Gründen rechtfertigen lässt und deshalb umgesetzt werden sollte.

Im Gegensatz zu Winterthur, wo blanke Aluminium-Paneelen zwischen den Holzbindern die eigentliche Deckenuntersicht darstellen, entschied sich die Bauherrschaft in Dübendorf für den Einsatz von Aluminium Trapezprofilblechen. Nachdem die technischen Anlagen im Sommer 2003 totalsaniert und die erste Messreihe für das P&D-Projekt ohne die geplante Deckenuntersicht während der folgenden Saison aufgezeichnet wurde, konnte die neue Aluminiumdecke im Sommer 2004 unter der bestehenden Faserholzdecke der Hockeyhalle installiert werden.

### Anmerkung:

Die hier beschriebene zeitliche Abfolge der Ereignisse beschränkt sich auf die vom Autor persönlich begleiteten Projekte. Es wurde in diesem Zusammenhang nicht explizit recherchiert - die Auflistung der mit Aluminiumdecken ausgerüsteten Eishallen erhebt deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

## Finanzierung

Das im hier vorliegenden Schlussbericht zusammengefasste Pilot- und Demonstrationsprojekt „Deckenstrahlung in Eishallen und überdeckten Ausseneisfeldern“ konnte in erster Linie dank der Unterstützung des Bundes (Bundesamt für Energie) realisiert werden, der für den grössten Teil der Projektkosten aufkam.

Ebenfalls an der Finanzierung beteiligten sich:

- Die Kantone Zürich (AWEL) und Basel Stadt (Amt für Umwelt und Energie)
- Der Schweizerische Eishockeyverband und der Zürcher Kantonalverband für Sport
- Die Firmen Axima AG, EWZ, Forges Profil AG, Halter Generalunternehmung AG, Hunter Douglas AG,

Zu erwähnen ist auch die Bauherrschaft in Dübendorf, die den Einbau der Aluminium-Deckenuntersicht ohne Kenntnis der heute vorliegenden Resultate finanzierte und das Messprojekt damit überhaupt ermöglichte.

Nicht zuletzt ist auch den Eismeistern und Betriebsleitern der involvierten Sportanlagen zu danken, die durch ihre betrieblichen Nutzungsaufzeichnungen und anderen unterstützenden Leistungen zur erfolgreichen Durchführung des Projekts beigetragen haben.

Rund 25% des effektiven Projektaufwandes werden als Eigenleistungen der Projektbeteiligten ausgewiesen.

## Physikalische Grundlagen

Zwischen zwei einander gegenüberliegenden Körpern unterschiedlicher Temperatur findet immer ein Strahlungsaustausch statt. Die Leistung des strahlungsbedingten Wärmeaustausches hängt vor allem von den Temperaturen, aber auch von den Strahlungseigenschaften der einander zugewandten Oberflächen ab. Der Strahlungsaustausch wird durch das Strahlungsgesetz von Stefan-Boltzmann wie folgt beschrieben:

$$\dot{Q}(St) = C_{1,2} \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

In Eissportanlagen stellt die Eisfläche den kalten und die Hallendecke den warmen Körper dar. Auf den Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und dem Eisfeld bezogen lautet die Beziehung:

$$\dot{Q}(St, Eis) = C_{1,2} \cdot A_D \cdot (T_D^4 - T_{Eis}^4) \text{ wobei } C_{1,2} = \frac{C}{\frac{1}{\epsilon_{Eis}} + \frac{A_{Eis}}{A_D} \left( \frac{1}{\epsilon_D} - 1 \right)} \cdot \frac{A_{Eis}}{A_D}$$

$Q(St, Eis)$ : Netto-Wärmefluss in Form von Infrarotstrahlung von der Hallendecke an das Eisfeld

$C$ : Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$C_{1,2}$ : Strahlungszahl als Funktion des Emissionsgrads und der Fläche der beiden beteiligten Körper

$\epsilon_{Eis}$ ;  $\epsilon_D$ : Emissionsgrad der Eisfläche (Eis: 0.91) bzw. der Deckenuntersicht (Holz: 0.91 / Alu: 0.10)

$T_{Eis}$ ;  $T_D$ : Absolute Temperatur der Eisoberfläche bzw. der Deckenuntersicht in Kelvin

$A_{Eis}$ ;  $A_D$ : Fläche der Eisoberfläche bzw. der Deckenuntersicht (horizontal projizierte Deckenfläche)

Die Abstrahlung einer Hallendecke steigt, je näher die Emissionseigenschaften der Deckenuntersicht im IR-Bereich bei denen eines physikalisch schwarzen Körpers liegen ( $\epsilon_D = 1.0$ ).

Holz, Eternit, Anstriche oder Pulverbeschichtungen emittieren rund 90% der Strahlung eines Schwarzen Körpers – eine blanke Aluminiumoberfläche hingegen nur 5% bis 10%. Die Strahlungseigenschaften der Hallendecke werden allein durch die Oberfläche der gegen das Eisfeld ausgerichteten Deckenuntersicht bestimmt. Wird zum Beispiel ein verzinkte Blechdecke lackiert, gehen die günstigen Eigenschaften der darunterliegenden Zinkschicht vollständig verloren und werden durch diejenigen des Lacks ersetzt.

Da der Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und der Eisfläche eine Auskühlung der Deckenuntersicht bewirkt, stellt sich bei einer Lufttemperatur im Deckenbereich von 10°C an der Oberfläche der Holzdecke eine Temperatur von 7°C ein. Die Aluminiumdecke weist hingegen unter den selben Bedingungen infolge geringerer Abstrahlungsverluste immer noch eine Temperatur von 9.5°C auf.

Rechnerisch resultieren deshalb bei einer Hallentemperatur im Deckenbereich von 10°C, einer Eisoberflächentemperatur von -4°C und identischer Fläche des Eisfeldes und der Deckenuntersicht folgende Strahlungsleistungen:

Netto-Wärmefluss (IR-Strahlung) von der Holzfaser-Deckenuntersicht an die Eisfläche: 78 kW

Netto-Wärmefluss (IR-Strahlung) von der Aluminium-Deckenuntersicht an die Eisfläche: 11 kW

Die von der Decke ans Eisfeld emittierte Wärme muss einerseits von der Kälteanlage abgeführt werden, ohne dass sie den Nutzern der Halle in irgendeiner Form zugute kommt.

Andererseits wird die von der Decke abgestrahlte Wärme grundsätzlich der Raumluft entzogen, weshalb diese zur Vermeidung von Oberflächenkondensatausfall und Nebelbildungen entweder intensiver beheizt oder entfeuchtet werden muss. Dieser Effekt wird durch das strahlungsbedingte Absinken der Deckenoberflächentemperatur zusätzlich verstärkt. Der Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und dem Eisfeld führt deshalb bei einer herkömmlichen Materialwahl der Deckenuntersicht zu einem unnötig hohen Energie- und Leistungsbedarf der installierten Kälte- und Klimatisierungsanlagen.

Unabhängig von der Konstruktion und der Materialwahl muss darauf hingewiesen werden, dass durch den Einsatz von emissionsarmen Deckenuntersichten keinesfalls auf eine entsprechende Konditionierung der Hallenluft zur Vermeidung der Feuchteproblematik verzichtet werden kann.

## Teilprojekt 1

### Zielsetzung

Mit dem Teilprojekt 1 soll auf der Basis von Messungen geklärt werden, wie viel Energie durch den Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht in einer Eishalle eingespart werden kann und innert welcher Frist sich die Kosten für die nachträgliche Installation einer geeigneten Deckenuntersicht in einer bestehenden Halle über die Einsparungen amortisieren lassen.

Die Auswirkungen einer emissionsarmen Deckenuntersicht auf den Kälte- und Wärmeleistungsbedarf einer Eishalle sollen in Funktion der Hallentemperatur dargestellt werden. Auf der Basis dieser Leistungsdifferenzen können einfache und relativ genaue Abschätzung des Einsparpotentials beliebiger Hallen vorgenommen werden.

Die Wirtschaftlichkeit einer nachträgliche installierten, emissionsarmen Deckenuntersicht wird nebst den Energieeinsparungen auch durch die Energiepreise, die Erstellungskosten und in starkem Masse auch durch die Effizienz der installierten Wärme- und Kälteerzeugungssysteme beeinflusst. Da diese Einflussgrössen objektbezogen stark variieren können, wird die Wirtschaftlichkeit anhand dreier Beispiele (ungünstige Rahmenbedingungen, Normalfall, günstige Rahmenbedingungen) aufgezeigt.

Die energetischen und wirtschaftlichen Aussagen beziehen sich auf die Messdatenaufzeichnungen vor und nach dem Einbau der Aluminiumdeckenuntersicht in der Hockeyhalle der Sportanlagen „Im Chreis“ in Dübendorf. Die Resultate beschreiben deshalb explizit die Auswirkungen einer Aluminiumdeckenuntersicht. Mit Aluminium wird dabei allerdings das mit Sicherheit geeignetste Deckuntersichtsmaterial untersucht (siehe Teilprojekt 2).

### Vorgehen

#### Ausgangslage

##### Hallenluftkonditionierung

Der Einfluss des Deckenuntersichtmaterials auf den Kälte- und Wärmeenergiebedarf ist von der Temperatur der Hallenluft im Deckenbereich und von der Eisoberflächentemperatur abhängig (siehe „Physikalische Grundlagen“). Die Raumluft in der ausgemessenen Hockeyhalle in Dübendorf wird über die Lüftungsanlage feuchte- und temperaturgeführt konditioniert. Die Konditionierung beschränkt sich dabei auf eine Beheizung der Raumluft im Umluftbetrieb. Zur Vermeidung von Nebel und Oberflächenkondensatausfall wird die Hallenlufttemperatur in den warmen Jahreszeiten dem Feuchteeintrag (Leckluft, Eisreinigung und Personen) entsprechend angehoben. Effektiv entfeuchtet wird die Hallenluft ausschliesslich durch die Kondensationszone über dem Eisfeld. Bei tiefen Aussentemperaturen und im Falle von Veranstaltungen wird die Hallenluft zur Gewährleistung der Komfortansprüche zusätzlich auf einer vom Betreiber bestimmten Temperatur gehalten. Die Nutzungsintensität, das Aussenklima, die Anlagesteuerung und der Eismeister können den Energiebedarf einer Eissportanlage erheblich beeinflussen. Aus diesem Grund stellen Jahres- oder Saisonenergiebilanzen keine ausreichend genauen Messgrössen dar, anhand derer der Einfluss der Deckenuntersichtsmaterialien auf den Energiebedarf mit genügender Genauigkeit untersucht werden könnte.

Der Vergleich der bestehenden Faserholzdecke mit der neu installierten Aluminiumdeckenuntersicht wurde deshalb auf der Basis von Nachtenergiebilanzen vorgenommen, denen ähnliche Rahmenbedingungen zu Grunde lagen. Das Arbeiten mit Nachtenergiebilanzen bietet den grossen Vorteil, dass die Hallenluftkonditionierung und die Eiserhaltung von möglichst wenig Störgrössen beeinflusst wird.

##### Eiserzeugung

Alle drei Eispisten (Hockeyhalle, Curlinghalle, Aussenpiste) werden auch nach der Sanierung ab einem gemeinsamen Abscheider direkt mit Ammoniak versorgt.

Da das Ammoniak flüssig in die Piste gepumpt wird und diese zweiphasig (flüssig und gasförmig) wieder verlässt, kann die Kälteleistung nicht direkt gemessen werden. Der Kälteleistungsbedarf der Hockeyhallenpiste muss deshalb indirekt über die gemessenen Abwärmeströme und den Elektrobedarf der Kältekompress-

soren ermittelt werden. In den Abwärmeströmen müssen jedoch die direkt eingebundene Ammoniak-Wärmepumpe, der Heissgasenthitizer, der Flusswasserkondensator und die Wärmeabgabe der Anlage selbst berücksichtigt werden, weshalb der daraus abgeleitete Kälteleistungsbedarf nicht sehr genau bestimmt werden kann. Da zwischen der ersten Messdatenaufzeichnung mit der Holzfaserdecke und der zweiten mit der Aludeckenuntersicht weder Anpassungen an den technischen Anlagen, noch an den Messeinrichtungen vorgenommen wurden, ist der theoretisch mögliche Messfehler für beide Messreihen gleich gross und muss deshalb in der Differenzbetrachtung ( $\Delta Q_0 = f(E1; E0; T_H)$ ) nicht berücksichtigt werden.

Als problematischer erwies sich die Tatsache, dass der Kältebedarf der Hockeyhallenpiste nur dann messtechnisch eindeutig erfasst werden kann, wenn die beiden anderen Pisten nicht betrieben werden. Die diesbezüglich direkt nutzbaren Messresultate beschränkten sich deshalb auf die Periode nach der Aufeisung der Hockeyhalle und vor der Aufeisung der Curlinghalle (eine bzw. zwei Wochen im Spätsommer).

## Ermitteln der Kälte- und Wärmeenergieeinsparungen

Die Kältebedarfseinsparung können infolge der kurzen und in beiden Fällen relativ warmen Messperioden nicht mit ausreichender Genauigkeit und nicht über den gesamten Hallentemperaturbereich gemessen werden. Sie werden deshalb zusätzlich mit Hilfe des nachfolgend beschriebenen Zusammenhangs anhand der Wärmebedarfseinsparung ermittelt.

Grundsätzlich gilt, dass die von der Decke an die Eispiste abstrahlte Wärme der Hallenluft entzogen wird und von der Kälteanlage vollumfänglich abgeführt werden muss. Zur Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen infolge der strahlungsbedingten Auskühlung der Raumluft oder zum Halten der minimal vorgegebenen Raumlufttemperatur muss die abgestrahlte Wärme der Halle wieder zugeführt werden:

$$Q_{0,E1}(T_H) - Q_{0,E0}(T_H) = Q_{W,EA}(T_H) - Q_{W,E0}(T_H)$$

- $Q_{0,E1}(T_H)$ : Kälteenergiebedarf der Hockeyhallenpiste bei der Hallentemperatur X mit Holzfaserdeckenuntersicht ( $E1 > 0.9$ )
- $Q_{0,E0}(T_H)$ : Kälteenergiebedarf der Hockeyhallenpiste bei der Hallentemperatur X mit Aludeckenuntersicht ( $E0 < 0.1$ )
- $Q_{W,E1}(T_H)$ : Gesamtwärmeeintrag in die Hockeyhalle bei der Hallentemperatur X mit Holzfaserdeckenuntersicht ( $E1 > 0.9$ )
- $Q_{W,E0}(T_H)$ : Gesamtwärmeeintrag in die Hockeyhalle bei der Hallentemperatur X mit Aludeckenuntersicht ( $E0 < 0.1$ )

Im Gegensatz zum Kälteenergiebedarf lässt sich der Heizenergiebedarf der Halle messtechnisch über die ganze Eissaison einwandfrei aufzeichnen. In der vorgängig erwähnten Beziehung wird unter  $Q_W$  hingegen nicht nur der Wärmeeintrag über die Lüftungsanlage verstanden, sondern der Gesamtwärmeeintrag. Dieser setzt sich aus folgenden Wärmeströmen zusammen:

$$Q_W = Q_{Tr} + Q_{Le} + Q_{Sol} + Q_{Pers} + Q_{ER} + Q_{Bel} + Q_{LH}$$

- $Q_W$ : Gesamtwärmeeintrag Hockeyhalle
- $Q_{Tr}$ : Wärmegewinne / Verluste durch Transmission: f (U-Werte; Bauteilflächen;  $T_H$ ;  $T_A$ )
- $Q_{Le}$ : Wärmegewinne / Verluste durch Leckluftströmungen: f (Toröffnungen; Gebäudehüllenundichtigkeiten;  $T_H$ ;  $T_A$ )
- $Q_{Sol}$ : Wärmegewinne durch Solare Einstrahlung: f (Fensterflächen; g-Werte; orientierte vertikale Direktstrahlung)
- $Q_{Pers}$ : Wärmegewinne durch Personenabwärme: f (Anzahl Personen; Tätigkeiten)
- $Q_{ER}$ : Wärmegewinne durch Eisreinigung: f (Anzahl Eisreinigungen; Menge Wasser pro Eisreinigung; Temperatur des Reinigungswassers)
- $Q_{Bel}$ : Wärmegewinne durch Hallenbeleuchtung: f (Dauer und Intensität der Beleuchtung; Absorptionsfaktor Eisfläche)
- $Q_{LH}$ : Wärmegewinne durch Beheizung über Lüftungsanlage: Messwert (Wärmezähler)

Da nur der Wärmestrom der Hallenlüftungsanlage  $Q_{LH}$  messtechnisch einwandfrei erfasst werden kann, müssen mit Hilfe von Datenfiltern für beide Messreihen Messdaten in Funktion der Hallentemperatur miteinander verglichen werden, bei denen die Wärmeströme  $Q_{Tr}$ ,  $Q_{Le}$ ,  $Q_{Sol}$ ,  $Q_{Pers}$ ,  $Q_{ER}$  und  $Q_{Bel}$  gleich gross sind oder wegfallen.

Werden ausschliesslich in der Nacht erfasste Messdaten berücksichtigt, reduziert sich der Wärmeeintrag durch Personen, Beleuchtung und Eisreinigung, sowie die solare Einstrahlung auf Null. Durch Aufzeichnungen des Eismeisters muss dabei sichergestellt werden, dass nur die Daten jener Nächte in die Auswertungen einfließen, während denen keinerlei betriebliche Aktivitäten in der Halle stattfanden.

Die Transmissions- und die Leckluftwärmeströme sind von der Temperaturdifferenz zwischen der Hallen- und der Aussenluft, der Wärmedämmung und der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle abhängig. Da zwischen den beiden Messreihen abgesehen vom Einbau der Deckenuntersicht keine Änderungen an der Gebäudehülle vorgenommen wurden, können die Messresultate der ersten Messreihe mit jenen der zweiten verglichen werden, sofern die Temperaturdifferenzen zwischen dem Innen- und Aussenklima bei beiden Messungen identisch oder gleich Null sind.

Der ursprünglich erwähnte Zusammenhang zwischen dem Kälteenergiebedarf und der Gesamtwärmezufuhr gilt deshalb auch für den Wärmeeintrag der Lüftungsanlage allein, wenn ausschliesslich Nachtmessungen berücksichtigt werden und nur Datensätze miteinander verglichen werden, in denen die Raumlufttemperatur nicht oder im selben Masse von der Aussenlufttemperatur abweichen.

$$Q_{0,E1}(T_H) - Q_{0,E0}(T_H) = Q_{LH,E1}(T_H) - Q_{LH,E0}(T_H)$$

- $Q_{0,E1}(T_H)$ : Kälteenergiebedarf der Piste bei der Hallentemperatur X mit Holzfaserdecke
- $Q_{0,E0}(T_H)$ : Kälteenergiebedarf der Piste bei der Hallentemperatur X mit Aludeckenuntersicht
- $Q_{LH,E1}(T_H)$ : Wärmeeintrag der Lüftungsanlage bei der Hallentemperatur X mit Holzfaserdecke
- $Q_{LH,E0}(T_H)$ : Wärmeeintrag der Lüftungsanlage bei der Hallentemperatur X mit Aludeckenuntersicht

## Versuchsanordnung / Messverfahren

Die Energiebedarfsermittlungen wurden in der Hockeyhalle der Eissportanlage „Im Chreis“ in Dübendorf vorgenommen. Nach einer Totalsanierung der technischen Anlagen im Sommer 2003, konnten beide Messreihen vollumfänglich mit dem neu installierte Leitsystem aufgezeichnet werden.

Vor der Aufzeichnung beider Messreihen wurden die wichtigsten Temperatur- und Feuchtefühler des MSR-Systems mittels kalibrierter Vergleichsmessungen überprüft und im Bedarfsfall abgeglichen.

Die Messdaten wurden von den DDC- und SPS-Systemen im geforderten Zeitschritt und der nötigen Auflösung bereitgestellt. Die von den Regelsystemen aufbereiteten Daten konnten über den Datenbus automatisiert abgeholt und unter Angabe von Datum und Uhrzeit als Mittelwert in der dafür vorgesehenen Datenbank auf dem Leitrechner abgespeichert werden.

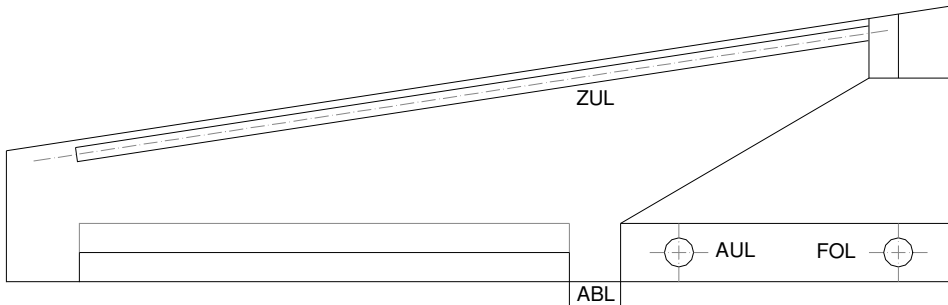
Die Datenaufzeichnung auf dem Leitrechner erfolgt in einem 5-Minuten-Intervall zu jeweils vollen 5 Minuten (00.00 – 00.05 – 00.10 ... 23.50 – 23.55). Zur Vermeidung von Synchronisierungsproblemen ist die Mittelwertbildung über 5 Minuten auf den SPS- und DDC-Systemen vorgenommen worden, indem sie im Messzyklus alle 15 Sekunden neu berechnet und die Daten so in aktualisierter Form für den Transfer bereitgestellt wurden. Für die nachträglich automatisierte Verarbeitung der Messdaten musste ein Unterbruch der Messdatenaufzeichnung, sowie der Ausfall einzelner Messgrössen in den gespeicherten Daten eindeutig identifizierbar sein. Die Datei musste dafür die entsprechende Zeile auch bei vollständig fehlenden Messdaten enthalten.

Die ersten Messreihe wurde während der Eissaison 2003/2004 aufgenommen und diente der Wärme- und Kältebedarfsermittlung der Hockeyhalle mit der bestehenden Holzfaserdecke.

Nach der Installation der Aluminiumdeckenuntersicht im Sommer 2004 wurde die zweite Messreihe während der anschliessenden Saison 2004/2005 aufgezeichnet und damit der Energiebedarf der Halle mit der emissionsarmen Deckenuntersicht bestimmt.

## Messkonzept

### Hockeyhalle in Dübendorf



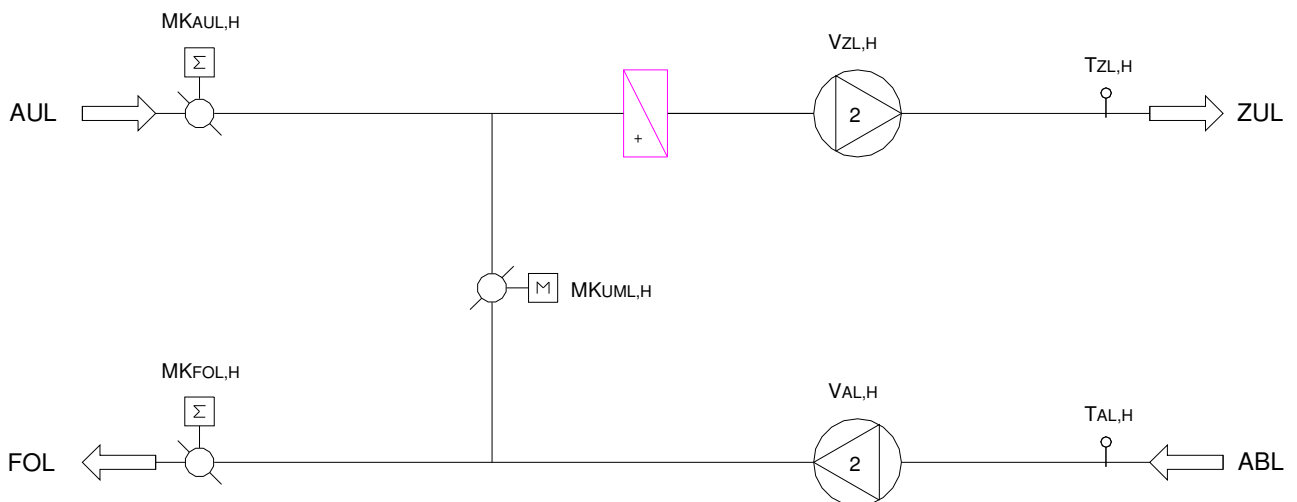
#### Messtechnische Installationen in der Halle

- $T_{OF}$     Oberflächentemperatur Stahlträger- und Alublechunterseite, Fensterinnenseite, Deckenoberfläche über Alublechfläche (Minimalwert)
- $T_{HD}$     Hallenlufttemperatur 0.6 m unter Hallendecke
- $\phi_{HD}$     Relative Hallenluftfeuchte 0.6 m unter Hallendecke
- $T_T$     Hallentemperatur im mittleren Tribünenbereich
- $K_{CO_2}$      $CO_2$ -Konzentration Hallenluft über dem mittleren Tribünenbereich

#### Abgeleitete, bzw. berechnete Mess- und Regelgrößen

- $x_{HD}$     Absolute Hallenluftfeuchte 0.6 m unter Hallendecke (Berechnet aus  $T_{HD}$  und  $\phi_{HD}$ )
- $\phi_{OK}$     Relative Luftfeuchte an der kritischsten Bauteiloberfläche (Maximalwert berechnet aus Minimalwert  $T_{OF}$  und  $x_{HD}$ )

#### Lüftung Hockeyhalle



## Resultate

### Allgemeines

Im Juli 2004 konnte die Aluminium-Deckenuntersicht in der Hockeyhalle Dübendorf wie geplant installiert werden. Da die Hallendecke südseitig ausgesprochen tief liegt und deshalb mit der Einwirkung abprallender Pucks gerechnet werden muss, entschied sich die Bauherrschaft für den Einbau des Trapezprofilblechs (*Forges Typ AL 45/150s*), das gegenüber den unwesentlich günstigeren Alu-Paneelen (*Hunter Douglas Typ 80 B*) die höhere Materialstärke aufwies.

Die Aluminium-Deckenuntersicht stösst unter den Nutzern auf breite Akzeptanz. Die Beleuchtungsverhältnisse in der Halle konnten durch ihre reflektierende Wirkung im sichtbaren Strahlungsbereich markant verbessert werden, ohne dass die akustischen Verhältnisse beeinträchtigt wurden. Inklusive Mehrwertsteuer beliefen sich die erforderlichen Investitionen für das Material und die Installation der Deckenuntersicht auf rund Fr. 110'000.--. Weitere Fr. 35'000.-- mussten in diesem Zusammenhang für die Demontage und Neumontage der Beleuchtungs- und Akustikanlagen, sowie für die Planungshonorare aufgewendet werden.

Fig. 1: Zustand vor Sanierung mit Faserholzdecke



Fig. 2: Neuinstallierte Aluminium-Deckenuntersicht



Vor der Sanierung der technischen Anlagen wurde die Hallenlüftung vom Betreiber mit viel Geschick manuell gesteuert. Die bestehende Holzfaserdeckenuntersicht wies keinerlei Feuchteschäden auf, obwohl bei sehr tiefen Aussentemperaturen auf eine Beheizung der Halle verzichtet wurde.

Wie sich während der ersten Messperiode mit der sanierten Anlage, aber ohne die geplante Aludeckenuntersicht zeigte, konnte die relativ schlecht gedämmte Hallendecke bei tiefen Aussentemperaturen infolge der Transmissions- und der Abstrahlungsverluste nur durch eine permanente Beheizung trocken gehalten werden. Zur Reduktion des Heizenergiebedarfs wurde die Anlage deshalb wie vor der technischen Sanierung manuell ausser Betrieb genommen. Obwohl die Deckenoberflächentemperatur dadurch den Taupunkt während mehreren Tagen unterschritt, konnten keine Tropfen- oder Eisfilmbildungen beobachtet werden, da bei Temperatur um oder unter dem Gefrierpunkt relativ wenig Wasser ausfallen kann und dieses offensichtlich von den Faserholzplatten aufgenommen wurde.

Nach dem Einbau der Aludeckenuntersicht konnte generell beobachtet werden, dass die Lüftungsanlage während der gesamten Saison wesentlich weniger häufig zugeschaltet werden musste, um die Halle im Gleichgewicht zu halten. Auch bei tiefen Aussentemperaturen konnten trotz erheblich kürzerer Laufzeiten der Lüftungsanlage keine Taupunktüberschreitungen an der Holzfaserdecke über der Aluminiumdeckenuntersicht mehr festgestellt werden.

## Auswertung der direkten Kältemessungen

Die Auswertungen der Kältemessungen, die systembedingt auf der Basis sehr kurzer Messperioden vorgenommen werden mussten, bestätigen zwar, dass sich der Kälteenergie durch den Einbau der Aluminiumdecke eindeutig reduzieren lässt. Erwartungsgemäss konnte das Ausmass der Einsparungen jedoch anhand der wenigen Messdaten nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Nebst der kurzen Aufzeichnungsdauer wirkten sich auch andere Faktoren ungünstig auf die Vergleichbarkeit der Daten aus:

- Modifizierte Regelparameter der Hallenlüftungsanlage bezüglich der Frischluftversorgung führten zu unterschiedlichen Feuchteinträgen während der beiden Messperioden im Spätsommer
- Die thermische Trägheit der Eispiste bewirkt in Abhängigkeit der Nutzung vor dem Nachtbetrieb unterschiedlich starke Puffereffekte, die sich relativ stark auf den Energiebedarf während der Nachtphase auswirken können.
- Über die ungedämmte Piste muss der darunterliegende, gegen aussen offenen Hohlraum in den ersten Betriebswochen der Saison mitgekühlt werden. Die Kälteleistung während der erwähnten Messperioden wurde deshalb auch von der Aussentemperatur und den Windverhältnissen, sowie der Temperatur des Erdreichs vor der Aufeisung beeinflusst.

Detaillierte Informationen zu den Messungen und Auswertungen des Kälteenergiebedarfs der Hockeyhalle vom 8.9.03 bis 12.9.03 mit der ursprünglichen Faserholzdecke und der neu installierten Aluminiumdeckenuntersicht vom 29.8.04 bis 9.9.04 werden im Anhang beschrieben (Anhang Teilprojekt 1, Messungen der Kälteeinsparungen).

## Auswertung der Wärmemessungen

Die Messdatenaufzeichnung der beiden Messreihen wurde jeweils über die gesamte Saison vorgenommen. Von ein paar Ausfällen des Leitsystem-Historymoduls abgesehen, konnte der Heizenergiebedarf der Halle mit der Holzfaserdecke vom 1.9.03 bis 26.3.04 und mit der neuen Aluminiumdeckenuntersicht vom 28.8.04 bis 11.4.05 mehr oder weniger vollständig aufgezeichnet werden.

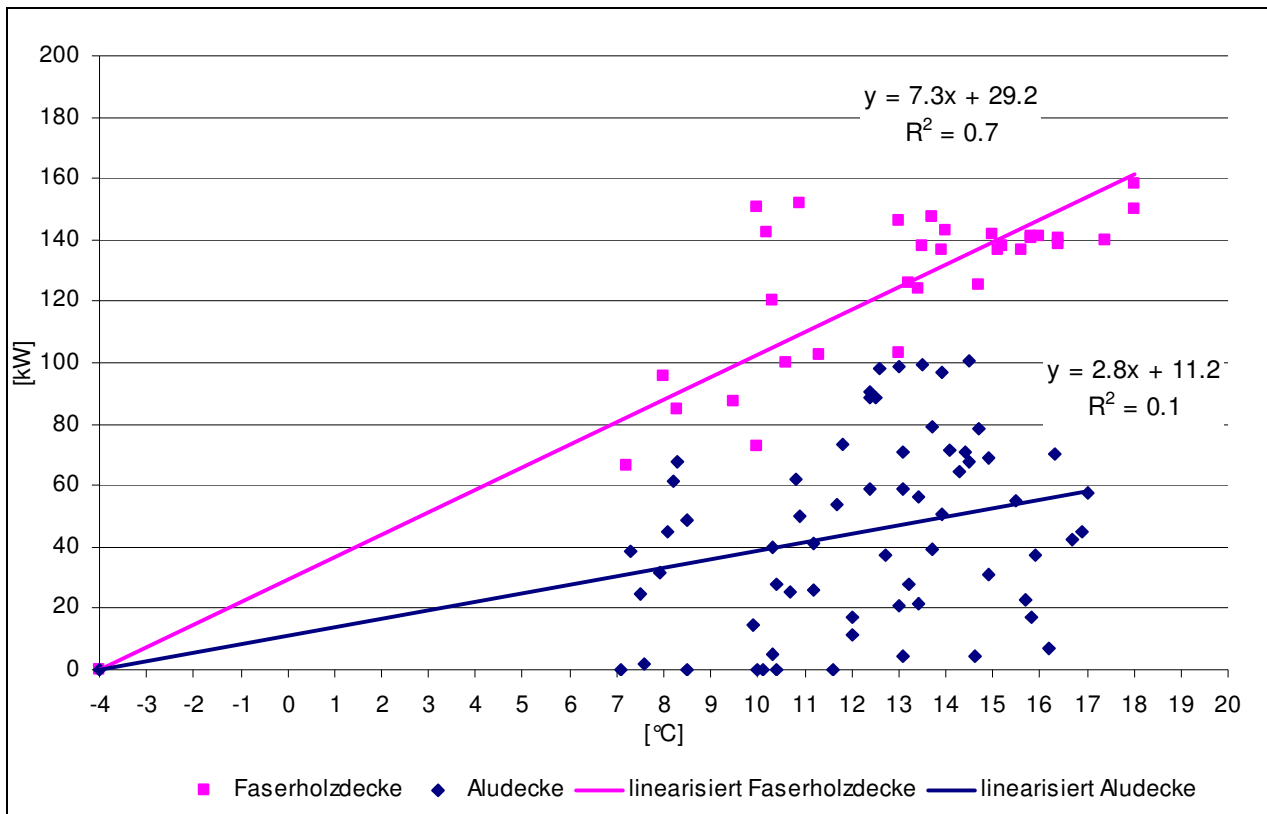
Für den Vergleich der beiden Messreihen wurden analog den Kältemessungen ausschliesslich die Heizregi-sterleistungs-, Temperatur- und Feuchtemittelwerte der ungestörten Nachtperioden von 00:00 bis 8:00 ausgewertet.

Um den Einfluss transmissions- und leckluftbedingter Wärmeströme eliminieren zu können, wurden die aufgezeichneten Datensätze beider Messreihen anhand folgender Kriterien gefiltert:

- Tribünen temperatur > 7°C
- Holzdeckentemperatur - Aussentemperatur zwischen -1.8K und +1.8K
- Kritische Oberflächenfeuchte zwischen 78% und 82%

Ebenfalls verzichtet wurde auf die Berücksichtigung von Datensätzen, bei denen während der definierten Nachtperiode gemäss den Aufzeichnungen des Eismeisters Aktivitäten irgendwelcher Art stattgefunden haben.

### Wärmebedarf in Funktion der Tribünen temperatur



Die beiden Kurven wurden um die physikalischen Nullpunkte ergänzt und in leicht vereinfachter Form als Geraden dargestellt. Effektiv handelt es sich aufgrund der  $T^4$ -Beziehung um Potenzfunktionen. Da sich die 4. Potenz jedoch auf Absoluttemperaturen bezieht und sich die Kurven deshalb in diesem engen Temperaturbereich nahezu linear verhalten, führt diese Vereinfachung zu keiner nennenswerten Verfälschung der Resultate. Zusätzlich werden die Kurve durch weitere beteiligte, linear zur Temperaturdifferenz verlaufende Wärmeströme geglättet (Wärmeübertragung durch Konvektion und Kondensation).

## Reduktion des Kältebedarfs

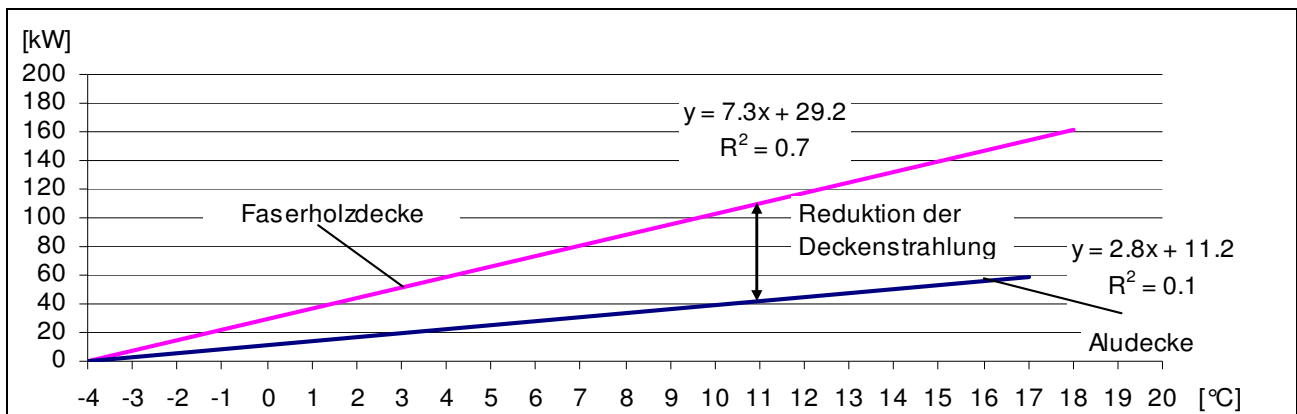
Der anhand der Nachtmessungen ermittelte und bezüglich Aussenklimaeinflüsse bereinigte Wärmeleistungsbedarf der Halle wird allein durch die Lüftungsanlage erbracht. Die aufgewendete Wärmeenergie wird via IR-Strahlung, Konvektion und Kondensation vollumfänglich der Eispiste zugeführt.

Der Wärmeleistungsbedarf entspricht zwar nicht dem Kälteleistungsbedarf, da die Verluste der Piste gegen den nach aussen offenen Hohlraum unter der ungedämmten Betonplatte das Raumklima nicht beeinflussen und deshalb nicht durch die Lüftungsanlage kompensiert werden müssen.

Da die Anteile der Konvektion und der Kondensation am Wärmeleistungsbedarf, wie auch die Verluste der Piste gegen den Hohlraum während der 1. und der 2. Messperiode identisch sein müssen, kann die Differenz des Wärmeleistungsbedarfs zwischen den beiden Messreihen eindeutig der veränderten Deckenstrahlung zugeschrieben werden.

Die Leistungsdifferenz der beiden Messreihen entspricht damit der reduzierten Abstrahlung durch die Aluminium-Deckenuntersicht.

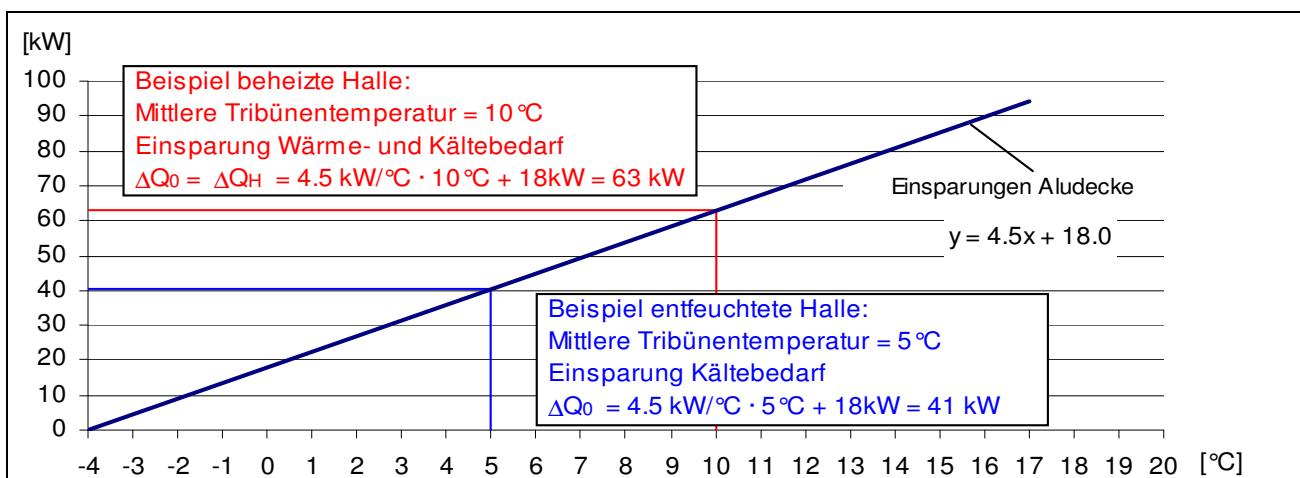
## Wärmeleistungsbedarf und reduzierte Deckenstrahlung in Funktion der Tribünentemperatur



Die Deckenstrahlung wirkt sich direkt, vollumfänglich und permanent auf den Kälteleistungsbedarf aus. Eine Reduktion der Deckenstrahlung führt deshalb zu einer identischen Reduktion des Kälteleistungsbedarfs.

In Bezug auf die Heizenergiebedarfs-Einsparungen gilt der hier aufgezeigte Zusammenhang jedoch nur dann, wenn die Halle nicht durch andere Wärmeströme (Leckluft, Transmission, Personen, Eisreinigung, solare Gewinne) unterstützend erwärmt wird.

## Reduktion der Deckenstrahlung und des Kälteleistungsbedarfs



Die Kurve „Einsparungen Aludecke“ resultiert als Differenz zwischen dem Wärmeleistungsbedarf der Halle mit Aludecke und jenem mit der Holzfaserdecke. Sie entspricht einerseits der Differenz des mittleren nächtlichen Wärmeleistungsbedarfs ohne äussere Wärmegewinne. Andererseits beschreibt sie die während der gesamten Betriebsdauer wirksame Reduktion der Deckenstrahlung und damit des Kälteleistungsbedarfs.

Wird von einer konstanten Eisoberflächentemperatur ausgegangen, ist der Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und dem Eisfeld allein vom Material der Deckenuntersicht und der Hallentemperatur abhängig. Die Hallentemperatur ihrerseits wird hingegen durch die Nutzung, die Art der Luftkonditionierung und die Eigenschaften der Gebäudehülle beeinflusst. Die im Verlauf einer Saison ermittelte Durchschnittstemperatur variiert deshalb von Halle zu Halle. Kleinere, dichte und gut gedämmte Hallen, die ausschliesslich entfeuchtet und nicht beheizt werden, weisen in einer 8-monatigen Saison eine mittlere Hallentemperatur von rund 5 °C auf. Undichte und schwach gedämmte Hallen, die nur beheizt, aber nicht entfeuchtet werden, erreichen hingegen Saisonmitteltemperaturen von gut 10 °C.

## Reduktion des Wärmebedarfs

Die ausgemessene Eishalle in Dübendorf wird auch nach der Totalsanierung der technischen Anlagen zur Verhinderung von Feuchteproblemen weiterhin ausschliesslich beheizt und nicht aktiv entfeuchtet. Die auf der Basis der vorgenommenen Messungen abgeleiteten Aussagen bezüglich der Einsparungen im Bereich der Raumluftkonditionierung beziehen sich deshalb in erster Linie auf beheizte Hallen.

Die Gesamtwärmeeinsparungen entsprechen grundsätzlich den Kälteeinsparungen. Ein Teil der erforderlichen Wärmeenergie wird der Halle jedoch nicht durch die Hallenlüftungsanlage, sondern durch Transmissions-, Leckluft- und solare Gewinne, sowie durch die Personen- und Anlagenabwärme zugeführt.

Da diese Wärmeströme schwer messbar sind, kann anhand der durchgeführten Messungen nur abgeschätzt werden, wie hoch der Anteil des Heizungssystems am Gesamtwärmebedarf effektiv ist. Für Dübendorf wird in einer sehr vorsichtigen Schätzung davon ausgegangen, dass infolge des grossen Fensterflächenanteils und der knapp bemessenen Wärmedämmung der Gebäudehülle nur ca. 60% der während einer Saison eingesparten Kälteenergie auch heizungsseitig eingespart werden können.

Die erforderliche Wärme wird heute in der Eissportanlage Dübendorf nach der Sanierung der technischen Systeme allerdings zum grössten Teil mit einer ausgesprochen effizienten Ammoniakwärmepumpe aus der Abwärme der Kälteanlage gewonnen. Die Wärmeeinsparungen wirken sich deshalb betriebskostenseitig nicht übermässig aus. Die Optimierungsmassnahme „Wärmepumpe“ steht damit effektiv in Konkurrenz mit der Massnahme „Deckenuntersicht“. Mit der Realisierung beider Massnahmen wurde bewusst in Kauf genommen, dass die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpe, wie auch jene der Deckenuntersicht reduziert wird. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen ist die eingesparte Wärmeenergie auch deshalb nicht von zentralem Interesse, weil die meisten bestehenden Hallen zur Vermeidung von Feuchteproblemen nicht mit Abwärme aus dem Kälteprozess, Gas oder Öl beheizt werden, sondern mit einem Kälte- oder Adsorptionstrockner aktiv entfeuchtet werden.

In ausschliesslich entfeuchteten Hallen wird die Hallentemperatur durch den Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht im Saisonschnitt leicht angehoben und dadurch eine Komfortverbesserung erzielt. Infolge des Anstiegs der Raumlufttemperatur müsste grundsätzlich auch weniger intensiv entfeuchtet werden. Dies trifft allerdings nur dann zu, wenn die Halle in Funktion der relativen Feuchte der kritischsten Bauteiloberfläche, die mit steigender Hallentemperatur abnimmt, entfeuchtet wird. Da die Entfeuchtungsanlagen (insbesondere die gas- oder elektrisch betriebenen Adsorptionstrockner) in vielen Hallen auf einen bestimmten, häufig sehr tiefen Absolutfeuchtwert geregelt werden, können an diesen Objekten durch den Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht ohne Regelungsanpassungen keine oder nur marginale Einsparungen am Energiebedarf des Entfeuchters erzielt werden.

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang, dass die Regelung einer Entfeuchtungsanlage auf einen absoluten Raumluftfeuchtwert höchstens für Curlinghallen im Zusammenhang mit der Reifbildung auf der Eisoberfläche sinnvoll ist. Hallen, in denen Spitzencurling nicht im Vordergrund der Nutzerinteressen steht, sollten in Abhängigkeit der relativen Bauteiloberflächenfeuchte entfeuchtet werden. In den meisten Fällen könnte eine diesbezügliche Regelungsanpassung durch den reduzierten Energiebedarf des Entfeuchters auch ohne den nachträglichen Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht bereits nach kurzer Zeit amortisiert werden.

## Wirtschaftlichkeit

### Abhängigkeiten

Die Kosten für die Installation einer emissionsarmen Deckenuntersicht in einer bestehenden Eishalle und die dadurch erzielbaren Energiekosteneinsparungen werden von diversen, nachfolgend aufgeführten Faktoren beeinflusst. Die Wirtschaftlichkeit derartiger Optimierungsprojekte kann deshalb von Objekt zu Objekt ausgesprochen stark variieren.

- **Verwendetes Deckenuntersichtsmaterial:**  
Je tiefer die Emissionszahl der gegen das Eisfeld gerichteten Materialoberfläche, desto höher die Einsparungen. Von den drei im Teilprojekt 2 untersuchten Materialien weist Aluminium die günstigsten Eigenschaften aus.
- **Nettofläche der Deckenuntersicht:**  
Je vollständiger die emissionsarme Fläche direkt über der Eispiste ausgeführt wird, desto höher die Einsparungen. Je grösser die emissionsarme Fläche, desto grösser die Einsparungen, wobei die Wirkung des Flächenanteils ausserhalb der projizierten Eisfläche mit zunehmenden Abstand von der Eisfläche stark abnimmt.
- **Mittlere Hallentemperatur:**  
Je grösser und undichter eine beheizte Halle oder je höher die Komfortansprüche, desto höher die mittlere Hallentemperatur und desto höher die Einsparungen.
- **Effizienz der Kälteerzeugungsanlage:**  
Je tiefer die Kälteerzeugungseffizienz der installierten Anlage, desto mehr Elektroenergie kann eingespart werden.
- **Energiepreise:**  
Je höher die Energiepreise, desto höher die Einsparungen.
- **Erstellungskosten:**  
Je einfacher die Deckenuntersichtskonstruktion und je weniger Beleuchtungs- und Akustiksysteme von der Installation betroffen sind, desto tiefer die Erstellungskosten und desto höher die Wirtschaftlichkeit.
- **Betriebsdauer:**  
Je länger die Eissaison, desto grösser die Einsparungen.

Handelt es sich um beheizte oder entfeuchtete Hallen, deren Regelsysteme in der Lage sind, die Raumluft in Funktion der relativen, kritischen Bauteilfeuchte zu konditionieren, kann durch den Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht auch der Energiebedarf für die Hallenbeheizung oder Entfeuchtung reduziert werden. In den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen solcher Projekte sind zusätzlich folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- **Effizienz der Wärmeerzeugungs- oder der Entfeuchtungsanlage:**  
Je ineffizienter die Wärmeerzeugungs- oder der Entfeuchtungsanlage, desto höher die Einsparungen.
- **Fensterflächen:**  
Je kleiner die ost-, süd- oder westorientierten Fensterflächen, desto geringer der solare Strahlungsgewinn und desto höher die Einsparungen-

## Beispielvarianten

Da die Wirtschaftlichkeit einer nachträglich installierten Deckenuntersicht von vielen Faktoren abhängig ist, wird sie nachfolgend anhand von vier Beispielen aufgezeigt:

### Optimalfall:

Ältere, undichte Halle mit ineffizientem Kälteerzeugungssystem (indirekte, hydraulisch ungünstige Kühlung der Eispiste; schlecht gewarteter, knapp dimensionierter Kühlturm). Zur Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen wird die Halle über die Lüftungsanlage in Funktion der relativen, kritischen Oberflächenfeuchte bedarfsgeführt beheizt. Die Wärmeerzeugung erfolgt mit einem älteren Öl- oder Gaskessel. Im Winter wird die Hallentemperatur aus Komfortgründen immer über 5°C gehalten.

### Normalfall:

Ältere oder grössere und undichte Halle mit mittelmässigem Kälteerzeugungssystem (indirekte Kühlung der Eispiste; knapp dimensionierter Kühlturm). Zur Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen wird die Halle mit einem gasbetriebenen Adsorptionstrockner entfeuchtet. Der Entfeuchter wird in Funktion eines fixen, eher tiefen, absoluten Raumlufffeuchte-Sollwerts betrieben. Die Halle wird ausschliesslich mit einem Teil der Entfeuchterabwärme beheizt.

### Ungünstigster Fall:

Moderne, kleinere und dichte Halle mit effizientem Kälteerzeugungssystem (indirekte Kühlung der Eispiste mit CO<sub>2</sub> oder direkte Kühlung mit Ammoniak; Rückkühlung mit Fluss-, Grund- oder Seewasser). Zur Verhinderung von Feuchtigkeitsproblemen wird die Halle mit einem gasbetriebenen Adsorptionstrockner in Funktion eines fixen, absoluten Raumlufffeuchtwerts entfeuchtet und nur mit dessen Abwärme beheizt.

### Hockeyhalle Dübendorf:

Ältere, undichte Halle mit sehr effizientem Kälteerzeugungssystem (direkte Kühlung der Eispiste mit Ammoniak; Abwärmenutzung mit Ammoniak-Wärmepumpe; Rückkühlung mit Flusswasser). Zur Vermeidung von Feuchtigkeitsproblemen wird die Halle über die Lüftungsanlage in Funktion der relativen, kritischen Oberflächenfeuchte bedarfsgeführt beheizt. Die Wärme für die Hallenbeheizung wird zu rund 70% mit einer sehr effizienten Ammoniakwärmepumpe und zu ca. 30% mit einem kondensierenden, modulierenden Gaskessel erzeugt. Die Hallentemperatur wird im Winter aus Komfortgründen immer über 5°C gehalten.

## Allgemeine Rahmenbedingungen

Um einen Vergleich zwischen Hallen und Techniksystemen unterschiedlicher Bauweise zu ermöglichen, muss ein Teil der Rahmenbedingungen für die vier Beispiele vereinheitlicht werden:

- Jährliche Betriebsdauer der Eishalle (Eisbetrieb):	8 Monate
- Mittl. Elektrizitätskosten während der Eissaison inkl. Leistungsanteil:	16.0 Rp./kWh
- Wärmekosten Gasheizung inkl. Unterhalts- und Kapitalkosten der Anlage:	8.0 Rp./kWh
- Material der nachträglich installierten Deckenuntersicht:	Aluminium
- Nettofläche der Deckenuntersicht:	2000 m <sup>2</sup>
- Erstellungskosten der Deckenuntersicht inkl. Planung und Nebenkosten:	Fr. 140'000.--

Zu bemerken ist in diesem Zusammenhang, dass sich die Installation der Aludeckenuntersicht in der Dübendorfer Hockeyhalle infolge der Lüftungskanäle und der Beleuchtungs- und Beschallungsinstallation ziemlich aufwändig gestaltete. In vielen Hallen wird der nachträgliche Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht einfacher und dadurch auch günstiger umgesetzt werden können.

## Einsparungs- und Wirtschaftlichkeitsabschätzungen

Objektspezifische Rahmenbedingungen:	Varianten			
	Optimal	Normal	Ungünstig	Dübendorf
Mittl. Saisonhallentemperatur im Tribünenbereich [°C]:	10.0	7.0	5.0	10.0
COP Kälteanlage [--]:	2.2	2.5	4.5	4.5
COP Ammoniak-Wärmepumpe [--]:	---	---	---	7.0
Wirkungsgrad Gaskessel [%]:	85	---	---	95
Anteil Wärmepumpe am Wärmebedarf [%]:	---	---	---	70

Kälteseitige Einsparungen:	Optimal	Normal	Ungünstig	Dübendorf
Reduktion des Kälteleistungsbedarfs [kW]:	63.0	49.5	40.5	63.0
Wirkdauer der eingesparten Kälteleistung [h/a]:	5'856	5'856	5'856	5'856
Eingesparte Kälteenergie [MWh/a]:	369	290	237	369
Eingesparte Elektroenergie [MWh/a]:	168	116	53	82
Eingesparte Kälteenergiekosten [Fr./a]:	26'800	18'600	8'400	13'100

Wärme- oder Entfeuchterseitige Einsparungen:	Optimal	Normal	Ungünstig	Dübendorf
Reduktion des Wärmeleistungsbedarfs [kW]:	63.0	---	---	63.0
Zeitanteil Hallenüberhitzung durch Ausseneinflüsse [%]:	30	---	---	40
Wirkdauer der eingesparten Wärmeleistung [h/a]:	4'099	---	---	3'514
Eingesparte Wärmeenergie [MWh/a]:	258	---	---	221
Eingesparte Elektroenergie [MWh/a]:	---	---	---	22
Eingesparte fossile Energie [MWh/a]:	304	---	---	70
Eingesparte Wärmeenergiekosten [Fr./a]:	20'700	---	---	9'100

Einsparungen Total und Payback-Zeit:	Optimal	Normal	Ungünstig	Dübendorf
Eingesparte Elektroenergie [MWh/a]:	168	116	53	104
Eingesparte fossile Energie [MWh/a]:	258	---	---	70
Eingesparte Energiekosten [Fr./a]:	47'500	18'600	8'400	22'200
Payback-Dauer [a]	2.9	7.5	16.7	6.3

## Teilprojekt 2

### Zielsetzung

Vorausgesetzt, dass eine Eishalle oder ein überdachtes Ausseneisfeld nicht umfunktioniert, abgerissen oder erneuert wird, müsste von einer nachträglich installierten, emissionsarmen Deckenuntersicht erwartet werden, dass sie während 15 Jahren oder länger direkt über dem Eisfeld erhalten bleibt und sich positiv auf den Energiebedarf der technischen Anlagen auswirkt.

Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer derartigen Deckenuntersicht interessiert in diesem Zusammenhang auch das Alterungsverhalten der eingesetzten Materialien, da auf jeden Fall sichergestellt werden muss, dass die installierte Decke ihre günstigen Strahlungseigenschaften mindestens während des Zeitraums der berechneten Payback-Dauer beibehält.

Auf der Basis von Messungen wurden deshalb im hier behandelten, zweiten Teilprojekt die Emissionseigenschaften von grundsätzlich geeigneten Deckenuntersichtsmaterialien in Abhängigkeit der Alterung und Verschmutzung untersucht.

### Vorgehen / Versuchsanordnung

Um den Einfluss der Alterung und Verschmutzung unter realen Bedingungen analysieren zu können, wurden im Sommer 2002 für drei unterschiedliche Blecharten je fünf identische Prüflinge direkt unter der bestehenden Deckenuntersicht der Eishalle Kreuzlingen montiert. Vorgängig ist je ein Prüfling an der EMPA-Dübendorf hinsichtlich seiner Emissionseigenschaften im langwelligen Infrarot-Strahlungsbereich ausgemessen worden. Die Prüflinge wurden einmal im Anlieferungszustand und einmal mit Alkohol gereinigt untersucht. Als Resultat dieser ersten Messungen konnte die vierte geprüfte Blechart, eloxiertes Aluminium mit einer Emissionszahl von 0.87, erwartungsgemäss als für diesen Anwendungsbereich ungeeignetes Material ausgeschieden werden. Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens der drei verbleibenden Materialien wurde bis Dezember 2004 jedes Jahr eine Reihe Prüflinge demontiert und erneut an der EMPA ausgemessen.

Materialien im Anlieferungszustand:

Material	Aluminiumblech eloxiert	Aluminiumblech blank	Stahlblech verzinkt	Stahlblech Alu-Zink beschichtet
Emissionszahl	Anlieferung: 0.858 Gereinigt: 0.870	Anlieferung: 0.038 Gereinigt: 0.048	Anlieferung: 0.055 Gereinigt: 0.056	Anlieferung: 0.277 Gereinigt: 0.270

Versuchsanordnung:



Fig. 1: Die drei verbleibenden Materialien, deren Emissionsverhalten in Funktion der Alterung untersucht wurde



Fig. 2: Fünf Messreihen mit je drei Prüflingen an der Hallendecke in Kreuzlingen für die jährliche Überprüfung der Emissionszahl

## Messverfahren

Die Emissionseigenschaften im langwelligen Infrarotbereich der drei grundsätzlich geeigneten, unterschiedlichen Blechoberflächen wurden an der EMPA Dübendorf von Dr. Hans Simmler und Roger Vonbank auf der Basis eines kalorimetrischen Integralmessverfahrens analysiert.

Das Emissionsmessgerät (KBE Emissometer Modell AE) besteht im Wesentlichen aus einer aufheizbaren Strahlungsquelle mit integrierter Messsonde, einer Wärmesenke und einem Voltmeter. Vor der Messung wurde das Gerät jeweils mit Hilfe zweier Referenzproben mit bekannten Emissionskoeffizienten geeicht (Referenzprobe 1:  $\epsilon = 0.89$  und Referenzprobe 2:  $\epsilon = 0.07$ ) und so die Gerätekennlinie ermittelt.

Jeder Prüfling wurde einmal im Anlieferungszustand und einmal nach einer Reinigung mit Alkohol an drei verschiedenen Orten ausgemessen. Die nachfolgend aufgeführten Messwerte stellen die Mittelwerte aus den drei Messungen dar.

Die Messgenauigkeit des Emissionsgrades wird bezogen auf den Messwert mit  $\pm 10\%$  angegeben.

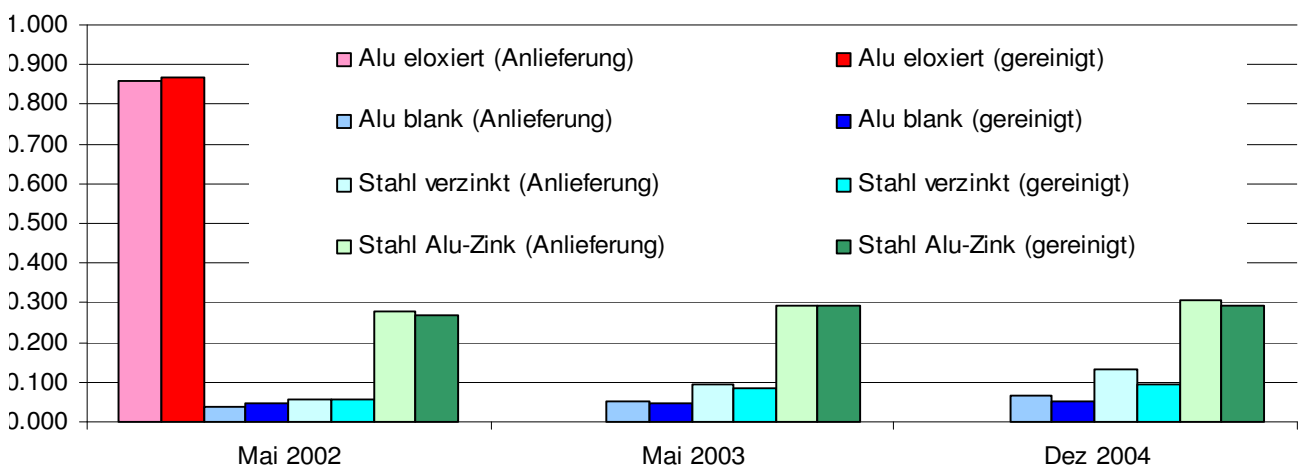
## Resultate

### Messdaten

Die nachfolgende Tabelle zeigt die an der EMPA auf der Basis von Messungen ermittelten Emissionsgrade der untersuchten Materialien. Der Messwerte vom Mai 2002 beschreiben den Neuzustand der Prüflinge. Der Einfluss der Alterung und Verschmutzung nach einem, bzw. zweieinhalb Jahren wurde anhand der Messresultate vom Mai 2003 und Dezember 2004 ausgewiesen.

Datum	Material	Aluminiumblech eloxiert	Aluminiumblech blank	Stahlblech verzinkt	Stahlblech Alu-Zink beschichtet
Mai 2002	Emissionszahl Neuzustand	Anlieferung: 0.858 Gereinigt: 0.870	Anlieferung: 0.038 Gereinigt: 0.048	Anlieferung: 0.055 Gereinigt: 0.056	Anlieferung: 0.277 Gereinigt: 0.270
Mai 2003	Emissionszahl Nach einem Jahr	Ungeeignet, keine Weiterbearbeitung	Anlieferung: 0.050 Gereinigt: 0.047	Anlieferung: 0.096 Gereinigt: 0.086	Anlieferung: 0.294 Gereinigt: 0.292
Dez. 2004	Emissionszahl Nach 2.5 Jahren	Ungeeignet, keine Weiterbearbeitung	Anlieferung: 0.064 Gereinigt: 0.051	Anlieferung: 0.133 Gereinigt: 0.094	Anlieferung: 0.308 Gereinigt: 0.293

Fig.3 Alterungs- und Verschmutzungseinflüsse



## Interpretation

Die an der EMPA ermittelten Emissionszahlen korrespondieren weitgehend mit jenen aus der Fachliteratur. Abweichungen davon konnten am verzinkten Stahlblech festgestellt werden, für das im gereinigten Neuzustand bessere Werte gemessen wurden.

Erwartungsgemäss weist blankes Aluminium die günstigsten Emissionseigenschaften aus. Im ungereinigten Anlieferungszustand unmittelbar nach dem Entfernen der Schutzfolie wurde ein Emissionsgrad von 0.038 gemessen. Der reinigungsbedingte Anstieg auf 0.048 lässt sich durch ein Nachoxidieren der erstmals realen Raumluft- und Feuchtigkeitseinflüssen ausgesetzten Oberfläche erklären.

Bezogen auf den gereinigten Zustand verhielt sich die Aluminiumoberfläche während der untersuchten Periode sehr stabil. Der Emissionsgrad sank nach dem ersten Jahr von 0.048 auf 0.047, was auf Ungenauigkeiten in diesem messtechnischen Grenzbereich zurückzuführen ist. Nach 2.5 Jahren wurde ein Emissionsgrad von 0.051 gemessen und damit recht genau jener Wert ermittelt, den eine blanke, unverschmutzte Aluminiumoberfläche gemäss Fachliteratur aufweisen sollte. Untersuchungen (Matter & Meth., 38, Nr. 1, S.18) zeigen, dass der Emissionsgrad von blankem Aluminium im Neuzustand bei 0.05 liegt, dass dieser Wert unter dem Einfluss der Alterung auf maximal 0.20 ansteigt und unter normalen klimatischen Bedingungen ungefähr auf diesem Niveau verharrt.

Die gemessenen Veränderungen nach dem zweieinhalbjährigen Einsatz gegenüber dem Neuzustand sind grundsätzlich klein. Insbesondere beim verzinkten Stahlblech scheint sich jedoch eine Alterung abzuzeichnen, die sich ungünstig auf die Emissionseigenschaften dieses Materials auswirkt. Die verzinkte Oberfläche wies im gereinigten Neuzustand eine unerwartet tiefe Emissionszahl von 0.056 auf. Der Werte verschlechterte sich nach dem ersten Jahr auf 0.086 und erreichte nach 2.5 Jahren 0.094. Gemäss Literatur sollte er im Neuzustand bei 0.10 liegen und unter dem Einfluss der Alterung auf maximal 0.40 ansteigen.

Das Alu-Zink beschichtete Stahlblech erwies sich in Bezug auf die Emissionseigenschaften als mittelmässig aber stabil. Der Emissionsgrad veränderte sich im Lauf der 2.5 Jahre von 0.270 auf 0.293. Gegenüber einer Holzdecke oder einer lackierten Blechdecke mit Werten um 0.9 lässt sich der Energiebedarf mit Alu-Zink beschichteten Blechen immer noch merklich senken. Im Vergleich mit Aluminiumblechen weist dieses Material den Vorteil auf, dass damit grössere, statisch belastete Spannweiten realisiert werden können. Aus diesem Grund stellt es für gewisse Deckenkonstruktionen in Hallenneubauten oder im Rahmen grösserer Sanierungen oder Erweiterungen sicher eine mögliche Lösung dar. Gegenüber verzinkten Blechen weist die Alu-Zinkbeschichtung gemäss Lieferantenangaben den Vorteil auf, dass sie unter dem Einfluss der Alterung weniger abdunkelt und dadurch nachhaltiger zu einem hellen Erscheinungsbild und guten Beleuchtungsverhältnissen beiträgt. Andere Untersuchungen zum Emissionsverhalten dieser relativ neuartigen Beschichtungsart unter dem Einfluss der Alterung sind dem Autor nicht bekannt.

Für alle geprüften Materialien fällt auf, dass sich der Emissionsgrad nach der zweieinhalbjährigen Einsatzdauer durch die Reinigung mit Alkohol deutlich senken lässt. Der Einfluss der Verschmutzung darf deshalb nicht unterschätzt werden. Innert welcher Zeit eine Deckenuntersicht so stark verschmutzt, dass ihre Emissionseigenschaften massgebend beeinträchtigt werden, hängt einerseits von der Kondensatausfallhäufigkeit und andererseits von den Staub- und Rauchimmissionen ab, mit denen die Halle belastet wird. Es ist davon auszugehen, dass sich eine Reinigung der Deckenuntersicht in einer intensiv genutzten Halle nach rund zehn Jahren auszahlen wird.

## Fazit

Anhand der vorgenommenen Messungen können keine wirklich verbindlichen Aussagen zum längerfristigen Einfluss der Alterung auf die Emissionszahl der untersuchten Blecharten gemacht werden. Der untersuchte Zeitraum von 2.5 Jahren ist gegenüber der aus wirtschaftlicher Sicht erforderlichen Wirk- und Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren eindeutig zu kurz. Da die gemessenen Emissionskoeffizienten jedoch mit den Angaben aus der Literatur weitgehend übereinstimmen und die altersbedingte Zunahme des Emissionsgrades unter realen Bedingungen in einer Eishalle mit funktionierendem Klimatisierungssystem sehr langsam abläuft, können trotzdem folgende Aussagen gemacht werden:

- Aluminium ist mit seinen dauerhaften und äusserst günstigen Strahlungseigenschaften sicher das geeignetste Material für die Fertigung von Deckenuntersichten in Eishallen. Sicher ist es auch das einzige Material, mit dem ein nachträglicher Einbau einer emissionsarmen Deckenuntersicht wirtschaftlich umgesetzt werden kann.  
Im Gegensatz zum kurzwelligen Strahlungsbereich beeinflusst der Reinheitsgrad des eingesetzten Aluminiums das Emissionsverhalten im Infrarotbereich kaum.  
In Bezug auf die Oberflächenbeschaffenheit gilt für Metalle im allgemeinen und damit auch für Aluminium der Zusammenhang, dass der Emissionsgrad mit zunehmender Oberflächenfeinheit sinkt und den Einflüssen der Alterung weniger stark unterworfen ist.
- Verzinkte Stahlbleche sollten wegen der zu erwartenden Alterung, die sich sowohl ungünstig auf den Emissionsgrad wie auch auf das Erscheinungsbild auswirkt, höchstens in Neubauten, in denen aus statischen Gründen kein Aluminium verwendet werden kann, nicht aber im Zusammenhang mit energetischen Optimierungen eingesetzt werden.
- Falls aus statischen oder konstruktiven Gründen in Neubauten, Erweiterungen oder Totalsanierungen keine Aluminium-Profilbleche oder Aluminiumpaneelen verwendet werden können, sollten anstelle von lackierten Stahlprofilblechen aus energetischen und Gründen Alu-Zink beschichtete Profile eingesetzt werden. Aus ästhetischer Sicht sind diese den statisch gleichwertigen, verzinkten Blechen vorzuziehen. Für den Einbau einer nachträglich zum Zwecke der Energieeinsparung installierten Deckenuntersicht eignet sich das Material infolge des mittelmässigen Emissionsgrades und der damit verbundenen Verschlechterung des Aufwand- / Ertragsverhältnisses nicht.
- Es muss davon ausgegangen werden, dass die Wirksamkeit einer emissionsarmen Deckenuntersicht durch Verschmutzungen je nach Intensität der Nutzung und der Qualität des Klimatisierungssystems früher oder später massgebend beeinträchtigt wird. Die Verschmutzung muss deshalb periodisch überprüft werden. Steigt der Emissionsgrad von Aluminium auf Werte über 0.25, sollte die Deckenuntersicht gereinigt werden. Falls im Rahmen von Vorabklärungen für den Einbau einer nachträglich einzubauenden Deckenuntersicht Payback-Zeiten von mehr als 10 Jahren resultieren, sollte eine Reinigung in der Wirtschaftlichkeitsberechnung berücksichtigt werden.

### Hinweis:

Jede noch so feine Lackierung, wie auch dünnfilmige Fett-, Kleber- oder Schmutzschichten beeinträchtigen die günstigen Emissionseigenschaften des Trägermaterials erheblich. Dasselbe gilt für Oxidschichten, insbesondere für anodisch oxidiertes (eloxiertes) Aluminium. Oxidierte oder lackierte Materialien sollten deshalb generell nie eingesetzt werden. Verschmutzte, fett- oder kleberbelastete Oberflächen müssen vor der Installation unbedingt gründlich gereinigt werden.

Wie sich Aluminiumanstriche in Bezug auf Emission und Alterung verhalten, wurde im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht untersucht.

## Teilprojekt 3

### Zielsetzung

Unter dem Einfluss der direkten Sonneneinstrahlung, hohen Aussenlufttemperaturen und warmen Luftströmungen muss bei nicht überdachten Ausseneisfeldern für die Eiserhaltung ein sehr hoher Kälteenergie- und Leistungsbedarf in Kauf genommen werden. Da die Kälteanlagen bei Aussenpisten aus wirtschaftlichen Gründen nicht auf den Spitzenleistungsbedarf ausgelegt werden können, führen die hohen Wärmelasten häufig zu einer Beeinträchtigung der Eisqualität bis hin zu Nutzungseinschränkungen. Zusätzlich ist die Eisfläche den Niederschlägen in Form von Wasser und Schnee ungeschützt ausgesetzt. Die Verfügbarkeit der Piste wird dadurch weiter reduziert und der hohe Aufwand für die Eispflege wirkt sich zusätzlich ungünstig auf das Aufwand-/ Ertragsverhältnis der Eissportanlage aus.

Unter der Berücksichtigung der Verfügbarkeit kann sich die Überdachung neuer oder bestehender Aussenpisten deshalb auch aus wirtschaftlicher Sicht durchaus positiv auswirken, wenn sie günstig erstellt werden kann und wenn sie in einer Form umgesetzt wird, die zu möglichst hohen Energie- und Leistungseinsparungen führt.

Im Gegensatz zu klimatisierten Eishallen kann die Temperatur und Feuchte der Luft unter der Überdachung von Aussenpisten in der Regel nicht durch heizen oder entfeuchten beeinflusst werden. Infolge der strahlungsbedingten Auskühlung der Überdachung und der unkontrollierbaren klimatischen Bedingungen im Deckenbereich ergeben sich lang andauernde Taupunktunterschreitungen, die mit einem Kondensatausfall an der Überdachungsuntersicht und den darunterliegenden Trägerkonstruktionen verbunden sind. Das kondensierte Wasser wird in Holz- oder Eternitdecken in geringem Masse aufgenommen, tropft aber häufig aufs Eis und kann an der Überdachung zu Feuchtigkeitsschäden und Schimmelpilzbildungen führen.

Im Rahmen des dritten Teilprojekts wurde deshalb das Verhalten unterschiedlicher Deckenmaterialien und Deckenkonstruktionen an einer überdachten Aussenpiste auf der Basis von Messungen analysiert.

Dabei wurde einerseits untersucht, ob durch den Einsatz von emissionsarmen Überdachungsmaterialien eine Reduktion der Betauungshäufigkeit (Häufigkeit des Oberflächenkondensatausfalls) an der Deckenuntersicht erzielt werden kann.

Andererseits soll geklärt werden, ob sich der Energiebedarf für die Kälteerzeugung durch den Einbau einer emissionsarmen Überdachung in ähnlichem Masse reduzieren lässt, wie in einer aktiv klimatisierten Eishalle.

### Vorgehen

Im Rahmen einer neu zu erstellenden Aussenfeldüberdachung konnten temporär zwei unterschiedliche Überdachungsvarianten aus Aluminium mit wenig Aufwand als Versuchsflächen in die Überdachung integriert werden. Das Verhalten der mit Oberflächen-Temperaturfühlern ausgerüsteten, gegen das Eis gerichteten Aluminiumflächen konnte auf diese Weise unter identischen aussenklimatischen Bedingungen messtechnisch erfasst und direkt mit jenem des einschichtigen, ungedämmten Eternitdachs verglichen werden.

Im Zusammenhang mit den energetischen Auswirkungen einer emissionsarmen Aussenfeldüberdachung und der zusätzlich erwarteten Reduktion der Kondensatausfallhäufigkeit werden hier die nachfolgend aufgelisteten physikalischen Gegebenheiten untersucht:

- Auskühlung der Deckenuntersicht infolge des Strahlungsaustausches zwischen der Hallendecke und dem Eisfeld (Kondensatausfall)
- Auskühlung der Deckenuntersicht infolge des Strahlungsaustausches zwischen der Hallendecke und dem Weltraum in klaren Nächten (Kondensatausfall)
- Erwärmung der Hallendecke infolge solarer Einstrahlung (Energiebedarf)
- Strahlungsaustausch zwischen der Hallendecke und dem Eisfeld (Energiebedarf)

### Variante 1: Einschichtige Überdachung aus blankem Aluminiumblech

Die ungedämmte Dachhaut in Form einer Eternitabdeckung wurde über dem Eisfeld auf einer Fläche von 6 m<sup>2</sup> durch ein gewelltes Aluminiumblech ersetzt. Diese Anordnung soll insbesondere unverfälschte Informationen zum Einfluss der solaren Strahlung und der nächtlichen Abstrahlung gegen den Weltraum liefern. Eine einschichtige Aluminiumüberdachung verursacht gegenüber einer Eternitüberdachung keine Mehrkosten. Die Konstruktion weist aber den Nachteil auf, dass Schallschutzmassnahmen wahrscheinlich eher aufwendig zu integrieren sind und Spiegelungen in der Umgebung in Kauf genommen werden müssen (gilt mindestens für blankes Aluminium, denkbar sind aber auch matte, rostfrei Stahlbleche oder gebeiztes Aluminium, das ebenfalls über hervorragende Strahlungseigenschaften verfügt).

### Variante 2: Eternitüberdachung mit Untersicht aus Aluminiumblech

Im Zusammenhang mit den vorgängig erwähnten Nachteilen der einschichtigen Aluminiumabdeckung soll eine konstruktiv aufwendigere Variante untersucht werden, die sich auch zur Nachrüstung an bestehenden Überdachungen anbietet. Ähnlich dem Projekt in der Eishalle Dübendorf wurden gewellte Alubleche unter der Eternitdachhaut montiert. Im Falle einer konkreten Anwendung können die Bleche teilperforiert und mit schallabsorbierenden Dämmstoffen belegt werden. Im Rahmen des P&D-Projekts wird vorallem das von der einschichtigen Aluminiumüberdachung abweichende Verhalten untersucht.

## Versuchsanordnung / Messkonzept

Die in Eternit ausgeführte Ausseneisfeldüberdachung wurde im Sommer 2003 erstellt und für das P&D-Projekt mit einem unter dem Eternit befestigten Aluminiumblech (Fig.1) über dem Eisfeld ergänzt. Eine gleich grosse, beidseitig blanke Aluminiumblechfläche ersetzt an einer zweiten Stelle die ungedämmte Dachhaut aus Eternit (Fig.2). Sowohl das Eternit, wie auch die beiden Aluminiumflächen wurden eisseitig mit Oberflächen-Temperaturfühlern ausgerüstet (Fig.3). Zusätzlich sind unter der Überdachung und ausserhalb der Eispiste kombinierte Temperatur-/Feuchtefühler installiert, mit denen die Oberflächenfeuchte ermittelt und das Aussenklima aufgezeichnet wurde.

Mit der Messdatenaufzeichnung wurde im September 2003 nach der Fühlereichung bereits vor Beginn der Aufeisung begonnen. Die Messwerte konnten in der Folge unterbruchslos bis Ende April 2004 aufgezeichnet und die Auswirkungen der drei Überdachungskonstruktionen auf den Oberflächenkondensatausfall während der letzten Eissaison 03/04 messtechnisch einwandfrei erfasst werden. Nach erfolgter Plausibilitätsüberprüfung der grafisch aufbereiteten Messresultate, wurden die Versuchs- und Messeinrichtungen zwischenzeitlich wieder entfernt.



Fig. 1:  
Unter dem Eternit platziertes,  
hinterlüftetes Aluminiumblech  
ohne Perforierung



Fig. 2:  
Beidseitig blankes Aluminium-  
blech ersetzt die Dachhaut aus  
Eternit



Fig. 3:  
Oberflächentemperaturfühler eis-  
seitig auf Aluminiumblech mit  
emissionsidentischer Abdeckung

## Testflächen und Messeinrichtung

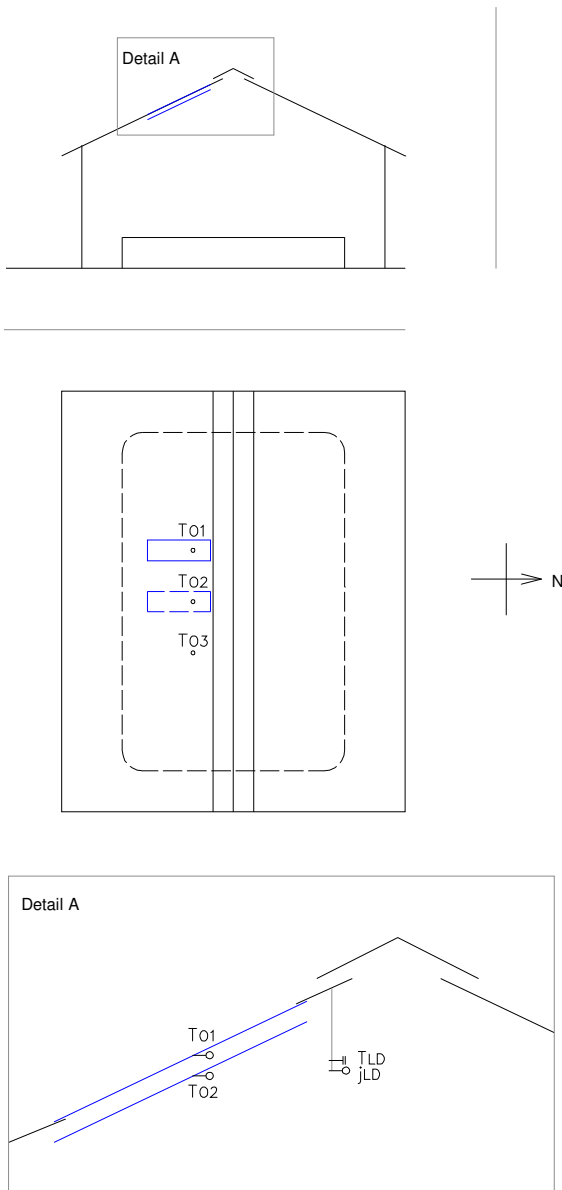
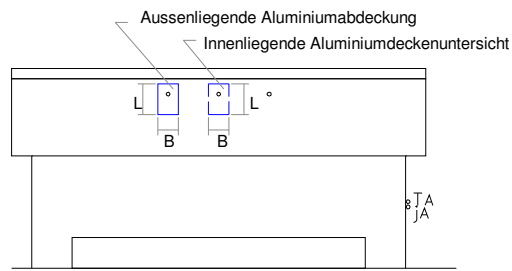
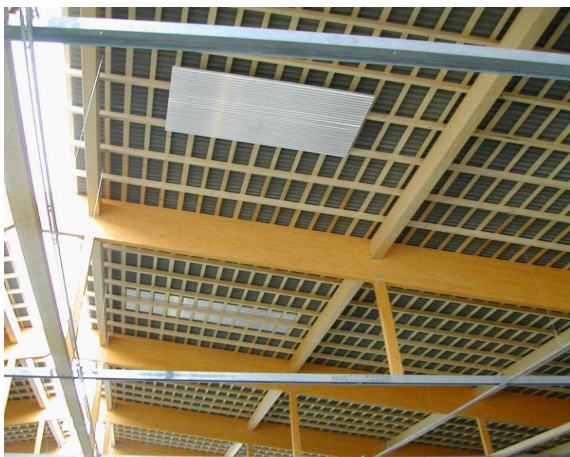


Fig.4: Versuchsanordnung



### Konstruktive Anforderungen

#### Innenliegende Aluminiumdeckenuntersicht:

Die innenliegende, gewellte Aluminiumdeckenuntersicht wird mit einer Abmessung von 2.2 m (B) auf 3.0 m (L) unter der Dachlattung installiert. Zur Gewährleistung der Hinterlüftung werden zwischen dem Blech und der Lattung Distanzhalter mit einer Höhe von 5 cm montiert.

#### Aussenliegende Aluminiumabdeckung:

Die aussenliegende Aluminiumabdeckung wird anstelle des Eternits als Dachhaut mit einer Abmessung von 2.2 m (B) auf 3.0 m (L) auf der Dachlattung montiert. Die Wellung des Blechs stimmt mit derjenigen des Eternits überein.

### Messtechnische Installationen

- T01 Oberflächentemperatur Unterseite aussenliegende Aluminiumabdeckung
- T02 Oberflächentemperatur Unterseite innenliegende Aluminiumdeckenuntersicht
- T03 Oberflächentemperatur Unterseite aussenliegende Eternitabdeckung
- TLD Lufttemperatur 1 m unter Abdeckung (Kombifühler unter Eternitabdeckung)
- ⊖ jHD Relative Luftfeuchte 1 m unter Eternitabdeckung (Kombifühler)
- TA Aussenlufttemperatur (Kombifühler vandalensicher und einstrahlungsgeschützt)
- ⊖ jA Relative Aussenluftfeuchte (Kombifühler)

### Abgeleitete, bzw. berechnete Messgrößen

- xLD Absolute Luftfeuchte 1 m unter Eternitabdeckung
- j01 Relative Oberflächenfeuchte Unterseite aussenliegende Aluminiumabdeckung
- j02 Relative Oberflächenfeuchte Unterseite innenliegende Aluminiumdeckenuntersicht
- j03 Relative Oberflächenfeuchte Unterseite aussenliegende Eternitabdeckung
- xA Absolute Aussenluftfeuchte

Fig.5: Untersuchte Aussenpistenüberdachung



## Resultate

### Messdaten

Die Messungen an der Aussenfeldüberdachung konnten Ende April 2004 vollständig und ohne störende Einflüsse abgeschlossen werden. Die mittlerweile wieder deinstallierte Versuchsanordnung ermöglichte unter anderem die Ermittlung der Betaungshäufigkeit an den verschiedenen Überdachungskonstruktionen:

- Welleternit als Dachhaut und Deckenuntersicht („Eternit“)
- Aluminium-Sinusblech als Dachhaut und Deckenuntersicht („Alu aussen“)
- Welleternit als Dachhaut mit untergehängtem Aluminium-Sinusblech als hinterlüftete Deckenuntersicht („Alu innen“)

Fig.6: Betaungshäufigkeit und Dauer der unterschiedlichen Deckenuntersichten im Verlauf der Saison 03/04

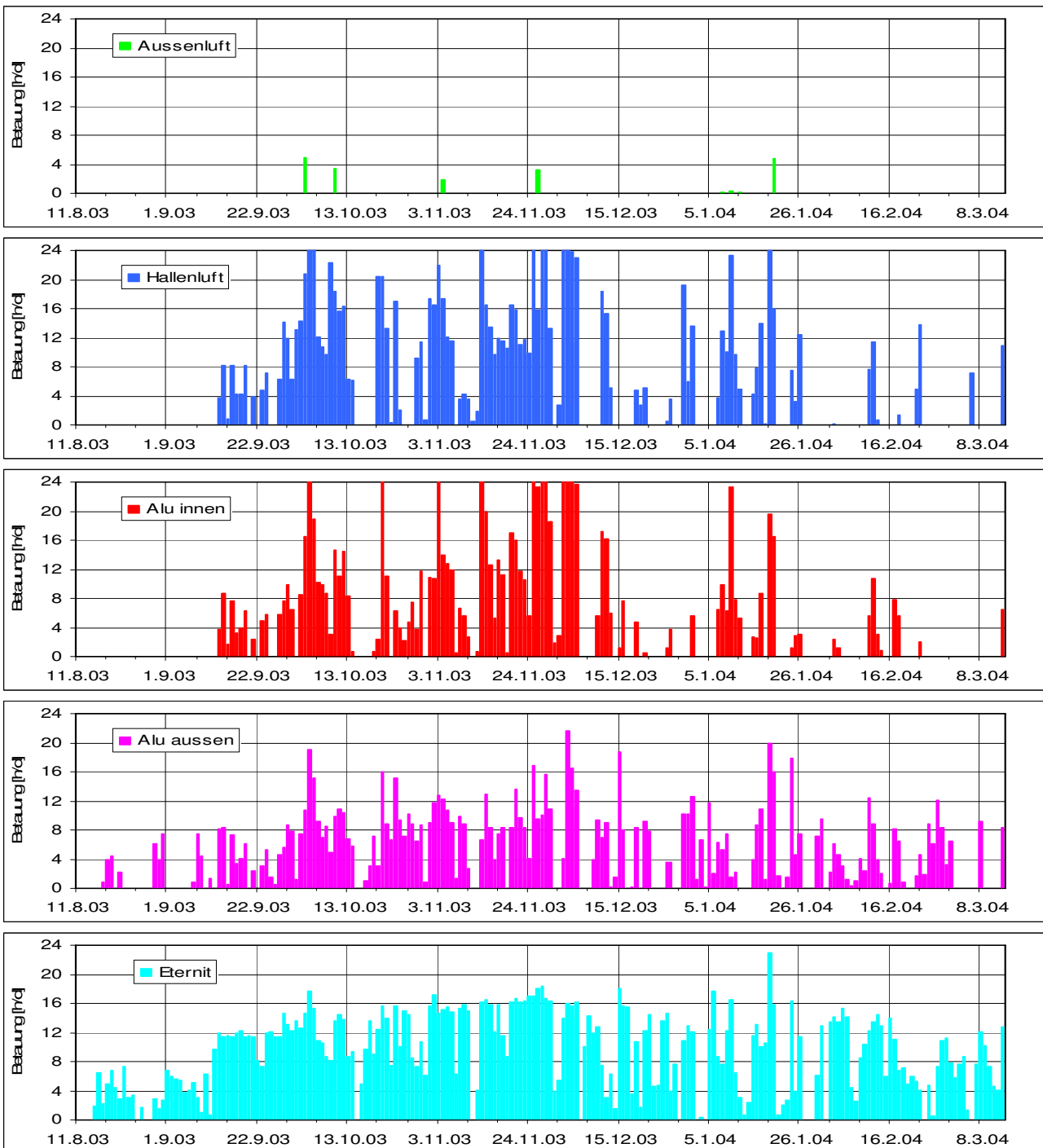
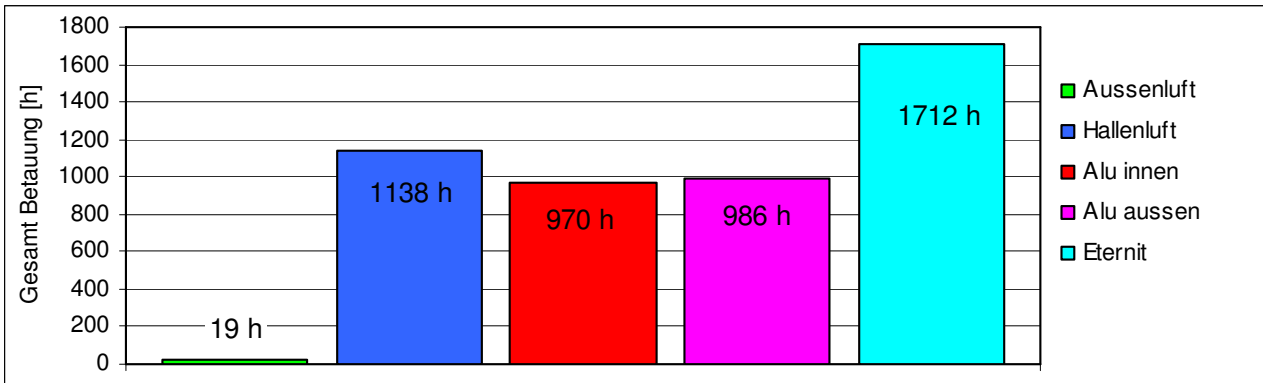
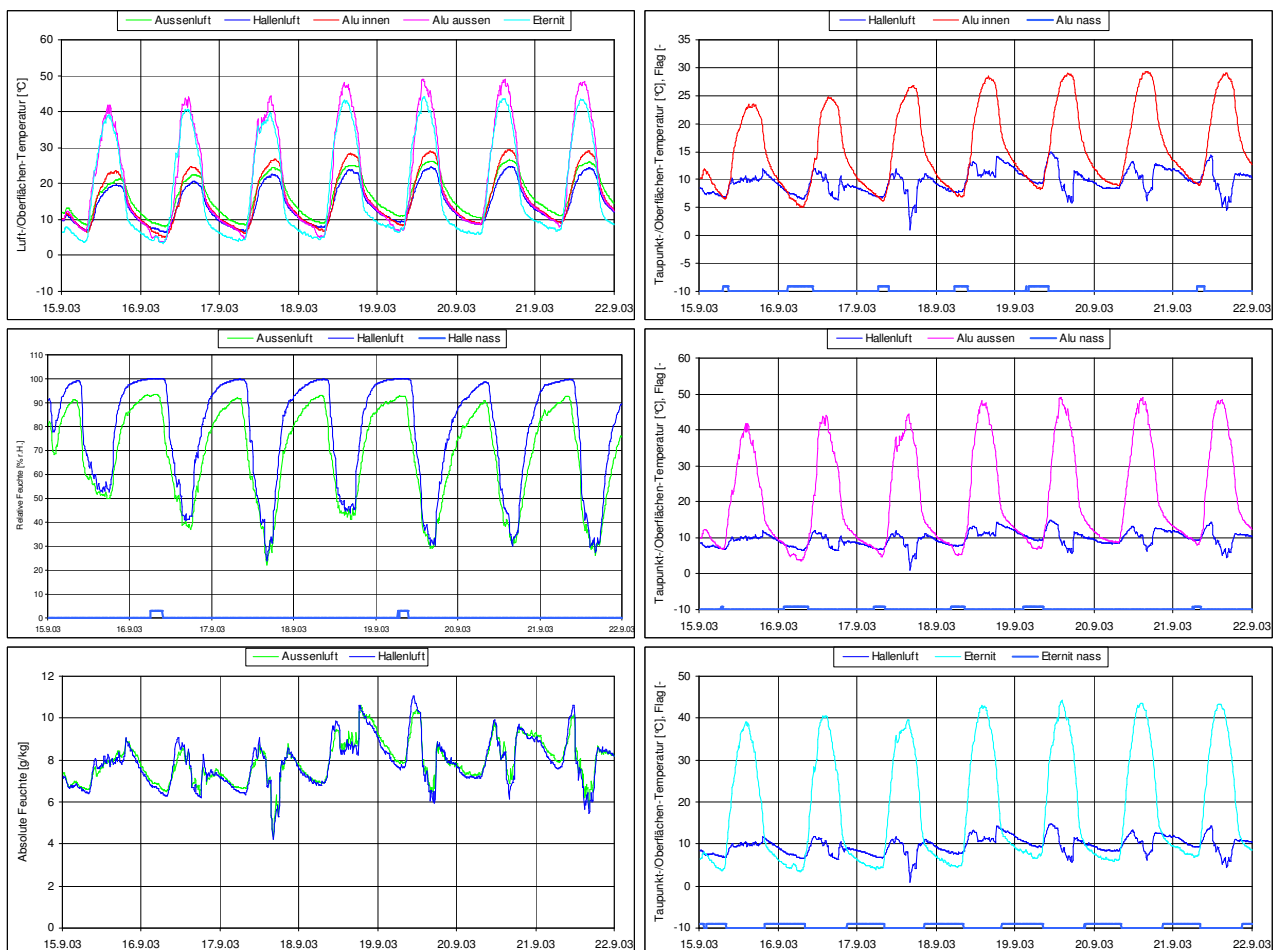


Fig.7: Aufsummierte Betauungshäufigkeit der unterschiedlichen Deckenuntersichten während der Saison 03/04



Im Diagramm (Fig.7) wird die Häufigkeit der über die gesamte Messperiode aufsummierten Taupunktüberschreitungen an der Oberfläche der unterschiedlichen Deckenuntersichten dargestellt. Anhand der Messungen kann eindeutig nachgewiesen werden, dass an den beiden Aluminiumkonstruktionen wesentlich weniger Taupunktüberschreitungen in Kauf genommen werden müssen als an der Eternitüberdachung.

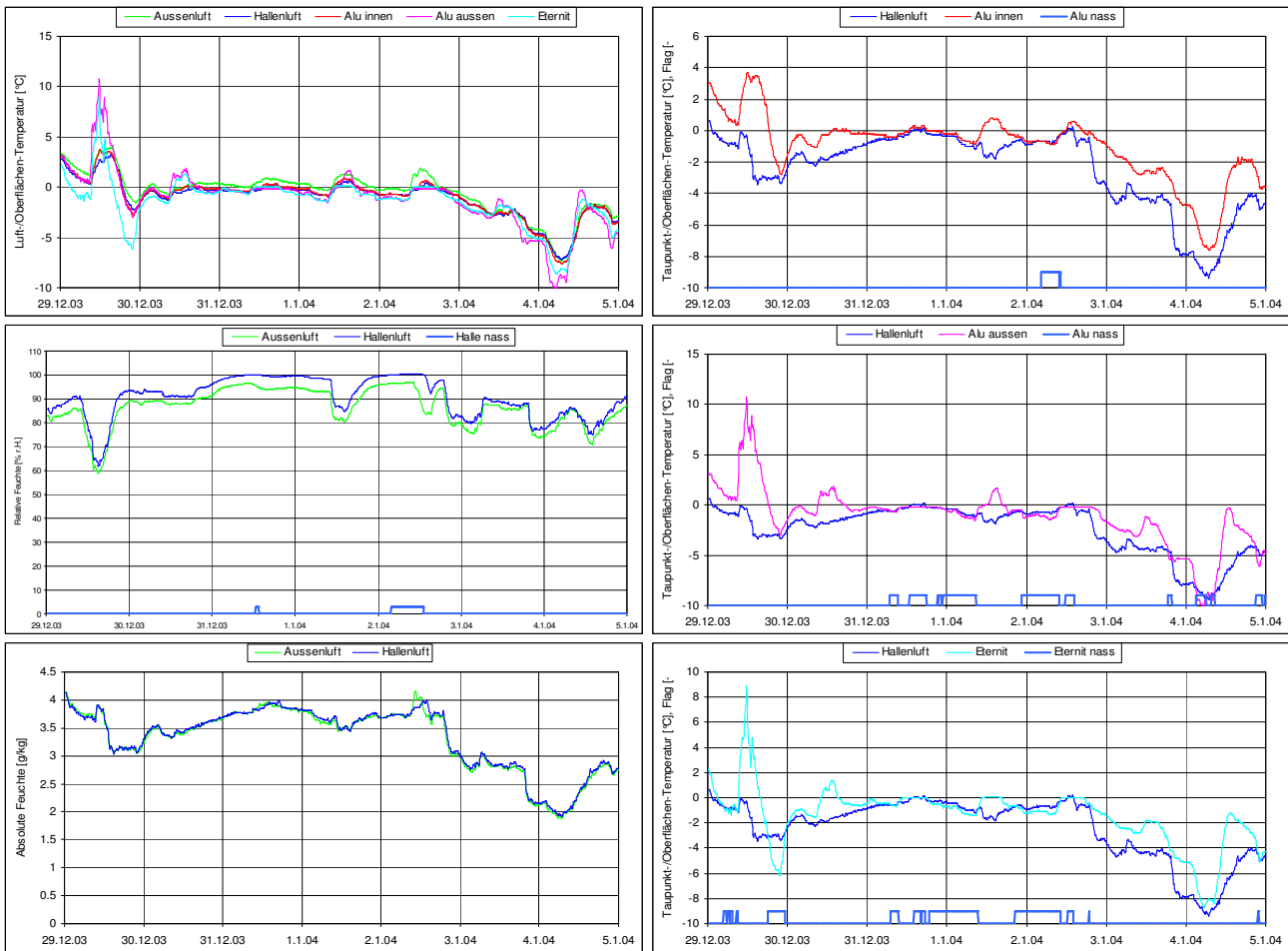
Fig.8: Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe im September 2003



Die oben dargestellten Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe zeigen ein typisches Verhalten des Aussenklimas und der klimatischen Gegebenheiten im Bereich der unterschiedlichen Bedachungskonstruktionen während der warmen, sonnigen Übergangszeit.

Interessanterweise können zwischen den beiden Aluminiumkonstruktionen hinsichtlich der nächtlichen Abstrahlung gegen den Weltraum keine Unterschiede festgestellt werden. Während der klaren Nächte wiesen beide Konstruktionen entgegen den Erwartungen die gleiche Oberflächentemperatur auf.

Fig.9: Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe im Januar 2004 (typisches Verhalten im Winter mit Hochnebel)



## Interpretation

### Oberflächenkondensatausfall (Btauung)

Die Auswirkungen emissionsarmer Aussenfeldüberdachungsuntersichten auf den Oberflächenkondensatausfall können zweifelsfrei aufgezeigt werden.

Bezogen auf eine Saisondauer von 4320 Stunden (Aufeisung am 12.09.03; Abtauung ab 07.03.05) konnten für die drei unterschiedlichen Überdachungsvarianten folgende aufsummierten Btauungszeiten gemessen werden:

Alu innen:	970 h	57% von Eternit	23% von Saisondauer
Alu aussen:	986 h	58% von Eternit	23% von Saisondauer
Eternit:	1712 h	100% von Eternit	40% von Saisondauer
Hallenluft 1 Meter unter der Decke:	1138 h	66% von Eternit	26% von Saisondauer
Aussenluft:	19 h	1% von Eternit	0% von Saisondauer

Da gegen 99 Prozent der projizierten Deckenuntersichtsfläche über dem Eisfeld aus Eternit und Holz (beides quasi schwarze Körper) bestehen, kühlt die Luft im Deckenbereich infolge der hohen Abstrahlungsleistung der beiden vorherrschenden Materialien entsprechend stark aus. Die reduzierte Abstrahlung der beiden verschwindend kleinen Aluminiumflächen bleibt in der Folge ohne Einfluss auf die Lufttemperatur im Deckenbereich. Die Gefahr des Kondensatausfalls nimmt dadurch auch für die Aluminiumdeckenuntersichten zu. Die Versuchsanordnung bewirkt deshalb eine für die Aluminiumkonstruktionen ungünstige Verfälschung der

Resultate. In der Praxis macht die wirksame Aluminiumoberfläche einer korrekt geplanten, emissionsarmen Überdachungsuntersicht auch unter Berücksichtigung von darunterliegenden Trägern und des Lochanteils von flankenperforierten Aluminiumblechen, immer mindestens 80 bis 90% aus. In Folge der stark reduzierten Abstrahlung wird sich deshalb im Deckenbereich effektiv eine höhere Lufttemperatur einstellen, die nur unwesentlich tiefer liegt als die Aussentemperatur. Es kann deshalb mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass die aufsummierte Betauungsdauer von mehr oder weniger vollflächigen Aluminiumkonstruktionen tatsächlich wesentlich tiefer liegt, als hier gemessen wurde.

Im Zusammenhang mit der solaren Einstrahlung ist bei der Interpretation der Messresultate allerdings auch zu berücksichtigen, dass die Messungen an der südorientierten, leicht geneigten Dachhälfte vorgenommen wurden. Da die direkte, solare Einstrahlung auf der nordorientierten Dachhälfte weitgehend entfällt, muss einerseits davon ausgegangen werden, dass sich nordseitig bei allen untersuchten Konstruktionen häufigere und länger andauernde Betauungsphasen ergeben hätten, als auf der Südseite gemessen werden konnten. Andererseits bewirkt diese Eigenschaft der Versuchsanordnung auch, dass die sich südseitig gemessenen, einstrahlungsbedingten Temperaturspitzen bei den einschichtigen Konstruktionen auf die südorientierte Dachhälfte beschränken. Nordseitig wird angenommen, dass sich die einschichtigen Konstruktionen unter dem Einfluss der solaren Einstrahlung im September nicht wesentlich über das Aussentemperaturniveau erwärmt haben.

Die einschichtige Aluminium- Deckenkonstruktion „Alu aussen“ profitiert bezüglich Kondensatausfall stärker von der Sonneneinstrahlung und trocknet deshalb schneller ab, als die unter der Eternitdachhaut montierte Aluminiumdeckenuntersicht „Alu-Innen“. Allerdings wirkt sich auch das Aussenklima direkter auf die Konstruktion „Alu-Aussen“ aus, so dass gegenüber „Alu-Innen“ häufiger Kondensat ausfällt, die Ausfallperioden aber weniger lang andauern. Dass in der Raumluft unter der Überdachung häufiger Kondensat ausfällt, als an den beiden Deckenuntersichten aus Aluminium, lässt sich mit der Erwärmung der Aluminiumbleche durch die immer wärmere Aussenluft und durch die solare Einstrahlung erklären.

Im Zusammenhang mit den erwähnten Eigenschaften der Versuchsanordnung konnte deshalb nicht fundiert nachgewiesen werden, in welchem Masse der kondensatausfallbedingte Niederschlag auf die Eisfläche der Aluminiumflächen gegenüber der wasseraufnahmefähigen Eternitüberdachung reduziert werden konnte. In Anbetracht der sehr langen Betauungsphase der Eternitabdeckung (40% der gesamten Einsatzdauer) muss aber davon ausgegangen werden, dass unter einer Eternitkonstruktion trotz des Pufferungseffekts wesentlich häufiger ausgefallenes Kondensat auf das Eisfeld tropft, als unter Aluminium-Deckenuntersichten.

Vor Ort konnte häufig beobachtet werden, dass an der 5 Meter über dem Eisfeld liegenden Holz-Metallrasterkonstruktion (Fig.4 und Fig.5) nur bei den Holzträgern, nicht aber bei den verzinkten Stahlträgern Tropfenbildungen festgestellt werden konnten. Ähnliches wurde vom Betreiber der mit Aluminiumblechen überdachten Aussenspiste in Luzern beobachtet, wo sich die Niederschlagsbildung, von Ausnahmen abgesehen, offensichtlich auf die unter dem Dach liegenden, lackierten Träger beschränkt.

## Kälteenergie- und Leistungsbedarf

Einfluss der Aluminiumbenetzung:

Wie bereits im Teilprojekt 2 erwähnt, sind die Emissionseigenschaften einer Deckenuntersicht ausschliesslich von der untersten, gegen das Eisfeld gerichteten Materialschicht abhängig. Die Benetzung der Aluminiumoberflächen mit Oberflächenkondensat führt aus diesem Grund zum temporären Verlust der günstigen Emissionseigenschaften der Deckenuntersicht. Effektiv strahlt während der benetzten Phasen nicht mehr die Aluminiumoberfläche Wärme an das Eisfeld ab, sondern die Wasseroberfläche des Kondensatfilms. Diese weist im Infrarotbereich nahezu die Strahlungseigenschaften eines schwarzen Körper auf. Die abgestrahlte Wärme nimmt dabei um Faktoren zu und führt zur verstärkten Auskühlung des Aluminiumblechs und damit auch zur verzögerten Abtrocknung der Aluminium-Deckenuntersicht.

Die energetische Wirksamkeit der Aluminiumdecken ist deshalb auch direkt von der Betauungsdauer abhängig und muss um jenen Zeitanteil reduziert werden, während dem die der Eisfläche zugewandte Oberfläche mit Kondensat bedeckt ist und wie ein schwarzer Körper funktioniert. Ausgehend von den Messresultaten würde dieser Anteil für beide Aluminiumkonstruktionen 23% betragen. Dieses Resultat wurde jedoch unter dem Einfluss der vorgängig beschriebenen Eigenschaften der Versuchsanordnung ermittelt.

Die Taupunktunterschreitungen unter realen Bedingungen mit einer vollflächigen Aluminiumdecke würden bezogen auf die südorientierte Dachhälfte schätzungsweise auf einen Fünftel gesenkt. Unter Berücksichtigung der nordseitigen Dachhälfte, bei der mit einer etwas höheren Betauungsdauer zu rechnen ist, wird davon ausgegangen, dass Wirksamkeit einer emissionsarmen Ausseneisfeldüberdachung gegenüber einer Deckenuntersicht in einer klimatisierten Halle durch die Betauungsdauer um knapp 10% reduziert wird.

#### Einfluss der solaren Einstrahlung:

Einschichtige Überdachungskonstruktionen können unter dem Einfluss der solaren Einstrahlung sehr hohe Temperaturen erreichen. Mitte September wurden bei einer Aussentemperatur von 26 °C folgende Spitzentemperaturen an den südorientierten Deckenuntersichten gemessen:

- Alu aussen: S:49 °C (N:26 °C) (berechnete Abstrahlungsleistung gegen Eispiste: 66 kW)
- Alu innen: S:29 °C (N:26 °C) (berechnete Abstrahlungsleistung gegen Eispiste: 47 kW)
- Eternit: S:44 °C (N:26 °C) (berechnete Abstrahlungsleistung gegen Eispiste: 323 kW)

Die Berechnung der aufgeführten Abstrahlungsleistung erfolgte jeweils für die eine Dachhälfte mit der südseitig gemessenen Temperatur und für die andere Dachhälfte mit der Aussentemperatur.

Eigentlich wurde erwartet, dass sich die einschichtige Aluminiumabdeckung infolge der Teilreflexion der solaren Einstrahlung weniger stark erwärmt, als die einschichtige Eternitabdeckung. Da die Eternitdecke auf diesem Temperaturniveau aber im IR-Bereich mit einer sehr massiven Leistung beidseitig Wärme abstrahlt, liegt die Gleichgewichtstemperatur tiefer als bei der einschichtigen Aluminiumabdeckung, die zwar weniger kurzwellige Solarstrahlung absorbiert, die aufgenommene Wärme aber auch in geringerem Masse über die langwellige IR-Strahlung wieder an die Umgebung abgeben kann.

Im Gegensatz zur Eternitüberdachung wirkt sich die hohe Temperatur der einschichtigen Aluminiumdecke deshalb auch bei Weitem nicht so ungünstig auf den Energie- und Leistungsbedarf der Kälteanlage aus.

#### Energiekosteneinsparungen:

Gegenüber einer Aluminiumdeckenuntersicht in einer Halle wird für die hier untersuchten Aluminium-Aussenpistenüberdachungen in erster Näherung davon ausgegangen, dass sich der energetisch ungünstige Einfluss der Benetzung und der günstige bezüglich der solaren Einstrahlungen ungefähr aufheben.

Um auf der Basis der Messungen des Teilprojekts 1 Aussagen zu den Auswirkungen auf den Kälteenergiebedarf machen zu können, wird analog der mittleren Hallenlufttemperatur in Eishallen die mittlere Lufttemperatur im Zuschauerbereich ermittelt. Diese entspricht bei einer überdachten Aussenpiste ziemlich genau der Aussentemperatur und beträgt im hier ausgemessenen Fall gemittelt über die gesamte Eisbetriebsdauer vom 12.09.03 bis 07.03.05 (knapp 6 Monate) 5.2 °C.

Wie in den Wirtschaftlichkeitsberechnungen des Teilprojekts 1 werden die Energiekosteneinsparungen für eine Aussenfeldüberdachung in Aluminium gegenüber Holz oder Eternit auf der Basis folgender Rahmenbedingungen abgeschätzt:

- Jährliche Betriebsdauer der Aussenpiste: 6 Monate
- Mittlere Elektrizitätskosten inkl. Leistungsanteil: 18 Rp./kWh
- Mittlere Temperatur im Tribünenbereich: 5 °C
- Gesamteffizienz des Kälteerzeugungssystems (COP): 3

Bedingt durch den höheren Anteil an teurem Winterstrom werden die Kosten für den Elektrizitätsbedarf mit 18 Rp/kWh höher angesetzt als bei einer Eishalle.

Ausgehend von den Erkenntnissen des Teilprojekts 1 in Form der Einsparungskurve resultieren für eine emissionsarme Aussenfeldüberdachung gegenüber einer Überdachung mit konventioneller Materialwahl folgende Einsparungen:

- Reduktion des mittleren Kälteleistungsbedarfs um ca. 40 kW
- Einsparungen von ca. 59 MWh Elektrizität oder ca. Fr. 10'600.-- pro Jahr.

Im Falle von Aussenpistenüberdachungen aus Aluminium müsste in der Wirtschaftlichkeit auch die Reduktion des Spitzenleistungsbedarfs berücksichtigt werden, die je nach Neigung, Orientierung und Konstruktion der Überdachung bis zu 300 kW betragen kann. Um von der möglichen Reduktion des Spitzenleistungsbedarfs profitieren zu können, müsste eine bestehende Kälteanlage allerdings redimensioniert oder entsprechend geregelt werden.

Im Falle von Neubauprojekten oder bei Kälteanlagen, die im Rahmen eines nachträglichen Überdachungsprojekts totalsaniert werden, sollte diese Gegebenheit bei der Planung berücksichtigt werden. Durch eine richtig dimensionierte, auf die Überdachung abgestimmte Kälteanlagen lassen sich die Anlagekosten senken. Viel mehr ins Gewicht fällt aber der reduzierte Spitzenstrombedarf, der bei Aussenpisten bis zu 40% der Elektrizitätskosten ausmachen kann.

## Fazit

Die Erstellung einer Aussenfeldüberdachung ist unabhängig von der Materialwahl der Deckenuntersicht mit Kosten verbunden, die nicht über die Energieeinsparungen amortisiert werden können. Ob sich für Aussenfeldüberdachungen eine vernünftige Wirtschaftlichkeit ausweisen lässt, wenn der durch die Überdachung reduzierte Aufwand für die Eispflege, die bessere Eisqualität und die erhöhte Nutz- und Verfügbarkeit der Aussenpiste mitberücksichtigt wird, konnte im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht werden.

Auf jeden Fall aus wirtschaftlichen Gründen, aber auch in Anbetracht der besseren Beleuchtungsverhältnisse und der eindeutig reduzierten Betauungsdauer, sollten für neu zu erstellende Aussenpistenüberdachungen grundsätzlich Aluminiumkonstruktionen gewählt werden.

Die optimalsten Resultate in Bezug auf die Kälteenergie-Einsparungen, die Reduktion der erforderlichen elektrischen Spitzenleistung und die akustischen Qualitäten der Überdachung lassen sich mit zweischichtigen Dachkonstruktionen erzielen. Mit dieser Art der Überdachung können Beeinträchtigungen der Umgebung durch Spiegelungen ausgeschlossen und die akustischen Eigenschaften durch die Wahl von flankenperforierten Aluminium-Trapezprofil- oder Sinusblechen mit darüberliegenden Akustikmaterialien optimiert werden.

Gegenüber der zweischichtigen Konstruktion bietet die einfache Überdachung mit blanken Aluminiumblechen den Vorteil der günstigeren Erstellungskosten. Die unerwünschten Spiegelungen können wahrscheinlich durch den Einsatz von gebeiztem Aluminium oder durch Bleche, deren äussere Oberfläche entsprechend behandelt wurde, auf ein akzeptables Mass reduziert werden. Aus schalltechnischer Sicht stellt die einfache Aluminiumüberdachung gegenüber der zweischichtigen Konstruktion sicher eine minderwertige Lösung dar.

Die Nachrüstung einer bereits bestehenden Holz- oder Eternitüberdachung kann aus wirtschaftlicher Sicht höchstens dann gerechtfertigt werden, wenn die bestehende Deckenuntersicht aus ästhetischen oder bautechnischen Gründen sowieso saniert werden muss oder die Leistung der installierten Kälteanlage zu knapp bemessen ist und einer verbesserten Eisqualität ein wirtschaftlicher Nutzen zugeordnet wird.

In Bezug auf den Unterhalt einer Aluminiumdeckenuntersicht über einem Ausseneisfeld wird erwartet, dass diese insbesondere an nordorientierten Elementen unter dem Einfluss des Kondensatausfalls schneller altert und wahrscheinlich auch schneller verschmutzt als eine Deckenuntersicht in einer Halle.

Im Rahmen dieses P&D-Projekts konnten im Bereich Aussenfeldüberdachungen nicht alle relevanten Fragen abschliessend geklärt werden. Vor der Planung eines derartigen Projekts sollten deshalb noch Abklärungen bezüglich der Niederschlagshäufigkeit und der Materialalterung an bestehenden Überdachungen durchgeführt werden. Dies gilt insbesondere für die im Rahmen dieses Projekts nicht konkret untersuchte, im Jahre 2002 aus blankem Aluminium erstellte Aussenfeldüberdachung in Luzern.

## Anhang Teilprojekt 1

### Informationen zur Hallenklimatisierung

#### Hallenlüftungsanlage

Die Halle verfügt über eine Zu- / Abluftanlage mit Heizregister, die sowohl mit Umluft, wie auch mit Frischluft betrieben werden kann. Die Lüftungsanlage ist weder mit einem Kältereister noch mit einem Adsorptions-trockner ausgerüstet. Da sie auch nicht über eine WRG verfügt, wird unter normalen Betriebsbedingungen auf die mechanische Zufuhr von Frischluft verzichtet.

#### Aussenklimateinflüsse

Bezogen auf die Nachtmessungen, die nicht durch die nutzungsspezifischen Emissionen wie Eisreinigungen, Toröffnungen, Beleuchtung, solare Einstrahlung und Personen beeinträchtigt werden, können die Einflüsse des Aussenklimas auf das Hallenklima und den Kältebedarf wie folgt beschrieben werden:

- Die absolute Aussenluftfeuchte wirkt sich direkt auf die absolute Raumlufftfeuchte in der Halle aus. Der Wasserdampfanteil der Hallenluft wird allein durch die Undichtigkeit der Hallengebäudehülle und die mechanische Frischluftzufuhr, nicht aber durch die Materialwahl der Deckenuntersicht beeinflusst.
- Die absolute Raumlufftfeuchte in der Halle wirkt sich direkt auf die Lufttemperatur in der Halle aus, die zur Vermeidung von Feuchteproblemen entsprechend angehoben werden muss. Die dafür nötige Wärmezufuhr erfolgt entweder über die Lüftungsanlage und/oder über Transmissions- und Leckluftgewinne.
- Die Raumluffttemperatur wirkt sich direkt auf den Kältebedarf der Eispiste aus. Die Wärmelast setzt sich im nächtlichen Ruhebetrieb aus folgenden Komponenten zusammen:
  - Konvektion: Der konvektive Lastanteil ist abhängig von der Temperatur im Kaltluftsee und der Luftturbulenz über der Eisfläche. Identische Bedingungen während beiden Messperioden.
  - Kondensation: Der Kondensationsanteil der Wärmelast wird von der absoluten Feuchte im Kaltluftsee und den Luftturbulenzen über Eisfläche bestimmt. Identische Bedingungen während beiden Messperioden.
  - IR-Strahlung: Der Strahlungsanteil ist abhängig von den Oberflächentemperaturen und den Emissionseigenschaften jener Bauteile, die im Einflussbereich der Eisfläche liegen (vorallem die Deckenuntersicht). Die Resultate der ersten Messperiode wurden mit der ursprünglichen, physikalisch schwarzen Faserholzdecke ermittelt. Jene der zweiten Messperiode beziehen sich auf die im Sommer 2004 installierte Aluminium-Deckenuntersicht.

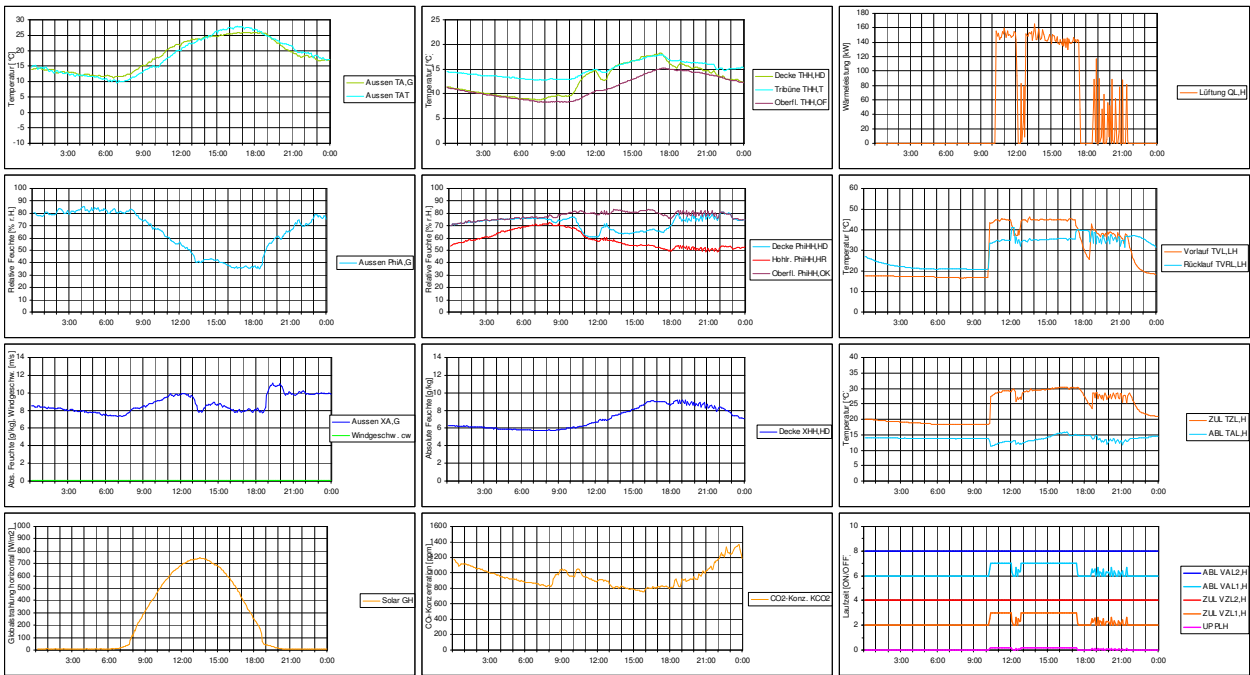
## Messwertstreuung

Die thermische Trägheit der Tribünenmasse und unterschiedlich zustande gekommene Mittelwerte können sich ausgesprochen stark auf den in Funktion der mittleren Hallentemperatur gemessenen Wärmeleistungsbedarf auswirken.

### Extrembeispiel mit Aludecke:

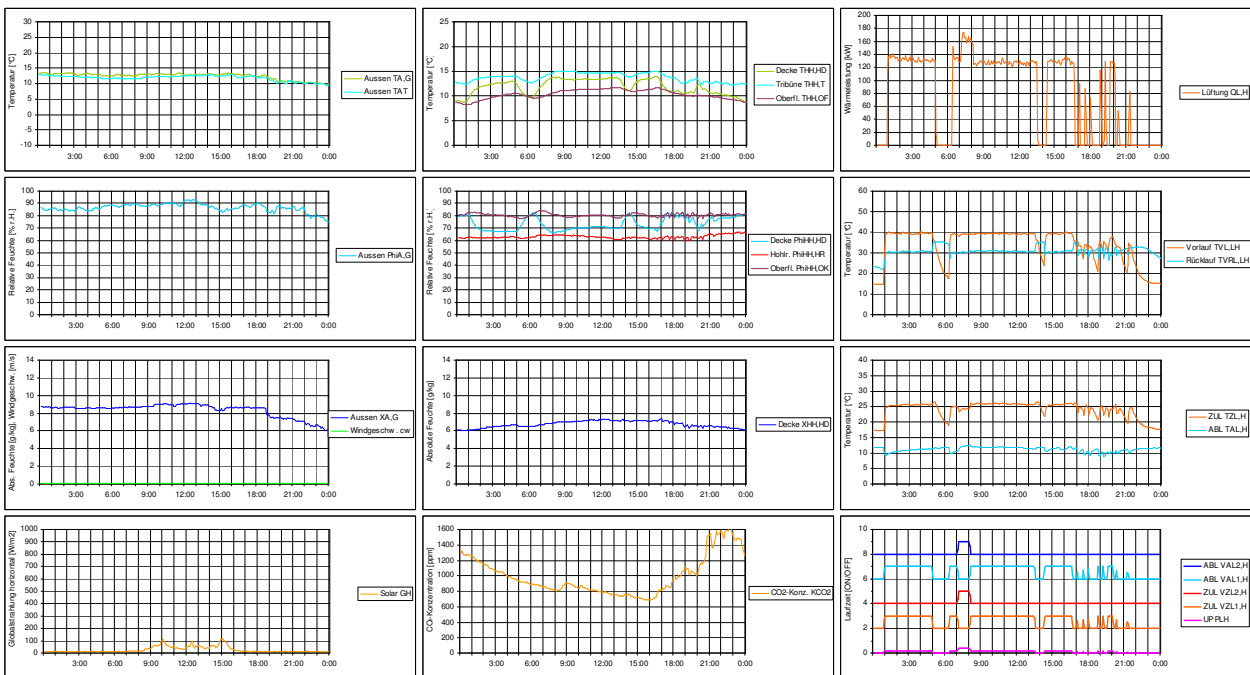
2. September 2004:

Mittlere Stahlträgertemperatur = 9.6 °C / Mittlere Wärmeleistung = 0.0 kW



5. November 2004:

Mittlere Stahlträgertemperatur = 9.6 °C / Mittlere Wärmeleistung = 80.1 kW



## Messungen der Kälteeinsparungen

### Rahmenbedingungen

Damit die Resultate der ersten Messperiode (8.9.03 bis 13.9.03 / Faserholzdecke) jenen der zweiten Messperiode (29.8.04 bis 9.9.04 / Aluminiumdeckenuntersicht) direkt und unmodifiziert gegenübergestellt werden können, müssten während beiden Messperioden identische Bedingungen in Bezug auf die Regelung der Lüftungsanlage vorliegen. Effektiv konnte diese Voraussetzung aus folgenden Gründen nur eingeschränkt erfüllt werden:

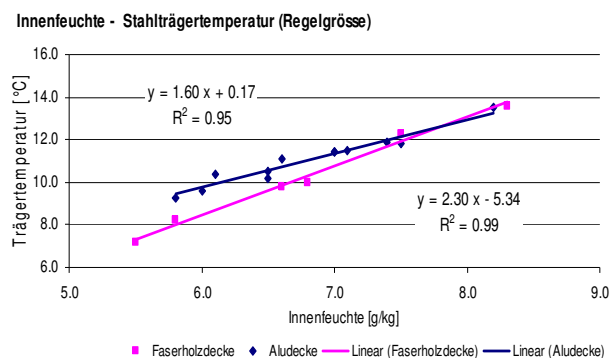
Unterschiedlicher Feuchteeintrag:

Zu Beginn der ersten Messperiode wurde die Halle versuchsweise CO<sub>2</sub>-geführt mit Frischluft versorgt. Da Zugserscheinungen im Winter ohne WRG nicht ausgeschlossen werden konnten, musste die Anlage noch im Verlauf der ersten Messperiode auf den reinen, ursprünglich geplanten Umluftbetrieb umgestellt werden. Die erhöhte Frischluftzufuhr während der ersten Messperiode führte jedoch zu einer klar höheren Raumluftfeuchte. Die beiden Messperioden können infolge des unterschiedlichen Feuchteintrags nicht ohne Transformation miteinander in Funktion des Aussenklimas verglichen werden.

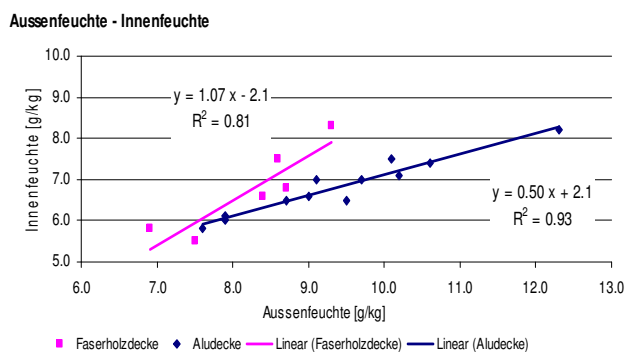
Überhitzung:

Weist die Aussenluft eine tiefe relative Feuchte auf und/oder liegt die Aussentemperatur wesentlich über der Hallenlufttemperatur, sinkt die relative Bauteil-Oberflächenfeuchte unter 80%, ohne dass die Lüftungsanlage dafür betrieben werden muss. Dies bedeutet, dass der Wärmebedarf für die Erwärmung der Hallenluft nicht über die Lüftungsanlage erbracht wird, sondern mit Gewinnen aus Transmissions- und Leckluftströmen gedeckt werden kann. Da der Wärmeenergiebedarf der Halle nach dem Einbau der Aludecke durch die reduzierte Deckenstrahlung offensichtlich stark gesenkt werden konnte, wurde die kritische Bauteil-Oberflächenfeuchte von 80% während der zweiten Messperiode selten erreicht. Das bedeutet, dass die Halle während der zweiten Messperiode höhere Temperaturen aufwies, als für die Gewährleistung der definierten Oberflächenfeuchte erforderlich waren.

Überhitzung während der 2. Messperiode



Erhöhter Feuchteeintrag in der 1. Messperiode



### Transformation:

Mit Hilfe der Transformation können auf der Basis gemessener Zusammenhänge für beide Messperioden identische Bedingungen simuliert werden. Da für die erste Messreihe im Zusammenhang mit der Inbetriebsetzung nur halb so viele Tagesdatensätze aufgezeichnet werden konnten, werden alle Transformationsbeziehungen aus der zweiten Messperiode abgeleitet und auf die erste Messperiode angewendet.

Beispiel: Kältebedarf in Funktion der Raumluftfeuchte

Die Überhitzung in der zweiten Messperiode verfälscht den Vergleich der Kältebedarfsdarstellung in Funktion Hallenraumluftfeuchte. Um die beiden Messperioden auf der Basis der selben Überhitzung (jener der zweiten Messperiode) miteinander vergleichen zu können, müssen die Innenfeuchtwerte der ersten Messperiode mit der linearen Beziehung „Innenfeuchte - Stahlträgertemperatur (Regelgrösse)“ der zweiten Messperiode und den Stahlträgertemperaturen der ersten Messperiode berechnet werden. Die korrigierte Darstellung des Kältebedarfs der ersten Messperiode beschreibt den Verlauf des Kältebedarfs in Funktion der Raumluftfeuchte unter Berücksichtigung der Überhitzung der zweiten Messperiode und basiert auf den gemessenen Kälteleistungswerten und den transformierten Innenfeuchtwerten.

## Interpretation der Messresultate

### Verbindlichkeit der Resultate:

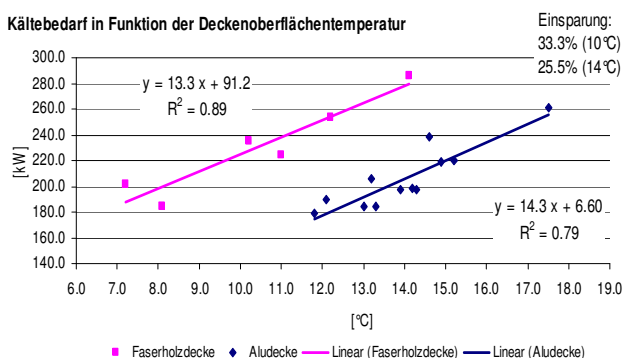
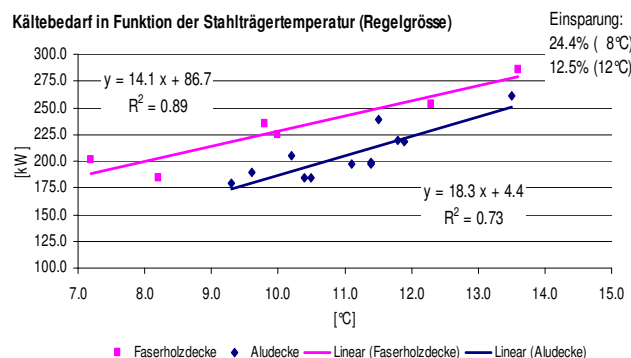
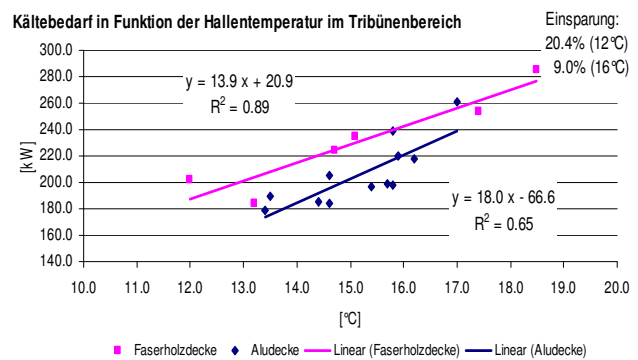
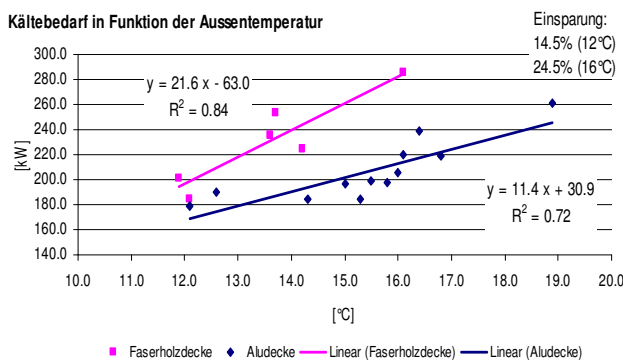
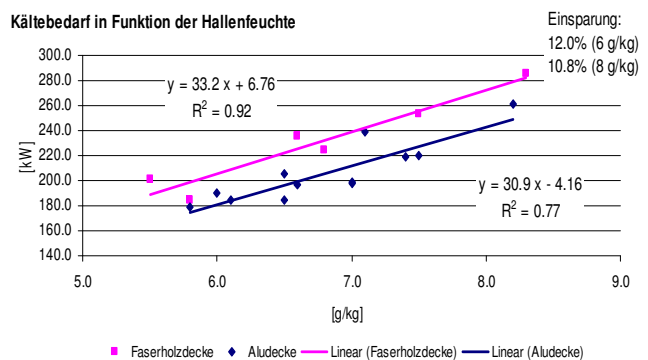
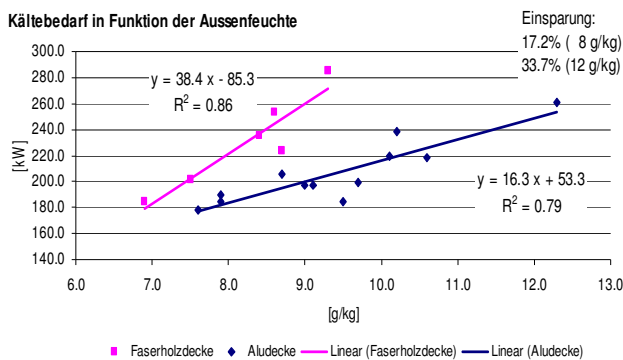
Da alle drei Eispisten ab dem selben Abscheider direkt mit flüssigem Ammoniak versorgt werden, kann der Kälteenergiebedarf der Hockehalle nur ausgewiesen werden, solange die beiden anderen Pisten nicht betrieben werden.

Die Messungen, die den direkten Vergleich des Kälteenergiebedarfs der Hockeyhalle mit und ohne Aluminiumdecke ermöglichen, mussten deshalb auf zwei sehr kurze Messperioden (8.9.03 bis 12.9.03 ohne Aludecke und 29.8.04 bis 9.9.04 mit Aludecke) beschränkt werden. Vorallem die Periode unmittelbar nach der Inbetriebnahme der totalsanierten Kälte- und Hallenlüftungsanlagen im Jahre 2003 liefert aus statistischer Sicht zu geringe Anzahl Messwerte, um einen wirklich eindeutigen Trend bestimmen zu können.

Die Kälteleistung kann infolge der Direktverdampfung nur über den Abwärmefall und den Elektrobedarf der Kompressoren ermittelt werden. Da sich die Abwärmeleistung aus der Leistung des Flusswasserkondensators und des Heissgasenthitzers, der Kälteleistung der Wärmepumpe und der nicht genutzten Maschinenabwärme zusammensetzt, weist die ermittelte Kälteleistung einen möglichen Fehler von  $\pm 3.5\%$  auf.

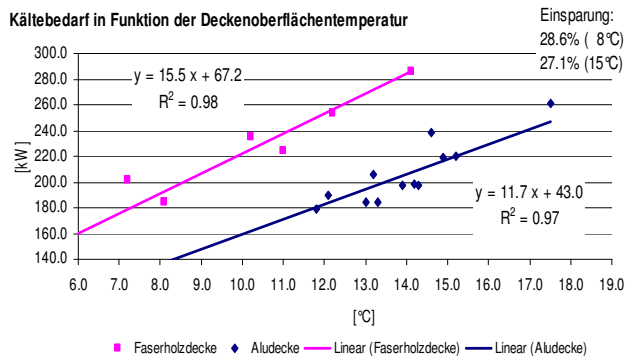
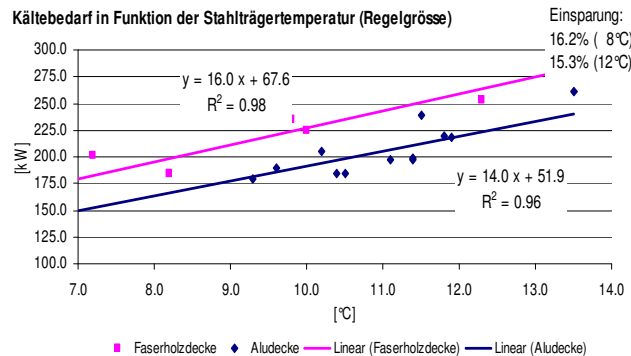
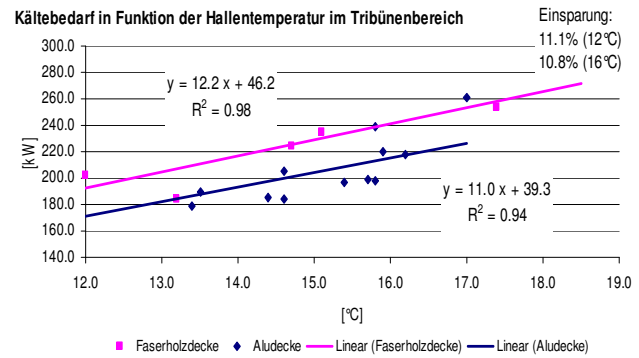
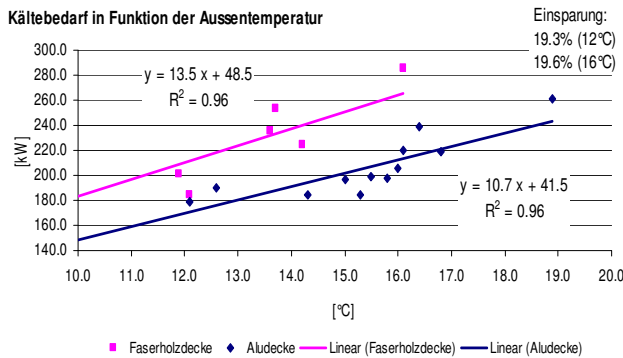
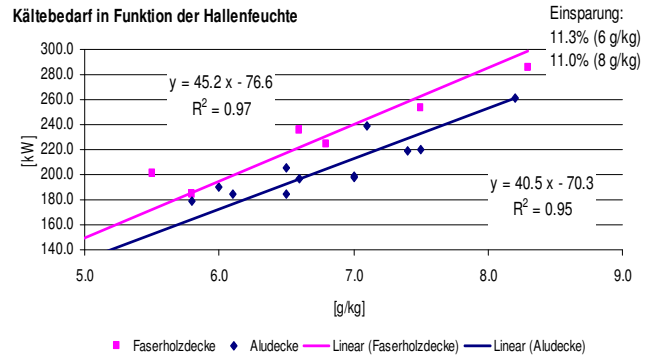
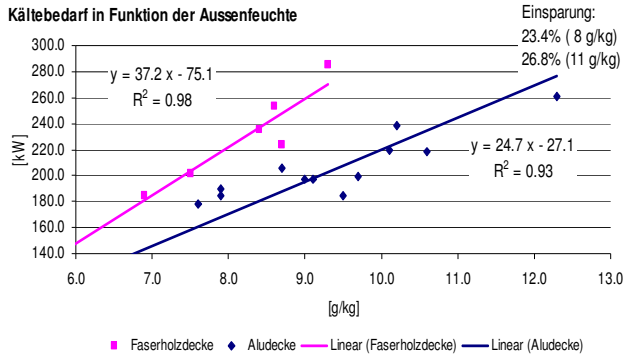
### Messresultate des Kältebedarf in Funktion verschiedener Referenzgrößen

Darstellung der unmodifizierten Messwerte ohne zusätzlichen theoretischen Nullpunkt:



Darstellung der unmodifizierten Messdaten mit zusätzlichem theoretischen Nullpunkt:

Alle dargestellten Auswertungen wurden um einen theoretisch extrapolierten Nullpunkt ergänzt. Wird die Kälteleistung in Funktion der absoluten Feuchte dargestellt, kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Feuchte von 2 g/kg keine Kälteenergie mehr benötigt wird (Voraussetzung: feuchtegeführter Ruhebetrieb ohne Beleuchtung und solare Einstrahlung). Analog dazu wird davon ausgegangen, dass bei einer Temperatur von -4 °C ebenfalls keine Kälteenergie mehr benötigt wird (Voraussetzung: Eisoberflächentemperatur = -4 °C; feuchtegeführter Ruhebetrieb ohne Beleuchtung und solare Einstrahlung).

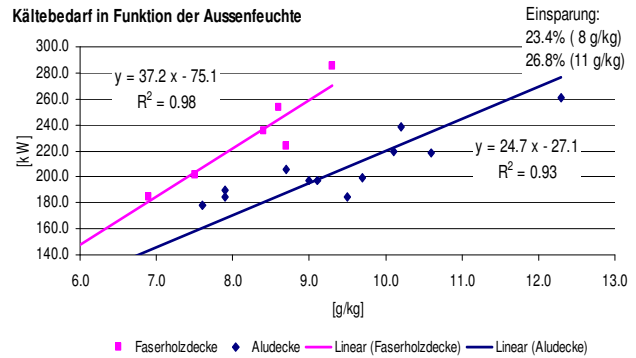
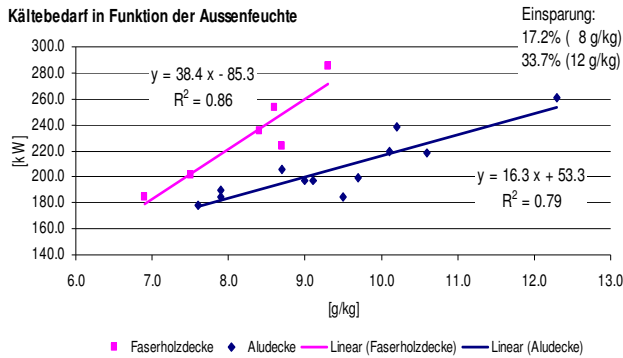


Feststellungen:

- Die Höhe der gemessenen Einsparungen, die auf die Installation der Aluminium-Deckenuntersicht zurückgeführt werden können, ist offensichtlich stark von der Referenzgrösse abhängig, anhand derer der Kältebedarf dargestellt wird.
- Die um den theoretischen Nullpunkt ergänzten Darstellungen weisen einen plausibleren Verlauf auf als die Auswertungen der reinen Messdaten

### Kältebedarf in Funktion der Aussenluftfeuchte

Trotz der plausibleren Resultate mit dem physikalischen Nullpunkt wird die Interpretation der Messdaten auf der Basis der unverfälschten Grafiken fortgesetzt.



#### Interpretation:

Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Aussenluftfeuchte ist nur bedingt zulässig, da die Halle einerseits wie unter „Aussenklimaeinflüsse“ erwähnt, während der ersten Messperiode intensiver mit Frischluft versorgt wurde. Die erhöhte Frischluftzufuhr in der ersten Messperiode führte deshalb klar zu einer höheren Raumluffteuchte.

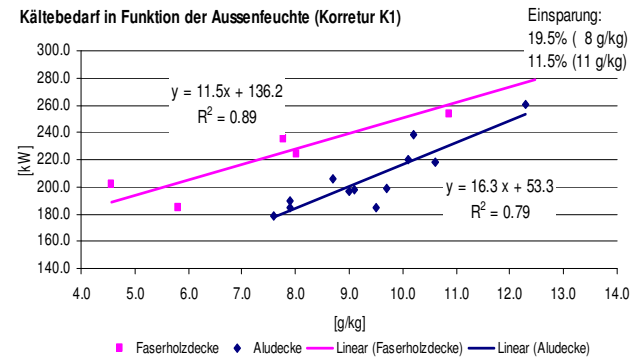
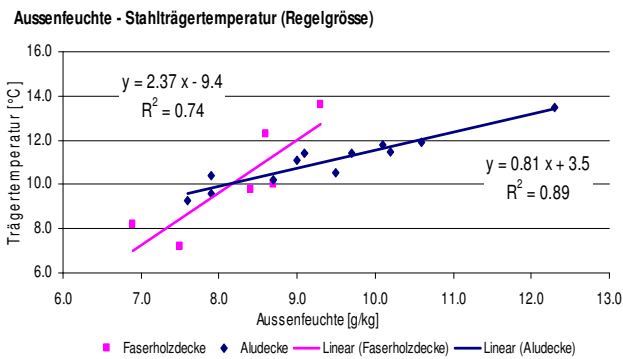
Andererseits überhitzte die Halle während der zweiten Messperiode, da der Wärmebedarf durch den Einbau der Aludecke stark gesenkt werden konnte (siehe „Aussenklimaeinflüsse“).

#### Transformationsziel:

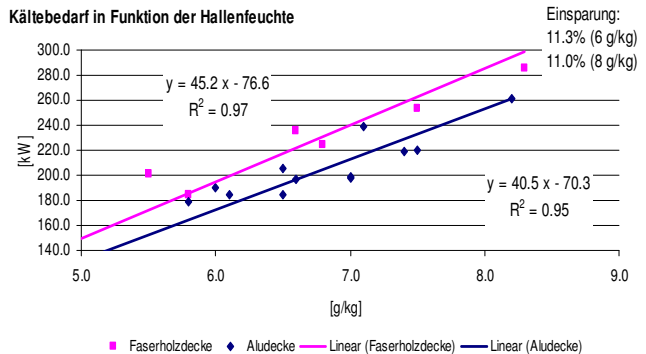
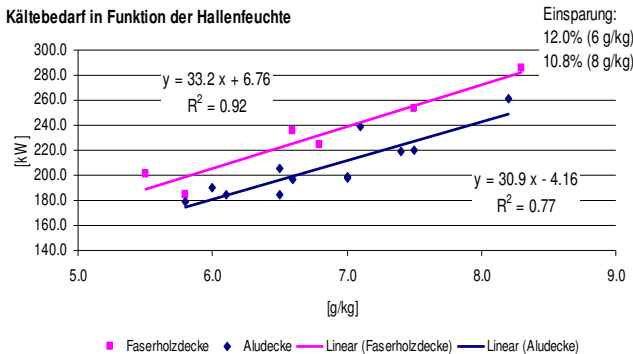
Vergleich der beiden Messperioden mit identischem Feuchteeintrag und identischer Überhitzung. Anwenden der Feuchteeintrags- und Überhitzungsverhältnisse der zweiten Messperiode auf die erste.

#### Transformationsgleichung:

$$x(\text{aussen};1.MP) = (T(\text{Stahlträger};1.MP) - 3.5) / 0.81$$



**Kältebedarf in Funktion der Hallenraumlufffeuchte:**



**Interpretation:**

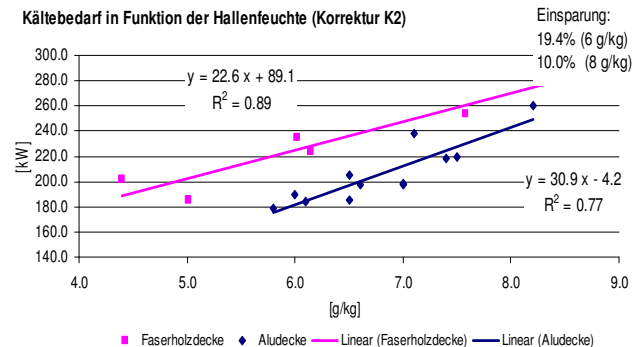
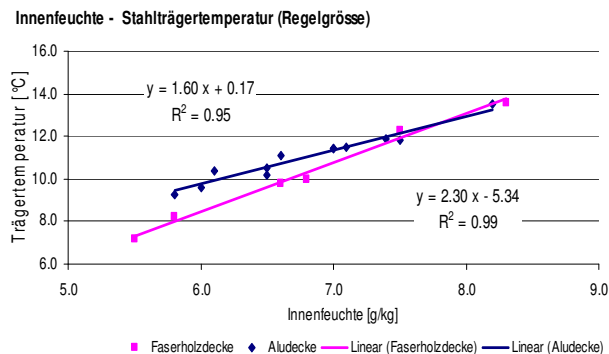
Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Hallenraumlufffeuchte ist grundsätzlich korrekt, da die erforderliche Stahlträgertemperatur direkt von der Innenfeuchte abhängig ist. Effektiv überhitzte die Halle im Gegensatz zur ersten Messperiode aber nach dem Einbau der Aluminiumdecke infolge der reduzierten Deckenstrahlung (siehe „Aussenklimaeinflüsse“).

**Transformationsziel:**

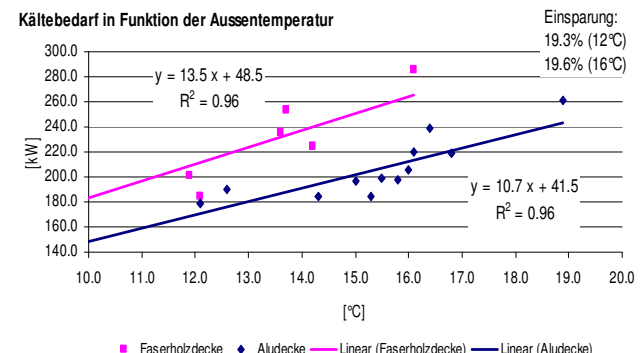
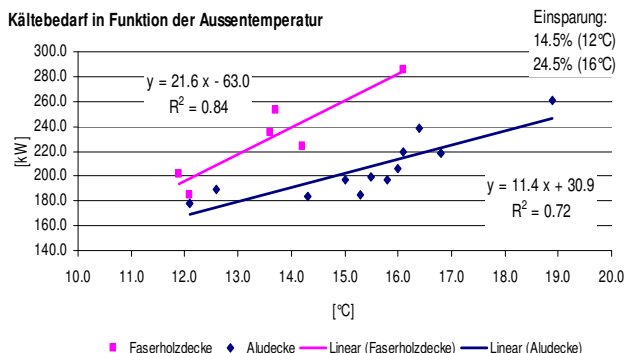
Vergleich der beiden Messperioden mit identischer Überhitzung. Anwenden der Überhitzungsverhältnisse der zweiten Messperiode auf die erste.

**Transformationsgleichung:**

$$x(\text{innen}; 1.MP) = (T(\text{Stahlträger}; 1.MP) - 0.17) / 1.60$$



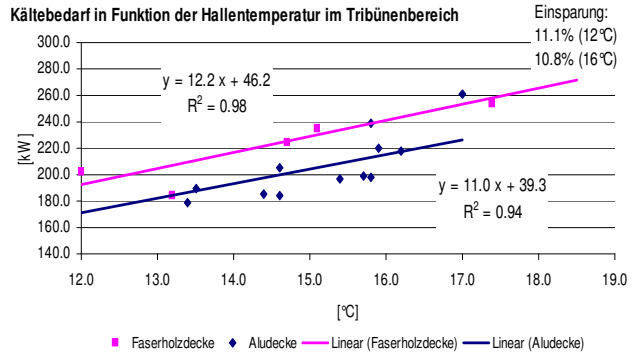
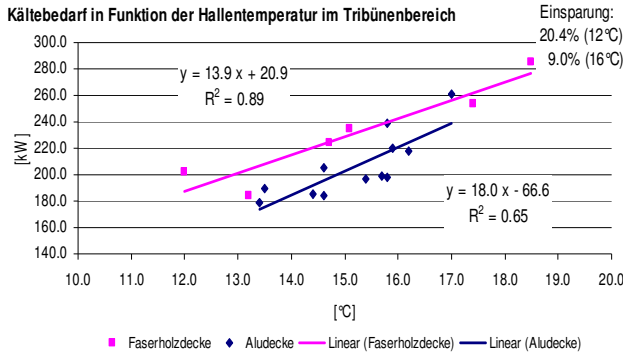
**Kältebedarf in Funktion der Aussentemperatur:**



**Interpretation:**

Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Aussentemperatur ist nicht aussagekräftig, da kein physikalischer Zusammenhang zwischen der Aussenfeuchte und der Aussentemperatur hergestellt werden kann.

**Kältebedarf in Funktion der Tribünenentemperatur:**



**Interpretation:**

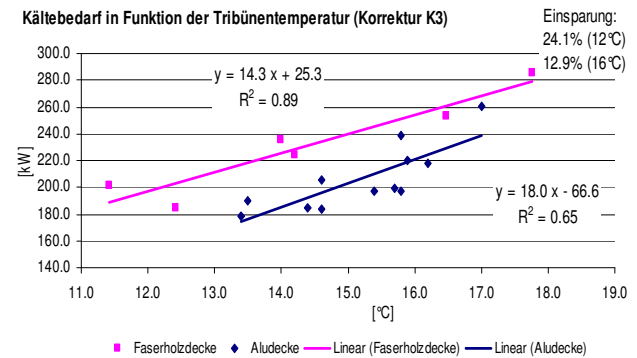
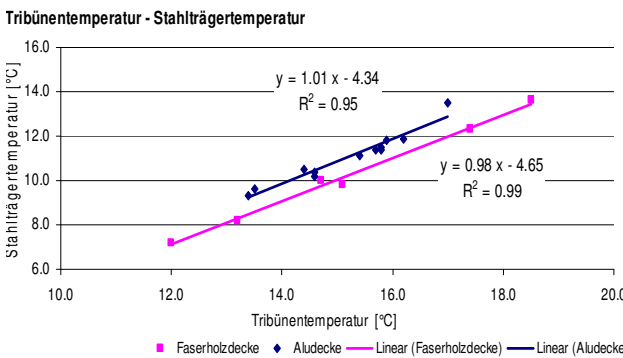
Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Lufttemperatur im Tribünenbereich ist nur bedingt zulässig, da die Halle über dem Eisfeld mit der Aludecke deutlich weniger beheizt werden muss, als dies mit der Holzdecke der Fall war (Diagramm „Tribünenentemperatur - Stahlträgerentemperatur“). In der Folge liegt die Tribünenentemperatur bezogen auf die Trägeroberflächentemperatur mit der Aludecke tiefer als mit der Holzdecke.

**Transformationsziel:**

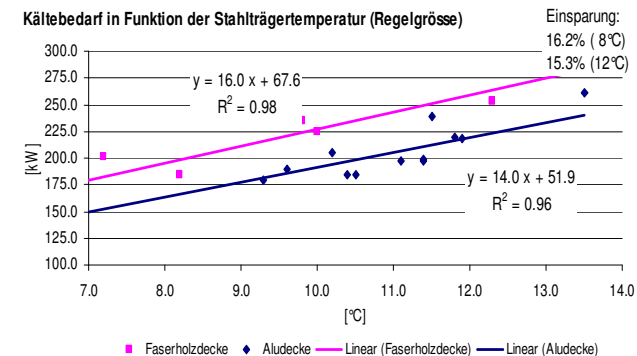
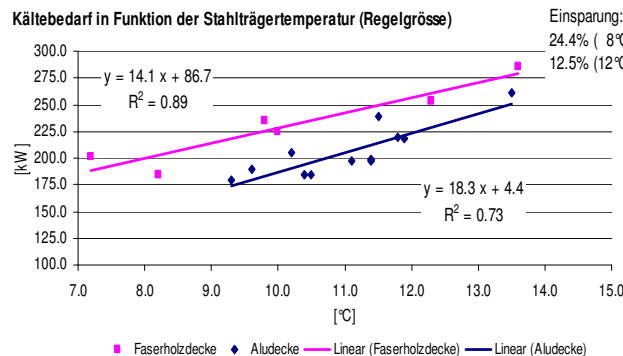
Vergleich der beiden Messperioden mit identischem Temperaturgradienten zwischen Tribünen- und Träger-temperatur. Anwenden des Temperaturgradienten der zweiten Messperiode auf die erste.

**Transformationsgleichung:**

$$T(\text{Tribüne}; 1.\text{MP}) = (T(\text{Stahlträger}; 1.\text{MP}) + 4.34) / 1.01$$



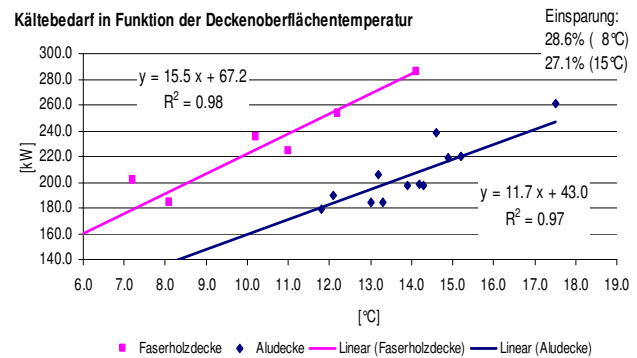
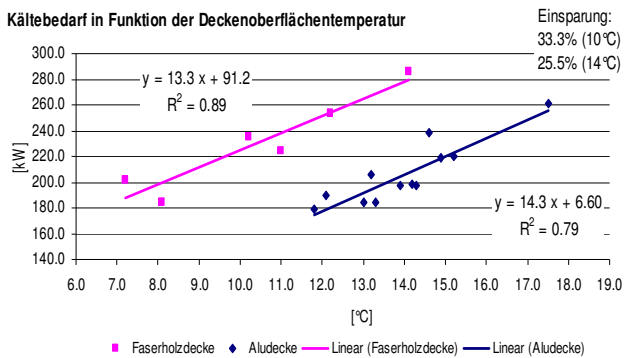
**Kältebedarf in Funktion der Stahlträgerentemperatur:**



**Interpretation:**

Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Deckenoberflächentemperaturen ist ohne Einschränkungen zulässig, da die Stahlträgerentemperatur während beiden Messperioden die Regelgröße darstellte.

## Kältebedarf in Funktion der Deckenoberflächentemperatur:



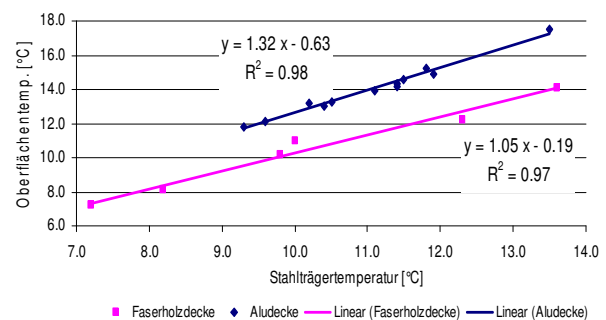
### Interpretation:

Der Vergleich der beiden Messperioden auf der Basis der Deckenoberflächentemperaturen ist nicht zulässig, da die Oberflächentemperatur der Aludecke in Funktion der Stahlträgertemperatur deutlich über der Holzdeckentemperatur liegt.

Während die Oberflächentemperatur der Holzdecke identisch mit der Stahlträgertemperatur (lackierte Oberfläche) verläuft (beides quasi schwarze Körper), liegt die Aludeckentemperatur immer wesentlich über der Stahlträgertemperatur (Diagramm „Stahlträger-Deckenoberflächentemperatur“).

Würde die feuchtegeführte Wärmezufuhr während der zweiten Messperiode in Funktion der Aluminium-Oberfläche geregelt, wäre der Vergleich des Kältebedarfs in Funktion der unterschiedlichen Deckenoberflächentemperaturen ohne Einschränkungen zulässig und die Einsparungen durch den Einsatz einer Aludeckenuntersicht entsprechend hoch. In der Praxis können Aludeckenkonstruktionen jedoch selten vollflächig umgesetzt werden. Die Wärmezufuhr muss zur Vermeidung von Kondensatausfall deshalb meistens in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur anderer strahlungsexponierter Bauteile mit nicht metallischen Oberflächen vorgenommen werden. Auf eine Transformation wird verzichtet.

### Stahlträgertemperatur - Deckenoberflächentemperatur



## Fazit

Infolge der feuchtegeführten Beheizung wird die Raumlufttemperatur der Halle im Spätsommer immer durch die Raumluftfeuchte bestimmt. Diese wird während der Nacht ausschliesslich durch den Feuchteeintrag über die Leckluftströme beeinflusst. Da die Gebäudehülle zwischen den beiden Messreihen nicht abgedichtet wurde, ist der Feuchteeintrag bezogen auf die beiden Messreihen allein von der absoluten Aussenluftfeuchte abhängig. Die Hallentemperatur steht deshalb zusammengefasst unter dem direkten Einfluss der Aussenluftfeuchte. Der Vergleich des Kälteenergiebedarfs der Halle mit und ohne Aludecke müsste demzufolge in Funktion der absoluten Aussenluftfeuchte vorgenommen werden.

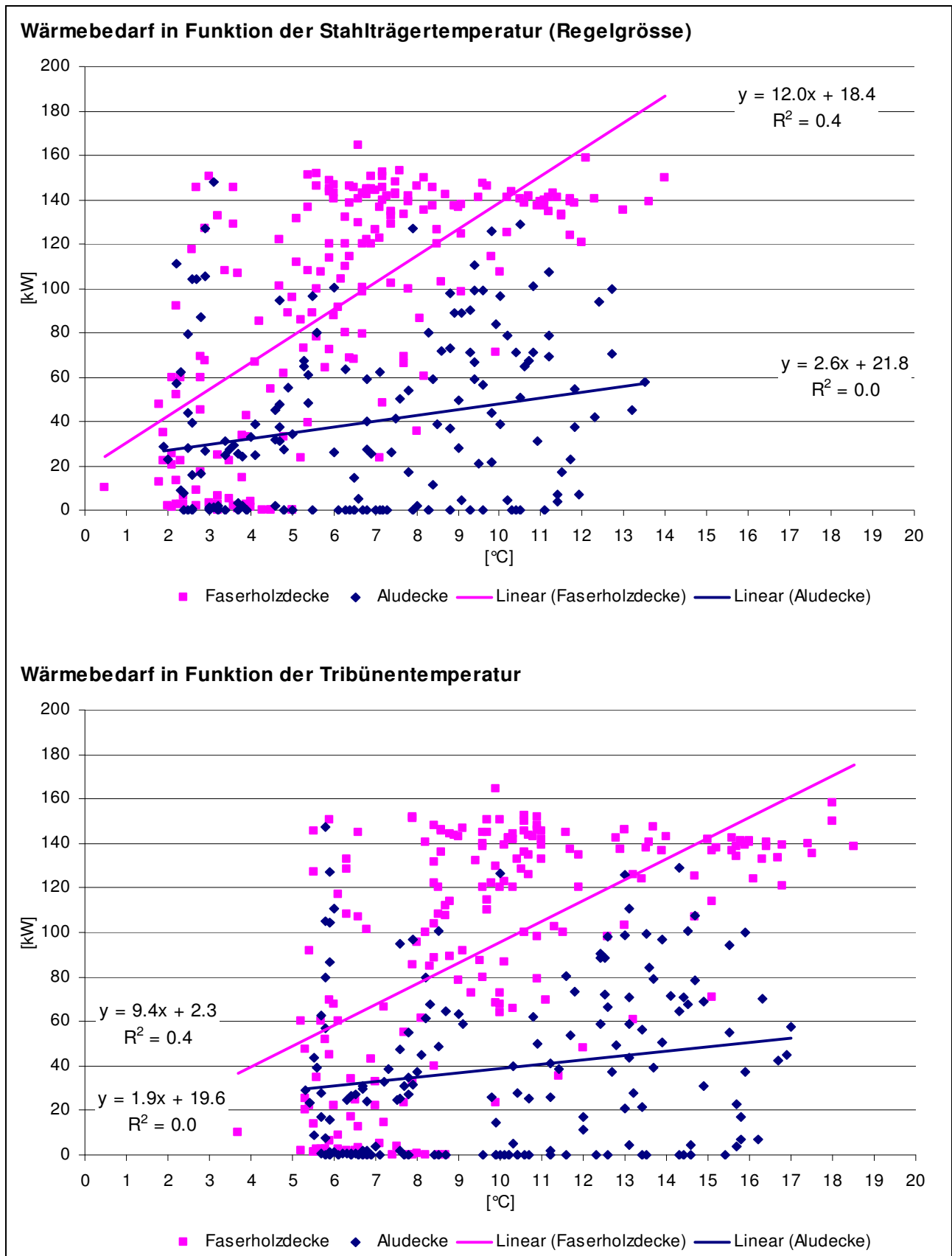
Da die Halle mit der Aludecke jedoch infolge der reduzierten Deckenstrahlung im Spätsommer deutlich häufiger überhitzt (die relative, kritische Bauteilfeuchte sinkt ohne Beheizung unter den Sollwert von 80%) und die Frischluftzufuhr und damit auch der Feuchteeintrag während der Aufzeichnung der ersten Messreihe infolge veränderter Regelparameter grösser war als in der zweiten, treffen die vorgängig erwähnten Zusammenhänge nicht mehr uneingeschränkt zu.

Durch die vorgenommenen Transformationen konnte die Vergleichbarkeit der beiden Messreihen zwar hergestellt werden. Trotzdem muss aufgrund der abweichenden Resultate bezogen auf die Referenzgrössen davon ausgegangen werden, dass für eine verbindliche quantitative Aussage zu wenig Messwerte aufgezeichnet werden konnten.

Anhand der Auswertungen kann hingegen zweifelsfrei aufgezeigt werden, dass der Kälteenergiebedarf mit der Aluminiumdeckenuntersicht unabhängig von der Betrachtungsweise eindeutig tiefer liegt als mit der Holzfaserdecke.

## Messungen des Wärmeleistungsbedarfs

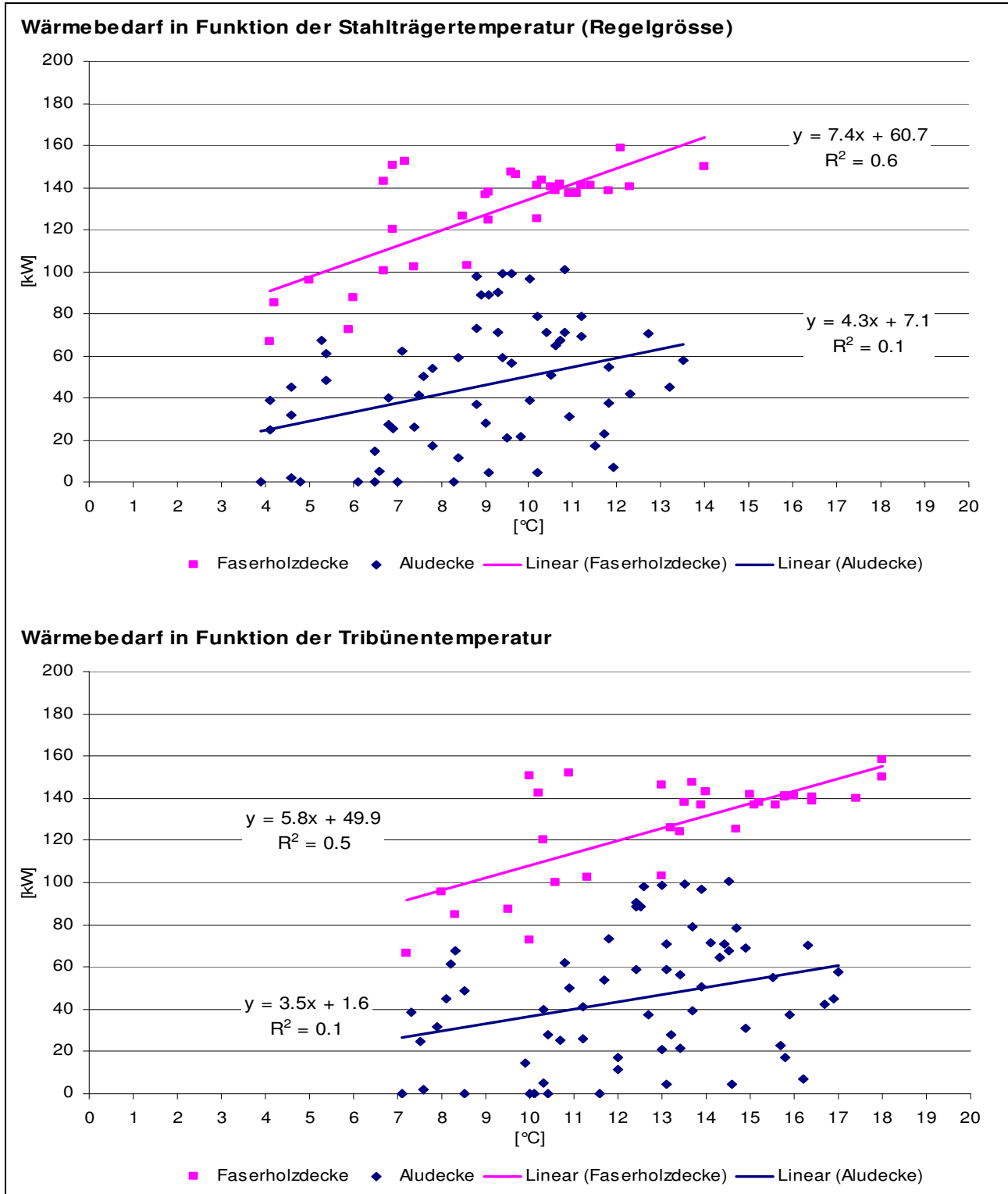
### Ungefilterte Daten ohne physikalischem Nullpunkt



## Gefilterte Daten ohne physikalischem Nullpunkt

Die Dargestellten Daten erfüllen folgende Bedingungen:

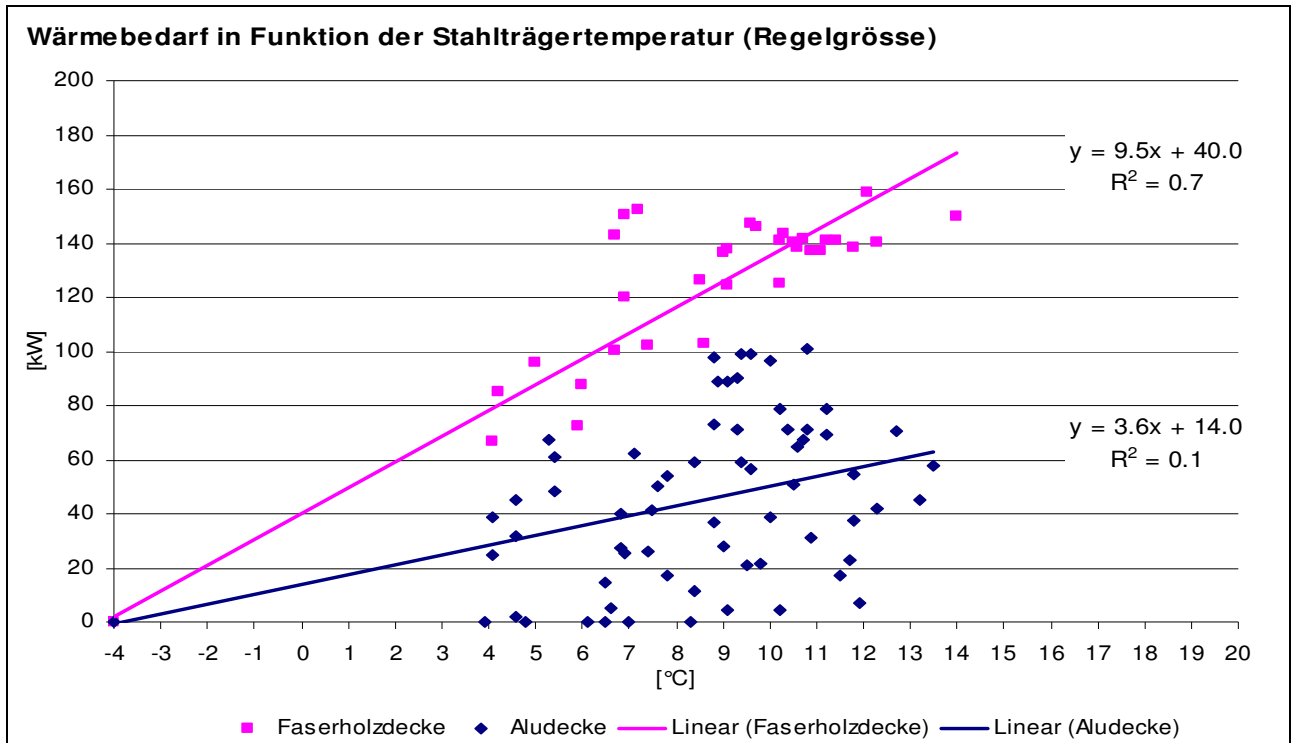
- Tribünen Temperatur > 7°C / Keine Nutzung und Beleuchtung während den nächtlichen Messperioden
- Differenz der Faserholzdeckentemperatur zur Aussentemperatur ist immer kleiner als 1.8K oder grösser - 1.8K
- Die kritische Bauteilfeuchte liegt im Schnitt der jeweiligen Nachtperiode zwischen 78% und 82%



### Gefilterte Daten mit physikalischem Nullpunkt (-4 °C / 0 kW)

Die Dargestellten Daten erfüllen folgende Bedingungen:

- Tribünentemperatur > 7 °C / Keine Nutzung und Beleuchtung während den nächtlichen Messperioden
- Differenz der Faserholzdeckentemperatur zur Aussentemperatur ist immer kleiner als 1.8K oder grösser - 1.8K
- Die kritische Bauteilfeuchte liegt immer zwischen 78% und 82%



#### Wärmebedarf in Funktion der Tribünentemperatur

