



Technische Universität Graz
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

Thermische Betrachtung der offenen Eissporthalle Bergheim

Masterarbeit

von

Josef Prattes

Eingereicht am

Institut für Hochbau

zur Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
der Studienrichtung Konstruktiver Ingenieurbau – Bauingenieurwissenschaften

Betreuer:

Univ.-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr.iur. Dr.techn. Peter Kautsch

Graz, im Juli 2015

Eidesstattliche Erklärung
STATUTORY DECLARATION

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

Unterschrift / *Signature*

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich während des Verfassens meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Für die geduldige Betreuung danke ich Herrn Univ.-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr.iur. Dr.techn. Peter Kautsch und Herrn Arch. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Grobbauer.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich über die gesamte Ausbildungszeit unterstützt hat.

KURZFASSUNG

Titel: Thermische Betrachtung der offenen Eissporthalle Bergheim

Autor: Josef Prattes

1. Stichwort: Kondensation
2. Stichwort: Wärmespeicherverhalten
3. Stichwort: Simulation

Die Problematik der Wasserdampfkondensation an der Deckeninnenseite von offenen Eissporthallen führt zu in der Literatur häufig erwähnten Bauschäden. Die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Kondensationsreduktion beschränken sich bislang auf Strahlungsschirme sowie wärmegeämmte Unterdecken in einer belüfteten Dachkonstruktion.

Bei der Konstruktion der offenen Eissporthalle Bergheim wurde zur Kondensationsreduktion eine hohe Wärmespeichermasse der Dachplatte sowie die Verwendung von sägerauen Holzbauteilen als mögliche Problemlösung erkannt. Um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu evaluieren, wurden während zwei Eislaufperioden Temperatur- und Luftfeuchtemessungen an der Eissporthalle durchgeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die vorhandenen Messungen ausgewertet und hinsichtlich des Feuchteverhaltens der Dachkonstruktion (Oberflächenkondensation an der Innenseite der Dachplatte sowie Wärmespeicherverhalten der Dachplatte) interpretiert. In den Messdaten zeigt sich, dass die Lufttemperatur im Dachraum meist unter der Außenlufttemperatur liegt. Grund dafür ist der konvektive Wärmeaustausch mit der Eisfläche. Diese Abkühlung führt dazu, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum über die relative Feuchtigkeit der Außenluft steigt. Auch die Innenseite der Dachplatte wird infolge des Wärmestrahlungsaustausches mit der Eisfläche abgekühlt. Die Bedingungen für die Kondensation an der Innenseite der Dachplatte sind einerseits von der Außenluftfeuchte und andererseits vom Wärmespeicherverhalten der Dachplatte abhängig. Dass das Wärmespeicherverhalten der Dachplatte zur Verringerung der Oberflächenkondensation beiträgt, kann qualitativ aus der Messung abgeleitet, quantitativ jedoch nicht erfasst werden.

In weiterer Folge wird ein vereinfachtes physikalisches Modell, das das thermische Verhalten der Eissporthalle abbildet, ausgearbeitet. Zur Abschätzung des natürlichen Luftwechsels der Eissporthalle sowie des Wärmestrahlungsaustauschs im Inneren der Halle werden stationäre Betrachtungen durchgeführt. Die Validierung des instationären thermischen Simulationsmodells der Eissporthalle, das auf dem physikalischen Modell basiert, ergibt eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Kondensationsdauer an der Dachplatteninnenseite zwischen der Messung und der Simulation.

Mit dem validierten Simulationsmodell wird schließlich der Effekt von Variationen des Dachaufbaus auf die Kondensationsdauer an der Innenseite der Dachplatte abgeschätzt. Es zeigt sich, dass der Einsatz einer Wärmedämmung einen stärkeren Einfluss auf die Kondensationsdauer hat als eine Erhöhung der Wärmespeichermasse. Ob sich eine schädliche Bauteilfeuchte in der Dachkonstruktion einstellt, kann mit den angestellten Untersuchungen nicht beurteilt werden.

ABSTRACT

Title: Thermic evaluation of the open ice pavilion Bergheim

Author: Josef Prattes

1st keyword: Condensation

2nd keyword: Thermal capacity

3rd keyword: Simulation

The problem of condensation of air humidity on the inside ceiling surface of open ice pavilions leading to structural damage is often mentioned in literature. Recommended measures available so far to lower condensation are solely installation of radiation shields and a thermally insulated suspended ceiling ventilated at rear.

When constructing the open ice pavilion Bergheim a high thermal capacity of the roof tile and the use of rough cut wooden structural elements was identified as potential answer to the condensation problem. In order to evaluate the effectiveness of this approach, measurements of temperature and air humidity were performed over two periods of ice pavilion operation.

In the scope of this work the available measurement data is evaluated with respect to the moisture behavior of the roof construction (condensation on the inside surface of the roof as well as thermal capacity performance of the roof tile). From the measurement data it is obvious that the air temperature in the attic is mostly below the ambient temperature. This cooling-down is due to convective heat exchange with the ice and leads to a rise in relative air humidity in the attic to values higher than in the ambience. The inside of the roof tile is also cooled down as a result of radiative heat exchange with the ice. The conditions for condensation on the inside surface of the roof tile are on the one hand dependent on the ambient air humidity and on the other hand on the thermal capacity performance of the roof tile. The fact that the thermal capacity performance of the roof tile contributes to a reduction in condensation on the surface can be derived from the measurement data; however, the amount of contribution cannot be quantified.

In the next step a simplified physical model that represents the thermal performance of the ice pavilion is elaborated. To estimate the natural ventilation rate of the pavilion and the heat radiation exchange rates between the inside surfaces steady-state calculations are performed. Validation of the transient thermic simulation model of the ice pavilion that is based on the physical model shows good accordance between measurements and simulation with respect to the duration of condensation on the inside of the roof tile.

Finally the effect of different roof setups on the duration of condensation on the inside of the roof tile is evaluated using the validated simulation model. It becomes apparent that inserting a thermal insulation layer has a higher impact on the duration of condensation than increasing the thermal capacity of the roof tile. However, the performed evaluation is not appropriate to show if the moisture in the constructive elements reaches a range where it gets destructive.

INHALT

1	EINLEITUNG	1
1.1	Arten von Eissportanlagen	1
1.2	Bauschäden infolge Oberflächenkondensat bei Dachkonstruktionen offener Eissporthallen	2
1.3	Problemstellung	3
1.4	Aufgabenstellung	5
2	GRUNDLAGEN	6
2.1	Wärmetransportmechanismen	6
2.1.1	Wärmeleitung	6
2.1.2	Konvektion.....	9
2.1.3	Wärmestrahlung	12
2.2	Wärmedurchgang	20
2.3	Temperaturmessung	22
2.3.1	Oberflächentemperatur.....	22
2.3.2	Lufttemperatur	25
2.4	Kondensationsschutz	26
2.4.1	Kondensationsschutz im Hochbau nach ÖNORM B 8110-2.....	26
2.4.2	Kondensationsschutz bei offenen Eissporthallen	27
3	MESSUNG UND AUSWERTUNG.....	29
3.1	Beschreibung des überdachten Eislaufplatzes Bergheim	29
3.1.1	Tragsystem und Konstruktionsaufbau	29
3.1.2	Anlagentechnische Ausstattung und Betriebscharakteristik.....	33
3.2	Messziele und Messeinrichtung	34
3.2.1	Messziele	34
3.2.2	Messeinrichtung	34
3.3	Auswertung und Interpretation der Messdaten	36
3.3.1	Anmerkung zur Messunsicherheit	37
3.3.2	Interpretation der Messung 2010.....	37
3.3.3	Interpretation der Messung 2010/2011	45
4	ENTWICKLUNG EINES PHYSIKALISCHEN MODELLS	52
4.1	Natürlicher Luftwechsel und konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	52

4.1.1	Strömungsgeschwindigkeiten auf Basis der logarithmischen Höhenformel	52
4.1.2	Natürlicher Luftwechsel	54
4.1.3	Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten.....	57
4.2	Physikalisches Modell.....	60
4.2.1	Methode	60
4.2.2	Modell 1 bis 3 - langwelliger Strahlungsaustausch	62
4.2.3	Modell 4.....	73
5	THERMISCHE SIMULATION DER EISSPORTHALLE	77
5.1	Kurzbeschreibung von Type56.....	77
5.2	Simulationsmodell.....	77
5.3	Validierung des Simulationsmodells	81
5.4	Variation des Dachaufbaus.....	82
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	85
	FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN	86
	Formelzeichen.....	86
	Abkürzungen.....	87
	ANHANG	92
	F₁₂ für parallele, nicht gleiche Rechteckflächen	92
	Mittlerer Quadrat-Wurzel-Fehler WMQF	92
	Vertikal- und Horizontalschnitt der Eishalle Bergheim.....	93
	Messung 2010 – Messwerte 21.02. bis 08.04.	94
	Messung 2010/2011 – Messwerte 17.10. bis 17.04.....	96
	Klimdaten ZAMG	103
	GA3 und GA4.....	105
	Volumen und Flächen des Simulationsmodells	106
	Simulationsergebnisse TRNSYS	107
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	111
	TABELLENVERZEICHNIS	113

1 EINLEITUNG

Die in der heutigen Zeit beobachtbare Vielzahl an Sportstättenbauten unterschiedlicher Nutzung ist Ausdruck des menschlichen Grundbedürfnisses nach körperlicher Bewegung.

Neben den gebäudetechnisch weniger anspruchsvollen Sporthallen, z.B. für Ballsportarten wie Fußball und Handball, ist in den letzten Jahrzehnten eine Zunahme an Eissporthallen aufgrund der Leistbarkeit dieser für Kommunen und die Beliebtheit des Eissports bei den Bürgern feststellbar.

Eine große Herausforderung für die Planer und letztendlich Betreiber von Eissporthallen stellt das physikalische Phänomen der Wasserdampfkondensation an der Deckeninnenseite dieser dar und führt insbesondere bei offenen Eissporthallen zu einer auffälligen Häufung von Bauschäden.

Hauptursachen für die Kondensatbildung sind einerseits die Abkühlung der Deckenkonstruktion unter den Taupunkt, hervorgerufen durch den Strahlungsaustausch mit der Eisfläche, und andererseits, je nach Witterung, die Zunahme der Luftfeuchtigkeit in der Eissporthalle durch den Luftwechsel zwischen feuchter Außenluft und Hallenluft.

Im Folgenden werden die begrifflichen und baulichen Unterschiede zwischen offener und geschlossener Eissporthalle erörtert. Zwei offene Eissporthallen werden vorgestellt und auf die infolge von Oberflächenkondensat entstandenen Bauschäden an der Dachkonstruktion eingegangen. Anschließend werden die in der Fachliteratur angeführten Lösungsansätze zur Minderung von Oberflächenkondensat zusammengefasst und daraus die Aufgabenstellung dieser Arbeit abgeleitet.

1.1 Arten von Eissportanlagen

Grundsätzlich wird in der DIN 18036 [1, S.9] hinsichtlich des Hallenbetriebes zwischen vier Arten von Eissportanlagen unterschieden, deren Gemeinsamkeit in der Eisfläche besteht, wobei die Eiserzeugung mit Hilfe von Kältemaschinen erfolgt:

- Unter einer *offenen Eissportanlage* wird eine Eisfläche verstanden, die den Witterungseinflüssen durch Regen, Wind, Schnee und Sonnenstrahlung ausgesetzt ist und folglich nur eingeschränkter Betrieb erlaubt.
- In der *überdachten Eissportanlage* ist ein durch Witterungseinflüsse weniger beeinträchtigter Betrieb als bei offenen Eissportanlagen möglich.
- Ein weitgehend witterungsunabhängiger Betrieb ist in einer *offenen Eissporthalle* möglich.
- Die *geschlossene Eissporthalle* kann unabhängig von der Witterung ganzjährig betrieben werden.

Der Begriff „offene Eissporthalle“ ist laut DIN 18036 [1, S.8] in Hinblick auf die Größenverhältnisse und die Anordnung der Hallenwände folgenderweise definiert: „*überdachte, allseitig maximal 70 % umschlossene Eisfläche mit im Regelfall an zwei gegenüberliegenden Wand-*

seiten jeweils unverschließbaren Öffnungen von mindestens je 60 m² sowie den für die Nutzung erforderlichen Betriebsräumen“.

Ergänzend zur Definition der offenen Eissporthalle nach DIN 18036 [1] wird an dieser Stelle eine Typisierung der offenen Eissporthalle bezüglich des Dachkonstruktionsaufbaues vorgenommen:

- Die primäre Tragkonstruktion des *Hallentyps I* besteht aus Einfeld-, Fachwerks- Dreigelenksbögen etc., auf die raumabschließend eine ungedämmte Dachschaale montiert wird, die häufig aus einer Pfettenkonstruktion mit darauf befestigten großformatigen Dachtafeln besteht.
- Der *Hallentyp II* unterscheidet sich vom Typ I durch eine gedämmte Dachschaale, die ein- oder mehrschichtig aufgebaut ist.

Bei der geschlossenen Eissporthalle ist neben der Art des Dachaufbaus die Möglichkeit der Raumluftkonditionierung als Unterscheidungsmerkmal zur offenen Eissporthalle festzustellen. Mit Hilfe von raumluftechnischen Anlagen (RLT), kann die Hallenluft ausgetauscht, beheizt, gekühlt und entfeuchtet werden. Abhängig vom Konditionierungskonzept des Planers kann beispielsweise eine RLT installiert werden, die nur dem Luftaustausch dient, oder alle vorhin erwähnten Aufgaben abdeckt.

Da bei geschlossenen Eissporthallen ein ganzjähriger Betrieb angestrebt wird, sind die Dach- und Wandkonstruktionen in der Regel gut wärmegeklämt.

1.2 Bauschäden infolge Oberflächenkondensat bei Dachkonstruktionen offener Eissporthallen

Bei offenen Eissporthallen kommen bevorzugt Holzwerkstoffe für die Dachkonstruktion zur Anwendung. In der Literatur finden sich einige Aufsätze über die Oberflächenkondensatbildung an hölzernen Deckenkonstruktionen offener Eissporthallen und den daraus resultierenden Feuchteschäden an den Konstruktionsteilen, wobei sich die Hallendächer bezüglich des konstruktiven Aufbaues sehr ähnlich sind und auch entsprechend häufig von gleichen Schadensbildern berichtet wird. Neben der Schädigung von Bauteilen führt von der Hallendecke auf die Eisfläche abtropfendes Kondensat zur Eispickelbildung, was mit einem erhöhten Kostenaufwand für die Eispflege verbunden ist.

Im Folgenden wird für den offenen Eissporthallentyp I und II je ein Fallbeispiel für die dabei beobachteten Bauschäden, verursacht durch Oberflächenkondensat, kurz wiedergegeben.

Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I

Beim Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I (Abb. 1-1) handelt es sich um eine 1982 in Bitburg erbaute Eissporthalle, die von Fritzen [2, S.40 ff] begutachtet wird. Das Dachtragwerk besteht aus Dreigelenkfachwerkträgern (Obergurt in Brettschichtholz (BS) mit chemischem Holzschutz, Untergurt aus Spannstahl) die auf eingespannten Betonstützen lagern. Die ungedämmte Dachschaale wird aus einer Asbestzement-Wellplatten-Dachdeckung und den Koppelpfetten aus Kantholz gebildet. Fritzen [3, S.44] stellt erhebliche Korrosionserschei-

nungen an den Stahlteilen im Inneren der Halle fest. Holzfeuchtemessungen bei den BS-Obergurten ergeben über eine Höhe von 133 cm stark unterschiedliche Werte. Im unteren Bereich der BS-Obergurte, also der Eisfläche zugewandten Seite, werden Holzfeuchten über 30 % festgestellt, wobei nach oben hin die Holzfeuchte abnimmt. Ein holzerstörender Pilzbefall ist an den Oberflächen trotz der hohen Holzfeuchte nicht erkennbar.

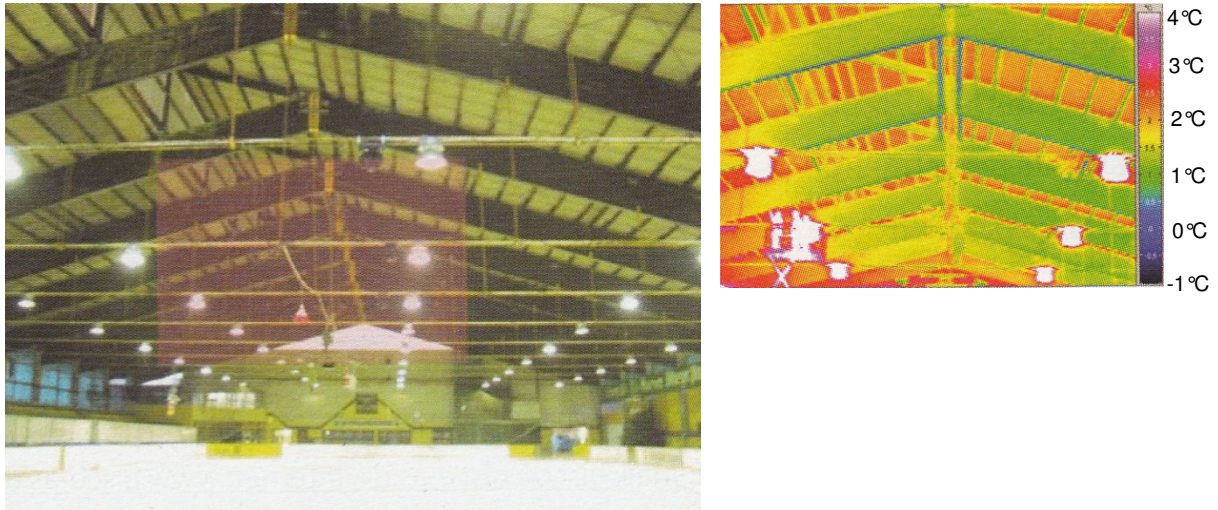


Abb. 1-1: Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I, Fritzen [2, S.40]
Links: Innenansicht der Halle in Bitburg; rechts: Thermografie-Aufnahme.

Fallbeispiel für den Eissporthallentyp II

Als Fallbeispiel für den Eissporthallentyp II (Abb. 1-2) wird die 1978 erbaute Eissporthalle Hannover gewählt, die von Marquardt und Mainka [3, S.91ff] erwähnt wird. Das Tragwerk ist als Dreigelenkbogen in Brettschichtholzbauweise ausgeführt. Bereits drei Jahre nach Fertigstellung der Halle wird beobachtet, dass sich die mit einem chemischen Holzschutz versehene Spanplatten der geringfügig gedämmten Dachkonstruktion erheblich durchbiegen und in Folge dessen teilweise von ihren Auflagern abrutschen. An den Spanplatten wird Schimmelfall festgestellt. In den der Eisfläche zugewandten Hälften der Spanplatten werden Holzfeuchten bis zu 56,2 % gemessen.

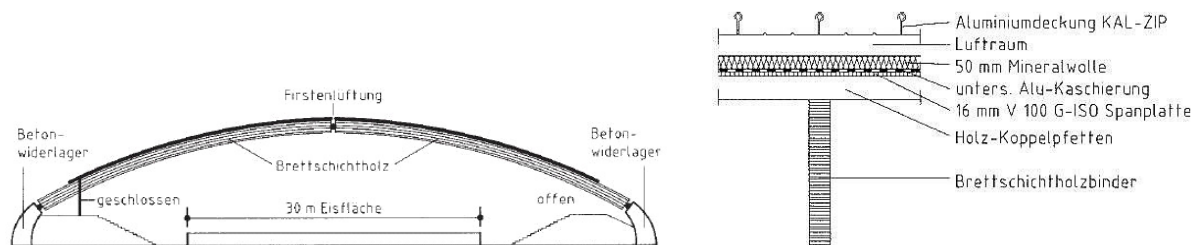


Abb. 1-2: Fallbeispiel für den Eissporthallentyp II, Marquardt und Mainka [4, S.91,92]
Links: Querschnitt der Halle; rechts: detaillierter Dachkonstruktionsaufbau

1.3 Problemstellung

Bei geschlossenen Eissporthallen wird durch das Beheizen der Hallenluft im Winter die Kondensatbildung an der Dachkonstruktion stark eingeschränkt, da konvektive Wärmeübertra-

gung zwischen warmer Hallenluft und kalter Dachkonstruktion Wärme, die infolge von Strahlungsaustausch an die Eisfläche abgegeben wurde, teilweise wieder zuführt. In Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Hallenluft und Dachkonstruktion kann dieser konvektive Wärmestrom die Oberflächentemperatur der Konstruktion über die Taupunkttemperatur anheben. Während der Phasen des Spielbetriebes oder Eispflege, aber auch durch den Luftwechsel bei hoher Außenluftfeuchte kann es trotz Beheizung der Hallenluft erforderlich werden, diese zu entfeuchten um Kondensat zu vermeiden.

Neben der Raumluftkonditionierung stellt die Verminderung des strahlungsbedingten Wärmestroms zwischen Decke und Eisfläche, z.B. durch bauliche Maßnahmen, eine weitere Möglichkeit zur Entschärfung der Kondensatproblematik dar. Bei geschlossenen Eissporthallen wird im Zeitschriftenbeitrag *„Zur Feuchteproblematik in Eissporthallen“* von Güldenpfening et al. [5, S.138] die Reduktion der Wärmübertragung durch Strahlung zwischen Decke und Eisfläche durch das Abhängen von Unterspannbahnen aus Aluminiumfolie als wirksame Maßnahme beschrieben.

Eine ähnliche Konstruktionsempfehlung, die sowohl für offene als auch geschlossene Eissporthallen gedacht ist, wird in *„Tauwasserausfall in Eissporthallen“* von Marquardt und Mainka in [4, S.101] gegeben: *„Bei offenen wie geschlossenen Eissporthallen schützt eine wärmegeämmte Unterdecke unter der belüfteten Dachkonstruktion diese vor den Strahlungsverlusten an die kalte Eisfläche und den daraus resultierenden hohen Luft- und Holzfeuchten. Eine solche Unterdecke muss allerdings selbst feuchteresistent und dampfdicht (an)geschlossen sein.“*

An der in Kapitel 1.2 beschriebenen offenen Eissporthalle in Bitburg wird die teilweise Abschirmung einer BS-Träger-Unterseite gegen die Eisfläche mit Sperrholzplatten experimentell untersucht und die Maßnahme von Fritzen [2, S.42] als wirksam bezeichnet, wobei das Maß der Wirksamkeit mangels ausreichender Messdaten nicht angegeben wird. Es wird von Fritzen [2, S.41] angemerkt: *„Die Forscher und die begleitende Arbeitsgruppe waren sich einig, dass eindeutige Schlüsse für Sanierungsempfehlungen aus den gewonnenen Erkenntnissen noch nicht gezogen werden können – ausgenommen die aktive technische Klimatisierung.“*

Während bei geschlossenen Eissporthallen durch technische Klimatisierung und das Abschirmen der Deckenkonstruktion gegen die Eisfläche die strahlungsbedingte Abkühlung der Deckenkonstruktion unter den Taupunkt vermieden werden kann, bleibt bei offenen Eissporthallen nur das Abschirmen der Decke gegen das Eis als „passive“ Maßnahme (also kein Einsatz von RLT oder jeglicher Form von Deckenheizung). In wie weit diese Maßnahme ausreicht, um bei offenen Eissporthallen Bauschäden infolge Oberflächenkondensat zu vermeiden, ist nicht eindeutig geklärt.

Es stellt sich die Frage, ob offene Eissporthallen vom Typ I und II frei von Feuchteschäden betrieben bzw. gebaut werden können, ohne auf den Einsatz von RLT oder einer Deckenheizung zurückgreifen zu müssen.

Dass dies möglich ist und vermutlich vom Aufbau der Dachkonstruktion abhängt, zeigt das Beispiel der Überdachung des Eislaufplatzes Bergheim [6], [7, S.1113ff], bei dem die hohe Wärmespeichermasse der hölzernen Dachschale und die sägeraue Ausführung der Holzbauteile von den Planern als mögliche Problemlösung erkannt wurde. Seit der Inbetriebnah-

me im Jahr 2005 wurden dort noch keine Feuchteschäden an den Holzbauteilen oder abtropfendes Kondensat von der Deckenkonstruktion beobachtet.

1.4 Aufgabenstellung

Zur Untersuchung des Feuchteverhaltens der Dachkonstruktion (Oberflächenkondensation und Wärmespeicherverhalten) des oben erwähnten Eislaufplatzes in Bergheim wurden in den Wintermonaten der Jahre 2010 und 2011 vom Institut für Hochbau der TU Graz Temperatur- und Luftfeuchtemessungen durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Temperatur- und Luftfeuchtemessungen ausgewertet. Ein physikalisches Modell, das das thermische Verhalten der Dachkonstruktion des Eislaufplatzes in Bergheim veranschaulicht, im speziellen die Oberflächenkondensation an der Innenseite der Dachplatte, soll entwickelt und mit den Messdaten validiert werden. Mit dem validierten Modell wird anschließend der Einfluss von Variationen des Konstruktionsaufbaues der Dachschaale auf die Entstehung von Oberflächenkondensat abgeschätzt.

2 GRUNDLAGEN

Im folgenden Kapitel werden ausgewählte, für die vorliegende Arbeit benötigte, bauphysikalische Grundlagen zusammengefasst.

2.1 Wärmetransportmechanismen

Um das thermische Verhalten der Eissporthalle, im speziellen das der Dachschale beschreiben zu können, werden die drei Arten des Wärmetransportes besprochen:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

Diese drei Wärmetransportmechanismen treten bei Bauteilen gemeinsam auf. Die Überlagerung dieser am Bauteil wirkenden Mechanismen wird in Kapitel 2.2 behandelt.

2.1.1 Wärmeleitung

Berühren sich zwei Festkörper unterschiedlicher Temperatur, so kommt es zwischen den Festkörpern und in den Körpern zur Wärmeübertragung durch Leitung. Dabei geben stark schwingende Moleküle an benachbarte, schwächer schwingende Moleküle Energie durch Stoßvorgänge weiter.

Mit Hilfe der allgemeinen Fourier'schen Differentialgleichung kann die zeit- und ortsabhängige Temperaturverteilung in einem Festkörper unter Berücksichtigung interner Wärmequellen W laut Fischer [8, S.122] mathematisch beschrieben werden:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + \frac{W}{c \cdot \rho} \quad \text{Gl. 2-1}$$

In obiger Gleichung werden die Wärmeleitfähigkeit λ , die spezifische Wärmekapazität c und die Dichte ρ als zeit-, orts- und temperaturunabhängige Materialkonstanten betrachtet, wobei die Zeit durch t , der Ort durch die Koordinaten x , y und z und die Temperatur durch Θ beschrieben wird. Gl. 2-1 stellt eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung dar und ist nur für Fälle mit einfachen Anfangs- und Randbedingungen geschlossen integrierbar. In den weiteren Ausführungen wird vorausgesetzt, dass keine internen Wärmequellen vorliegen.

2.1.1.1 Eindimensionale stationäre Wärmeleitung

An einer einschichtigen homogenen Platte (Abb. 2-1), deren Abmessungen normal zur Dicke d größer sind als die Plattendicke selbst, werden die zeitlich konstanten Oberflächentemperaturen $\theta_{s1} > \theta_{s2}$ angelegt. Nach dem Fourier'schen Gesetz, das mit Gl. 2-2 beschrieben wird, stellt sich in Richtung der Plattendicke eine Wärmestromdichte q_x ein, die zum Temperaturgefälle $-\frac{\partial \theta}{\partial x}$ proportional ist. Der Proportionalitätsfaktor ist die Wärmeleitfähigkeit λ , die als temperaturunabhängig angenommen wird. Beispiele für die Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Stoffe sind in Tab. 2-1 angegeben.

$$q_x = \lambda \cdot \left(-\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-2}$$

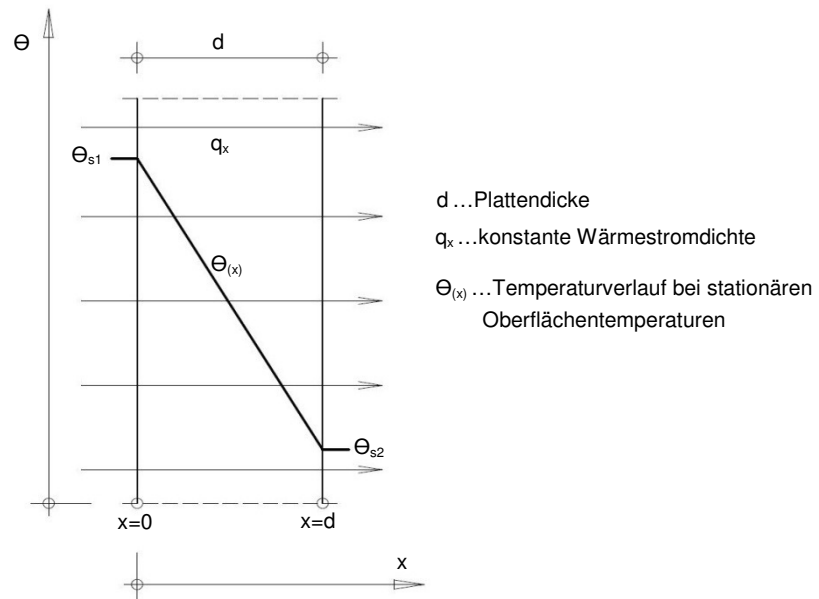


Abb. 2-1: Temperaturverlauf in einer einschichtigen homogenen Platte

Da die Oberflächentemperaturen zeitlich unveränderlich sind, muss die an den Plattenoberflächen zu- und abströmende Wärme gleich sein. Da auch keine internen Wärmequellen- oder Senken vorhanden sind, ist die Wärmestromdichte in jeder Plattenschicht konstant ($q_x = \text{const.}$). Für den Gradient der Wärmestromdichte $\frac{\partial q_x}{\partial x}$ gilt daher:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} = 0 \quad \text{Gl. 2-3}$$

Wird Gl. 2-2 in Gl. 2-3 eingesetzt, dann folgt daraus die Differenzialgleichung für die stationäre eindimensionale Wärmeleitung:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad \text{Gl. 2-4}$$

Nach zweimaliger Integration von Gl. 2-4 ergibt sich die Lösung:

$$\theta_{(x)} = C_1 \cdot x + C_2 \text{ [K]} \quad \text{Gl. 2-5}$$

Zur Ermittlung der Integrationskonstanten werden die Randbedingungen laut Abb. 2-1 herangezogen ($\theta(0) = \theta_{s1}$; $\theta(d) = \theta_{s2}$):

$$C_2 = \theta_{s1} \quad \text{Gl. 2-6}$$

$$C_1 = \frac{\theta_{s2} - \theta_{s1}}{d} \text{ [K/m]} \quad \text{Gl. 2-7}$$

Werden Gl. 2-6 und Gl. 2-7 in Gl. 2-5 eingesetzt, resultiert der Temperaturverlauf in Richtung der Plattendicke zu:

$$\theta_{(x)} = \frac{(\theta_{s2} - \theta_{s1})}{d} \cdot x + \theta_{s1} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad \text{Gl. 2-8}$$

In der einschichtigen Platte stellt sich also bei eindimensionaler stationärer Betrachtung an jeder Stelle entlang des Plattenquerschnittes zwischen den Oberflächen ein konstantes Temperaturgefälle ein. Gl. 2-8 in Gl. 2-2 eingesetzt ergibt die konstante Wärmestromdichte über den Plattenquerschnitt laut Gl. 2-9.

$$q_x = \lambda \cdot \frac{(\theta_{s1} - \theta_{s2})}{d} \quad [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-9}$$

Das Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit λ und Plattendicke d wird als Wärmedurchlasskoeffizient Λ bezeichnet (Gl. 2-10).

$$\Lambda = \frac{\lambda}{d} \quad [W/(m^2K)] \quad \text{Gl. 2-10}$$

Der Reziprokwert des Wärmedurchlasskoeffizienten Λ ist der Wärmedurchlasswiderstand R (Gl. 2-11).

$$R = \frac{1}{\Lambda} = \frac{d}{\lambda} \quad [m^2K/W] \quad \text{Gl. 2-11}$$

Besteht ein plattenförmiger Bauteil aus mehreren Schichten, die eine unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit haben, so ergibt sich der Wärmedurchlasswiderstand R des Bauteils aus der Summe der Wärmedurchlasswiderstände R_i jeder Schicht laut Gl. 2-12.

$$R = \sum_{i=1}^n R_i \quad [m^2K/W] \quad \text{Gl. 2-12}$$

2.1.1.2 Eindimensionale instationäre Wärmeleitung

Sind die Oberflächentemperaturen an einem Bauteil zeitlich veränderlich, stellen sich im Bauteil instationäre Wärmebewegungen ein. Für den eindimensionalen Fall reduziert sich die allgemeinen Fourier'sche Differentialgleichung (Gl. 2-1) zu Gl. 2-13, wenn keine internen Wärmequellen auftreten.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad \text{Gl. 2-13}$$

Im Vergleich zum stationären Fall laut Gl. 2-4 ist der zeit- und ortsabhängige Temperaturverlauf nicht konstant und wird entsprechend Gl. 2-13 neben der Wärmeleitfähigkeit λ auch von der Dichte ρ und der spezifischen Wärmekapazität c des Bauteils beeinflusst. Der Quotient $\lambda/(c \cdot \rho)$ wird als Temperaturleitfähigkeit a bezeichnet und kennzeichnet die Fähigkeit eines Materials zum Temperatenausgleich laut Glück [9, S.16]. Die Temperaturleitfähigkeit charakterisiert also den instationären Wärmetransport im Bauteil und beeinflusst den vom stationären Wärmetransport abweichenden Temperaturverlauf bei Erwärmung oder Abkühlung der Bauteiloberflächen.

Wird ein Bauteil um eine Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ erwärmt, speichert dieser in Abhängigkeit von c , ρ und des Bauteilvolumens V die zugeführte Wärmemenge Q laut Gl. 2-14.

$$Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta\theta \quad [Wh] \quad \text{Gl. 2-14}$$

Werte für c und ρ sind in Tab. 2-1 für jene Baumaterialien und Stoffe angegeben, die in dieser Arbeit verwendet werden.

Tab. 2-1: Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c und Wärmeleitfähigkeit λ ausgewählter Stoffe

Stoff	ρ [kg/m ³]	c [J/(kgK)]	$c \cdot \rho$ [kJ/(m ³ K)]	λ [W/(mK)]
Eis bei -10 °C [10]	920	2000	$1,84 \cdot 10^3$	2,30
Nutzholz [10],[11]	470 [11]	1600 [10]	$7,52 \cdot 10^2$	0,13 [10]
Mineralwolle [10],[12]	140 [12]	1030 [10]	$1,52 \cdot 10^2$	0,04 [12]
Luft [10]	1,23	1008	1,24	0,025

Vergleicht man die Materialkennwerte in Tab. 2-1 unter Einbeziehung von Gl. 2-14, ist ersichtlich, dass beispielsweise Holz bei gleichem Volumen und gleicher Temperaturdifferenz wie Mineralwolle die fünffache Wärmemenge speichern kann.

Wie Gl. 2-1, stellt auch die Gleichung für den eindimensionalen instationären Wärmetransport, Gl. 2-13, eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung dar. Die Lösung von instationären Wärmetransportproblemen erfolgt mit der Methode der finiten Differenzen bzw. finiten Elemente, die in EDV-Programmen implementiert sind.

2.1.2 Konvektion

Unter Konvektion wird jener Wärmetransport verstanden, bei dem Wärme von einem Festkörper an ein vorbeiströmendes Medium (flüssig oder gasförmig) übertragen wird. Die Wärmestromdichte q_{cv} beim konvektiven Wärmeübergang zwischen einer Oberfläche und der angrenzenden Luft wird mit Hilfe des Newton'schen Ansatzes laut Gl. 2-15 bestimmt, wobei q_{cv} das Produkt aus dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten h_{cv} und der Temperaturdifferenz zwischen der Festkörperoberfläche und der Luft ($\theta_s - \theta_L$) ist.

$$q_{cv} = h_{cv} \cdot (\theta_s - \theta_L) [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-15}$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient in Gl. 2-15 ist von der Luft- und Oberflächentemperatur, der Strömungsform der Luft (laminar oder turbulent), den Stoffwerten der Luft und der Oberflächengeometrie abhängig.

Mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie können die aus Experimenten gewonnenen konvektiven Übergangskoeffizienten h_{cv} als Nusselt-Zahl Nu laut Gl. 2-16 dargestellt werden. Nu ist von den sogenannten Ähnlichkeitszahlen (Reynolds-Zahl Re , Grashof-Zahl Gr , Prandtl-Zahl Pr , Rayleigh-Zahl Ra) abhängig, die Strömungs- und Wärmeleitvorgänge beschreiben. Für die physikalische Interpretation dieser Kennzahlen wird auf Glück [13, S.20] verwiesen.

$$Nu_{(Re,Gr,Pr,Ra)} = \frac{h_{cv} \cdot l}{\lambda} \quad \text{Gl. 2-16}$$

Nu wird für spezielle Fälle des konvektiven Wärmeübergangs in der Literatur angegeben (vgl. Kapitel 2.1.2.1 und 2.1.2.2). Somit ist laut Gl. 2-16 für diese Fälle auch h_{cv} bekannt.

Neben den beschriebenen Einflüssen auf h_{cv} wird beim konvektiven Wärmeübergang zwischen freier ($h_{cv, frei}$) und erzwungener ($h_{cv, zwang}$) Konvektion unterschieden, die sich im Regelfall als Mischkonvektion überlagern. Die freie Konvektion stellt sich durch Dichteunterschiede infolge von Temperaturunterschieden in der Luft ein und ist von der Re - und Pr -Zahl abhän-

gig. Bei der erzwungen Konvektion wird der Wärmeübergang durch eine erzwungene Strömung (z.B. Wind) verursacht und durch die Gr- bzw. Pr-Zahl beschrieben. Eine Vorschlag zur Überlagerung von $h_{cv,frei}$ und $h_{cv,zwang}$ wird von Glück [13, S.24] nach Churchill wie folgt angegeben:

$$h_{cv} = \sqrt[3]{h_{cv,zwang}^3 \pm h_{cv,frei}^3} \quad [W/(m^2K)] \quad \text{Gl. 2-17}$$

Sind die Strömungsrichtungen der erzwungen und der freien Konvektion gleichgerichtet, werden $h_{cv,zwang}$ und $h_{cv,frei}$ in Gl. 2-17 addiert, anderenfalls wird $h_{cv,frei}$ von $h_{cv,zwang}$ subtrahiert.

2.1.2.1 Erzwungene Konvektion an Platten

Für eine längsangeströmte Platte wie in Abb. 2-2 kann der Wärmeübergangskoeffizient infolge erzwungener Konvektion $h_{cv,zwang}$ mit Gl. 2-18 laut Glück [13, S.21] berechnet werden, wobei $l_{\ddot{u}}$ die Überströmlänge bezeichnet.

$$h_{cv,zwang} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_{\ddot{u}}} \quad [W/(m^2K)] \quad \text{Gl. 2-18}$$

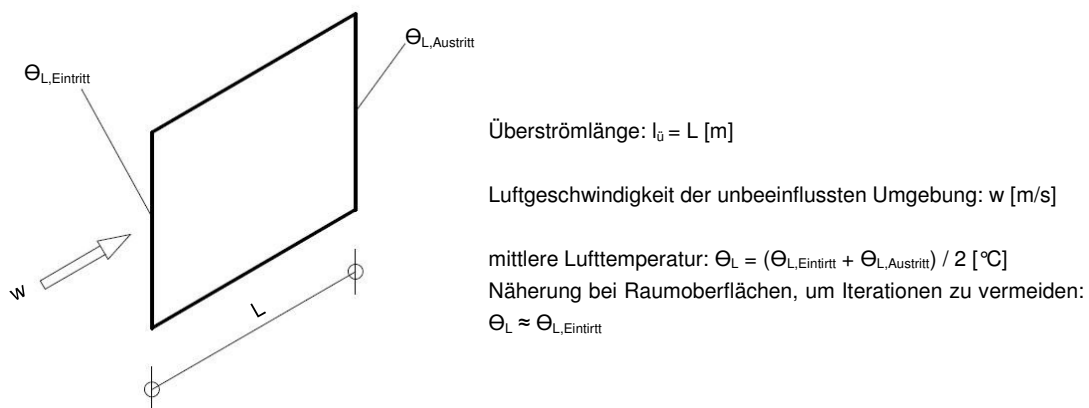


Abb. 2-2: Parameter für die erzwungene Konvektion einer längsangeströmten Platte nach Glück [13, S.21]

Die Nusselt-Zahl ergibt sich für den Fall der längsangeströmten Platte laut Glück [13, S.21] gemäß Gl. 2-19.

$$Nu = 0,441 \cdot Re \cdot Pr^{0,667} + \frac{Re^{1,6} \cdot Pr^2}{[27,027 + 66,027 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{-0,1} - 1)]} \quad \text{Gl. 2-19}$$

Nu ist gültig im Bereich: $10 < Re < 10^7$ und $0,6 < Pr < 2000$. Re wird mit Gl. 2-20 unter Berücksichtigung von Abb. 2-2 berechnet. Die Stoffwerte Pr , λ und ν (kinematische Viskosität) sind laut Tab. 2-2 einzusetzen und werden bei Θ_L (Abb. 2-2) bestimmt.

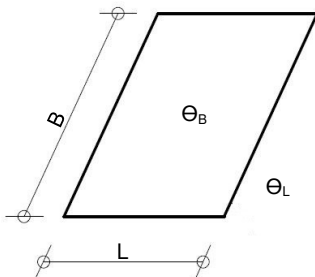
$$Re = \frac{w \cdot l_{\ddot{u}}}{\nu} \quad \text{Gl. 2-20}$$

Tab. 2-2: Stoffwerte der Luft bei einem Druck von 1 bar nach Glück [14, S.83ff]

Θ [°C]	λ [W/(mK)]	ν [10^{-6} m ² /s]	Pr [-]
-20	0,0226	11,78	0,72
0	0,0242	13,52	0,72
20	0,0257	15,35	0,71
40	0,0272	17,26	0,71

2.1.2.2 Freie Konvektion an horizontalen Platten

Bei einer horizontalen Platte (Abb. 2-3) wird der freie konvektive Wärmeübergangskoeffizient $h_{cv, frei}$ mit Gl. 2-21 laut Glück [13, S.22] bestimmt.



charakteristische Länge $l = \text{Min}(L, B)$ [m]

Temperatur der unbeeinflussten Umgebung: Θ_L [°C]

mittlere Bauteiltemperatur: Θ_B [°C]

mittlere Grenzschichttemperatur: $\Theta_G = (\Theta_B + \Theta_L) / 2$ [°C]

Betrag der Temperaturdifferenz

zwischen Θ_B und Θ_L : $|\Delta\Theta| = |(\Theta_B + \Theta_L) / 2|$ [°C]

Abb. 2-3: Parameter für die freie Konvektion einer horizontalen Platte nach Glück [13, S.22]

$$h_{cv, frei} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad [W/(m^2K)] \quad \text{Gl. 2-21}$$

Die Nusselt-Zahl hängt bei der freien Konvektion von der Wärmestromrichtung ab. Stellt sich der Wärmestrom aufwärts, also entgegen der Schwerkraft ein, liegen turbulente Strömungsverhältnisse ohne äußeren Einfluss vor und für Nu gilt Gl. 2-22 (Gültigkeitsbereich $Ra > 4 \cdot 10^7$).

$$Nu = 0,155 \cdot Ra^{0,333} \quad \text{Gl. 2-22}$$

Ra in Gl. 2-22 wird mit Gl. 2-23 berechnet, wobei Pr, λ und ν (Tab. 2-2) bei Θ_G (Abb. 2-3) bestimmt werden.

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot l^3 \cdot |\Delta\theta| \cdot Pr}{(\theta_L + 273) \cdot \nu^2} \quad \text{Gl. 2-23}$$

Für den Fall des abwärts gerichteten Wärmestroms stellen sich laminare Strömungsverhältnisse ein. Nu errechnet sich gemäß Gl. 2-24 (Gültigkeitsbereich $3 \cdot 10^3 < Ra < 3 \cdot 10^{10}$) mit Ra nach Gl. 2-23.

$$Nu = 0,485 \cdot Ra^{0,2} \quad \text{Gl. 2-24}$$

2.1.3 Wärmestrahlung

Liegt die Temperatur eines Festkörpers über der des absoluten Nullpunktes (0 K), strahlt der Körper Energie in Form von elektromagnetischen Wellen ab. Bei dieser Abstrahlung (auch als Emission bezeichnet) wird innere Energie des Körpers in elektromagnetische Energie umgewandelt und von der Körperoberfläche emittiert. Treffen umgekehrt elektromagnetische Wellen auf einen Körper, wird die auftreffende Wellenenergie teilweise an dessen Oberfläche absorbiert und in innere Energie umgewandelt. Ein weiterer Anteil der Wellenenergie wird an der Oberfläche reflektiert, außerdem tritt bei transparenten Materialien ein Teil durch den Körper hindurch. Da elektromagnetische Wellen kein Trägermedium benötigen, gilt dies auch für den Wärmetransport durch Strahlung im Gegensatz zum Wärmetransport durch Leitung oder Konvektion. Strahlung kann somit auch im Vakuum übertragen werden.

In der Bauphysik relevante Problemstellungen in Hinblick auf die Wärmeübertragung durch Strahlung treten im kurz- und langwelligen Strahlungsbereich auf. Die als Licht vom menschlichen Auge wahrgenommene kurzwellige Strahlung oder auch Solarstrahlung (Wellenlänge von 0,38 bis 0,78 μm) ist ein Teil des Spektrums der Sonnenstrahlung. Im Gegensatz zur kurzwelligen Strahlung wird langwellige Strahlung, üblicherweise bei Umgebungstemperatur als Wärmestrahlung bezeichnet, neben der Sonne auch von Bauteiloberflächen emittiert und hat einen Längenwellenbereich von 0,78 bis 3,0 μm .

In Kapitel 2.1.3.2 werden Berechnungsansätze und Gleichungen vorgestellt, mit denen der Wärmestrahlungsaustausch zwischen ebenen Flächen berechnet werden kann. Um ein Verständnis für diese Berechnungsansätze zu entwickeln, wird im nächsten Kapitel ein kurzer Überblick zu Strahlungsgesetzen gegeben, die im Zusammenhang mit daraus abgeleiteten Gleichungen stehen. Eine umfangreichere Beschreibung der folgenden Strahlungsgesetze wird in Baehr [15, S.589ff] gegeben.

2.1.3.1 Strahlungsgesetze

Die Oberflächeneigenschaften eines Körpers und dessen Oberflächentemperatur T [K] bestimmen, wie viel Energie die Körperoberfläche abstrahlt. Ein Maß für die von einem Körper abgestrahlte Energie ist die spektralspezifische Ausstrahlung M_λ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$]. Sie beschreibt die Wellenlängenabhängigkeit der in den Halbraum ausgestrahlten Energie. Die Umrechnung der Oberflächentemperatur Θ in Grad Celsius auf die Temperatur T in Kelvin erfolgt laut Gl. 2-25.

$$T = \Theta + 273,16 \text{ [K]} \quad \text{Gl. 2-25}$$

Schwarzer Strahler

Die Obergrenze für die emittierte Energie eines Körpers gibt der "schwarze Strahler" an, dessen spektralspezifische Ausstrahlung $M_{\lambda s}$ durch das Planck'sche Strahlungsgesetz (Gl. 2-26) angegeben wird.

$$M_{\lambda s} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{C_2/(\lambda \cdot T)} - 1)} \text{ [W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})] \quad \text{Gl. 2-26}$$

In Gl. 2-26 bezeichnen C_1 [Wm^2] und C_2 [$\mu m K$] Strahlungskonstanten die von der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum sowie der Planck-Konstante und der Boltzmann-Konstante abhängen. Die Wellenlängen- und Temperaturabhängigkeit von $M_{\lambda s}$ wird in Abb. 2-4 anhand einiger Isothermen gezeigt.

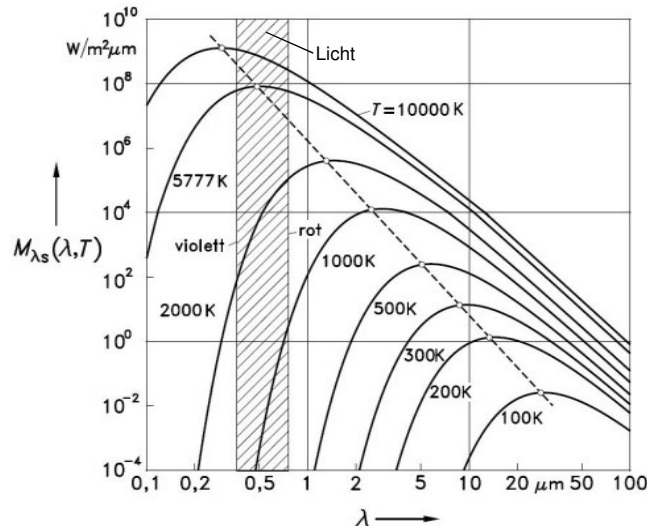


Abb. 2-4: Spektralspezifische Ausstrahlung des schwarzen Strahlers in logarithmischer Darstellung laut Baehr [15, S.619]

Wien'sches Verschiebungsgesetz

In Abb. 2-4 ist ersichtlich, dass das Maximum der spektralspezifischen Ausstrahlung sich mit steigender Temperatur in Richtung kürzerer Wellenlängen verschiebt, wobei das Produkt aus λ_{max} (jene Wellenlänge bei der $M_{\lambda s}$ ihr Maximum annimmt) und der entsprechenden Temperatur konstant bleibt. Dieser Zusammenhang wird durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz (Gl. 2-27) beschrieben.

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 [\mu m K] \quad \text{Gl. 2-27}$$

Stefan-Boltzmann-Gesetz und Emissionsgrad

Durch Integration der spektralspezifischen Ausstrahlung $M_{\lambda s}$ des schwarzen Strahlers über alle Wellenlängen erhält man seine spezifische Ausstrahlung M_s laut Gl. 2-28 (Stefan-Boltzmann-Gesetz) mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ ($5,67 \cdot 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$).

$$M_s = \sigma \cdot T^4 [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-28}$$

Eine weitere mögliche Schreibweise des Stefan-Boltzmann-Gesetzes zeigt Gl. 2-29 mit dem Strahlungskoeffizienten (auch Strahlungskonstante) des schwarzen Strahlers C_s ($5,67 [W/(m^2K^4)]$).

$$M_s = C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-29}$$

Der schwarze Strahler ist ein idealer Strahler, dessen spezifische Ausstrahlung von keinem realen Strahler gleicher Temperatur erreicht wird. Durch die Einführung des dimensionslosen Emissionsgrades ϵ [-] in Gl. 2-29 kann die spezifische Ausstrahlung M eines realen Strahlers

laut Gl. 2-30 geschrieben werden. Der Strahlungskoeffizient C eines realen Strahlers ergibt sich dabei aus dem Produkt von ε und C_s , wobei stets $\varepsilon < 1$.

$$M = \varepsilon \cdot C_s \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-30}$$

Der Emissionsgrad ist streng genommen keine reine Materialkonstante, da sein Wert auch von den emittierten Wellenlängen und der Temperatur des Strahlers abhängt. Wird für technische Anwendungen ε in einem bestimmten Temperaturbereich als Materialkonstante angenommen, spricht man von einem grauen Strahler. Laut Baehr [15, S.601] wird üblicherweise für einen grauen Strahler auch die Gültigkeit des Lambert'schen Kosinusetzes vorausgesetzt, so dass dieser dann als grauer Lambert-Strahler oder auch diffuser grauer Strahler bezeichnet wird. Zur Berechnung des Strahlungsaustausches wird vorzugsweise der graue Lambert-Strahler verwendet. Emissionsgrade werden in Tab. 2-3 angegeben.

Absorption und Reflexion

Wie am Beginn des Kapitels 2.1.3 erwähnt, kann die auf eine Körperoberfläche auftreffende Strahlung reflektiert, absorbiert oder bei transparenten Materialien auch durchgelassen werden. Die jeweiligen Anteile werden auf die Gesamtstrahlung bezogen und als Absorptionsgrad α (Gl. 2-31), Reflexionsgrad ρ (Gl. 2-32) und Transmissionsgrad τ (Gl. 2-33) bezeichnet, wobei deren Summe Eins ergibt. In Gl. 2-34 wird dieser Zusammenhang für opake Körper ($\tau = 0$) dargestellt.

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-31}$$

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-32}$$

$$\tau = \frac{\text{durchgelassene Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}} \quad [-] \quad \text{Gl. 2-33}$$

$$\alpha + \rho = 1 \quad \text{Gl. 2-34}$$

Das Reflexionsvermögen realer Oberflächen liegt zwischen den idealisierten Grenzfällen der spiegelnden und der diffusen Reflexion (Abb. 2-5). Im Fall der spiegelnden Reflexion ist der Einfallswinkel β der Strahlung gleich dem Ausfallswinkel β_r . Bei diffuser Oberflächenreflexion wird die im Winkel β einfallende Strahlung über alle Abstrahlwinkel $\beta_{r,i}$ gleichmäßig verteilt reflektiert.

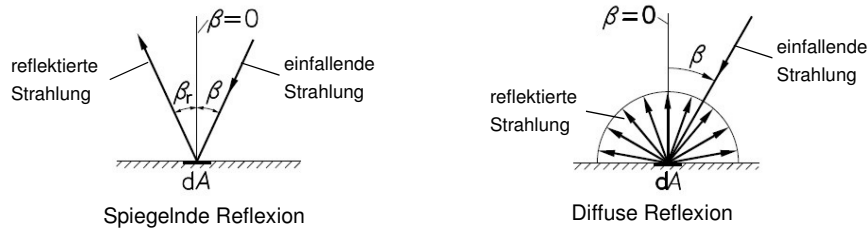


Abb. 2-5: Spiegelnd und diffus reflektierende Oberfläche nach Baehr[15, S.611]

Beziehungen zwischen Emissions-, Absorptions- und Reflexionsgrad

Der Zusammenhang zwischen Emissions- und Absorptionsgrad wird durch das Gesetz von Kirchhoff hergestellt, das sich laut Baehr [15, S.615] vereinfacht wie folgt ausdrücken lässt: *“Ein guter Absorber von Wärmestrahlung ist auch ein guter Emittor”*. Somit gilt bei gleicher Wellenlänge die laut Gl. 2-35 dargestellte Beziehung zwischen ϵ und α für den grauen Lambert-Strahler.

$$\epsilon = \alpha = \frac{M}{M_S} \tag{Gl. 2-35}$$

Gl. 2-34 nach ρ umgestellt und in Gl. 2-35 eingesetzt ergibt die Verknüpfung zwischen ϵ , α und ρ laut Gl. 2-36 (gültig nur für opake Körper).

$$\rho = 1 - \alpha = 1 - \epsilon \tag{Gl. 2-36}$$

Wie schon bei der Definition der spezifischen Ausstrahlung (Gl. 2-30) bemerkt, ist der Emissionsgrad auch wellenlängen- und temperaturabhängig. Aus diesem Grund wird für die Solarstrahlung der Absorptionsgrad α_s und für die Wärmestrahlung der Emissionsgrad ϵ in einschlägigen Tabellenwerken angegeben. Eine ausführlichere Beschreibung dieses Sachverhaltes ist in Baehr [15, S.634, S.663] zu finden. Beispiele für α_s und ϵ zeigt Tab. 2-3.

Tab. 2-3: Gegenüberstellung der Absorptionsgrade α_s für Solarstrahlung und Emissionsgrade ϵ für Wärmestrahlung verschiedener Materialien laut Baehr [15] und VDI-Wärmeatlas [16]

Material	α_s	ϵ	T für ϵ [K]	Literaturquelle
Aluminium, poliert	0,2	0,08	300	[15 S.663]
Chrom, poliert	0,4	0,07		
Dachpappe, schwarz	0,82	0,91		
Farbe Zinkweiß	0,22	0,92		
Schwarze Ölfarbe	0,9	0,92		
Schnee, sauber	0,2...0,35	0,95		
Eisen, vorpoliert	k.A.	0,17	373	[16 S.Ka 5]
Eisenblech, rot angerostet	k.A.	0,61	293	
Holz, Eiche gehobelt	k.A.	0,90	273 bis 366	
Eis, glatt mit Wasser	k.A.	0,92	273	

Anhand der Tab. 2-3 ist ersichtlich, dass für nichtmetallische Stoffe ϵ bei einem Wert von ca. 0,9 liegt und die Oberflächenfarbe für ϵ unerheblich ist. Bei den Metallen ist ϵ von der Rauigkeit der Oberfläche abhängig. Auf α_s der Nichtmetalle hat die Farbe einen großen Einfluss.

2.1.3.2 Strahlungsaustausch zwischen Flächen

Der Strahlungsaustauschvorgang zwischen Körpern, also das Emittieren, Absorbieren und Reflektieren der am Austausch beteiligten Körper, wurde bereits am Beginn von Kapitel 2.1.3 beschrieben. Für thermische Betrachtungen ist der resultierende Wärmestrom auf einen von zwei betrachtete Körper bzw. Oberflächen von Interesse. Dieser resultierende Wärmestrom, der auch als Nettowärmestrom bezeichnet wird, hängt von der gegenseitigen Lage (Geometrieinfluss), den Strahlungseigenschaften und der Temperatur der beteiligten Oberflächen ab.

In dieser Arbeit sei der Einfluss von Luft zwischen den Flächen beim Strahlungsaustausch vernachlässigt und die betrachteten Strahlungsflächen seien graue Lambert-Strahler.

Strahlungsaustausch zwischen gleich großen parallelen Flächen

Für den einfachen Fall zweier gleich großer paralleler Flächen ($A_1 = A_2$), deren lineare Ausdehnung wesentlich größer ist als ihr Abstand zueinander, kann der resultierende Strahlungswärmestrom $\Phi_{r,12}$, der sich infolge der unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ($T_1 > T_2$) zwischen den Flächen A_1 und A_2 einstellt, mit Gl. 2-37 laut Glück [17, S.15] berechnet werden.

$$\Phi_{r,12} = A_1 \cdot C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] [W] \quad \text{Gl. 2-37}$$

Der Gesamtstrahlungskoeffizient C_{12} in Gl. 2-37 ist davon abhängig, ob die auf die Oberflächen auftreffende und zum Teil reflektierte Wärmestrahlung bei der Berechnung des resultierenden Strahlungswärmestroms berücksichtigt wird oder nicht. Unter Berücksichtigung von Reflexionen wird C_{12} laut Gl. 2-38 berechnet, wobei C_s (Strahlungskoeffizient des schwarzen Strahlers) und die Emissionsgrade ϵ_1, ϵ_2 der Flächen entsprechend dem vorherigen Kapitel einzusetzen sind.

$$C_{12} = \frac{C_s}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} [W/(m^2K^4)] \quad \text{Gl. 2-38}$$

Liegt der Emissionsgrad ϵ der Oberflächen nahe bei Eins, so sind die Reflexionsanteile gering und C_{12} kann laut Glück [17, S.18] *in guter Näherung* mit Gl. 2-39 berechnet werden.

$$C_{12} = \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot C_s [W/(m^2K^4)] \quad \text{Gl. 2-39}$$

Anhand von Tab. 2-3 ist ersichtlich, dass der Emissionsgrad nichtmetallischer Materialien ca. bei 0,9 liegt. Da in dieser Arbeit vorkommende Bauteile aus nichtmetallischen Materialien gefertigt sind, bleiben die Reflexionsanteile bei der Berechnung des Strahlungsaustausches in Kapitel 4 und 5 unberücksichtigt.

Strahlungsschutzschirme zwischen gleich großen parallelen Flächen

Um den Strahlungsaustausch zwischen zwei Flächen unterschiedlicher Temperatur zu verringern, ist die Anordnung sogenannter Strahlungsschutzschirme zwischen den Flächen möglich. Werden N Strahlungsschutzschirme zwischen zwei gleich großen parallelen Flä-

chen ($A_1 = A_2$) angeordnet, so kann nach Baehr [15, S.687] der Strahlungswärmestrom $\Phi_{r,12}$ zwischen den Flächen mit Gl. 2-41 (Legende siehe Abb. 2-6) berechnet werden.

$$\Phi_{r,12} = \frac{A_1 \cdot C_s}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + N \cdot \left(\frac{2}{\varepsilon_s} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] [W] \quad \text{Gl. 2-40}$$

Abb. 2-6 zeigt eine Schnittdarstellung der erwähnten Flächen ($A_1 = A_2$) und der Strahlungsschutzschirme.

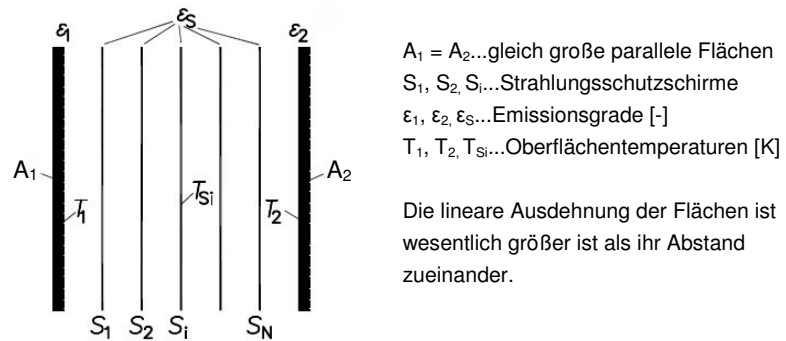


Abb. 2-6: Strahlungsschutzschirme zwischen zwei gleich großen parallelen Flächen nach Baehr [15, S.687]

Strahlungsaustausch zwischen Flächen beliebiger Lage

Der resultierende Strahlungswärmestrom $\Phi_{r,12}$ von einer Fläche A_1 auf eine in beliebiger Lage zu dieser Fläche angeordnete Fläche A_2 wird nach Glück [17, S.18] mit Gl. 2-41 berechnet.

$$\Phi_{r,12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot C_{12} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] [W] \quad \text{Gl. 2-41}$$

In Gl. 2-41 wird der Geometrieinfluss der Flächen A_1 und A_2 mit der sogenannten Einstrahlzahl F_{12} , deren Bestimmung im folgenden Kapitel gezeigt wird, erfasst. Für C_{12} gilt Gl. 2-39.

2.1.3.3 Einstrahlzahlen

Mit Hilfe der Einstrahlzahlen F_{ij} bzw. f_{ij} die auch als Sichtfaktor, Formfaktor oder Winkelverhältnis bezeichnet werden, wird der Einfluss der Lage und Orientierung der Flächen zueinander sowie die Form und Größe der Flächen beim Strahlungsaustausch erfasst. Die Berechnung der Einstrahlzahlen erfolgt mit Integralen. Zur Vollständigkeit sind die allgemeinen Gleichungen nach Glück [17, S.290] für die Bestimmung von F_{12} und f_{12} angegeben.

Die Einstrahlzahl f_{12} eines Flächenelementes 1 auf eine Fläche 2 ist durch Gl. 2-42 bestimmt.

$$f_{12} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cdot \cos\beta_2}{r^2} \cdot dA_2 [-] \quad \text{Gl. 2-42}$$

Die darin verwendeten Bezeichnungen und Winkel sowie eine symbolische Darstellung der Einstrahlzahl sind in Abb. 2-7 gezeigt. Demnach strahlt das Flächenelement 1 (Abb. 2-7 Mitte) in den Halbraum und ein Teil der Strahlung trifft auf Fläche 2. Das Verhältnis zwischen

der auf Fläche 2 auftreffenden Strahlung und der von Flächenelement 1 abgegebenen Gesamtstrahlung wird als Einstrahlzahl f_{12} bezeichnet.

Die Einstrahlzahl F_{12} einer Fläche 1 auf eine Fläche 2 (vgl. Abb. 2-7 rechts) ist durch Gl. 2-43 bestimmt.

$$F_{12} = \frac{1}{A_1 \pi} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1 = \frac{1}{A_1} \cdot \int_{A_1} f_{12} \cdot dA_1 [-] \quad \text{Gl. 2-43}$$

Demnach strahlt das Flächenelement $1'$ auf die Fläche 2, ausgedrückt durch f_{12} analog der Gl. 2-42. Um F_{12} zu erhalten, muss das Flächenelement $1'$ über alle Stellen der Fläche 1 wandern, also über die Fläche 1 integriert werden. Die so erhaltene Einstrahlzahl F_{12} in Gl. 2-43 stellt einen Mittelwert für die unendliche vielen Werte von f_{12} dar. "Man sagt, es ist die mittlere Einstrahlzahl der Fläche 1 auf die Fläche 2" laut Glück [17, S.290].

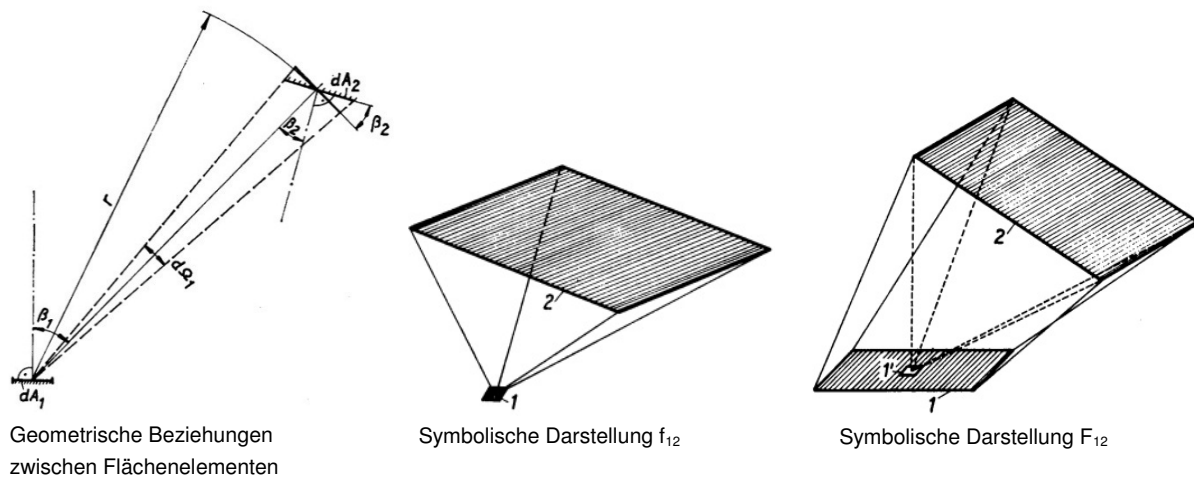


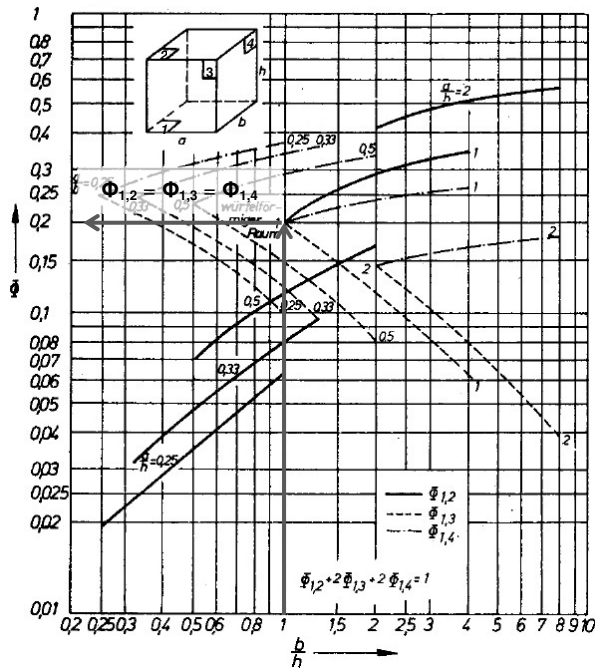
Abb. 2-7: Geometrische Beziehungen zwischen Flächenelementen und symbolische Darstellung der Einstrahlzahlen laut Glück [9, S.168, S.169]

Der größte Wert, den eine Einstrahlzahl annehmen kann, ist Eins. Dieser Grenzfall liegt dann vor, wenn die Fläche 2 in Abb. 2-7 das strahlende Flächenelement 1 bzw. die strahlende Fläche 1 umhüllt.

Einstrahlzahlen von Rechteckflächen

Für Einstrahlzahlen von Rechteckflächen, die zueinander parallel oder normal angeordnet sind, stehen umfassende Auswertungen der Gl. 2-43 in Form von Tabellen und Diagrammen zur Verfügung. Eine bestimmte geometrische Anordnung zweier oder mehrerer Rechteckflächen und die zugehörige Einstrahlzahl wird in dieser Arbeit als "Einstrahlzahl eines Falls" bezeichnet.

In Abb. 2-8 wird die Ermittlung der Einstrahlzahlen mit Hilfe eines Diagramms in einem würfelförmigen Raum gezeigt. Dabei wird der Strahlungseinfluss der Bodenfläche auf die Decke und auf die Wand mittels der Einstrahlzahlen $F_{\text{BodenDecke}}$ und $F_{\text{BodenWand}}$ angegeben.



Ablesebeispiel für einen Würfel (a = b = h):

Anmerkung: In [17] wird die Einstrahlzahl F_{ij} mit Φ_{ij} bezeichnet. Im links dargestellten Diagramm ist dies beim Ablesen zu beachten.

Einstrahlzahl des Bodens auf die Decke - $F_{\text{BodenDecke}}$:

$F_{\text{BodenDecke}}$ der Fläche 1 auf die Fläche 2 mit folgenden Eingangsparametern für das Diagramm:

$b/h = a/h = 1$

$\Phi_{1,2}$ entspricht $F_{\text{BodenDecke}}$ und ergibt den Wert **0,2**.

Einstrahlzahl des Bodens auf die Wand - $F_{\text{BodenWand}}$:

$F_{\text{BodenWand}}$ der Fläche 1 auf die Fläche 3 mit folgenden Eingangsparametern für das Diagramm:

$b/h = a/h = 1$

$\Phi_{1,3}$ entspricht $F_{\text{BodenWand}}$ und ergibt den Wert **0,2**.

Abb. 2-8: Einstrahlzahlen einer Rechteckfläche auf die übrigen Rechteckflächen im quaderförmigen Raum nach Glück [17, S.350]

Anhand des Ablesebeispiels in Abb. 2-8 wird ersichtlich, dass die Einstrahlzahl des Bodens auf die anderen Raumflächen des Würfels jeweils 0,2 beträgt. Geht man von der Würfelform ($a = b = h$) durch Verkleinerung von h auf eine Quaderform ($a > h, b > h$) über, wird $F_{\text{BodenDecke}}$ größer und $F_{\text{BodenWand}}$ kleiner. Sei h gegenüber der den Abmessungen a und b sehr klein, liegt der Sonderfall paralleler Flächen mit unendlicher Ausdehnung vor, bei dem $F_{\text{BodenDecke}}$ den Wert 1 annimmt und die Einstrahlzahlen des Bodens auf die Wandflächen Null werden. Für die praktische Berechnung der Einstrahlzahlen von unregelmäßigen Geometrien, die nicht als Standardfälle in Diagrammform vorliegen, werden mit Hilfe von Rechenregeln bekannte Standardfälle zu einem kombinierten Fall zusammengefasst.

Einige dieser Rechenregeln für Einstrahlzahlen, nämlich die Reziprozitätsbeziehung, die Summationsbeziehung und das Zerlegungsgesetz, werden folgend nach dem VDI-Wärmeatlas [16, S.Ka 7] angegeben.

Die Reziprozitätsbeziehung zweier Flächen A_i und A_k und deren Einstrahlzahlen F_{ik} und F_{ki} wird in Gl. 2-47 dargestellt.

$$A_i \cdot F_{ik} = A_k \cdot F_{ki} \tag{Gl. 2-44}$$

In einem abgeschlossenen Raum (Abb. 2-9 links) wird mit der Summationsbeziehung nach Gl. 2-45 der Strahlungseinfluss einer Fläche i auf die umschließenden Raumflächen k angegeben.

$$\sum_{k=1}^n F_{ik} = 1 \tag{Gl. 2-45}$$

Gl. 2-46 beschreibt das Zerlegungsgesetz unter Berücksichtigung der Abb. 2-9 rechts.

$$A_1 \cdot F_{12} = A'_1 \cdot F'_{12} + A''_1 \cdot F''_{12} \tag{Gl. 2-46}$$

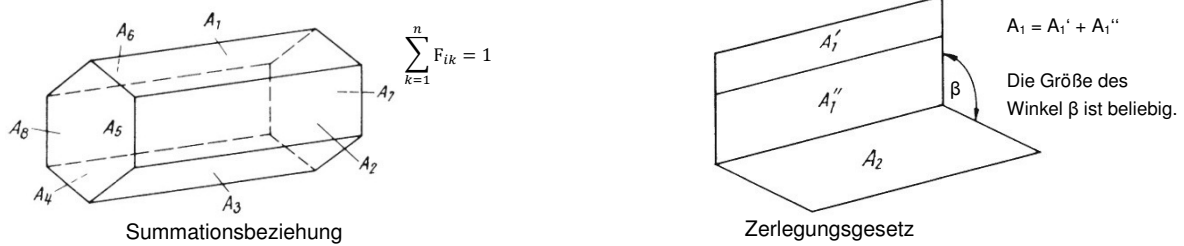


Abb. 2-9: Grafische Darstellung zur Summationsbeziehung und dem Zerlegungsgesetz nach [20, S.Ka 7]

In der vorliegenden Arbeit werden die Einstrahlzahlen der Fälle 1, 2 und 3 im quaderförmigen Raum laut Abb. 2-10 verwendet.

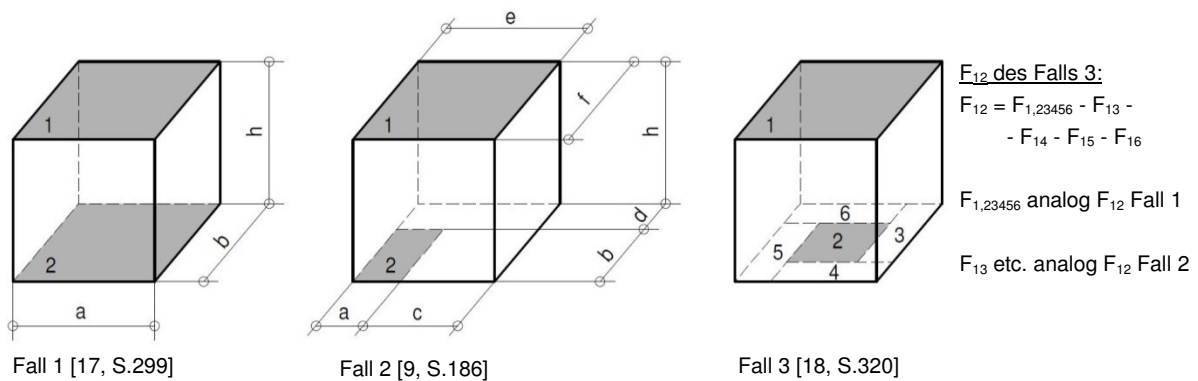


Abb. 2-10: Einstrahlzahlen F_{12} unterschiedlicher Fälle im quaderförmigen Raum nach Glück[17], [9] bzw. nach Kollmar und Liese [18]

Die Einstrahlzahl F_{12} für Fall 1 (zwei gleich große parallele Rechteckflächen) kann mit dem Diagramm in Abb. 2-8 bestimmt werden. Zur Berechnung von F_{12} für Fall 1 gibt Glück [17, S.299] die Gl. 2-47 an.

$$F_{12} = \frac{2}{\pi \cdot \bar{a} \cdot \bar{b}} \left(\bar{a} \cdot \sqrt{\bar{b}^2 + 1} \cdot \arctan \frac{\bar{a}}{\sqrt{\bar{b}^2 + 1}} - \bar{a} \cdot \arctan \bar{a} + \bar{b} \cdot \sqrt{\bar{a}^2 + 1} \cdot \arctan \frac{\bar{b}}{\sqrt{\bar{a}^2 + 1}} - \bar{b} \cdot \arctan \bar{b} - \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{\bar{a}^2 + \bar{b}^2 + 1}{(\bar{a}^2 + 1) \cdot (\bar{b}^2 + 1)} \right) \quad \text{Gl. 2-47}$$

mit $\bar{a} = \frac{a}{h}$ und $\bar{b} = \frac{b}{h}$

Die Bestimmungsgleichung für Fall 2 zur Berechnung der Einstrahlzahl F_{12} der Rechteckfläche 1 auf eine parallele, kleinere Rechteckfläche 2 ist in Abb. A- 1 (S.92) dargestellt. Durch Anwendung des Zerlegungsgesetzes wird aus den Fällen 1 und 2 die Einstrahlzahl F_{12} für Fall 3 berechnet.

2.2 Wärmedurchgang

Laut Lohmeyer [19, S.69] ist der Begriff „Wärmedurchgang“ folgenderweise definiert: „Der gesamte Wärmetransport von der Luft auf der einen Seite eines Bauteils zur Luft auf der an-

deren Seite wird als Wärmedurchgang bezeichnet.“ Dabei werden drei Einzelvorgänge (I, II, III) unterschieden, die in Abb. 2-11 schematisch dargestellt sind.

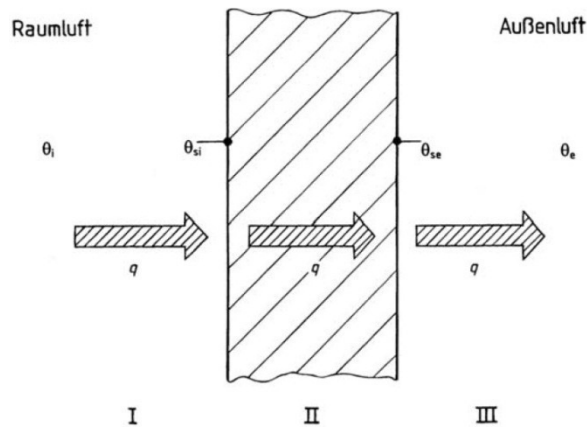


Abb. 2-11: Schematische Darstellung des Wärmedurchganges laut Fischer [8, S.123]

Die Vorgänge I und III in Abb. 2-11 werden als Wärmeübergang, und der Vorgang II wird als Wärmeleitung durch das Bauteil bezeichnet. In Abhängigkeit des Bauteilaufbaues und des an das Bauteil angrenzenden Mediums (Luft oder Wasser) treten bei den Einzelvorgängen I bis III die in Kapitel 2.1 beschriebenen Wärmetransportmechanismen (Leitung, Konvektion und Strahlung) auf.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_{cv} , mit dem die Wärmestromdichte q_{cv} beim konvektiven Wärmeübergang zwischen Luft und einem Bauteil angegeben werden kann, wurde bereits in Kapitel 2.1.2 (S.9) beschrieben. Neben dem konvektiven Wärmeübergang erfolgt dabei auch ein strahlungsbedingter Wärmeübergang zwischen dem Bauteil und seiner Umgebung. Nach Recknagel [20, S.203] kann die Wärmestromdichte infolge Strahlung q_r , vereinfacht mit der Gl. 2-48 angegeben werden, wobei h_r den Wärmestrahlungsübergangskoeffizient, Θ_U die Strahlungstemperatur der Umgebung und Θ_s die Oberflächentemperatur des betrachteten Bauteils darstellt.

$$q_r = h_r \cdot (\theta_s - \theta_U) [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-48}$$

Weicht die Lufttemperatur Θ_L von der Strahlungstemperatur der Umgebung Θ_U nicht merklich ab, gilt also $\Theta_L \approx \Theta_s$, so können h_{cv} und h_r addiert und als kombinierter Wärmeübergangskoeffizient h ausgedrückt werden. Somit lässt sich die Wärmestromdichte q beim Wärmeübergang laut Gl. 2-49 angeben.

$$q = q_{cv} + q_r = (h_{cv} + h_r) \cdot (\theta_s - \theta_L) = h \cdot (\theta_s - \theta_L) [W/m^2] \quad \text{Gl. 2-49}$$

Der Reziprokwert des Wärmeübergangskoeffizienten h in Gl. 2-50 wird als Wärmeübergangswiderstand R_s bezeichnet.

$$R_s = \frac{1}{h} = \frac{1}{h_{cv} + h_r} [m^2K/W] \quad \text{Gl. 2-50}$$

In der ÖNORM EN ISO 6946 [21, S.9] sind Bemessungswerte der Wärmeübergangswiderstände angegeben (Tab. 2-4), die laut [21, S.7] „in den meisten Fällen ausreichend genau“ sind.

Tab. 2-4: Wärmeübergangswiderstände laut ÖNORM EN ISO 6946 [21, S.9]

Wärmeübergangswiderstand R [m ² K/W]	Richtung des Wärmestromes		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R _{si}	0,1	0,13	0,17
R _{se}	0,04	0,04	0,04

R_{si}...bei Innenoberflächen

R_{se}...bei Außenoberflächen

Für eine genauere Behandlung des Wärmeübergangswiderstandes, werden im Anhang A der ÖNORM EN ISO 6946 [21, S.17ff] Näherungsformeln bzw. Werte für h_{cv} und h_r angegeben. Beispielsweise kann nach [21, S.18] der konvektive Wärmeübergangskoeffizient h_{cve} einer Außenoberfläche in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit v [m/s] laut Gl. 2-51 bestimmt werden.

$$h_{cve} = 4 + 4 \cdot v \text{ [W/(m}^2\text{K)]} \quad \text{Gl. 2-51}$$

Die Wärmestromdichte jedes in Abb. 2-11 dargestellten Einzelvorganges beim Wärmedurchgang (I, II, III), muss bei stationären Verhältnissen gleich groß sein. Dies wird durch Gl. 2-52 ausgedrückt, wobei h_i als innerer Wärmeübergangskoeffizient und h_e als äußerer Wärmeübergangskoeffizient bekannt ist (Temperaturbezeichnungen laut Abb. 2-11).

$$q = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) = \Lambda \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) = h_e \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{Gl. 2-52}$$

Wird Gl. 2-52 in Abhängigkeit von q nach den jeweiligen Temperaturdifferenzen aufgelöst und werden diese anschließend addiert, erhält man Gl. 2-53 dem Wärmedurchgangswiderstand R_T [m²K/W] (Summe der reziproken Wärmedurchlasskoeffizienten).

$$\theta_i - \theta_e = q \cdot \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{h_e} \right) = q \cdot R_T \quad \text{Gl. 2-53}$$

2.3 Temperaturmessung

Im Folgenden werden Definitionen für die Begriffe Oberflächentemperatur und Lufttemperatur angegeben. Es wird auf die Messung dieser Temperaturgrößen und die mit der Messung verbundene Messunsicherheit eingegangen. Die Beurteilung der Messunsicherheit des zur Untersuchung der offenen Eissporthalle Bergheim eingesetzten Temperaturmesssystems (Kapitel 3.3.1, S.37), erfolgt auf Basis der folgenden theoretischen Grundlagen.

2.3.1 Oberflächentemperatur

„Die Oberflächentemperatur ist die Temperatur einer gegebenen Oberfläche“ laut ÖNORM EN ISO 7726 [22, S.9]. Sie wird mit Berührungsthermometern oder Strahlungsthermometern gemessen. Die folgenden Ausführungen gelten nur für Berührungsthermometer, im speziellen für dünne Thermoelemente, kleine Halbleiter-Widerstandssensoren sowie Metall-Schicht und Folien-Messwiderstände.

Nach der VORNORM ÖNORM ENV 13005 [23, S.10] gibt ein Messergebnis nur eine Näherung oder einen Schätzwert des Wertes einer Messgröße an. Ein Messergebnis ist nur dann vollständig wenn die Messunsicherheit des Schätzwertes angegeben wird.

Um die Einflüsse auf das Messergebnis einer Temperaturmesseinrichtung angeben zu können, ist in Abb. 2-12 der Aufbau und die Wirkungsweise einer solchen Messeinrichtung, die auch als Messkette bezeichnet wird, als schematisches Signalflussbild dargestellt.

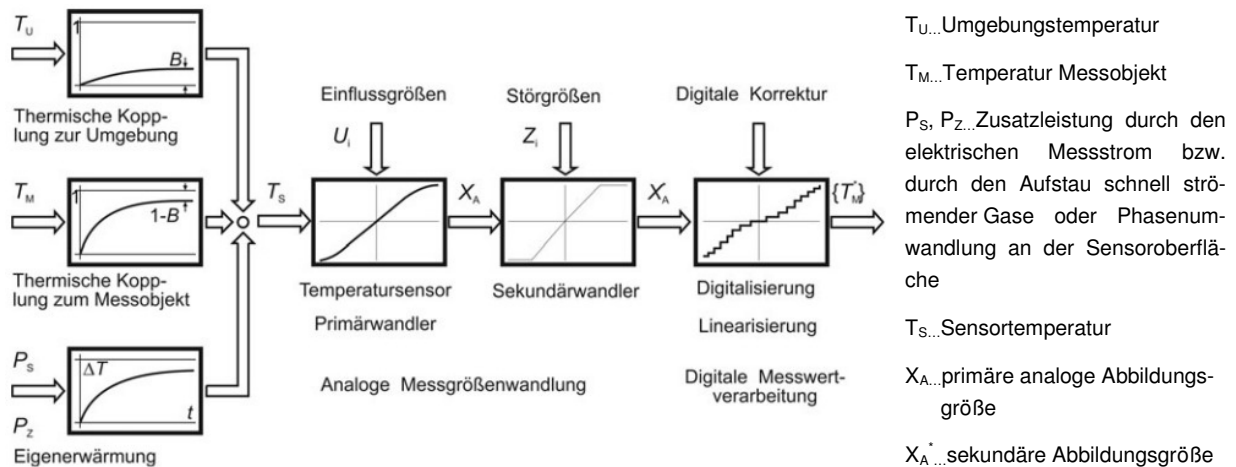


Abb. 2-12: Allgemeines Signalflussbild einer Temperaturmesseinrichtung mit Berührungsthermometer laut Bernhard [24, S.59]

Die Hauptbauteile der in Abb. 2-12 dargestellten Temperaturmesseinrichtung sind der Temperatursensor (auch Primärwandler), der Sekundärwandler (z.B. Brückenschaltung) und die Digitalisierungs- bzw. Linearisierungseinheit. Für eine Beschreibung der Aufgaben und Funktionsweise der Bauteile wird auf Bernhard [26, S.58ff] verwiesen.

Der Gesamtfehler δT einer Temperaturmesskette bei der Oberflächentemperaturmessung in Gl. 2-54 setzt sich laut Bernhard [24, S.64] aus dem thermischen Messfehler ΔT_{th} , dem Kennlinienfehler des Temperatursensors δT_{XA} , dem Fehler durch Einflussgrößen δT_{Ui} und dem Messfehler der Sensor-Ausgangsgröße δT_{XA^*} zusammen.

$$\delta T = \Delta T_{th} + \delta T_{XA} + \delta T_{Ui} + \delta T_{XA^*} \quad \text{Gl. 2-54}$$

Sind die Teilfehler (ΔT_{th} , δT_{XA} , δT_{Ui} , δT_{XA^*}) des Gesamtfehlers systematische Fehler, so kann der Temperaturwert des Messobjektes T_M laut Gl. 2-55 korrigiert werden.

$$T_M = T_S - \delta T \quad \text{Gl. 2-55}$$

In der Regel bestehen diese Teilfehler nicht nur aus systematischen, sondern auch aus zufälligen Fehlern bzw. Messunsicherheiten. Für diesen Fall wird von Bernhard [24, S.66] Gl. 2-56 vorgeschlagen, mit der die Gesamtunsicherheit $u(\delta T)$ des Messergebnisses abgeschätzt werden kann.

$$u(\delta T) = \sqrt{\frac{1}{3} * (\Delta T_{th}^2 + \delta T_{XA}^2 + \delta T_{Ui}^2 + \delta T_{XA^*}^2)} \quad \text{Gl. 2-56}$$

Da der thermische Messfehler ΔT_{th} - jener Fehler, der unter anderem bei der thermischen Kopplung des Temperatursensors (vgl. Sensortemperatur T_S in Abb. 2-12) mit dem Messobjekt und der Umgebung entsteht- in der Regel die größte Auswirkung auf den Gesamtfehler einer Temperaturmesskette hat, wird folgend nur auf diesen eingegangen.

Thermischer Messfehler

In Abb. 2-13 sind die Wärmeströme, die Temperaturverläufe und Isothermen eines Festkörpers vor und nach dem Aufsetzen eines Temperaturfühlers gegenübergestellt.

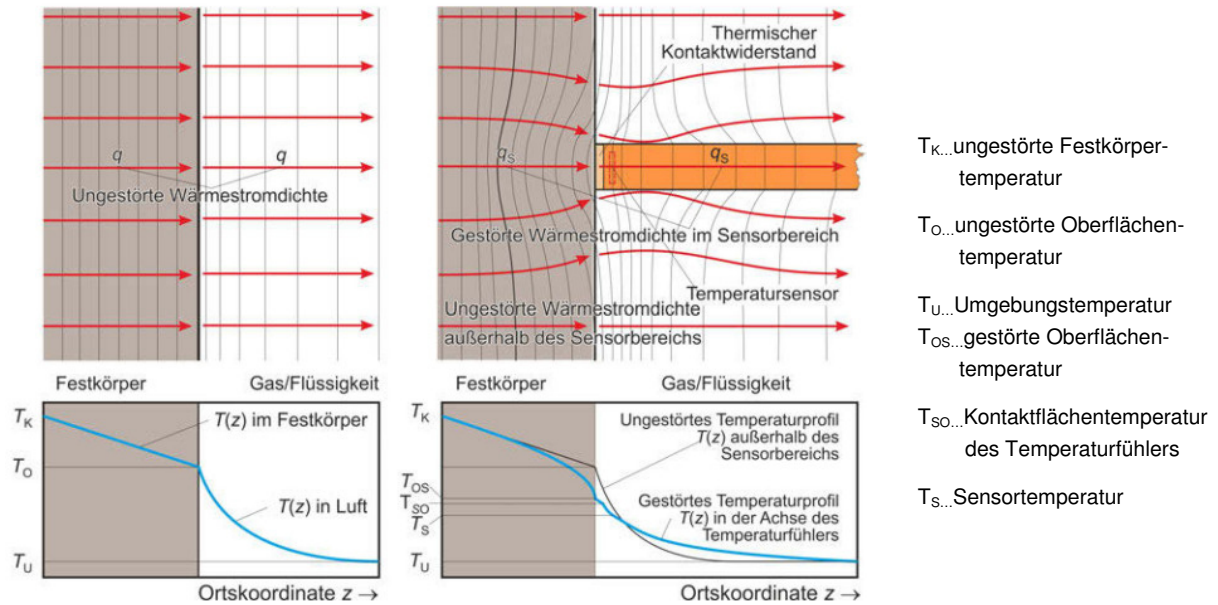


Abb. 2-13: Wärmeströme, Isothermen und Temperaturverläufe laut Bernhard [24, S.123]
 Links: Festkörper ohne Temperaturfühler; rechts: Festkörper mit aufgesetztem Temperaturfühler

Anhand Abb. 2-13 ist ersichtlich, dass infolge des aufgesetzten Temperaturfühlers das ursprünglich ungestörte Temperaturprofil, die ungestörte Oberflächentemperatur des Festkörpers T_o , sowie die Wärmestromdichte im Sensorbereich beeinflusst werden. Der Temperaturunterschied zwischen der Sensortemperatur T_s und der ungestörten Oberflächentemperatur T_o stellt den bereits vorhin erwähnten thermischen Messfehler ΔT_{th} dar (Gl. 2-57), der sich laut Bernhard [24, S.122] aus drei Teilfehlern zusammensetzt (Gl. 2-58 bis Gl. 2-61).

$$\Delta T_{th} = T_s - T_o \quad \text{Gl. 2-57}$$

$$\Delta T_{th} = \Delta T_{th,1} + \Delta T_{th,2} + \Delta T_{th,3} \quad \text{Gl. 2-58}$$

Der erste Teilfehler $\Delta T_{th,1}$ ist die Temperaturdifferenz zwischen gestörter und der ungestörter Oberflächentemperatur nach Gl. 2-59.

$$\Delta T_{th,1} = T_o - T_{os} \quad \text{Gl. 2-59}$$

Mit dem zweiten Teilfehler $\Delta T_{th,2}$ wird die Temperaturdifferenz zwischen der gestörten Oberflächentemperatur des Körpers T_{os} und der Kontaktflächentemperatur des Temperaturfühlers T_{so} , die sich infolge des Kontaktwiderstandes einstellt, angegeben (Gl. 2-60).

$$\Delta T_{th,2} = T_{os} - T_{so} \quad \text{Gl. 2-60}$$

Der dritte Teilfehler $\Delta T_{th,3}$ gibt die Temperaturdifferenz zwischen der Kontaktfläche des Temperaturfühlers T_{so} und dem Temperatursensor T_s an (Gl. 2-61).

$$\Delta T_{th,3} = T_{so} - T_s \quad \text{Gl. 2-61}$$

Laut Bernhard [26, S.106] ist der thermische Temperaturmessfehler ΔT_{th} annähernd proportional des ihn verursachenden Temperaturunterschiedes zwischen Oberfläche (T_O) und Umgebung (T_U), wenn dieser nicht sehr groß ist (Gl. 2-62).

$$\Delta T_{th} = T_S - T_O = B_S \cdot (T_U - T_O) \quad \text{Gl. 2-62}$$

Der Proportionalitätsfaktor B_S in Gl. 2-62 wird als Kopplungsfaktor bezeichnet. B_S kann in Abhängigkeit der Bauform des Temperaturfühlers und der einbautypischen thermischen Kopplungsverhältnisse mit von Bernhard [24, S.123ff] beschriebenen Modellen abgeschätzt oder experimentell ermittelt werden.

2.3.2 Lufttemperatur

„Die Lufttemperatur ist die Temperatur der den Menschen umgebenden Luft“ laut ÖNORM EN ISO 7726 [22, S.7]. Für die Messung der Lufttemperatur können in Abhängigkeit der jeweiligen Messsituation die im vorigen Kapitel erwähnten Berührungsthermometer eingesetzt werden. Anhand des Signalbildes der Temperaturmesseinrichtung mit Berührungsthermometern in Abb. 2-12 werden von Bernhard [24, S.200] schematisch die thermische Kopplung und die Einflussfaktoren auf die Sensortemperatur bei der Temperaturmessung in einem strömenden Medium (Luft) abgeleitet (Abb. 2-14).

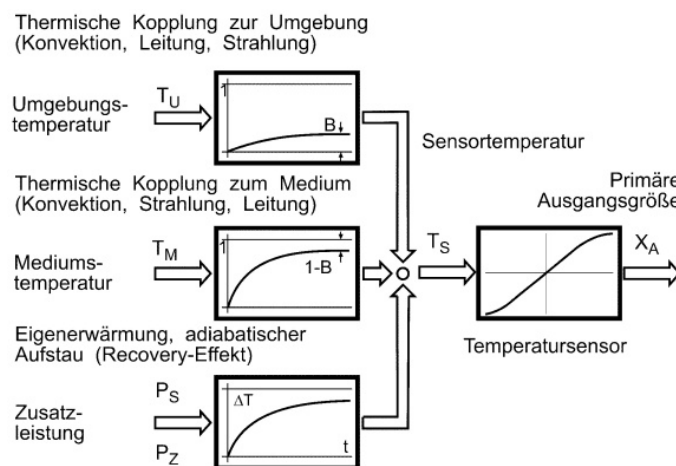


Abb. 2-14: Lufttemperaturmessung, thermische Kopplung und Einflussfaktoren laut Bernhard [24, S.200]

Die in Abb. 2-14 angedeuteten Wärmetransportmechanismen (Konvektion, Leitung und Strahlung), die sich infolge der thermische Kopplung zwischen der Umgebung und dem Temperatursensor bzw. dem Medium und dem Temperatursensor einstellen, sind je nach Messsituation unterschiedlich stark ausgeprägt und beeinflussen das Messergebnis. Da für die Lufttemperaturmessung im Kapitel 3 ein vorgefertigtes und in sich abgeschlossenes Messsystem verwendet wurde, wird an dieser Stelle nicht auf die Ermittlung der Messunsicherheit einer Lufttemperatur-Messeinrichtung eingegangen. Bezüglich des verwendeten Temperaturmesssystems ist jedoch anzumerken, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Luft die konvektive Wärmeübertragung zwischen der Luft und dem Temperatursensor stark beeinflusst und somit auch Auswirkungen auf das Messergebnis hat. Auch der Wärmestrah-

lungseinfluss der Umgebung auf den Temperatursensor (Messwertaufnehmer) spielt bei der Lufttemperaturmessung eine wichtige Rolle. In der ÖNORM EN ISO 7726 [22, S.17] werden Maßnahmen angegeben, wie z.B. die Reduzierung des Emissionsgrades des Messwertaufnehmers oder die Anordnung von reflektierenden Schirmen aus dünnen Aluminiumfolien zwischen dem Messwertaufnehmer und der Umgebung, um den Strahlungseinfluss auf den Messwertaufnehmer zu mindern.

2.4 Kondensationsschutz

Die vom Gasgemisch Luft aufnehmbare Wasserdampfmenge nimmt mit steigender Lufttemperatur zu. Dabei übt der Wasserdampf entsprechend seines Mengenanteils am Gasgemisch Luft den sogenannten Wasserdampfpartialdruck p [Pa] aus. Das Verhältnis zwischen Wasserdampfpartialdruck p und Sättigungsdampfdruck p_{sat} gibt die relative Luftfeuchtigkeit φ an (Gl. 2-63).

$$\varphi = \frac{p}{p_{sat}} [\%] \quad \text{Gl. 2-63}$$

Die Wasserdampfaufnahmefähigkeit ungesättigter Luft ist erreicht, wenn die ungesättigte Luft durch Feuchtigkeitszufuhr in Form von Wasserdampf oder durch Temperaturabsenkung in den Sättigungszustand ($\varphi = 100\%$) übergeht. Wird gesättigter Luft Wasserdampf zugeführt oder diese abgekühlt, fällt überschüssiger Wasserdampf, allgemein als Nebel bekannt, aus. Die Temperatur, bei der der Wasserdampfpartialdruck p gleich dem Sättigungsdruck p_{sat} ist, wird als Sättigungstemperatur Θ_{sat} (auch Taupunkttemperatur) bezeichnet. Mit den empirischen Gl. 2-64 und Gl. 2-65 laut ÖNORM B 8110-2 [25, S.19] kann der Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit der Temperatur berechnet werden.

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} [Pa] \quad \text{wenn } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ C \quad \text{Gl. 2-64}$$

$$p_{sat} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} [Pa] \quad \text{wenn } \theta < 0 \text{ } ^\circ C \quad \text{Gl. 2-65}$$

Liegt die Oberflächentemperatur eines Bauteils unter der Sättigungstemperatur der ihn umgebenden feuchten Luft, so wird der an der Bauteiloberfläche kondensierende Wasserdampf als Oberflächenkondensat bezeichnet.

Infolge von Wasserdampfdiffusion kann es auch im Inneren eines Bauteils, das zwei unterschiedliche Klimabereiche (bestimmt durch Lufttemperatur und -feuchtigkeit) trennt, zur Kondensatbildung kommen.

2.4.1 Kondensationsschutz im Hochbau nach ÖNORM B 8110-2

Die ÖNORM B 8110-2 [25, S.4ff] versteht unter Kondensationsschutz im Hochbau alle baulichen Maßnahmen, mithilfe derer unter dem der jeweiligen Nutzung entsprechendem Innenraum- und Außenklima kein Oberflächenkondensat entsteht, das Risiko von Schimmelbildung an der inneren Oberfläche von Außenbauteilen beschränkt wird und im Bauteilinneren schädliche Wasserdampfkondensation verhindert wird. Um diese Forderungen an den Kon-

densationsschutz einhalten zu können, werden in der ÖNORM B 8110-2 vereinfachte Rechenverfahren für eine entsprechende feuchtigkeitstechnische Bauteilbemessung angegeben. Die der feuchtigkeitstechnischen Bemessung zu Grunde liegenden Innen- und Außenluftbedingungen sind ebenfalls in der ÖNORM B 8110-2 geregelt, wobei sich die Angaben bezüglich der Innenluftbedingungen auf Wohnräume und Räume vergleichbarer Nutzung beschränken.

Mit der Forderung zur Vermeidung von schädlichem Wasserdampfkondensat im Inneren des Bauteils und einer kondensatfreien Innenoberfläche soll im Wesentlichen erreicht werden, dass Baustoffe durch Feuchtigkeitsanreicherung nicht geschädigt werden (Korrosion, Pilzbefall oder Ähnliches) bzw. deren Wärmeleitfähigkeit nur in beschränktem Maß zunimmt. Eine Erhöhung des massebezogenen Feuchtigkeitsgehaltes um mehr als 3 % ist bei Holz und Holzwerkstoffen unzulässig, der Wärmedurchlasswiderstand eines Bauteils darf sich nicht um mehr als 10 % verringern. Das Risiko von Schimmelbildung an der inneren Oberfläche ist vermindert, wenn die relative Feuchtigkeit an der Innenoberfläche einen Wert von 80 % nicht überschreitet.

2.4.2 Kondensationsschutz bei offenen Eissporthallen

Wie vorhin erläutert, ist der Kondensationsschutz im Hochbau durch die Bestimmungen der ÖNORM B 8110-2 eindeutig geregelt. Im Gegensatz dazu gibt es keine Normung, die den Kondensationsschutz bei offenen Eissporthallen regelt.

Als Hilfestellung kann die DIN 18036:2010-03 [1, S.13] herangezogen werden, die folgende Anforderung an die Decken von Eissporthallen stellt: *„Die Oberflächentemperatur von Tragkonstruktion und Decken in geschlossenen Eissporthallen muss über dem Taupunkt der Raumluft liegen. Decken von offenen Eissporthallen und die mit ihr verbundenen Einbauten sind so auszubilden, dass sie einer Kondensatbildung entgegenwirken“*. Für die Decken von offenen Eissporthallen sind in dieser Norm also keine konkreten Bemessungsregeln angegeben, aus denen Bauteilkonstruktionen abgeleitet werden können, die der Kondensatbildung vorbeugen. Jedoch wird in der DIN 18036:2010-03 [1, S.30] angemerkt, dass es sich bei Holz um einen besonders feuchteempfindlichen Werkstoff handelt, *„bei dem es bereits vor dem Erreichen des Taupunktes zu Einbußen im Tragverhalten und zu Schädigungen durch holzerstörende Holzfäule (Pilze) kommen kann“*. Weiters ist eine Auflistung von Regelungen (vgl. Tab. 2-5) angegeben, die zur Orientierung dienen [1, S.30].

Tab. 2-5: Gegenüberstellung von Normen nach DIN und ähnlichlautender ÖNORM

Normativer Verweis laut DIN 18036:2010-03	DIN vergleichbar mit ÖNORM
DIN EN 1995-1-1 (DIN 1052)	ÖNORM B 1995-1-1
DIN EN 335	ÖNORM EN 335
DIN EN 350	ÖNORM EN 350
DIN 68800	-

In der ÖNORM B 1995-1-1 [26], die die statische Bemessung von Holzbauten regelt, werden Tragwerke in Abhängigkeit von definierten Umgebungsbedingungen in drei sogenannte Nutzungsklassen laut Tab. 2-6 eingeteilt. Die Nutzungsklassen dienen der Zuordnung von Fes-

tigkeitskennwerten und der Verformungsberechnung, wobei mit steigender Nutzungsklasse die Festigkeitskennwerte abnehmen.

Tab. 2-6: Zuordnung von Tragwerken zu Nutzungsklassen laut ÖNORM B 1995-1-1 [26, S.7]

Nutzungsklasse	Umgebungs-klima		Holzfeuchte der meisten Nadelhölzer	Tragwerks- bzw. Gebäudetyp
	Temperatur	relative Luftfeuchte ^a		
1	20 °C	≤ 65 %	≤ 12 %	Innenräume von Wohn-, Schul- und Verwaltungsbauten
2	20 °C	≤ 85 %	≤ 20 %	Innenräume von Nutzbauten wie Lagerhallen, Reithallen und Industriehallen, sowie überdachte Konstruktionen im Freien, deren Bauteile nicht der freien Bewitterung ausgesetzt sind (30° Regeneinfallswinkel)
3	-	> 85 %	> 20 %	Bauteile im Freien mit konstruktivem Holzschutz

^a Die relative Luftfeuchte darf in den Nutzungsklassen 1 und 2 maximal für einige Wochen im Jahr die angegebenen Werte übersteigen.

Werden offene Eissporthallen in Holzbauweise auf Grund des Umgebungs-klimas der Nutzungsklasse 3 (Tab. 2-6) zugeordnet, so ist davon auszugehen, dass sich in Konstruktions-teilen eine Holzfeuchte von mindestens 20 % einstellt. Nach ÖNORM EN 335 [27, S.10] ist für die Entwicklung von Holz zerstörenden und verfärbenden Pilzen eine Holzfeuchte von mehr als 20 % erforderlich.

Für den Kondensationsschutz der Dachkonstruktion bei offenen Eissporthallen in Holzbauweise kann anhand der vorhin zitierten Normen abgeleitet werden, dass durch eine entsprechende Planung des Konstruktionsaufbaues der Kondensatbildung an den Bauteiloberflächen entgegenzuwirken ist und die Holzfeuchte der Konstruktionsteile einen Wert von 20 % nicht überschreiten soll.

Die weitere Arbeit beschränkt sich auf die Untersuchung des thermischen Verhaltens der Dachkonstruktionen der Überdachung des Eislaufplatzes in Bergheim und der in diesem Zusammenhang stehenden Bildung von Obeflächenkondensat an der Innenseite der Dachkonstruktion. Aussagen über die sich in den Konstruktionsbauteilen einstellende Holzfeuchte werden im Rahmen dieser Arbeit nicht getroffen.

3 MESSUNG UND AUSWERTUNG

Im ersten Teil dieses Kapitels wird der überdachte Eislaufplatz in Bergheim [6], [7, S.1113ff] hinsichtlich seines Tragsystems und Konstruktionsaufbaus sowie der anlagentechnischen Ausstattung und Betriebscharakteristik vorgestellt. Die Kenntnis dieser Fakten ist zweckmäßig, um die Messdaten interpretieren zu können. Es folgt die Beschreibung der an der Dachkonstruktion des Eislaufplatzes durchgeführten Messungen und deren Auswertung.

3.1 Beschreibung des überdachten Eislaufplatzes Bergheim

In der Salzburger Umlandgemeinde Bergheim wird am Areal der Freizeitbetriebe Bergheim eine 20 x 40 Meter große Asphaltfläche im Sommer als Minigolfanlage und im Winter als Eislaufplatz genutzt. Die beiden Nutzungen der frei bewetterten Fläche waren bis zum Jahr 2005 wegen des fehlenden Sonnen- und Witterungsschutzes nur eingeschränkt möglich. 2005 wurden die Pläne des Unternehmens mfgarchitekten [6] zur Überdachung dieser Fläche realisiert. Der überdachte Eislaufplatz entspricht auf Grund der Betriebscharakteristik während der Winternutzung, der im Kapitel 1.1 beschriebenen Definition einer offenen Eissporthalle. In der weiteren Arbeit wird der überdachte Eislaufplatz Bergheim als offene Eissporthalle Bergeheim bezeichnet.

3.1.1 Tragsystem und Konstruktionsaufbau

Der Baukörper der Eishalle Bergheim setzt sich aus großen flächenhaften Elementen zusammen. Als Hauptelemente sind die Asphaltfläche, die Dachfläche mit integriertem, zentral angeordnetem Oberlicht, der darunterliegende Deckenrost, das horizontal auskragende Vordach und die teilweise verschiebbaren textilbespannten Vertikalelemente zu nennen (Abb. 3-1 bis Abb. 3-4).



Abb. 3-1: Außenansichten der Eishalle Bergheim (© Paul Ott, Graz)¹)

Links: Süd- und Westseite der Halle mit den textilbespannten, verschiebbaren Vertikalelemente in geschlossener Position; rechts: Ost- und Südseite der Halle mit den Schiebeelementen im geöffneten Zustand.

¹ Paul Ott, Kernstockgasse 22/24, A-8020 Graz; <http://paul-ott.at>



Abb. 3-2: Innenansichten der Eishalle Bergheim (© Paul Ott, Graz)²

Links: Südwest- Ecke; rechts: Blick in Hallenlängsrichtung auf die Westseite.

Die ausgekreuzten Pendelstützen, der Deckenrost unter der Dachplatte, das Oberlicht und die textilbespannten Vertikalelemente als Sonnenschutz (teils verschiebbar und teils fest montiert) sind ersichtlich.

Das primäre Tragsystem bilden in Hallenquerrichtung gespannte Einfeldträger aus Brett-schichtholz (BSH), die auf den Pendelstützen aus BSH lagern. Die zwischen den BSH-Trägern einachsig gespannte Dachplatte aus Brettsperrholz (CLT) steift das Dachtragwerk aus. In jeder Hallenwand sind zwei Stützenfelder mittels Stahlstangen ausgesteift und stabilisieren die Pendelstützen. Ein detaillierter Konstruktionsaufbau in graphischer Form findet sich in Abb. A- 2 des Anhangs (S.104), weshalb an dieser Stelle nur die wichtigsten Hallen-elemente verbal beschrieben werden.

Die opaken Teile der Dachfläche und des Vordaches bestehen aus der bereits erwähnten Dachplatte aus CLT (108 mm) und dem darauf mechanisch befestigten Kunststofffolien-dach (1,5 mm). Die Oberlichtkonstruktion umfasst die zwischen den BSH-Trägern gespannten Holzpfetten mit den darauf montierten Polycarbonatwellplatten. Der Deckenrost wird aus einer auf Konterlatten befestigten sägerauen Fichtenlattung (50/30 mm) gebildet und ist über eine Pfettenkonstruktion an die Unterseite der BSH-Träger geschraubt. Die Trennung zwischen dem Dachraum und dem Hallenraum wird durch den Deckenrost markiert.

Die teilweise verschiebbaren Vertikalelemente bestehen aus einem mit Polyestergerewebe bespannten Stahlrohrrahmen. Sie sind an der Ost-, Süd- und Westseite angeordnet und dienen als Sonnen- und Windschutz. Folgende Stützenfelder können durch die Vertikalelemente geöffnet werden (vgl. Abb. 3-3 und Abb. 3-4):

- an der Ost- und Westseite die Felder zwischen den Achsen A-B, C-D und E-F
- an der Südseite die Felder zwischen den Achsen 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 und 9-10

An der Nordseite ist die Eissporthalle über die Höhe des Hallenraums offen, es gibt also keine bauliche Trennung zwischen Hallenraum und Umgebung.

² Paul Ott, Kernstockgasse 22/24, A-8020 Graz; www.paul-ott.at

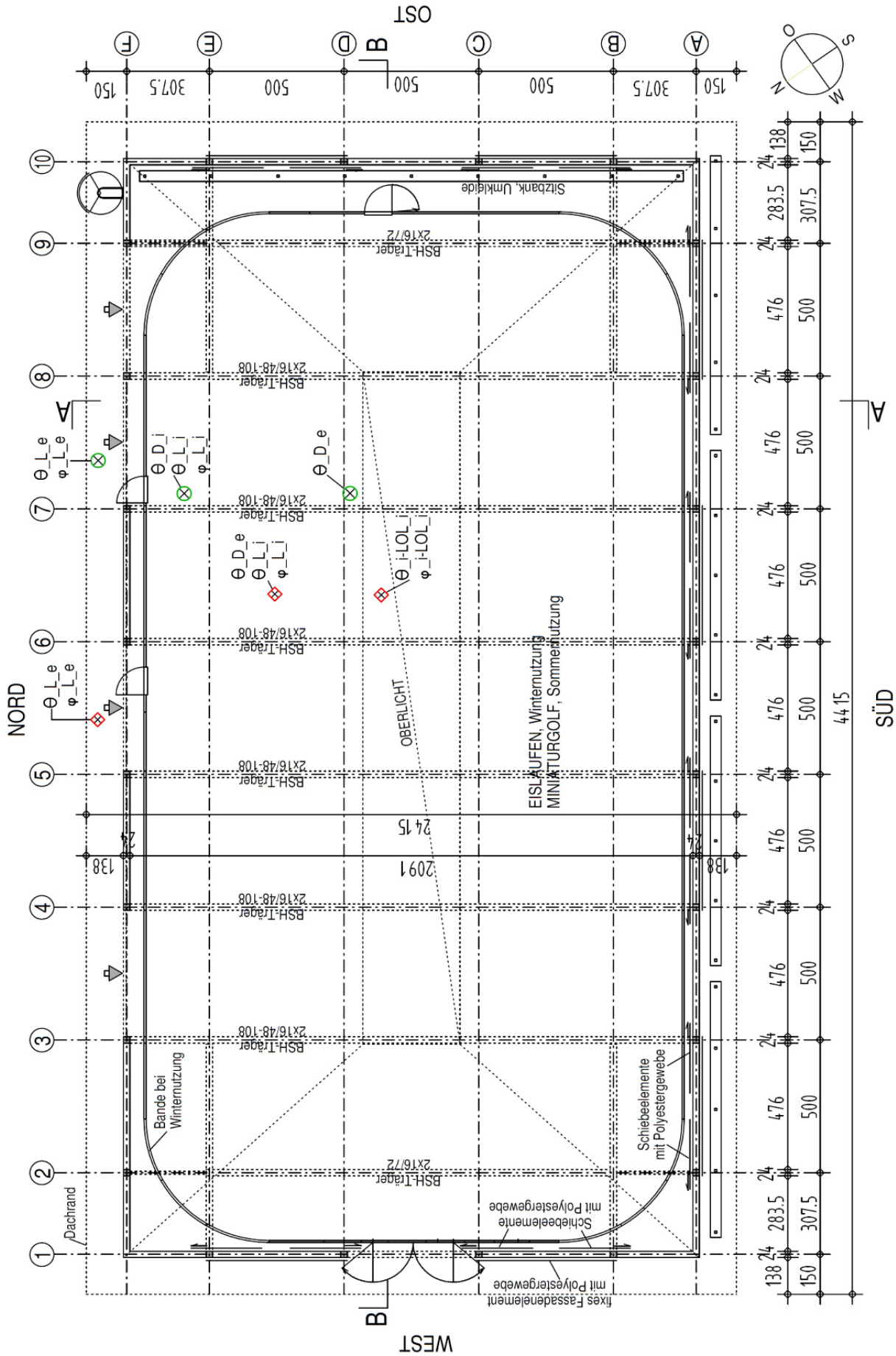


Abb. 3-3: Grundriss der Eishalle Bergheim; Lage der Messpunkte; überarbeitet nach mfgarchitekten [6]; Legende siehe Abb. 3-4

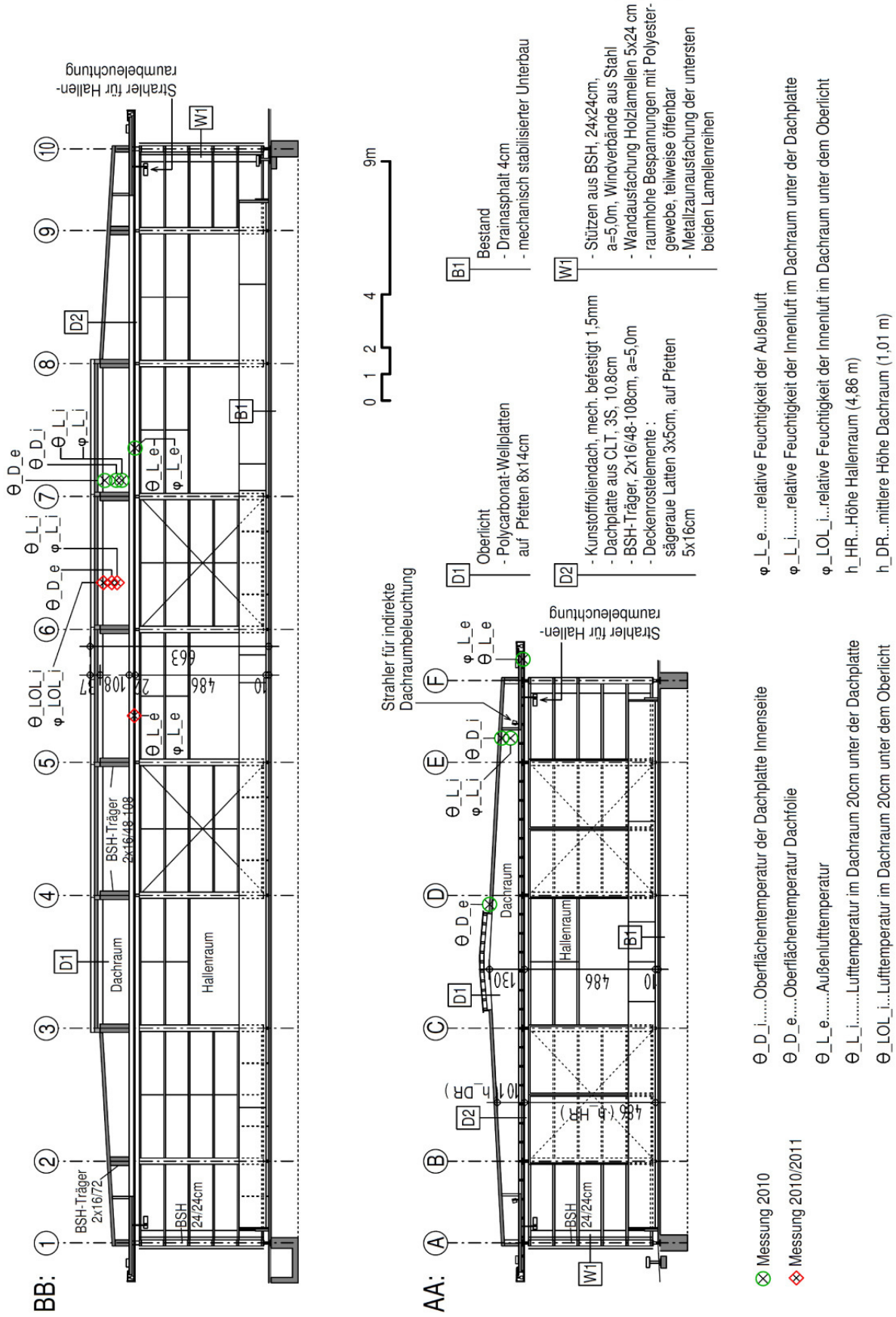


Abb. 3-4: Schnitte der Eishalle Bergheim; Lage der Messpunkte; überarbeitet nach mfgarchitekten [6]

3.1.2 Anlagentechnische Ausstattung und Betriebscharakteristik

In Abhängigkeit der Nutzung werden die Kältemaschine und die textilbespannten verschiebbaren Vertikalelemente wie folgt betrieben.

Winternutzung

Die zur künstlichen Eiszeugung notwendige Kältemaschine ist im Nebengebäude der Eis-sporthalle untergebracht. Laut Auskunft des Betriebsleiters wird Mitte November mit der Herstellung der Eisfläche begonnen, die im Betriebszustand 5 bis 6 cm dick ist. Während des Eislaufbetriebes hat das Kältemittel, das durch die in der Asphaltfläche integrierte Verrohrung gepumpt wird, eine Vorlauftemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Fällt die Außenlufttemperatur an kalten Tagen unter die Vorlauftemperatur, schaltet sich die Kältemaschine ab. Am Ende der zweiten Märzwoche wird der Eislaufbetrieb eingestellt und die Kältemaschine abgeschaltet. Zum Schutz vor Wind, Sonne und Flugschnee bleiben die Vertikalelemente in geschlossener Position (Abb. 3-1 links).

Sommernutzung

Bei der Nutzung als Miniaturgolfanlage entscheidet der Besucher über das Öffnen oder Schließen der Vertikalelemente.

Beleuchtung

Für die künstliche Beleuchtung der Nutzfläche sind Strahler mit einer Nennleistung von 500 W im Dachraum (als indirekte Beleuchtung) und im Hallenraum (als direkte Beleuchtung) angeordnet. Die Beleuchtungsdauer wird bedarfsabhängig vom Betriebsleiter gesteuert.

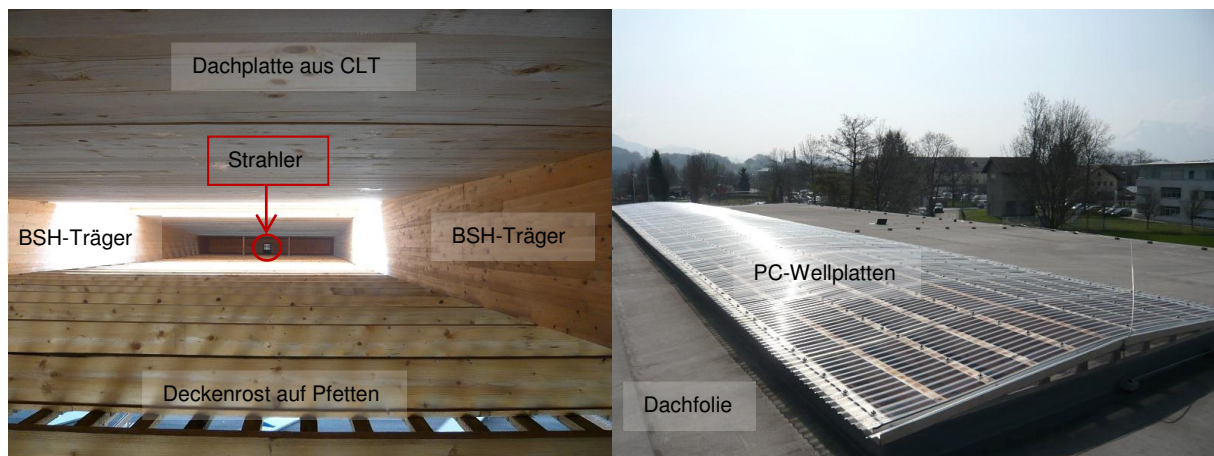


Abb. 3-5: Dachraum und Oberlicht der Eishalle Bergheim³

Links: Blick in den Dachraum und auf den Strahler für die indirekte Beleuchtung. In Bildmitte ist der natürliche Lichteinfall durch das Oberlicht sichtbar. Rechts: Polycarbonat-Wellplatten des Oberlichts

³ Dipl.-Ing. Dr.techn. Architekt Michael Grobbauer [6]

3.2 Messziele und Messeinrichtung

Im Zuge zweier Messreihen wurden vom Institut für Hochbau der TU Graz an der Dachplatte der Eissporthalle Oberflächentemperaturmessungen durchgeführt und zeitgleich das Außen- und Innenklima der Eissporthalle mittels Lufttemperatur- und -feuchtemessungen erfasst. Die erste Messreihe dauerte vom 21.02.2010 bis zum 08.04.2010 und wird in der vorliegenden Arbeit als „Messung 2010“ bezeichnet. Die zweite Messreihe wurde vom 17.10.2010 bis zum 14.04.2011, im Weiteren als „Messung 2010/2011“ bezeichnet, durchgeführt. Die beiden Messungen unterscheiden sich im Datenaufzeichnungsintervall sowie teilweise in den Positionen der Messfühler.

3.2.1 Messziele

Ein Ziel der Messungen besteht darin, die das Feuchteverhalten der Dachplatte beeinflussenden thermischen Vorgänge zu untersuchen. In diesem Zusammenhang werden in der Messdatenauswertung die Messwerte grafisch dargestellt und Aussagen bezüglich folgender Punkte getroffen:

- Wärmestrahlungsverluste der Dachplatte an die Eisfläche
- Wärmespeicherverhalten der Dachplatte und deren solare Erwärmung
- Kondensationsdauer an der dem Eis zugewandten Oberfläche der Dachplatte
- relative Feuchtigkeit der Luft im Dachraum sowie der Außenluft

3.2.2 Messeinrichtung

Messung der Oberflächentemperatur

Die Messung der Oberflächentemperaturen erfolgte mit Pt100-Widerstandsthermometern (Klasse A), die an Datenlogger des Modells TGP-4104 der Firma Gemini Data Loggers [28] angeschlossen wurden. Laut Produktdatenblatt der Firma kann dieses Messsystem, bestehend aus Widerstandsthermometer und Datenlogger, im Temperaturbereich von -50 bis 600 °C (abhängig vom Widerstandsthermometer) eingesetzt werden. Die Ansprechzeit des Widerstandsthermometers in Wasser beträgt 25 Sekunden für 90 % des Messbereichs. Die Auflösung des Messsystems wird mit 0,02 °C angegeben. Die Messunsicherheit des Messsystems wird im Bereich von -50 bis 0 °C mit $\pm 0,4$ K angegeben und steigt dann linear bis zum oberen Messbereich von 600 °C auf $\pm 1,8$ K an (vgl. Abb. 3-6).

Für die Messung der Oberflächentemperaturen an der Dachplatte (Θ_{D_i} , Θ_{D_e}) wurden die Pt100-Widerstandsthermometer mittels wärmeleitendem Pad an der jeweiligen Oberfläche befestigt und durch ein Klebeband, das den Sensor vollständig überdeckt, gesichert.

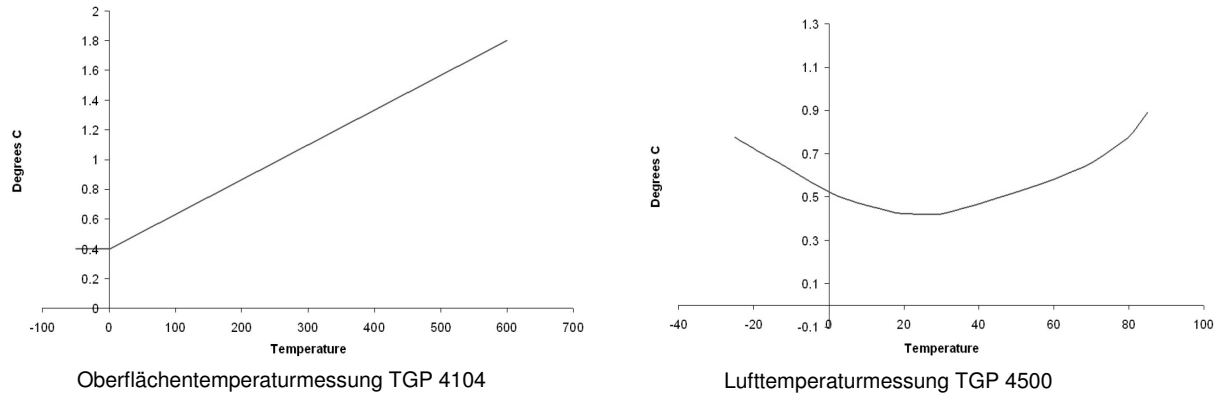


Abb. 3-6: Messunsicherheiten der verwendeten Temperaturmesssysteme laut Gemini Data Loggers [30]

Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit

Für die Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit im Dachraum sowie außerhalb der Halle wurde ein von der Firma Gemini Data Loggers [30] vorgefertigtes und in sich abgeschlossenes Messsystem verwendet, das die Modellbezeichnung TGP-4500 trägt. Dieses Messsystem besteht aus dem Datenlogger, in dessen Gehäuse die Messelektronik sowie der Temperatur- und Feuchtesensor integriert sind.

Der Messbereich des NTC-Temperatursensors (negative temperature coefficient) liegt zwischen -25 und 85 °C bei einer Auflösung von 0,01 °C. Die Ansprechzeit des Temperatursensors in bewegter Luft ist mit 25 Minuten für 90 % des Messbereichs angegeben. Die Messunsicherheit des Temperatursensors liegt laut Abb. 3-6 im Temperaturbereich von 20 bis 30 °C bei mindestens ±0,4 K und steigt außerhalb dieses Temperaturbereiches nichtlinear bis auf ±0,9 K an.

Der Messbereich des kapazitiven Feuchtesensors liegt zwischen 0 und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit bei Lufttemperaturen von -40 bis 60 °C. Die Auflösung des Sensors wird mit 0,3 % relativer Feuchtigkeit angegeben, die Ansprechzeit beträgt 40 Sekunden für 90 % des Messbereichs. Die Messunsicherheit des Feuchtesensors wird von der Firma Gemini Data Loggers [30] nur für einen Temperaturwert von 25 °C angegeben, bei dem die Messunsicherheit ±3,0 % relativer Luftfeuchtigkeit beträgt.

Zur Messung des Klimas im Dachraum (Θ_{L_i} , φ_{L_i}) wurde ein Datenlogger TGP-4500 20 cm unterhalb der Dachplatte, im Bereich des Pt100-Widerstandsthermometers zur Messung von Θ_{D_i} positioniert. Das Außenklima (Θ_{L_e} , φ_{L_e}) wurde mit einem weiteren Datenlogger TGP-4500 im Bereich des Vordachs zwischen horizontal auskragender Dachplatte und Deckenrost erfasst.

Die Lage der Messpunkte (Messung 2010 und 2010/2011) für die Temperatur- und Luftfeuchtemessung sind in Abb. 3-3 bzw. Abb. 3-4 dargestellt.

In Tab. 3-1 werden die bei der Messung 2010 und 2010/2011 erfassten Messgrößen angegeben.

Tab. 3-1: Erfasste Messgrößen der Messung 2010 und 2010/2011

Kurzbezeichnung	Beschreibung	Messung 2010	Messung 2010/2011
Θ_{D_e}	Temperatur der auf der Dachplatte außen angebrachten Dachfolie	X	X
Θ_{D_i}	Temperatur an der dem Eis zugewandten Oberfläche der Dachplatte (auch als "Oberflächentemperatur der Dachplatte innen" bezeichnet)	X	
Θ_{L_i}	Lufttemperatur im Dachraum 20 cm unter der Dachplatte (CLT)	X	X
φ_{L_i}	relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum 20 cm unter der Dachplatte (CLT)	X	X
Θ_{LOL_i}	Lufttemperatur im Dachraum 20 cm unter dem Oberlicht (PC-Wellplatte)		X
φ_{LOL_i}	relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum 20 cm unter dem Oberlicht (PC-Wellplatte)		X
Θ_{L_e}	Außenlufttemperatur	X	X
φ_{L_e}	relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft	X	X

Die Messdaten der beiden Messreihen sind grafisch in Abb. A- 3 bis Abb. A- 11 des Anhangs (S. 94-102) dargestellt.

3.3 Auswertung und Interpretation der Messdaten

Um verallgemeinerte Aussagen bezüglich des thermischen Verhaltens über die gesamte Messdauer treffen zu können, ist eine Darstellung der Tagesmittelwerte sinnvoll. Aus diesem Grund wird bei der Interpretation der Messung 2010 bzw. 2010/2011 am Beginn des jeweiligen Kapitels (Kapitel 3.3.2 und 3.3.3) eine Darstellung der Tagesmittelwerte über die gesamte Messdauer abgebildet und diskutiert. Anschließend werden die Messwerte ausgewählter Tage, an denen der solare Strahlungseinfluss auf das Temperaturverhalten der Eissporthalle gut nachvollziehbar ist, im jeweiligen Aufzeichnungsintervall betrachtet.

Zur Ergänzung und Unterstützung der Interpretation der beiden Messreihen sind im Anhang die Tagesmittelwerte der zeitgleich gemessenen meteorologischen Daten der am Salzburger Flughafen befindlichen Wetterstation der ZAMG [29] zusammengefasst (Tab. A- 1 S. 103, Tab. A- 2 S. 104). Zwischen dem Salzburger Flughafen und der offenen Eissporthalle Bergheim liegen ca. sechs Kilometer Luftlinie.

Auf die Intensität der solaren Einstrahlung bei der Auswertung der Messwerte kann mit den in Tab. A- 1 und Tab. A- 2 angegebenen Bewölkungsgrad geschlossen werden. Es sei angemerkt, dass der Bewölkungsgrad in Tab. A- 1 und Tab. A- 2 dem Mittelwert aus den Beobachtungen um 07:00, 14:00 und 19:00 Uhr entspricht und somit der Bewölkungsgrad in den Nachtstunden unbekannt ist. Laut Podesser et al. [30] werden Tage hinsichtlich des Bewölkungsgrads wie folgt klassifiziert:

- heitere Tage: Bewölkungsgrad kleiner 20 %
- freundliche Tage: Bewölkungsgrad von 21 bis 50 %
- Tage mit mittlerer Bewölkung: Bewölkungsgrad von 51 bis 80 %
- trübe Tage: Bewölkungsgrad über 80 %

3.3.1 Anmerkung zur Messunsicherheit

Die eingesetzten Temperaturmesssysteme wurden vom Hersteller kalibriert und sollten erwartungsgemäß mit den von ihm angegebenen Messunsicherheiten (vgl. Kapitel 3.2.2) behaftet sein. Eine Überprüfung der Messsysteme vor bzw. nach deren Einsatz wurde nicht durchgeführt.

Messunsicherheit Oberflächentemperaturmessung

In Kapitel 2.3.1 ist der Einfluss der thermischen Kopplung (thermischer Messfehler) zwischen Temperaturfühler und seiner Umgebung bzw. dem Messobjekt erläutert.

Durch das Sichern der Temperatursensoren mittels Klebebandes wird der Emissionskoeffizient der metallischen Oberfläche des Pt100-Widerstandsthermometers an die Emissionskoeffizienten der Dachplattenoberflächen (Holz innen bzw. Dachfolie außen) angepasst, so dass ein Temperaturmessfehler infolge verringerter Emission von Wärmestrahlung der ursprünglich metallischen Thermometeroberfläche auszuschließen ist. In den gemessenen Oberflächentemperaturen der Dachplatte (Θ_{D_i} , Θ_{D_e}) wird der Wärmestrahlungsaustausch der Dachplatte mit ihrer Umgebung (innen vorwiegend mit der Eisfläche bzw. außen mit dem Himmel) abgebildet.

Die thermischen Messfehler durch das Anbringen der Pt100-Widerstandsthermometer an den Oberflächen der Dachplatte wurden nicht bestimmt. Es ist also davon auszugehen, dass die Messergebnisse eine größere Messunsicherheit aufweisen, als die vom Hersteller angegebene.

Messunsicherheit Lufttemperaturmessung

Der für die Lufttemperaturmessung verwendete Datenlogger schützt durch die Anordnung des Lufttemperatursensors im Inneren des Datenlogger-Gehäuses diesen vor dem Wärmestrahlungseinfluss der Umgebung. Inwieweit das Gehäuse des Datenloggers einen vergleichbaren Schutz vor Wärmestrahlung wie ein Schirm aus Aluminiumfolien bietet (vgl. Kapitel 2.3.2), kann nicht beurteilt werden.

3.3.2 Interpretation der Messung 2010

Die Messung 2010 erfasst die letzten drei Wochen der Eislaufsaison 2009/2010 bis zum Abschalten der Kältemaschine (21.02. - 15.03.) und die darauffolgenden vier Wochen.

3.3.2.1 Tagesmittelwerte 2010

In Abb. 3-7 sind die Tagesmittelwerte der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung 2010 dargestellt, wobei die relative Feuchtigkeit an der Oberfläche der Dachplatte innen (φ_{D_i}) aus den Messwerten φ_{L_i} , Θ_{L_i} und Θ_{D_i} unter Einbeziehung von Gl. 2-63 bis Gl. 2-65 berechnet wurde. Die aus der Messung 2010 ermittelten Tagesmittelwerte der Außenlufttemperatur (Abb. 3-7) stimmen mit den Messdaten der am Salzburger Flughafen befindlichen Wetterstation der ZAMG (vgl. Tab. A- 1 im Anhang) über weite Bereiche überein.

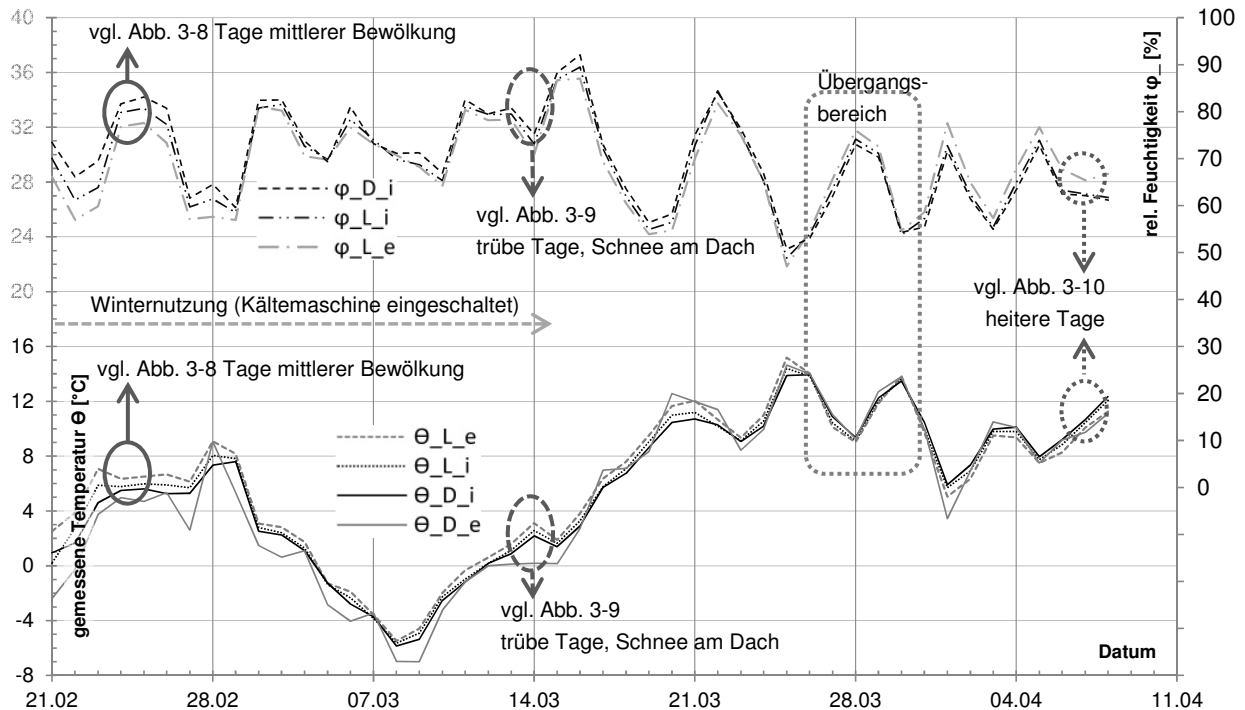


Abb. 3-7: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung 2010, Tagesmittelwerte sowie Kennzeichnung ausgewählter Tage

φ_{D_i} ...berechnete rel. Feuchtigkeit an der Oberfläche der Dachplatte innen, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit im Dachraum unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft, θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, θ_{L_i} ...Lufttemp. im Dachraum unter der Dachplatte, θ_{D_i} ...Oberflächentemperatur der Dachplatte innen, θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Betrachtet man die Verläufe der Tagesmittelwerte in Abb. 3-7, so sind für den Zeitraum vom 21.02.2010 bis zum 26.03.2010, also der Zeit während des Eislaufbetriebes und den darauffolgenden elf Tagen, nachdem die Kältemaschine abgeschaltet wurde, folgende Zusammenhänge ersichtlich:

- $\theta_{D_i} \leq \theta_{L_i} < \theta_{L_e}$ (Ausnahmen am 05.03. und am 07.03.)
- $\varphi_{D_i} > \varphi_{L_i} > \varphi_{L_e}$ (vereinzelte Ausnahmen vom 04.03. bis 09.03.)

Der Zeitraum vom 26.03.2010 bis zum 31.03.2010 stellt einen Übergangsbereich dar, während dessen sich die Verläufe der Tagesmittelwerte annähern. Vom Ende dieses Übergangsbereiches bis zum 08.04.2010 stellen sich die Verläufe der Tagesmittelwerte folgenderweise ein:

- $\theta_{D_i} > \theta_{L_i} > \theta_{L_e}$
- $\varphi_{D_i} < \varphi_{L_i} < \varphi_{L_e}$

Aufgrund dieser Beobachtungen können die folgenden verallgemeinerten Aussagen bezüglich des thermischen Verhaltens der Eissporthalle während des Eislaufbetriebes formuliert werden:

- Der in die Eissporthalle strömenden Außenluft wird infolge des konvektiven Wärmeaustausches mit der kühleren Eisfläche und der kühleren Innenseite der Dachplatte Wärme entzogen.

- Durch diesen Abkühlungsvorgang steigt die relative Feuchtigkeit der Luft im Dachraum über die relative Feuchtigkeit der Außenluft an, unter der Voraussetzung, dass keine Feuchtigkeit zugeführt bzw. entzogen wird.
- Die Oberflächentemperatur der Dachplatte innen liegt tendenziell unter der Lufttemperatur des Dachraums und diese unter der Außenlufttemperatur.

Die in der Einleitung erwähnte Problematik bezüglich der Kondensatbildung an der Deckeninnenseite offener Eissporthallen ist anhand dieser verallgemeinerten Aussagen gut nachvollziehbar.

3.3.2.2 Messwerte an Tagen mittlerer Bewölkung 2010

Anhand des in Abb. 3-8 gezeigten Verlaufs der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte 2010 (Eislaufbetrieb, Tage mittlerer Bewölkung), wird auf das Wärmespeicherverhalten der Dachplatte und auf die Kondensatbildung an der Innenseite der Dachplatte eingegangen.

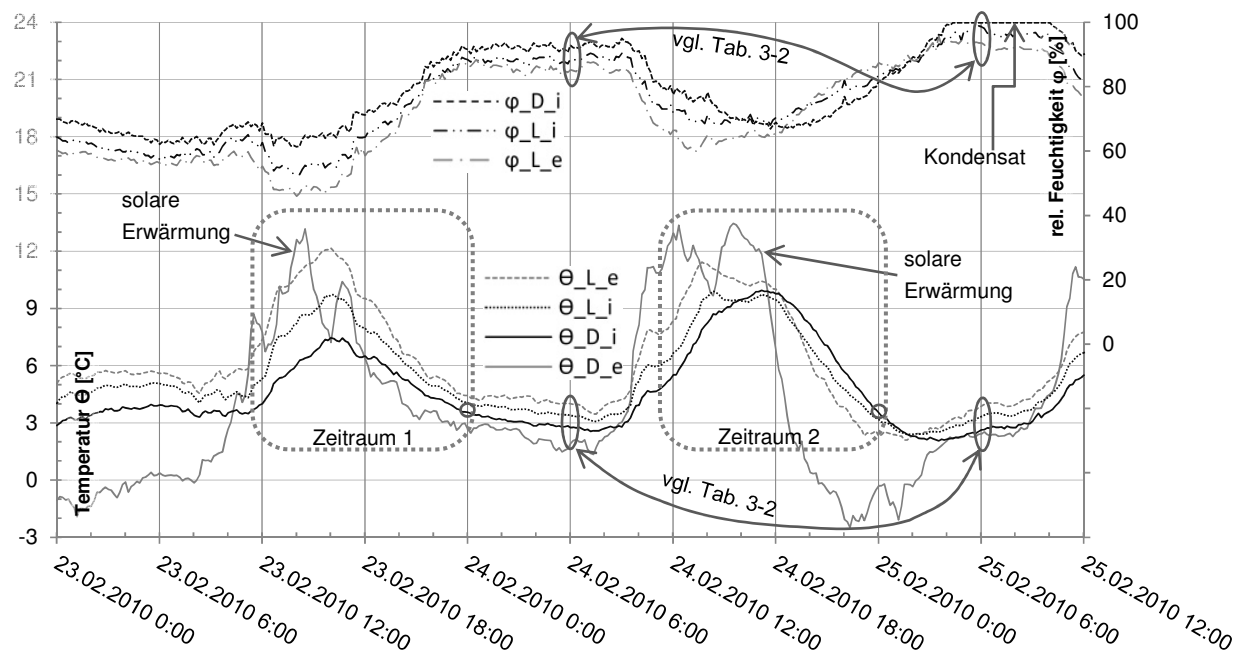


Abb. 3-8: 10-Minutenwerte der Messung 2010 - Tage mittlerer Bewölkung - Winternutzung
 φ_{D_i} ...berechnete rel. Feuchtigkeit an der Oberfläche der Dachplatte innen, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit im Dachraum unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft,
 Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{L_i} ...Lufttemp. im Dachraum unter der Dachplatte,
 Θ_{D_i} ...Oberflächentemperatur der Dachplatte innen, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Aus dem Vergleich der Temperaturverläufe des in Abb. 3-8 dargestellten Zeitraums 1 und 2 ist die solare Erwärmung der Dachplatte und das Wärmespeicherverhalten dieser gut erkennbar:

- Die Anzahl der Stunden, in denen Θ_{D_e} über Θ_{L_e} liegt, ist durch die solare Einstrahlung im Zeitraum 2 größer als im Zeitraum 1. Folglich erreicht Θ_{D_i} im Zeitraum 2 einen höheren Wert als im Zeitraum 1 und die Dachplatte speichert im Zeitraum 2 mehr Wärme als im Zeitraum 1.
- Obwohl Θ_{L_e} in den späten Abendstunden des Zeitraumes 2 deutlich steiler abfällt als im Zeitraum 1 und zusätzlich die Wärmeabstrahlung der Dachfolie an den Himmel

des Zeitraumes 2 stärker ausgeprägt ist als im Zeitraum 1 (erkennbar am Verlauf von Θ_{D_e}), sind am Ende der beiden Zeiträume (24.02.2010 bzw. 25.02.2010 um 00:00 Uhr) die Werte für Θ_{D_i} annähernd gleich, was durch die Wärmespeicherfähigkeit der Dachplatte begründet ist.

Das Wärmespeicherverhalten der Dachplatte trägt auch dazu bei, dass Θ_{D_i} in den späten Abendstunden des Zeitraums 2 (18:00 – 24:00 Uhr) über Θ_{L_i} liegt, während vergleichsweise in den späten Abendstunden des Zeitraums 1 (18:00 – 24:00 Uhr), Θ_{D_i} unter Θ_{L_i} liegt. Werden die eben beschriebenen Temperaturdifferenzen zwischen Θ_{D_i} und Θ_{L_i} in Hinblick auf die Kondensatentstehung an der Innenseite der Dachplatte gegenübergestellt, so ist zu erkennen, dass es im Zeitraum 2 beim Abkühlen der Innenseite der Dachplatte (18:00 – 24:00 Uhr) nie zur Unterschreitung der Taupunkttemperatur kommen kann, da Θ_{D_i} über Θ_{L_i} liegt. Im Gegensatz dazu liegt im Zeitraum 1 Θ_{D_i} immer unter Θ_{L_i} (18:00 – 24:00 Uhr), wodurch es in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit zur Taupunkttemperaturunterschreitung und folglich zur Kondensatbildung kommen kann.

Die Wärmespeicherfähigkeit der Dachplatte trägt somit unter bestimmten klimatischen Randbedingungen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Oberflächenkondensat an der Innenseite der Dachplatte bei.

Dass die Wirksamkeit der Wärmespeicherung bezüglich der Vermeidung von Kondensat an der Dachplatte innen beschränkt ist, und dass es bei annähernd gleichen Temperaturverhältnissen durch einen Anstieg der relativen Feuchtigkeit der Außenluft, der zu einer noch höheren relativen Luftfeuchtigkeit im Dachraum führt (die Außenluft strömt in die offene Eissporthalle und wird dabei abgekühlt), zur Bildung von Oberflächenkondensat kommen kann, wird anhand des Vergleichs der Messwerte um 06:00 Uhr am 24.02.2010 mit denen am 25.02.2010 um 06:00 Uhr deutlich (vgl. Abb. 3-8 und Tab. 3-2).

Tab. 3-2: Vergleich der Messwerte um 06:00 Uhr des 24.02.2010 mit denen des 25.02.2010

Datum, Uhrzeit	Θ_{L_e} [°C]	Θ_{L_i} [°C]	Θ_{D_i} [°C]	Θ_{D_e} [°C]	φ_{L_e} [%]	φ_{L_i} [%]	φ_{D_i} [%]
24.02.2010 06:00	4,0	3,4	2,7	1,9	85	88	93
25.02.2010 06:00	3,8	3,3	2,6	2,4	94	98	100

3.3.2.3 Messwerte an trüben Tagen 2010

In Abb. 3-9 sind die Verläufe der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte 2010 an trüben Tagen während des Eislaufbetriebs dargestellt. Aufgrund des annähernd konstanten Verlaufes der Temperaturmesswerte der Dachfolie (Θ_{D_e} von 0,1 °C bis 0,3 °C) und den meteorologischen Aufzeichnungen der ZAMG laut Tab. A- 1 (S.103) ist davon auszugehen, dass während des in Abb. 3-9 gezeigten Zeitraumes das Dach der Eissporthalle zumindest im Bereich des Temperatursensors für Θ_{D_e} mit Schnee bedeckt war.

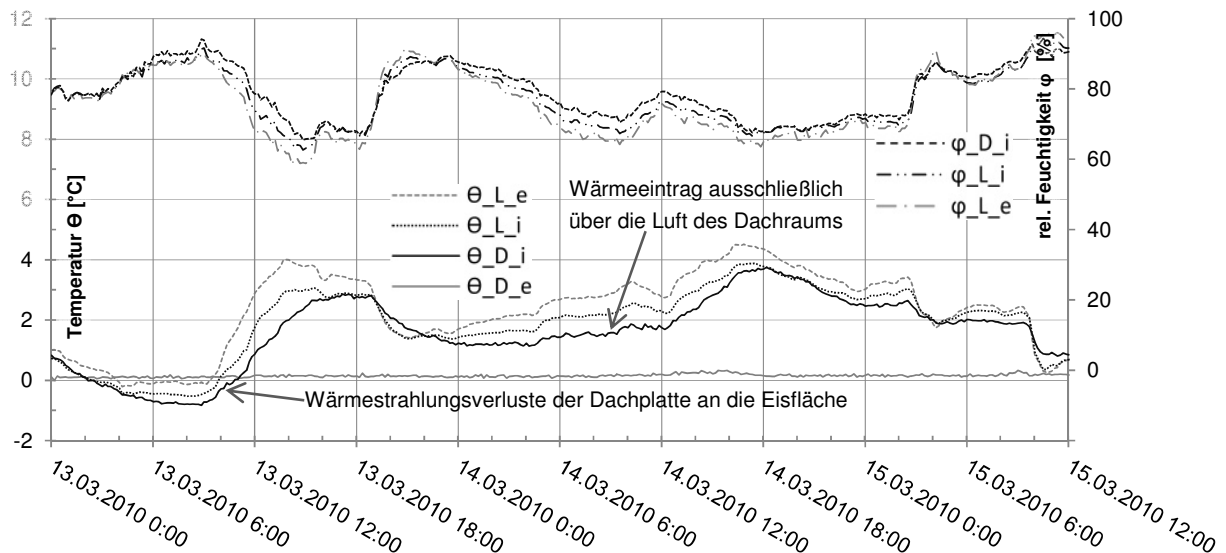


Abb. 3-9: 10-Minutenwerte der Messung 2010 - trübe Tage, Schnee am Dach - Winternutzung
 φ_{D_i} ...berechnete rel. Feuchtigkeit an der Oberfläche der Dachplatte innen, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit im Dachraum unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft, Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{L_i} ...Lufttemp. im Dachraum unter der Dachplatte, Θ_{D_i} ...Oberflächentemperatur der Dachplatte innen, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Am 13.03.2010 liegen die Messwerte für Θ_{D_i} während der Zeit von 02:00 Uhr bis 10:00 Uhr unter den übrigen Temperaturmesswerten. In diesem Zeitraum kann Θ_{D_i} nur infolge des Wärmestrahlungsaustausches mit der Eisfläche (ca. -5°C) unter Θ_{L_i} absinken, da ein konvektiver Wärmetransport an die wärmere Luft im Dachraum (Θ_{L_i}) sowie Wärmetransport durch Leitung an die wärmere Dachfolie (Θ_{D_e}) physikalisch nicht möglich ist. Die größte Temperaturdifferenz zwischen Θ_{L_i} und Θ_{D_i} des Betrachtungszeitraums, die auf Wärmestrahlungsverluste der Dachplatte an die Eisfläche hinweist, tritt am 13.03.2010 um 06:30 auf und beträgt $-0,4\text{ K}$. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit der verwendeten Temperaturmesssysteme (vgl. Abb. 3-6, S.35) von $\pm 0,4\text{ K}$ bei der Oberflächentemperaturmessung und $\pm 0,5\text{ K}$ bei der Lufttemperaturmessung besteht allerdings die Möglichkeit, dass der eben erwähnte Temperaturunterschied zwischen Θ_{L_i} und Θ_{D_i} auch aus der Messunsicherheit resultiert.

Während der Zeit zwischen 00:00 Uhr und 18:00 Uhr am 14.03.2010 steigen Θ_{L_e} , Θ_{L_i} und Θ_{D_i} an, wobei folgender Zusammenhang zwischen den Temperaturmesswerten ersichtlich ist:

$$- \quad \Theta_{L_e} > \Theta_{L_i} > \Theta_{D_i} > \Theta_{D_e}$$

Anhand dieses Verlaufs ist erkennbar, dass der Anstieg von Θ_{D_i} ausschließlich über den konvektiven Wärmetransport zwischen der Innenseite der Dachplatte und der wärmeren Luft des Dachraums erfolgen kann, da Θ_{D_e} bedingt durch die Schneebedeckung bei ca. 0°C liegt. Folglich ist bei Schneebedeckung der Dachplatte eine Erwärmung dieser über 0°C nur über die Luft des Dachraums möglich ist.

Innerhalb des in Abb. 3-9 dargestellten Zeitraums ist keine Kondensatbildung an der dem Eis zugewandten Seite der Dachplatte feststellbar.

3.3.2.4 Messwerte an heiteren Tagen 2010

In Abb. 3-10 sind die Verläufe der Temperatur- und Luftfeuchtwerte 2010 dreier Tage während der Sommernutzung als Miniaturgolfanlage dargestellt. Der 05.04.2010 ist ein Tag mittlerer Bewölkung, die beiden anderen Tage (06.04. und 07.04.2010) werden hinsichtlich des Bewölkungsgrads als heitere Tage klassifiziert.

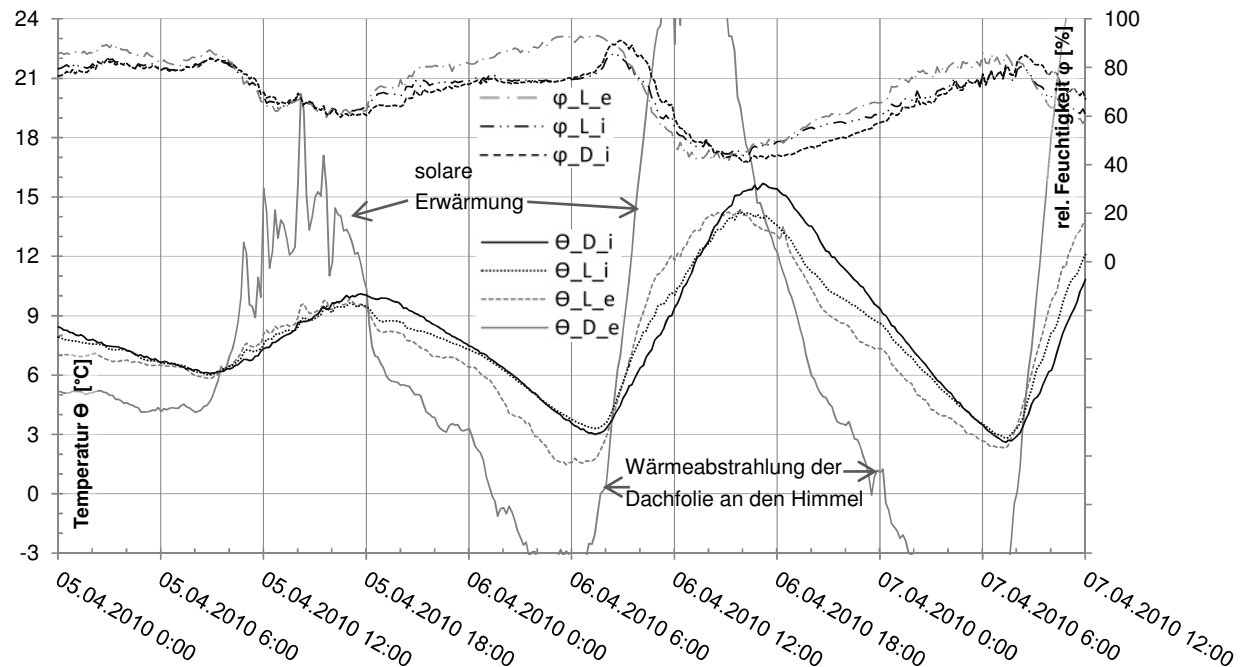


Abb. 3-10: 10-Minutenwerte der Messung 2010 – mittlere Bewölkung, heitere Tage - Sommernutzung φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit im Dachraum unter der Dachplatte, φ_{D_i} ...berechnete rel. Feuchtigkeit an der Oberfläche der Dachplatte innen, Θ_{D_i} ...Oberflächentemperatur der Dachplatte innen, Θ_{L_i} ...Lufttemp. im Dachraum unter der Dachplatte, Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Durch den Vergleich der Messwerte der Sommernutzung (Abb. 3-10) mit jenen der Winternutzung (Abb. 3-8, Abb. 3-9), sind folgende wesentliche Unterschiede festzustellen:

- Bei der Sommernutzung liegt Θ_{D_i} zeitlich länger über Θ_{L_i} und Θ_{L_e} als dies bei der Winternutzung der Fall ist.
- Dementsprechend ändern sich auch die Verläufe der relativen Feuchtigkeit: φ_{D_i} liegt während der Sommernutzung zeitlich kürzer über φ_{L_i} und φ_{L_e} als während der Winternutzung.

Ein tendenziell unterschiedliches Temperatur- und Feuchteverhalten zwischen der Sommer- und Winternutzung wurde bereits anhand der Tagesmittelwerte in Kapitel 3.3.2.1 festgestellt. Der oben beschriebene Vergleich der 10-Minutenmesswerte zwischen Sommer- und Winternutzung verdeutlicht die Problematik hinsichtlich der Kondensatbildung an der dem Eis zugewandten Seite der Dachplatte während der Winternutzung.

3.3.2.5 Feuchteverhalten der Luft im Dachraum in Abhängigkeit der Außenluft - 2010

Dass die in die Eissporthalle strömende feuchte Außenluft abkühlt und dabei die relative Luftfeuchtigkeit φ_{L_i} während der Winternutzung ansteigt, wurde bereits in Kapitel 3.3.2.1

gezeigt und ist auch anhand des Vergleichs der Mittelwerte für φ_{L_i} und φ_{L_e} laut Tab. 3-5 (S. 45) ersichtlich. Es stellt sich die Frage, ob Abweichungen der Messwerte von φ_{L_i} gegenüber den Messwerten von φ_{L_e} nur durch die Temperaturänderung bedingt sind, oder ein möglicher Einfluss von Feuchtequellen (Verdunstung von der Eisoberfläche, Eispflege, Eisläufer) bzw. Feuchtesenken (Sorptionsverhalten der hölzernen Dachkonstruktion, ausfrieren von Feuchtigkeit an der Eisoberfläche) anhand der Partialdampfdrücke von φ_{L_i} bzw. φ_{L_e} erkennbar ist.

Um dies festzustellen, wird die Differenz $\Delta p_{L_i_e}$ zwischen dem Partialdampfdruck der Luft im Dachraum (p_{L_i}) und dem Partialdampfdruck der Außenluft (p_{L_e}) auf Basis der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit (φ_{L_i} , φ_{L_e}) und der Lufttemperatur (Θ_{L_i} , Θ_{L_e}) gebildet (Gl. 2-63 bis Gl. 2-65, S.26). Ein positiver Wert für $\Delta p_{L_i_e}$ drückt eine Zunahme der absoluten Feuchte der Luft des Dachraums gegenüber der Außenluft aus und kennzeichnet eine Feuchtequelle. Bei negativem $\Delta p_{L_i_e}$ liegt eine Feuchtesenke vor, die eine Abnahme der absoluten Feuchte der Luft des Dachraums gegenüber der Außenluft bedeutet. Entsprechend dieser Vorgehensweise sind die Extrem- und Mittelwerte der Differenzen $\Delta p_{L_i_e}$, die sich aus den Messwerten der Winternutzung ergeben, in Tab. 3-3 dargestellt.

Tab. 3-3: Extrem- und Mittelwerte von p_{L_i} , p_{L_e} und $\Delta p_{L_i_e}$ der Messung 2010 - Winternutzung min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen 10-Minutenwerten

	p_{L_i} [Pa]	p_{L_e} [Pa]	$\Delta p_{L_i_e}$ [Pa]
min	209	207	-55
max	907	949	82
MW	509	512	-3

Der Mittelwert für $\Delta p_{L_i_e}$ von -3 Pa in Tab. 3-3 weist darauf hin, dass die absolute Feuchte der Luft im Dachraum (Messpunkt 20 cm unter der Dachplatte) während der Winternutzung im zeitlichen Mittel geringfügig unter der absoluten Feuchte der Außenluft liegt, das heißt eine Feuchtesenke vorliegt.

Werden für die mittlere Oberflächentemperatur der Eisfläche -3°C angenommen (die Vorlauftemperatur der Kältemaschine liegt bei -5°C), dann ist davon auszugehen, dass an der Eisfläche häufiger Wasser ausfriert als von dieser verdunstet, da der Sättigungsdampfdruck der Eisfläche mit 476 Pa unter dem Mittelwert von p_{L_i} und p_{L_e} laut Tab. 3-3 liegt.

Auf Grund der Schwierigkeit, die durch den natürlichen Luftwechsel der Eissporthalle entstehenden Luftströmungen zwischen dem Hallen- und dem Dachraum vorherzusagen (vgl. Kapitel 4.1.2, S.57), ist mit dieser Messanordnung nicht feststellbar, welchen Anteil das Sorptionsverhalten der Dachkonstruktion bzw. das Ausfrieren von Feuchtigkeit an der Eisfläche bezüglich der oben erwähnte Feuchtesenke hat. Es sei angemerkt, dass bei der Auswertung der Messung 2010/2011 durch die geänderte Messanordnung der Einfluss des Sorptionsverhaltens der Dachkonstruktion auf das Dachraumklima erkennbar ist (vgl. Kapitel 3.3.3.2, S.47 und 3.3.3.5, S.49)

Für die Feststellung, ob die Luft des Dachraums im Vergleich zur Außenluft eine Feuchtequelle oder eine Feuchtesenke aufweist, stellt der Vergleich der Partialdampfdrücke die übersichtlichste und einfachste Vorgehensweise dar. Der Vergleich auf Basis der Partial-

dampfdrücke hat jedoch den Nachteil, dass über den Differenzwert $\Delta p_{L_i_e}$ keine Aussage hinsichtlich der Messunsicherheit möglich ist, da der Hersteller des Messsystems die Messunsicherheitsangabe auf die relative Feuchtigkeit bezieht.

Um dennoch eine Aussage über die Messunsicherheit beim Vergleich zwischen φ_{L_i} und φ_{L_e} zu erhalten, wird folgenderweise vorgegangen:

- Der Partialdampfdruck der Außenluft p_{L_e} , der durch φ_{L_e} und Θ_{L_e} gemäß Gl. 2-63 bis Gl. 2-65 verknüpft ist, wird auf den Sättigungsdampfdruck $p_{sat_{L_i}}$ der Innenluft bei Θ_{L_i} bezogen, um so den rein temperaturabhängigen Rechenwert für die relative Feuchtigkeit der in die Eissporthalle und folglich in den Dachraum strömenden Außenluft ($\varphi_{L_e}-\Theta_{L_i}$) zu erhalten.
- Anschließend wird die Differenz $\Delta\varphi_{L_i_e}$ zwischen dem Messewert φ_{L_i} und dem Rechenwert $\varphi_{L_e}-\Theta_{L_i}$ gebildet.

Entsprechend dieser Vorgehensweise wird $\Delta\varphi_{L_i_e}$ zwischen allen φ_{L_i} und $\varphi_{L_e}-\Theta_{L_i}$ der Messung 2010 (Winternutzung) berechnet. Die Extrem- und Mittelwerte der Berechnung sind in Tab. 3-4 dargestellt.

Tab. 3-4: Extrem- und Mittelwerte von φ_{L_i} , $\varphi_{L_e}-\Theta_{L_i}$ und $\Delta\varphi_{L_i_e}$ der Messung 2010 - Winternutzung
min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen 10-Minutenwerten

	φ_{L_i} [%]	$\varphi_{L_e}-\Theta_{L_i}$ [%]	$\Delta\varphi_{L_i_e}$ [%]
min	37	34	-12
max	99	98	7
MW	72,1	72,7	-0,6

Der negative Mittelwert von -0,6 % für $\Delta\varphi_{L_i_e}$ in Tab. 3-4 weist analog dem negativen Mittelwert für $\Delta p_{L_i_e}$ von -3,0 Pa in Tab. 3-3 auf eine Feuchtesenke hin. In Abb. 3-11 sind die berechneten und in Größenklassen eingeteilten $\Delta\varphi_{L_i_e}$ der Messung 2010 während des Eislaufbetriebs in Abhängigkeit ihrer Häufigkeit dargestellt. Da rund 89 % der in Abb. 3-11 dargestellten $\Delta\varphi_{L_i_e}$ innerhalb der vom Hersteller angegebenen Messunsicherheit von $\pm 3,0$ % relativer Luftfeuchtigkeit liegen, ist während der Messung 2010 keine nennenswerte Feuchtesenke bzw. Feuchtequelle zwischen der Außenluft und der Luft im Dachraum feststellbar.

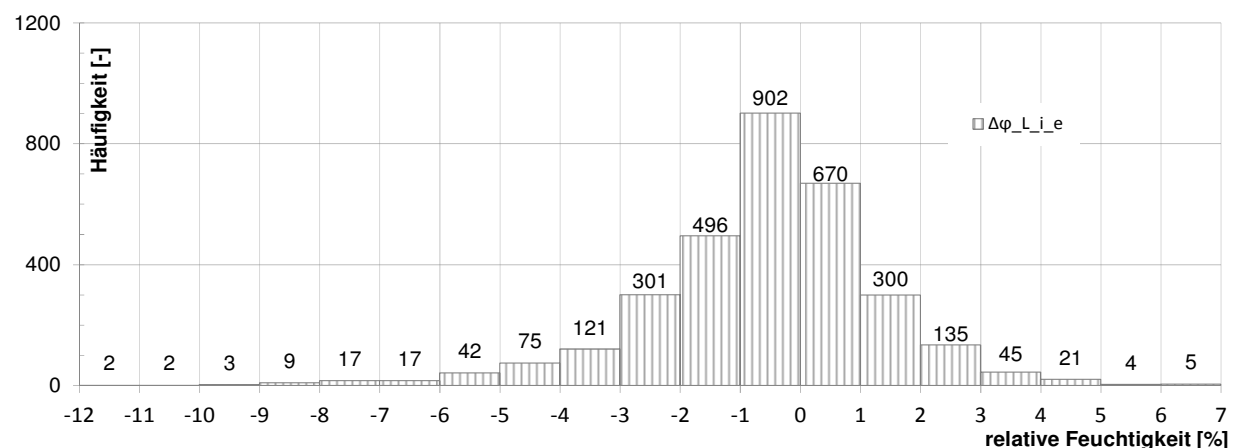


Abb. 3-11: $\Delta\varphi_{L_i_e}$ in Abhängigkeit der Häufigkeit – Messung 2010 - Winternutzung

3.3.2.6 Zusammenfassung der Messdaten 2010

In Tab. 3-5 sind die Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010 während der Winternutzung (21.02 bis 15.03.) zusammengefasst, wobei einzelne Werte der Tabelle in Kapitel 4 und 5 verwendet werden. Die Kondensationsdauer in Tab. 3-5 ist jener Zeitraum, in dem an der Innenseite der Dachplatte eine relative Luftfeuchtigkeit von mindestens 100 % laut Gl. 2-63 berechnet wird.

Tab. 3-5: Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010 – Winternutzung (21.02 bis 15.03.)
min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen 10-Minutenwerten

	Θ_{L_e} [°C]	Θ_{L_i} [°C]	Θ_{D_i} [°C]	Θ_{D_e} [°C]	φ_{L_e} [%]	φ_{L_i} [%]	φ_{D_i} [%]	Θ_{L_i} minus Θ_{L_e} [K]	Θ_{D_i} minus Θ_{L_i} [K]	Θ_{Eis} minus Θ_{L_i} [K]	Kondensat- dauer [Minuten]
min	-9,9	-9,4	-9,6	-13,8	31	37	39	-3,1	-2,3	-18,5	310
max	15,8	13,5	11,8	21,5	96	99	100	1,7	1,5	4,4	
MW	2,28	1,76	1,37	0,36	70,2	72,1	74,1	-0,52	-0,39	-6,76	

3.3.3 Interpretation der Messung 2010/2011

Die Messung 2010/2011 erfasst die gesamte Eislautsaison 2010/2011 inklusive 14 Tage davor und 33 Tage danach. Die Messreihe 2010/2011 unterscheidet sich von der Messreihe 2010 dadurch, dass auf die Messung der Oberflächentemperatur der Dachplatte innen (Θ_{D_i}) verzichtet wurde, dafür wurden die Lufttemperatur Θ_{LOL_i} und die Luftfeuchtigkeit φ_{LOL_i} im Dachraum 20 cm unter dem Oberlicht erfasst.

3.3.3.1 Tagesmittelwerte 2010/2011

Die Tagesmittelwerte der Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung 2010/2011 sind in Abb. 3-12 (S. 46) dargestellt, wobei die Tagesmittelwerte für Θ_{L_e} mit den Messdaten der am Salzburger Flughafen befindlichen Wetterstation der ZAMG (vgl. Tab. A- 1 und Tab. A- 2 im Anhang, S.103) gut übereinstimmen.

Betrachtet man die Verläufe der Tagesmittelwerte für den Zeitraum vom 20.11.2010 bis zum 03.04.2011 (vorwiegend Eislaufbetrieb) in Abb. 3-12, so sind für den Großteil der Tagesmittelwerte folgende Zusammenhänge erkennbar:

- $\Theta_{L_e} > \Theta_{LOL_i} > \Theta_{L_i}$
- $\varphi_{L_e} < \varphi_{L_i} < \varphi_{LOL_i}$

Während des Zeitraums vor dem Beginn des Eislaufbetriebs, also vom 17.10.2010 bis zum 15.11.2010, verlaufen die Tagesmittelwerte tendenziell wie folgt:

- $\Theta_{L_e} < \Theta_{L_i} < \Theta_{LOL_i}$
- $\varphi_{L_e} > \varphi_{LOL_i} > \varphi_{L_i}$

Wie schon bei der Betrachtung der Tagesmittelwerte der Messung 2010 in Kapitel 3.3.2.1 festgestellt, zeigt sich auch anhand der Tagesmittelwerte der Messung 2010/2011, dass die Eisfläche zu einer Abkühlung der in die Eissporthalle und folglich in den Dachraum strömenden Außenluft führt, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum über der relativen Feuchtigkeit der Außenluft liegt.

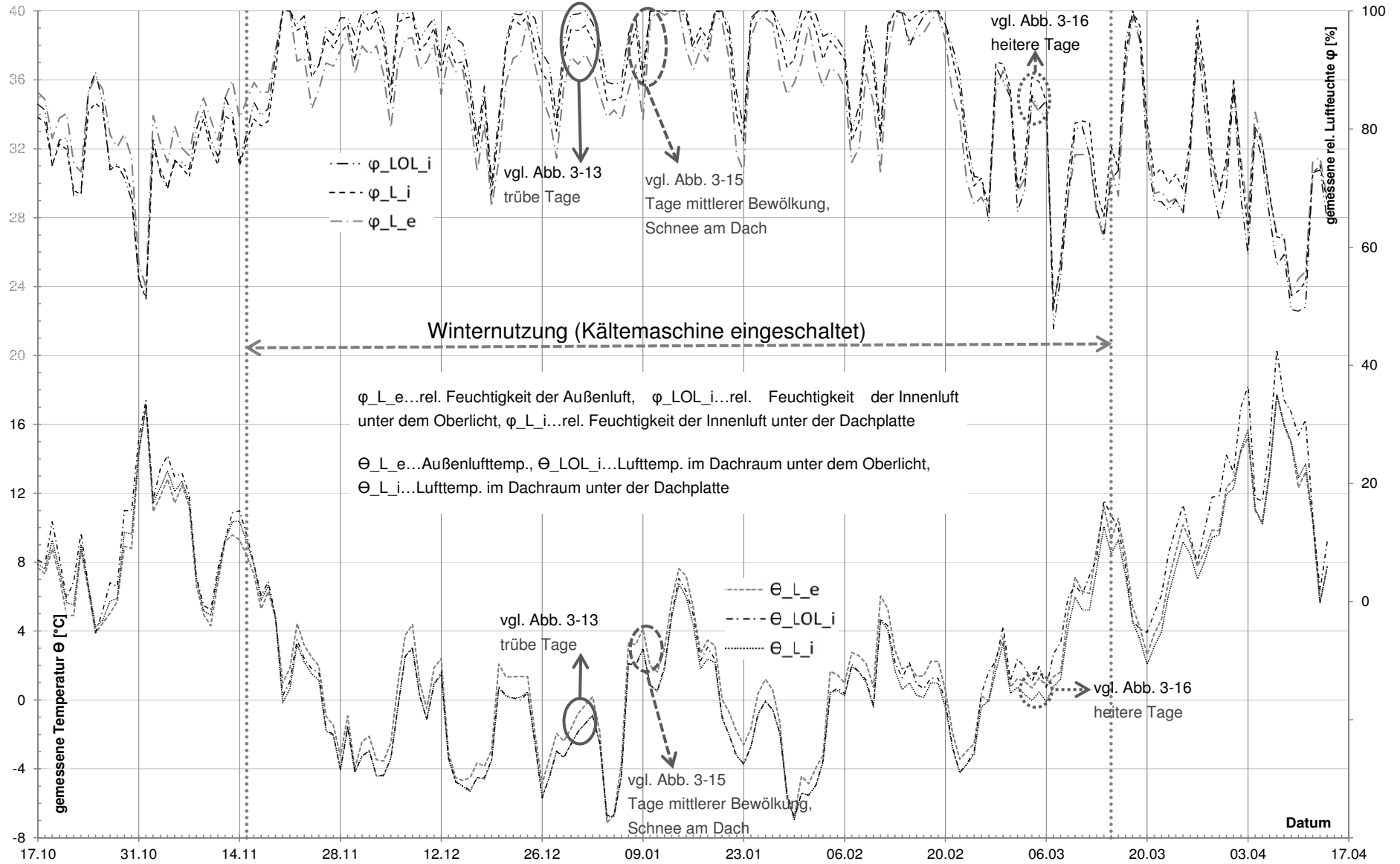


Abb. 3-12: Temperatur- und Luftfeuchtheitsmessung 2010/11 Tagesmittelwerte

3.3.3.2 Messwerte an trüben Tagen 2010/2011

Abb. 3-13 zeigt den Verlauf der Temperatur- und Luftfeuchtwerte an trüben Tagen während der Winternutzung 2010/2011. Dabei ist ersichtlich, dass bei geringer Sonneneinstrahlung Θ_{L_i} und Θ_{LOL_i} annähernd gleich groß sind. Dennoch liegt φ_{LOL_i} (mit Ausnahme von 00:00 bis 06:00 Uhr am 30.12.2010) stets über φ_{L_i} . In Abb. 3-14 sind die relativen Luftfeuchtwerte der Abb. 3-13 vergrößert dargestellt und ergänzend die zugehörigen Partialdampfdrücke (ermittelt aus der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit) eingezeichnet.

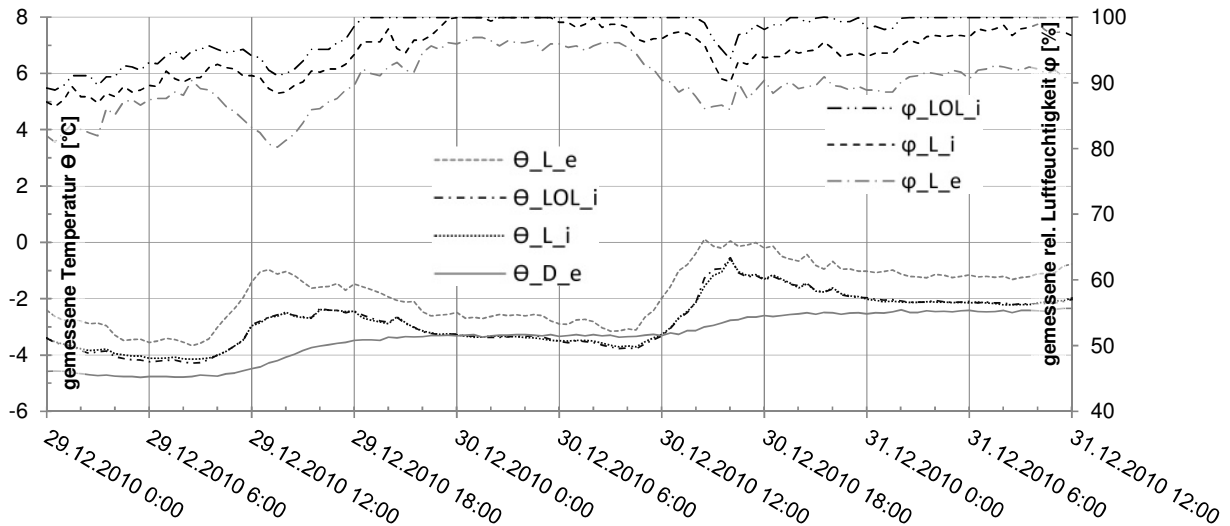


Abb. 3-13: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – trübe Tage - Winternutzung
 φ_{LOL_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter dem Oberlicht, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft,
 Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{LOL_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter dem Oberlicht,
 Θ_{L_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter der Dachplatte, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

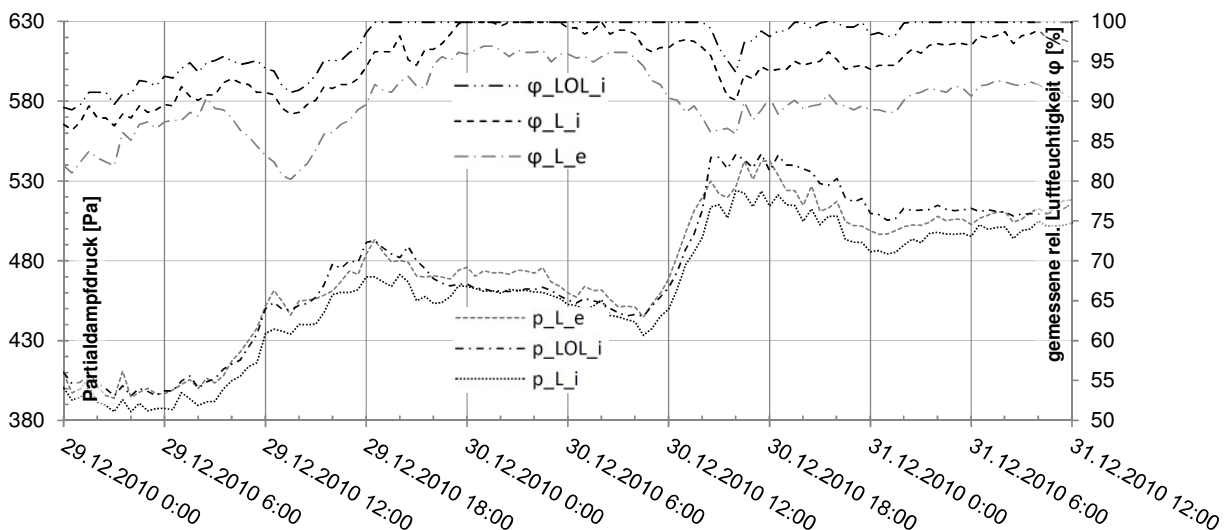


Abb. 3-14: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – trübe Tage - Winternutzung
 φ_{LOL_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter dem Oberlicht, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft,
 p_{L_e} ...Partialdampfdruck der Außenluft, p_{LOL_i} ...Partialdampfdruck der Innenluft unter dem Oberlicht, p_{L_i} ...Partialdampfdruck der Innenluft unter der Dachplatte

Am 29.12.2010 von 04:00 bis 12:00 Uhr ist in Abb. 3-14 folgender Verlauf der Partialdampfdrücke erkennbar:

- $p_{L_e} \approx p_{LOL_i}$
- $p_{LOL_i} > p_{L_i}$

Der Unterschied zwischen p_{L_i} und p_{LOL_i} ist durch das stärker ausgeprägte Sorptionsverhalten der Dachplatte aus CLT gegenüber der PC-Wellplatte des Oberlichts erklärbar, wobei der Unterschied zwischen φ_{L_i} und φ_{LOL_i} innerhalb der Messunsicherheit von $\pm 3,0$ % relativer Luftfeuchtigkeit liegt.

3.3.3.3 Messwerte an Tagen mittlerer Bewölkung 2010/2011

Abb. 3-15 zeigt die Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte an Tagen mit mittlerer Bewölkung während der Winternutzung 2010/2011, wobei im dargestellten Zeitraum das Dach der Eissporthalle mit Schnee bedeckt war (erkennbar an den nahezu konstanten Werten von Θ_{D_e}).

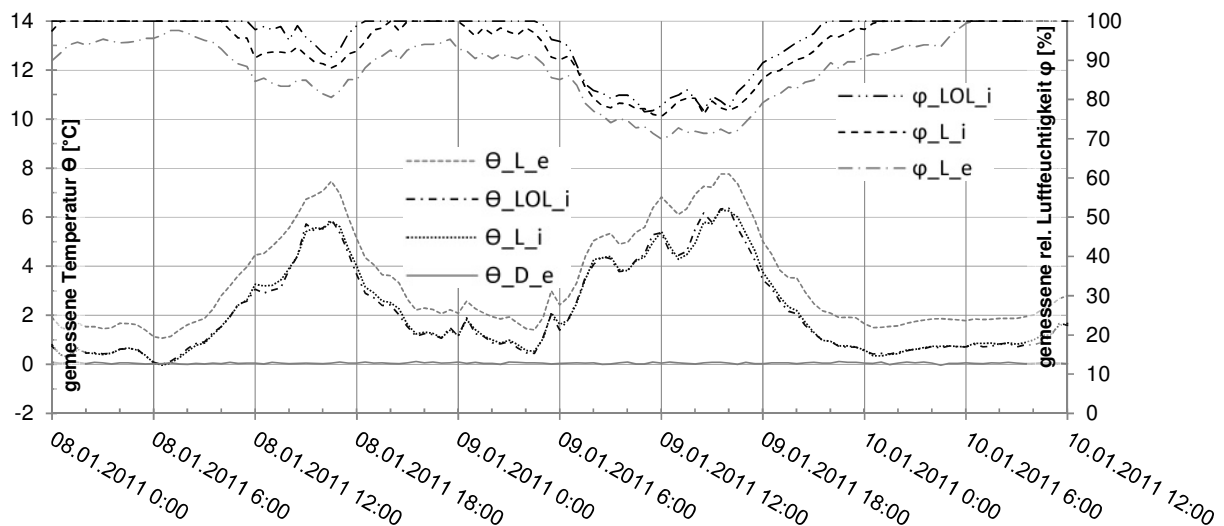


Abb. 3-15: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – an Tagen mittlerer Bewölkung, Schnee am Dach - Winternutzung

φ_{LOL_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter dem Oberlicht, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft, Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{LOL_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter dem Oberlicht, Θ_{L_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter der Dachplatte, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Vergleicht man die Verläufe der Lufttemperaturen und der relativen Luftfeuchtigkeit der Abb. 3-15 mit jenen der Abb. 3-13 wird ersichtlich, dass sich diese tendenziell gleich verhalten. Demnach stellten sich an trüben Tagen und an Tagen mit schneebedecktem Dach qualitativ ähnliche Klimaverhältnisse im Dachraum der Eissporthalle ein.

3.3.3.4 Messwerte an heiteren Tagen 2010/2011

Die Messwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit an heiteren Tagen während der Winternutzung 2010/2011 sind in Abb. 3-16 dargestellt.

Die Verläufe tagsüber (10:00 bis 18:00) stellen sich wie folgt dar:

- $\Theta_{D_e} > \Theta_{LOL_i} > \Theta_{L_e} > \Theta_{L_i}$
- $\varphi_{LOL_i} < \varphi_{L_e} < \varphi_{L_i}$

In den restlichen Tagesstunden (18:00 bis 10:00) zeigt sich folgendes Verhalten der Messwerte:

- $\Theta_{D_e} < \Theta_{LOL_i} < \Theta_{L_i} < \Theta_{L_e}$
- $\varphi_{LOL_i} > \varphi_{L_i} > \varphi_{L_e}$

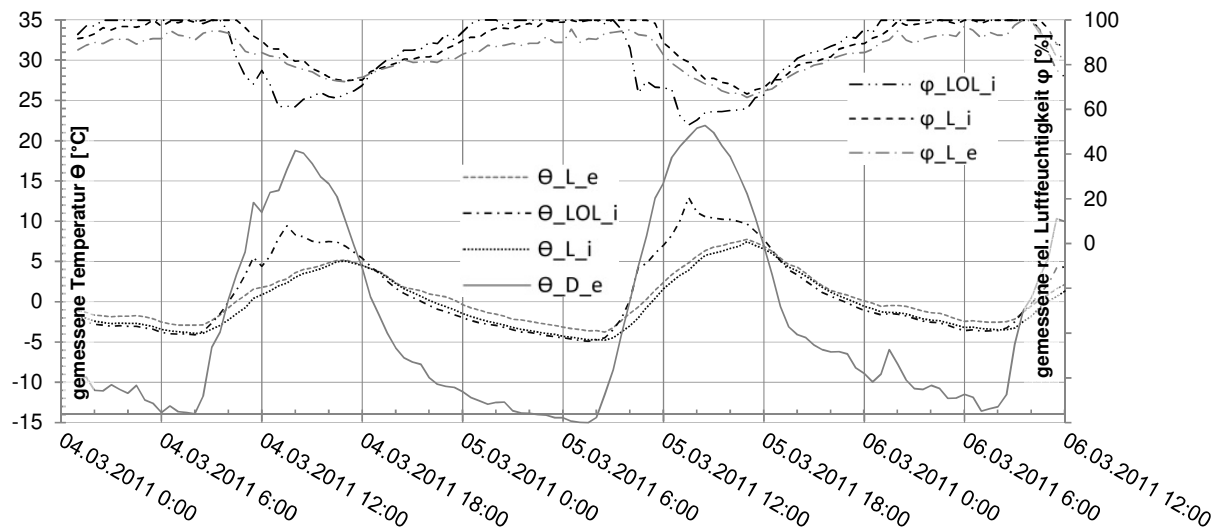


Abb. 3-16: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – heitere Tage - Winternutzung
 φ_{LOL_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter dem Oberlicht, φ_{L_i} ...rel. Feuchtigkeit der Innenluft unter der Dachplatte, φ_{L_e} ...rel. Feuchtigkeit der Außenluft,
 Θ_{L_e} ...Außenlufttemperatur, Θ_{LOL_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter dem Oberlicht, Θ_{L_i} ...Lufttemperatur im Dachraum unter der Dachplatte, Θ_{D_e} ...Oberflächentemperatur der Dachfolie

Der Einfluss der Sonnenstrahlung auf Θ_{LOL_i} an heiteren Tagen ist in Abb. 3-16 gut erkennbar: Θ_{LOL_i} steigt an heiteren Tagen um bis zu 7 K über Θ_{L_i} , während vergleichsweise an trüben Tagen (Abb. 3-13) Θ_{LOL_i} dem Verlauf von Θ_{L_i} folgt.

3.3.3.5 Feuchteverhalten der Luft im Dachraum in Abhängigkeit der Außenluft – 2010/2011

Entsprechend der in Kapitel 3.3.2.5 beschriebenen Vorgehensweise zur Untersuchung des Feuchteverhaltens zwischen der Luft des Dachraums und der Außenluft wird auch die Messung 2010/2011 ausgewertet, um Aussagen über das Sorptionsverhalten der Dachkonstruktion während der Winternutzung 2010/2011 treffen zu können.

Dementsprechend werden die folgenden Differenzen zwischen den Partialdampfdrücken p_{L_e} , p_{L_i} und p_{LOL_i} der Messwerte φ_{L_e} , φ_{L_i} und φ_{LOL_i} berechnet:

- $\Delta p_{L_i_e} = p_{L_i} - p_{L_e}$
- $\Delta p_{LOL_i_e} = p_{LOL_i} - p_{L_e}$

Die Extrem- und Mittelwerte von $\Delta p_{L_i_e}$ und $\Delta p_{LOL_i_e}$ der Winternutzung 2010/2011 sind in Tab. 3-6 zusammengefasst.

Tab. 3-6: Extrem- und Mittelwerte $\Delta p_{L_i_e}$, $\Delta p_{LOL_i_e}$ der Messung 2010/2011 - Winternutzung min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen 30-Minutenwerten

	p_{L_e} [Pa]	p_{L_i} [Pa]	p_{LOL_i} [Pa]	$\Delta p_{L_i_e}$ [Pa]	$\Delta p_{LOL_i_e}$ [Pa]
min	207	227	234	-118	-88
max	1213	1104	1279	93	152
MW	560	544	558	-16	-2

Der Mittelwert für $\Delta p_{L_i_e}$ von -16 Pa und der Mittelwert für $\Delta p_{LOL_i_e}$ von -2 Pa in Tab. 3-6 weist darauf hin, dass die absolute Feuchte der Luft im Dachraum im zeitlichen Mittel der Winternutzung unter der absoluten Feuchte der Außenluft liegt, das heißt eine Feuchtesenke vorliegt.

Wie bereits in Kaptiel 3.3.2.5 erwähnt, kann für die Differenzwerte $\Delta p_{L_i_e}$ und $\Delta p_{LOL_i_e}$ keine Messunsicherheit angegeben werden, da diese der Messgerätehersteller in Prozentpunkten relativer Feuchtigkeit ausweist. Folglich wird der Partialdampfdruck der Außenluft p_{L_e} auf die Sättigungsdampfdrücke $psat_{L_i}$ bzw. $psat_{LOL_i}$ der Innenluft bei Θ_{L_i} bzw. Θ_{LOL_i} bezogen, damit die rein temperaturabhängigen Rechenwerte $\varphi_{L_e} - \Theta_{L_i}$ bzw. $\varphi_{L_e} - \Theta_{LOL_i}$ für die relative Feuchtigkeit der in den Dachraum strömenden Außenluft vorliegen. Mit den Differenzen $\Delta\varphi_{L_i_e}$ (φ_{L_i} minus $\varphi_{L_e} - \Theta_{L_i}$) bzw. $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ (φ_{LOL_i} minus $\varphi_{L_e} - \Theta_{LOL_i}$) kann festgestellt werden, ob zwischen der Luft im Dachraum und der Außenluft ein Feuchtesenke oder Feuchtequelle besteht.

In Abb. 3-17 sind $\Delta\varphi_{L_i_e}$ und $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ in Klassen eingeteilt und entsprechend ihrer Häufigkeit dargestellt.

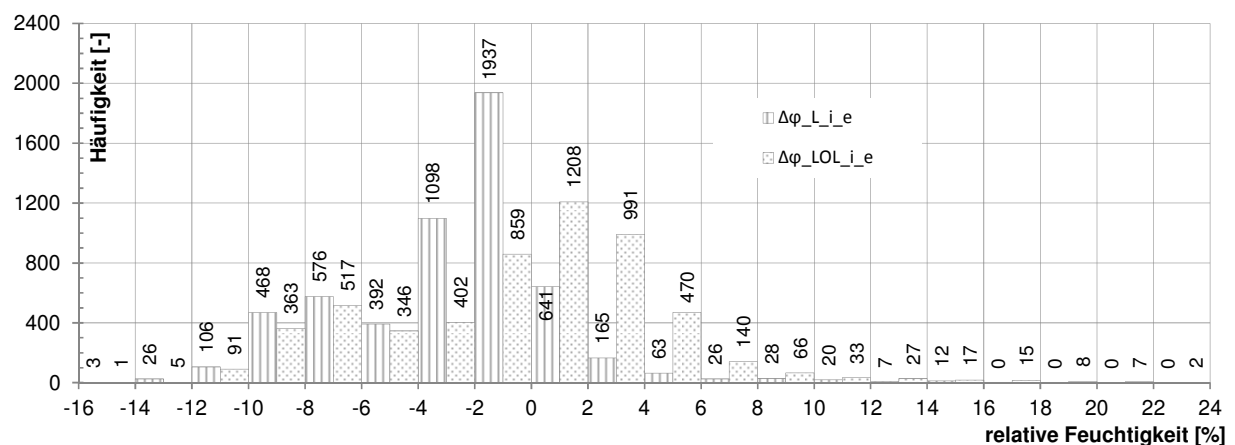


Abb. 3-17: $\Delta\varphi_{L_i_e}$ und $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ in Abhängigkeit der Häufigkeit – Winternutzung 2010/2011

In Tab. 3-7 sind die in der Abb. 3-16 dargestellten $\Delta\varphi_{L_i_e}$ und $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ in Abhängigkeit der Klassengrößen -16 % bis -3,1 %, -3 % bis 3 % (Messunsicherheit) und von 3,1 % bis 24 % relativer Feuchtigkeit zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass 48 % der Differenzen $\Delta\varphi_{L_i_e}$ und 31 % der der Differenzen $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ (Klassengröße -16 % bis -3,1% relativer Feuchtigkeit) außerhalb der Messunsi-

cherheit von $\pm 3,0$ % relativer Luftfeuchtigkeit liegen und somit eine Feuchtsenke zwischen der Außenluft und der Luft im Dachraum nachgewiesen ist.

Weiters zeigt sich, dass um 17 Prozentpunkte mehr $\Delta\varphi_{L_i_e}$ als $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ in der Klassengröße -16 % bis -3,1% relativer Feuchtigkeit liegen, was durch das Sorptionsverhalten der Dachplatte gegenüber den PC-Wellplatten des Oberlichts erklärbar ist.

Tab. 3-7: Relative Häufigkeit von $\Delta\varphi_{L_i_e}$ und $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ – Winternutzung 2010/2011

Klassengröße relativer Feuchtigkeit	relative Häufigkeit von $\Delta\varphi_{L_i_e}$ [-]	relative Häufigkeit von $\Delta\varphi_{LOL_i_e}$ [-]
-16 % bis -3,1 %	0,48	0,31
-3 % bis 3 %	0,48	0,47
3,1 % bis 24 %	0,04	0,22

3.3.3.6 Zusammenfassung der Messdaten 2010/2011

Tab. 3-8 zeigt die Zusammenstellung der Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010/2011 während der Winternutzung.

Tab. 3-8: Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010/2011 Winternutzung

min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen 30-Minutenwerten

	Θ_{L_e} [°C]	Θ_{L_i} [°C]	Θ_{LOL_i} [°C]	Θ_{D_e} [°C]	φ_{L_e} [%]	φ_{L_i} [%]	φ_{LOL_i} [%]	Θ_{L_i} minus Θ_{L_e} [K]	Θ_{LOL_i} minus Θ_{L_e} [K]	Θ_{LOL_i} minus Θ_{L_i} [K]
min	-10,4	-9,3	-9,3	-20,8	35	35	22	-2,9	-3,1	-0,9
max	17,6	17,1	27,1	34,7	100	100	100	1,8	12,9	13,1
MW	0,53	-0,36	-0,05	-1,25	86,8	90,4	91,2	-0,89	-0,58	0,31

Bezugnehmend auf die Zuordnung von Tragwerken zu den Nutzungsklassen nach ÖNORM B 1995-1-1 [26] (vgl. Tab. 2-6 im Kapitel 2.4.2, S.28) sei angemerkt, dass auf Grund der Mittelwerte von 90,4 % für φ_{L_i} und 91,2 % für φ_{LOL_i} laut Tab. 3-8 die offene Eissporthalle Bergheim der Nutzungsklasse 3 zuordenbar ist. Dementsprechend ist laut Tab. 2-6 eine Holzfeuchte von mehr als 20 % zu erwarten und folglich die Voraussetzung für die Entwicklung von Holz zerstörenden und Holz verfärbenden Pilzen erfüllt.

4 ENTWICKLUNG EINES PHYSIKALISCHEN MODELLS

Die Auswertung der Messungen 2010 und 2010/2011 der offenen Eissporthalle Bergheim in Kapitel 3 zeigen die enge Kopplung des Innen- an das Außenklima, wobei das Außenklima stark schwankt. Auch das schwankende Temperaturverhalten der Dachplatte und damit der relativen Feuchtigkeit infolge der erwähnten Klimarandbedingungen ist ersichtlich.

Aufgrund der instationären Klimarandbedingungen wird in Kapitel 5 eine instationäre thermische Simulation der Eissporthalle durchgeführt, um den zeitlich veränderlichen Verlauf der Dachplattentemperatur zu berechnen und damit auf die Kondensationsdauer an der Innenseite der Dachplatte schließen zu können. Das der Simulationsberechnung zugrunde gelegte physikalische Modell der Eissporthalle wird in Kapitel 4.2 beschrieben. Davor werden in Kapitel 4.1 die Größenordnungen zweier physikalischer Teilprozesse die im Modell berücksichtigten werden, - Konvektion und natürlicher Luftwechsel -, abgeschätzt.

Es wird angemerkt, dass in den folgenden Kapiteln wenn nicht anders angegeben, ausschließlich die Messung 2010 während der Winternutzung (21.02 – 15.03.2010) für die Entwicklung und Validierung des Modells der Eishalle herangezogen wird.

4.1 Natürlicher Luftwechsel und konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Für die Abschätzung des natürlichen Luftwechsels der Eissporthalle sowie des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zwischen der Hallenluft und der Dachplatte bzw. der Eisfläche müssen an den entsprechenden Stellen der Halle die folgenden Strömungsgeschwindigkeit der Luft bekannt sein:

- die Luftgeschwindigkeit v_{10} in 10 Meter Höhe über dem Boden außerhalb der Eissporthalle für den Luftwechsel
- die Luftgeschwindigkeit $v_{hcv,D,i}$ unter dem Dachraum zugewandten Seite der Dachplatte für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten $h_{cv,D,i}$
- die Luftgeschwindigkeit $v_{hcv,E}$ oberhalb der Eisfläche für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten $h_{cv,E}$

Im Zuge des in Kapitel 3 erläuterten Temperatur- und Luftfeuchtemessprogramms wurden keine Messungen zur Strömungsgeschwindigkeit der Luft an den oben erwähnten Stellen durchgeführt. Werte für v_{10} , $v_{hcv,D,i}$ und $v_{hcv,E}$ werden im nächsten Kapitel auf Grundlage der Messdaten der meteorologischen Station der ZAMG [29] am Flughafen Salzburg abgeleitet.

4.1.1 Strömungsgeschwindigkeiten auf Basis der logarithmischen Höhenformel

Die Beschreibung der mit der Höhe zunehmenden horizontalen Windgeschwindigkeit in der freien Umgebung ist für eine Reihe technischer Aufgaben, wie z.B. die energetische Auslegung von Windkraftanlagen oder als Randbedingung für die Simulation der Luftströmung in und um Gebäude etc. von Bedeutung.

Liegen keine Messdaten für das Höhenprofil der Windgeschwindigkeit für einen konkreten Standort eines Untersuchungsobjektes vor, so ist ein möglicher Ansatz die logarithmische Höhenformel (Gl. 4-1) nach Hau [31, S.557]. Dabei wird die Beschreibung der Windgeschwindigkeitszunahme mit der Höhe als „statistischer Mittelwert einer als stationär angenommenen Geschwindigkeitsverteilung“ laut Hau [31, S.557] aufgefasst.

$$v_H = v_{ref} \cdot \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_{ref}}{z_0}} \quad \text{Gl. 4-1}$$

v_H	[m/s]	mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe H
v_{ref}	[m/s]	mittlere Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe H_{ref}
H	[m]	Höhe
H_{ref}	[m]	Referenzhöhe, in der v_{ref} gemessen wurde
ln	[-]	natürlicher Logarithmus (Basis e = 2,7183)
z_0	[m]	Rauigkeitslänge (gibt die Bodenrauigkeit an)

Zur Auswertung der logarithmischen Höhenformel für den Standort der Eissporthalle Bergheim werden die Windgeschwindigkeiten der bereits erwähnten meteorologischen Station der ZAMG [29] am Flughafen Salzburg (siehe Tab. A- 1 S.103), verwendet. Die Werte dieser in 10 Meter über dem Boden gemessenen Windgeschwindigkeiten (v_{10}) sind in Tab. 4-1 zusammengefasst.

Tab. 4-1: Windgeschwindigkeiten v_{10} in Abhängigkeit der Windrichtung bzw. der Summe der Beobachtungen vom 21.02. bis 15.03.2010

Windgeschwindigkeit v_{10}		Anzahl an Beobachtungen mit zugehöriger Windrichtung								Summe der Anzahl an Beobachtungen
[Beaufort]	[m/s]	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0	< 0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,3 - 1,5	2	0	0	2	3	1	1	5	14
2	1,6 - 3,3	4	3	0	5	3	3	3	5	26
3	3,4 - 5,4	1	2	0	5	2	0	4	5	19
4	5,5 - 7,9	0	2	1	2	1	0	2	1	9
5	8,0 - 10,7	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Anhand der Messwerte in Tab. 4-1 wird davon ausgegangen, dass am Standort der Eissporthalle Bergheim im Laufe der Messung 2010 (Winternutzung) in 10 Meter Höhe häufig Windgeschwindigkeiten von 1 bis 3 Beaufort (0,3 bis 5,4 m/s) auftraten.

In Abb. 4-1 ist die Auswertung der logarithmischen Höhenformel für unterschiedliche Werte von $v_{10} = \bar{v}_{ref}$ (0,3 m/s, 3 m/s, 5 m/s) dargestellt. Die Rauigkeitslänge wird dabei mit 0,3 m - dies entspricht der Oberflächencharakteristik eines bebauten Geländes, - vgl. dazu Hau [33, S.558] - festgelegt.

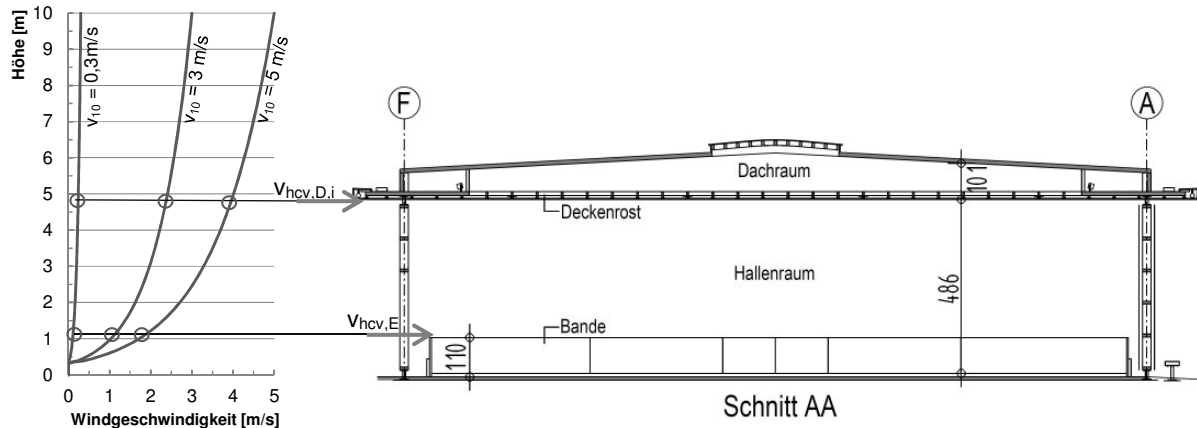


Abb. 4-1: Horizontale Windgeschwindigkeiten auf Basis der logarithmischen Höhenformel

Für die Abschätzung des Luftwechsels n der Eissporthalle in Kapitel 4.1.2 wird die Windgeschwindigkeit v_{10} (vgl. Abb. 4-1) direkt verwendet.

Um eine Größenordnung für die Strömungsgeschwindigkeiten $v_{hcv,D,i}$ (4,8 m über der Eisfläche) und $v_{hcv,E}$ (1,1 m über der Eisfläche) im Halleninneren angeben zu können, wird $v_{hcv,D,i}$ und $v_{hcv,E}$ auf Basis der logarithmischen Höhenformel berechnet. In wieweit diese Vorgehensweise vertretbar ist kann nur durch Messung der Strömungsgeschwindigkeiten vor Ort festgestellt werden. Eine Zusammenstellung der Windgeschwindigkeiten $v_{hcv,E}$, $v_{hcv,D,i}$ und v_{10} (Abb. 4-1) gibt Tab. 4-2.

Tab. 4-2: Windgeschwindigkeiten $v_{hcv,E}$, $v_{hcv,D}$ und v_{10}

$v_{hcv,E}$ [m/s]	$v_{hcv,D,i}$ [m/s]	v_{10} [m/s]
0,1	0,2	0,3
1,0	2,4	3,0
1,8	4,0	5,0

$H_{ref} = 10 \text{ m}$, $z_0 = 0,3 \text{ m}$
 $H = 1,1 \text{ m}$ für $v_{hcv,E}$
 $H = 4,8 \text{ m}$ für $v_{hcv,D,i}$

4.1.2 Natürlicher Luftwechsel

Die natürliche Lüftung von Wohngebäuden über geöffnete Fenster ist das technisch einfachste und günstigste Lüftungsprinzip. Neben der Sicherstellung des Frischluftbedarfs für die Benutzer trägt die gezielte Fensterlüftung in den Sommermonaten, idealerweise in den Nacht- bzw. Morgenstunden, zur Gebäudekühlung bei.

Der natürliche Luftwechsel stellt sich durch das komplexe Zusammenwirken von Windkräften (windinduzierter Luftwechsel) und Auftriebskräften infolge des Temperaturunterschiedes zwischen Innen- und Außenluft (thermisch induzierter Luftwechsel) ein. Für eine Beschreibung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und die Randbedingungen, die den natürlichen Luftwechsel beeinflussen, wird auf Etheridge [32] verwiesen.

Hinsichtlich der Anzahl und Position der Öffnungen in einem Raum, die für die Lüftung verwendet werden, wird zwischen zwei typischen Lüftungsprinzipien unterschieden: der einseitigen Lüftung und der Querlüftung. Bei der einseitigen Lüftung wird nur durch ein Fenster einer Außenwand des Raums gelüftet. Für die Querlüftung werden mindestens zwei Fenster, die sich nicht in der gleichen Außenwand des Raums befinden, herangezogen. Mit der Quer-

lüftung wird bei sonst gleichen Randbedingungen gegenüber der einseitigen Lüftung ein höherer Luftwechsel erzielt.

Ein Maß für den Luftaustausch eines Raums gibt die Luftwechselzahl n [1/h] an, die als Quotient aus dem stündlich durch die Lüftungsöffnungen einströmenden bzw. wieder ausströmenden Luftvolumen (ausgedrückt durch den lüftungswirksamen Luftvolumenstrom \dot{V}_L [m³/h]) und dem Raumvolumen V_R [m³] definiert ist (Gl. 4-2).

$$n = \frac{\dot{V}_L}{V_R} \quad \text{Gl. 4-2}$$

Für die rechnerische Vorbestimmung von \dot{V}_L stehen eine Reihe von Berechnungsansätzen zur Verfügung, die von einfachen empirischen Modellen bis hin zu aufwendigen CFD-Modellen (Computational Fluid Dynamics) reichen.

Die Eingangsparameter für empirische Berechnungsgleichungen werden durch Experimente im Klein- oder Originalmaßstab angepasst und haben im Vergleich zu CFD-Modellen wesentliche Nachteile in Bezug auf die Aussagekraft und Genauigkeit der Berechnungsergebnisse. So sind mit CFD-Modellen, im Gegensatz zu empirischen Modellen, neben der Bestimmung von \dot{V}_L auch Aussagen über die Strömungsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung der Raumluft möglich.

Empirische Berechnungsansätze für den einseitigen Luftwechsel in Wohnräumen

Der von De Gids und Phaff [33] stammende empirische Berechnungsansatz für den einseitigen Luftwechsel von Wohnräumen (Gl. 4-3), wird in Larsen und Heiselberg [34, S.1033] bzw. in Caciolo et. al. [35, S.1766] angegeben.

$$\dot{V}_L = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \sqrt{(0,001 \cdot v_{10}^2 + 0,0035 \cdot h \cdot |\Delta T| + 0,01)} \quad \text{Gl. 4-3}$$

\dot{V}_L	[m ³ /s]	lüftungswirksamer Luftvolumenstrom
A	[m ²]	Öffnungsfläche
v_{10}	[m/s]	Windgeschwindigkeit in 10 Meter Höhe über dem Boden
$ \Delta T $	[K]	absoluter Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenluft

Mit Gl. 4-3 wird sowohl der windinduzierte als auch der thermisch induzierte Luftwechsel berücksichtigt, wobei auffällt, dass weder die Raumgeometrie noch der Anströmwinkel zwischen dem Wind und der Öffnung in den Berechnungsansatz eingehen.

Larsen und Heiselberg [34, S.1037] weisen auf den Einfluss des Anströmwinkels hin und haben einen empirischen Berechnungsansatz für die einseitige Lüftung entwickelt, bei dem der Anströmwinkel berücksichtigt wird.

Caciolo et. al. [35] vergleicht die Luftwechselzahlen verschiedener empirischer Berechnungsansätze, unter anderem auch jene von De Gids und Phaff [33] bzw. von Larsen und Heiselberg [34], mit den von ihm experimentell gewonnenen Luftwechselzahlen, wobei die Anströmrichtung im Experiment (vgl. Abb. 4-2) berücksichtigt wird.

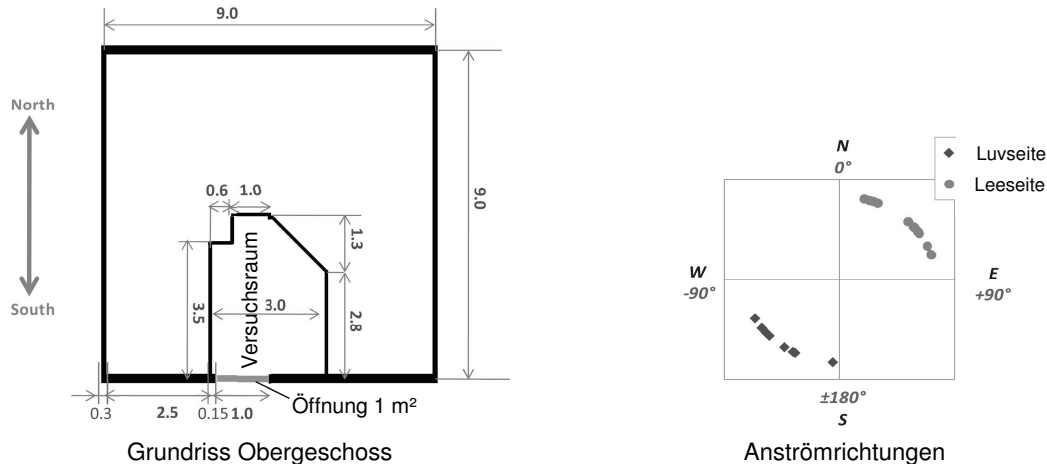


Abb. 4-2: Grundriss des Obergeschosses mit dem Versuchsraum und den Anströmrichtungen des Experiments [nach 35, S.1766,1771]

Die Abweichungen der Luftwechselzahlen die mit den Berechnungsansätzen der oben genannten Autoren ermittelt wurden, von den im Experiment von Caciolo et. al. [35] bestimmten Luftwechselzahlen, sind in Tab. 4-3 ersichtlich. Anhand der großen Abweichungen wird deutlich, dass empirische Berechnungsansätze nur für eine erste Abschätzung des Luftwechsels herangezogen werden können und dass ein Berechnungsansatz, der mehr Randbedingungen berücksichtigt - im dargestellten Vergleich die Anströmrichtung des Winds - nicht zwangsläufig exaktere Ergebnisse liefert.

Tab. 4-3: Durchschnittliche, minimale und maximale Abweichungen der mit den Berechnungsansätzen ermittelten Luftwechselzahl vom Experiment [nach 36 S.1772]

	Luvseite			Leeseite			Total
	Durchsch.(%)	Min (%)	Max (%)	Durchsch.(%)	Min (%)	Max (%)	
De Gids und Phaff [37]	20	-29	+36	43	-3	+84	32
Larsen und Heiselberg [35]	22	-49	+30	104	+28	+196	63

Luftwechsel der offenen Eissporthalle Bergheim

Im Fall der Eissporthalle wird angenommen, dass sich ein vorwiegend einseitiger Luftwechsel über die offene Hallenlängswand (Achse F in Abb. 3-3, S.31) einstellt. Es ist jedoch anzumerken, dass die Winddurchlässigkeit des Polyestergewebes der verschiebbaren Vertikalelemente (Achse 1, 10 und A in Abb. 3-3, S.31), sowie der Luftspalt zwischen den Vertikalelementen und dem Deckenrost (ca. 16 cm) bzw. dem Boden (ca. 18 cm) eine Querlüftung bewirken. In Abb. 4-3 sind für den einseitigen Luftwechsel der Eissporthalle symbolisch Pfade (punktierte Linien) eingezeichnet, entlang denen die Luft für die folgend definierten Luftwechselzahlen strömt:

- n_{DR-e} ; Luftwechsel zwischen Dachraum und Außenraum
- n_{HR-e} ; Luftwechsel zwischen Hallenraum und Außenraum
- n_{DR-HR} ; Luftwechsel zwischen Dachraum und Hallenraum

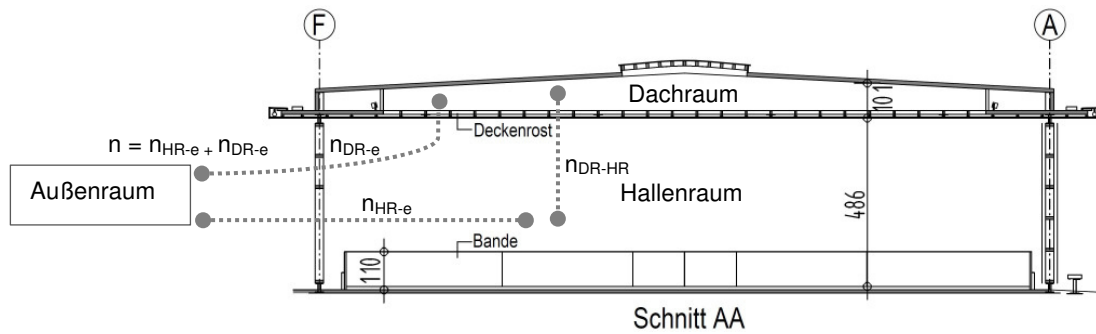


Abb. 4-3: Pfade für n_{DR-e} , n_{HR-e} und n_{DR-HR}

Mit den Luftwechselzahlen n_{DR-e} und n_{HR-e} , kann die Luftwechselzahl n für die gesamte Eissporthalle (Dachraum und Hallenraum) laut Gl. 4-4 angegeben werden, wobei n_{DR-HR} keinen Einfluss auf n hat.

$$n = n_{HR-e} + n_{DR-e} \quad \text{Gl. 4-4}$$

Aussagen über die Größe von n_{DR-e} , n_{HR-e} und n_{DR-HR} sind nur mit aufwendigen Berechnungsansätzen (zB. CFD) oder Messungen möglich und werden hier nicht angestellt. Deshalb wird für die Berechnung der in Tab. 4-4 dargestellten Luftwechselzahlen das Volumen des Dachraums und das Volumen des Hallenraums als homogenes Raumvolumen V_R , entsprechend der Definition in Gl. 4-2, betrachtet.

Mangels in der Literatur auffindbarer empirischer Berechnungsansätze, welche für die einseitige Lüftung bzw. Querlüftung von Hallenbauwerken mit großen Öffnungen anwendbar sind, wird der Luftwechsel der Eissporthalle mit dem Berechnungsansatz von De Gids und Phaff [33] abgeschätzt, obwohl dieser nur für Wohnräume evaluiert wurde. In Tab. 4-4 sind der lüftungswirksame Luftvolumenstrom \dot{V}_L (Gl. 4-3) und die Luftwechselzahl n (Gl. 4-2) für die Windgeschwindigkeiten v_{10} laut Tab. 4-2 und den mittleren bzw. maximalen Temperaturunterschied zwischen Außen- und Hallenluft laut Tab. 3-5 (S. 45) angegeben. Es wird der zwischen den Achsen 7 und 8 liegende Hallenbereich (vgl. Abb. 3-3, S.31) betrachtet.

Tab. 4-4: Luftwechselzahlen für den einseitigen Luftwechsel der offenen Eissporthalle Bergheim

v_{10} [m/s]	$ \Delta T = 0,5$ [K]		$ \Delta T = 3,1$ [K]		$V_R = 21,15 \cdot 5,0 \cdot (4,86 + 1,01) = 620,8 \text{ m}^3$ $A = (5,0 - 0,24) \cdot 4,86 = 23,1 \text{ m}^2$ 4,86 ... Höhe Hallenraum h_{HR} [m] 1,01 ... Höhe Dachraum h_{DR} [m]
	\dot{V}_L [m³/s]	n [1/h]	\dot{V}_L [m³/s]	n [1/h]	
0,3	1,59	9	2,90	17	
3,0	1,93	11	3,10	18	
5,0	2,42	14	3,43	20	

Die Luftwechselzahlen in Tab. 4-4 zeigen, dass sich beim gewählten Berechnungsansatz der Einfluss des Temperaturunterschieds zwischen Außenluft und Hallenluft stärker auswirkt als der Einfluss der Windgeschwindigkeit.

4.1.3 Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten

Mit den Gleichungen Gl. 2-16 bis Gl. 2-24 aus Kapitel 2.1.2 (S.9) wird in diesem Abschnitt ein Größenbereich für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten an der Eisfläche ($h_{cv,E}$) sowie an der dem Eis zugewandten Seite der Dachplatte ($h_{cv,D,i}$) ermittelt. An der Eis-

fläche und an der Dachplatte handelt es sich um eine Mischkonvektion die sich durch Überlagerung der erzwungenen mit der freien Konvektion einstellt. Die dafür erforderlichen Eingangsgrößen (Strömungsgeschwindigkeit der Luft bei erzwungener Konvektion aufgrund von Wind, Überströmlänge bzw. charakteristische Länge der Oberfläche sowie Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Luft bei freier Konvektion) werden folgend festgelegt.

Strömungsgeschwindigkeit der Luft

Die auf Basis der logarithmischen Höhenformel (Gl. 4-1) berechneten Strömungsgeschwindigkeiten $v_{hcv,E}$ (1,8 m/s) und $v_{hcv,D,i}$ (4,0 m/s) für v_{10} von 5,0 m/s laut Tab. 4-2 (S.54) stellen den oberen Grenzwert zur Berechnung von $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$ dar. Im Vergleich dazu hat Fritzen [2, S.40] im Dachraum der einseitig offenen Eissporthalle in Bitburg (siehe Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I auf S.2) eine maximale Windgeschwindigkeit von 3 m/s gemessen. Folglich wird bei der erzwungenen Konvektion ein Luftgeschwindigkeitsbereich von 0,2 m/s bis 3,0 m/s betrachtet.

Überströmlänge und charakteristische Länge

Neben der Luftgeschwindigkeit geht auch die Überströmlänge $l_{\bar{u}}$ (Gl. 2-18, Gl. 2-20, S.10) in die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten für die erzwungene Konvektion ein. Für $l_{\bar{u}}$ wird ein Längenbereich von 1,0 m bis 20,0 m (die Begründung dieser Annahme erfolgt später) betrachtet.

Der Einfluss der charakteristischen Länge l (Gl. 2-21, S.11) auf den Wärmeübergangskoeffizienten bei der freien Konvektion ist für den abwärts gerichteten Wärmestrom gering und beim aufwärts gerichteten Wärmestrom vernachlässigbar. Die charakteristische Länge l wird mit 1,0 m festgelegt.

Temperaturdifferenz

Anhand der Zusammenfassung der Messdaten 2010 (Tab. 3-5, S.45) ist ersichtlich, dass der Temperaturunterschied zwischen der dem Eis zugewandten Seite der Dachplatte und der Luft im Dachraum ($\Theta_{D,i}$ minus $\Theta_{L,i}$) im Mittel -0,39 K und maximal -2,3 K beträgt. In Anlehnung daran wird bei der freien Konvektion an der Dachplatte ein Temperaturunterschied von 0 K bis -2,0 K berücksichtigt. Dabei stellt sich ein aufwärtsgerichteter Wärmestrom an der Dachplatte ein.

Für die freie Konvektion zwischen der Eisfläche und der Luft im Dachraum wird die maximale Temperaturdifferenz ($\Theta_{E,i}$ minus $\Theta_{L,i}$) von -18,5 K laut (Tab. 3-5, S.45) angesetzt, wobei sich ein abwärtsgerichteter Wärmestrom an der Eisfläche einstellt.

Mit diesen Eingangsparametern ergeben sich die in Abb. 4-4 dargestellten konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten ($h_{cv,zwang}$, $h_{cv,frei}$).

4 Entwicklung eines physikalischen Modells

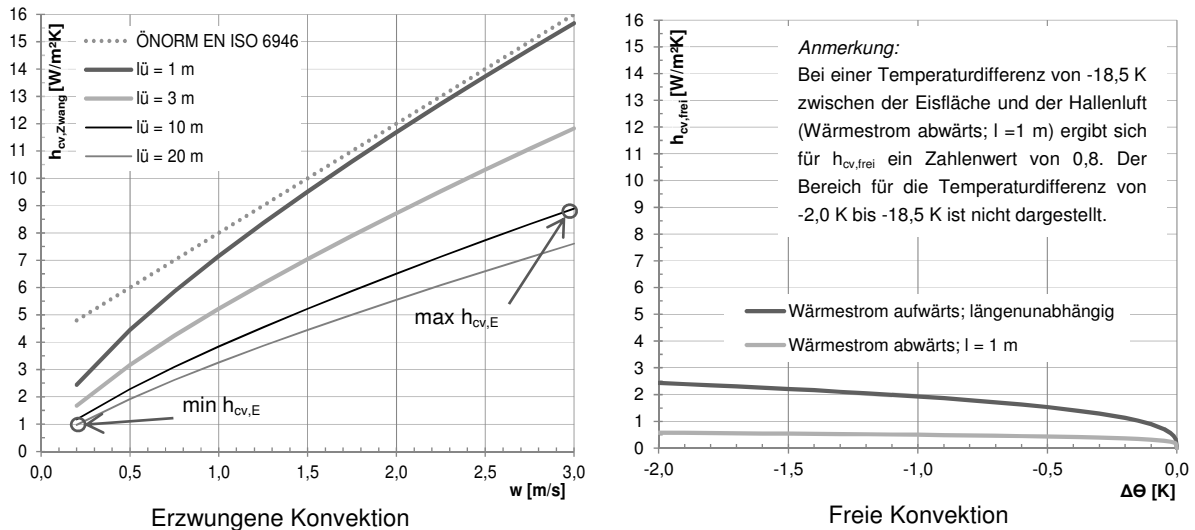


Abb. 4-4: Größenordnungen für $h_{cv,zwang}$ und $h_{cv,frei}$ nach Gl. 2-16 bis Gl. 2-24

Durch den Vergleich der in Abb. 4-4 dargestellten Werte für die erzwungene Konvektion mit jenen für die freie Konvektion wird ersichtlich, dass im Rahmen der gewählten Eingangsgrößen die Zahlenwerte für $h_{cv,zwang}$ ab einer Luftgeschwindigkeit von 0,8 m/s für alle Überströmlängen $l_{\bar{u}}$ über den Zahlenwerten für $h_{cv,frei}$ liegen. In Abb. 4-4 ist neben dem von der Überströmlänge $l_{\bar{u}}$ beeinflussten Wärmeübergangskoeffizienten der erzwungenen Konvektion (Gl. 2-18, Gl. 2-20, S.10) der rein windgeschwindigkeitsabhängige Ansatz aus der ÖNORM EN ISO 6946 [21] (Gl. 2-51 S.22) dargestellt, der die größten Werte ergibt.

Der Größenbereich für die Mischkonvektion (Gl. 2-17, S.10) an der Dachplatte $h_{cv,D,i}$ in Abb. 4-5 ergibt sich durch Überlagerung von $h_{cv,zwang}$ laut Abb. 4-4 links (Überströmlänge $l_{\bar{u}} = 1$ m, Windgeschwindigkeiten w von 0,2 m/s, 1,5 m/s und 3,0 m/s) mit $h_{cv,frei}$ laut Abb. 4-4 rechts (Wärmestrom aufwärts). Obwohl die Innenfläche der Dachplatte zwischen den Querträgern ca. 8,8 m x 4,8 m misst, wird für $l_{\bar{u}}$ 1 m gewählt. Diese Annahme wird mit der Überlegung begründet, dass sich im Dachraum, der im Mittel rund 1 m hoch ist und durch den Deckenrost vom Hallenraum getrennt wird, walzenförmige Konvektionsströmungen einstellen.

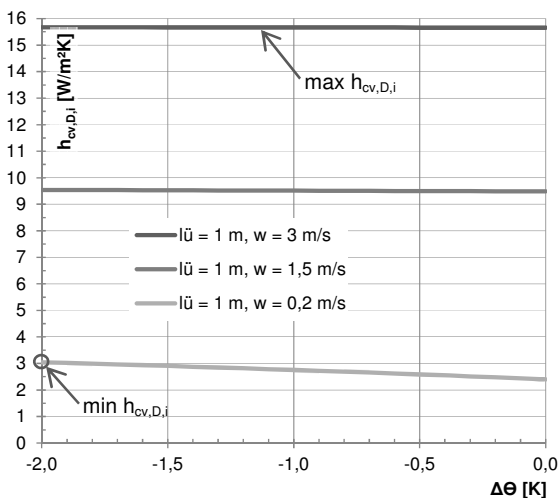


Abb. 4-5: Größenbereich der Mischkonvektion $h_{cv,D,i}$ durch Überlagerung von $h_{cv,zwang}$ und $h_{cv,frei}$

Abb. 4-5 zeigt deutlich, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit die freie Konvektion eine untergeordnete Rolle gegenüber der erzwungenen Konvektion spielt und deshalb die Mischkonvektion $h_{cv,D,i}$ von der Temperaturdifferenz unabhängig wird. Für die Eisfläche, an der sich ein abwärtsgerichteter Wärmestrom einstellt, ist der Anteil der freien Konvektion an der Mischkonvektion noch geringer als für die Dachplatte (siehe Abb. 4-4 rechts). Folglich werden die Grenzwerte des konvektiven Wärmeübergangs an der Eisfläche $h_{cv,E}$, die in Hallenquerrichtung rund 20 Meter breit ist, unmittelbar der Abb. 4-4 links ($h_{cv,Zwang}$ für die Überströmlänge $l_{\bar{u}} = 10$ m und $l_{\bar{u}} = 20$ m) entnommen.

Die Zusammenfassung der abgelesenen Grenzwerte für $h_{cv,E}$ (Abb. 4-4 links) und $h_{cv,D,i}$ (Abb. 4-5) ist in Tab. 4-5 ersichtlich.

Tab. 4-5: Grenzwerte für $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$

	$h_{cv,E}$ [W/(m ² K)]	$h_{cv,D,i}$ [W/(m ² K)]
min	1	3
max	8	16

4.2 Physikalisches Modell

Im folgenden Kapitel werden vier physikalische Modelle der Eissporthalle schrittweise mit der in Kapitel 4.2.1 dargestellten Methode entwickelt. Mit den Modellen 1 bis 3 wird in Kapitel 4.2.2 der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Eisfläche, dem Deckenrost und der Dachplatte untersucht. Aufbauend auf die ersten drei Modelle wird in Kapitel 4.2.3 das Modell 4 betrachtet, mit dem auch der natürlichen Luftwechsel und der konvektive Wärmeübergang zwischen der Eisfläche und der Luft des Dachraums erfasst wird. Die instationäre Simulation in Kapitel 5 basiert auf Modell 4.

Alle vier Modelle beruhen auf stationären Betrachtungen, wobei die Randbedingungen und die zu berechnenden Größen an der entsprechenden Stelle angegeben werden. In Kapitel 5 wird schließlich die Überführung in ein dynamisches Modell beschrieben.

4.2.1 Methode

In den Modellen 1 bis 3 wird das physikalische Modell schrittweise erweitert, bis in Modell 4 alle in Tab. 4-6 aufgelisteten Komponenten integriert sind. Die Bezeichnungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden dabei von der Messung übernommen, soweit entsprechende Messpunkte vorhanden waren (vgl. Kapitel 3.2.2). Zur Lösung der Modellgleichungen wurde das Programm EES [37] verwendet.

Tab. 4-6: Komponenten des Modells 4 der Eissporthalle

Modellkomponente	Physikalische Größe und Bezeichnung	
	AUßENKLIMA	$\Theta_{L,e}$ [°C]
$\varphi_{L,e}$ [%]		laut Kapitel 3.2.2
DACHRAUMKLIMA	$\Theta_{L,i}$ [°C]	laut Kapitel 3.2.2
	$\varphi_{L,i}$ [%]	laut Kapitel 3.2.2
DACHPLATTE	$\Theta_{D,e}$ [°C]	laut Kapitel 3.2.2
	$\Theta_{D,i}$ [°C]	laut Kapitel 3.2.2
	$\varphi_{D,i}$ [%]	laut Kapitel 3.2.2
DECKENROST	Θ_R [°C]	Temperatur des Deckenrosts
EISFLÄCHE	$\Theta_{E,i}$ [°C]	Eistemperatur der Hallenraum zugewandten Seite
	$\Theta_{E,e}$ [°C]	Vorlauftemperatur der Kältemaschine (-5 °C)

Bei dem in Kapitel 3.2 beschriebenen Messprogramm wurde keine Messung der Solarstrahlung durchgeführt. Aus diesem Grund wird bei den vier Modellen das in die Dachfläche integrierte Oberlicht (rund 10 % der Dachfläche) nicht berücksichtigt, obwohl anhand der Auswertung der Messung 2010/2011 in Kapitel 3.3.3.4 (S.48) festgestellt wird, dass an heiteren Tagen $\Theta_{LOL,i}$ (Lufttemperatur im Dachraum unter dem Oberlicht) um bis zu 7 K über $\Theta_{L,i}$ (Lufttemperatur im Dachraum unter der Dachplatte) ansteigt.

Eine weitere Vereinfachung betrifft die Modellierung des Dachraumklimas ($\Theta_{D,i}$, $\varphi_{D,i}$), das durch den natürlichen Luftwechsel an das Außenklima gekoppelt ist. In Kapitel 4.1.2 (S.57) wurde bei der Abschätzung des Luftwechsels festgelegt, das gesamte Volumen der Eissporthalle (bestehend aus dem Volumen des Dach- und des Hallenraums) als ein homogenes Raumvolumen V_R zu betrachten. Folglich wird in den Modellen der Dach- und der Hallenraum als ein Modellraum (eine Zone) mit homogenem Modellklima zusammengefasst. Das mit den Modellen berechnete Modellklima entspricht also gleicherweise dem Dachraumklima ($\Theta_{D,i}$, $\varphi_{D,i}$) der Messung 2010 und dem messtechnisch nicht erfassten Klima des Hallenraums.

An bzw. zwischen den oben beschriebenen Modellkomponenten werden die in Tab. 4-7 angeführten Wärmeströme, hervorgerufen durch die Wärmetransportmechanismen Leitung, Strahlung und Konvektion, berücksichtigt.

Tab. 4-7: Wärmeströme in Modell 4

Kurzbezeichnung	Beschreibung des Wärmestroms
$\phi_{cd,D}$	eindimensionale Wärmeleitung in der Dachplatte
$\phi_{cd,E}$	eindimensionale Wärmeleitung in der Eisfläche
$\phi_{cv,Li-D}$	Konvektion zwischen der Luft des Dachraums und der Dachplatte
$\phi_{cv,Li-R}$	Konvektion zwischen der Luft des Dachraums und dem Rost
$\phi_{cv,Li-E}$	Konvektion zwischen der Luft des Dachraums und der Eisfläche
ϕ_{LW}	Luftwechsel der Eissporthalle (Austausch mit der Außenluft)
$\phi_{r,D-E}$	langwelliger Strahlungsaustausch zwischen der Dachplatte und der Eisfläche
$\phi_{r,D-R}$	langwelliger Strahlungsaustausch zwischen der Dachplatte und dem Deckenrost
$\phi_{r,E-R}$	langwelliger Strahlungsaustausch zwischen der Eisfläche und dem Deckenrost

4.2.2 Modell 1 bis 3 - langwelliger Strahlungsaustausch

Die Abbildung des konvektiven Wärmeübergangs erfolgt in den Modellen 1 bis 3 gemäß der in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Annahmen. Die exakte analytische Behandlung des langwelligigen Strahlungsaustausches zwischen der Dachkonstruktion und der Eisfläche ist aufgrund der starken Strukturierung der Dachkonstruktion (bestehend aus den BSH-Trägern, der Dachplatte und dem Deckenrost) sehr aufwendig, da alle Einstrahlzahlen zwischen der Eisfläche und den Bauteilen der Dachkonstruktion ermittelt werden müssen. Genau genommen müssen auch die Wände der Eissporthalle und der angrenzende Außenflächenbereich an der offenen Nordseite bei der Berechnung des langwelligigen Strahlungsaustausches berücksichtigt werden.

Um den Rechenaufwand gering zu halten, wird in den folgenden drei Modellen der langwellige Strahlungsaustausch in vereinfachter Weise untersucht:

- Modell 1 - langwelliger Strahlungsaustausch ohne Deckenrost
- Modell 2 - langwelliger Strahlungsaustausch mit Deckenrost
- Modell 3 - langwelliger Strahlungsaustausch mit vereinfachtem Deckenrost (nur eine Deckenrosttemperatur)

4.2.2.1 Modell 1 - langwelliger Strahlungsaustausch ohne Deckenrost

In Abb. 4-6 ist das Modell 1, bestehend aus der Dachplatte, dem Dachraumklima und der Eisfläche, symbolisch mit den untersuchten Temperaturen und Wärmeströmen dargestellt. Die Temperaturen $\Theta_{D,e}$, $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{E,i}$ werden in der folgenden Betrachtung als Randbedingung vorgegeben. Es wird der Zusammenhang zwischen $\Theta_{D,i}$ und der Einstrahlzahl F_{ED} , die beim Strahlungsaustausch zwischen der Eisfläche und der Dachplatte den Einfluss der Lage und Orientierung der beiden Flächen zueinander sowie die deren Form und Größe erfasst, untersucht. Der Deckenrost wird im Modell 1 nicht berücksichtigt.

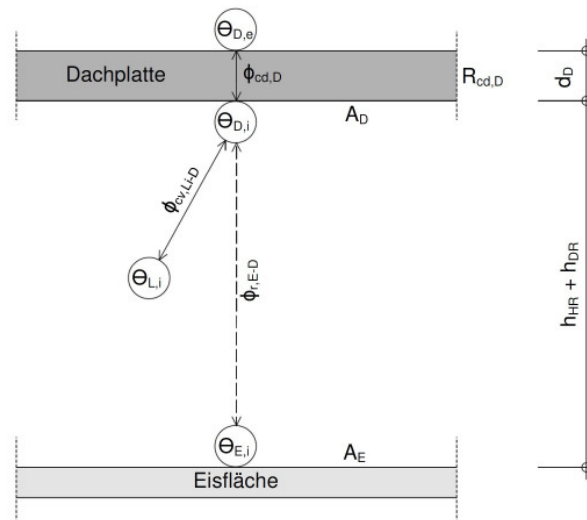


Abb. 4-6: Modell 1 – langwelliger Strahlungsaustausch ohne Deckenrost

Die grafische Darstellung der Temperaturbezeichnungen in einem Kreis in Abb. 4-6 wird als „Knoten“ bezeichnet. Da $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{E,i}$ im Modell 1 Randbedingungen sind, wird zwischen dem Knoten $\Theta_{L,i}$ und dem Knoten $\Theta_{E,i}$ keine konvektive Wärmeübertragung abgebildet. Im Knoten $\Theta_{D,i}$ muss die Summe der Wärmeströme den Zahlenwert 0 ergeben (stationäre Randbedingungen, keine Quellen oder Senken vorausgesetzt), was durch Gl. 4-5 ausgedrückt wird. Die Wärmeströme in Gl. 4-5 ergeben sich laut Gl. 4-6 bis Gl. 4-8.

$$\Phi_{cd,D} - \Phi_{cv,Li-D} + \Phi_{r,E-D} = 0 \quad \text{Gl. 4-5}$$

$$\text{Wärmeleitung: } \Phi_{cd,D} = \frac{1}{R_{cd,D}} \cdot (\theta_{D,e} - \theta_{D,i}) \cdot A_D \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-6}$$

$$\text{Konvektion: } \Phi_{cv,Li-D} = h_{cv,D,i} \cdot (\theta_{D,i} - \theta_{L,i}) \cdot A_D \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-7}$$

$$\text{Wärmestrahlung: } \Phi_{r,E-D} = A_E \cdot F_{ED} \cdot \varepsilon_E \cdot \varepsilon_D \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_{E,i}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{D,i}}{100} \right)^4 \right] \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-8}$$

A_D	[m ²]	Dachplattenfläche
A_E	[m ²]	Eisfläche
d_D	[m]	Dachplattendicke (0,11 m)
λ_{Holz}	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit Holz (0,13 laut Tab. 2-1, S.9)
$R_{cd,D}$	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand Dachplatte; $R_{cd,D} = d_D / \lambda_{\text{Holz}}$
F_{ED}	[-]	Einstrahlzahl der Eisfläche auf die Dachplatte
$h_{cv,D,i}$	[W/(m ² K)]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Dachplatte innen
ε_E	[-]	Emissionsgrad Eis (0,92 laut Tab. 2-3, S.15)
ε_D	[-]	Emissionsgrad Decke (0,9 für Holz laut Tab. 2-3, S.15)
C_s	[W/(m ² K ⁴)]	Strahlungskoeffizient schwarzer Strahler (5,67 laut S.13)
$T_{E,i}$	[K]	$\Theta_{E,i} + 273,16$
$T_{D,i}$	[K]	$\Theta_{D,i} + 273,16$

Die Auswertung der Gl. 4-5 ergibt aufgrund von Gl. 4-8 ein nichtlineares Gleichungssystem woraus $\Theta_{D,i}$ iterativ berechnet werden kann. Auf die Berechnung der Einstrahlzahl F_{ED} in Gl. 4-8 wird im Folgenden ausführlich eingegangen. Wie bereits erwähnt, ist die exakte analytische Behandlung des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen der Dachkonstruktion und der Eisfläche sehr aufwendig. Aus diesem Grund werden im Modell 1 fünf Geometrieansätze (GA1 bis GA5) zur Berechnung von F_{ED} vorgestellt, wobei Größe und Lage der Dachplattenfläche A_D und der Eisfläche A_E variieren.

GA1

Marquardt und Mainka [4, S.96] bzw. Wienrich und Anhalt [36, S.14] befassen sich in ihren Arbeiten mit der Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen der Eisfläche und der Decke von Eissporthallen. Bei ihren Berechnungen wird offensichtlich die Annahme getroffen (da sie den langwelligen Strahlungsaustausch laut Gl. 2-40 bis Gl. 2-42 berechnen), dass die Eis- und Dachplattenfläche gleich groß sind und deren Ausdehnung wesentlich größer ist als ihr Abstand zueinander. Für GA1 soll ebenfalls diese Annahme verwendet werden ($F_{ED} = 1$).

GA2

In Abb. 4-7 ist GA2 im Grundriss und in den Schnitten dargestellt. Ebenfalls abgebildet, allerdings nur im Grundriss, sind GA3 bis GA5. Aufgrund der geringen Dachneigung wird die Vereinfachung getroffen, dass die Dachplatte im Abstand von 5,87 m (Höhe Hallenraum h_H plus Höhe Dachraum h_{DR}) parallel zur Eisfläche angeordnet ist.

Laut der Definition der Einstrahlzahl zwischen zwei Flächen (Kapitel 2.1.3.3, S.17), steht jedes Flächenelement der Eisfläche A_E mit direkter Sichtverbindung zur Dachplattenfläche A_D im Strahlungsaustausch. Dementsprechend wurde die Größe der Eisfläche A_E in Abb. 4-7 grafisch bestimmt. Dass für die Randbereiche der Dachplattenfläche und der Eisfläche diese Bedingung nicht erfüllt ist, wird durch die punktierten Linien in der Schnittdarstellung BB der Abb. 4-7 verdeutlicht. Diese werden von den BSH-Trägern unterbrochen, was sich als sogenannte Verschattung äußert. Die Verschattung wird in GA2 nicht berücksichtigt. In der Schnittdarstellung AA ergibt sich keine Verschattung.

Die Berechnung der Einstrahlzahl F_{ED} erfolgt entsprechend des Falls 3 in Abb. 2-10 (S.20) und wird anhand von Tab. 4-8 gezeigt. In Abb. 4-8 ist GA2 in detaillierter Form als Ausschnitt von Abb. 4-7 dargestellt.

Tab. 4-8: Berechnung von F_{ED} in GA2

Einstrahl - zahl	a [cm]	c [cm]	e [cm]	b [cm]	d [cm]	f [cm]	h [cm]	Rechenwert der Einstrahlzahl
$F_{1,23456}$	3115	0	3115	1990	0	1990	587	0,64054
F_{13}	1099	2016	3115	125	1865	1990	587	0,00947
F_{14}	623	2492	3115	1865	125	1990	587	0,10418
F_{15}	2492	623	3115	1173	817	1990	587	0,32048
F_{16}	2016	1099	3115	817	1173	1990	587	0,16913
$F_{12} = F_{ED}$	$F_{12} = F_{1,23456} - F_{13} - F_{14} - F_{15} - F_{16}$							0,03728

4 Entwicklung eines physikalischen Modells

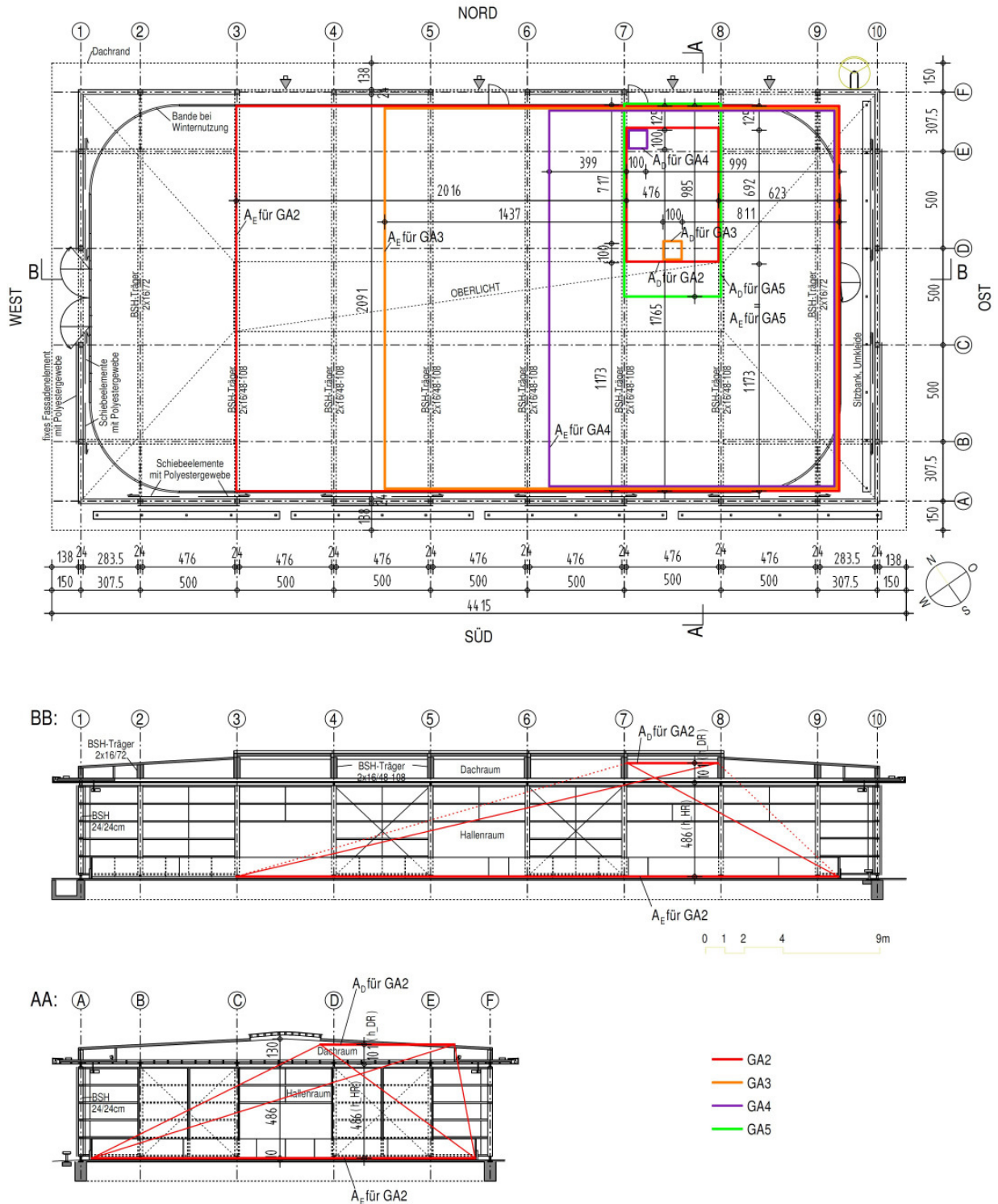


Abb. 4-7: GA2 bis GA5 in Modell 1 der Eissporthalle Bergheim

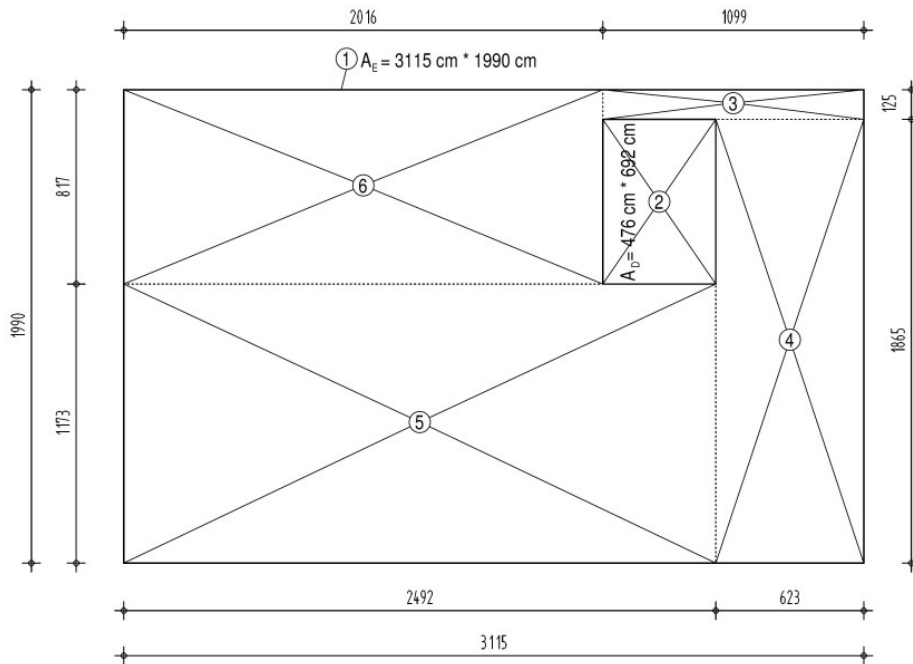


Abb. 4-8: Detaillierte Darstellung des GA2 für die Berechnung von F_{ED}

GA3 und GA4

Die gleich großen Dachplattenflächen A_D in GA3 und GA4 (vgl. Abb. 4-7, Grundriss) sind innerhalb der Dachplattenfläche des GA2 an verschiedenen Positionen angeordnet. Für die Ermittlung der Eisflächengröße A_E in GA3 und GA4 wird analog zu GA2 vorgegangen. Eine detaillierte Darstellung des GA3 und GA4 ist in Abb. A- 12 (S.105) und Abb. A- 13 (S.105) zu finden. Die Berechnung von F_{ED} erfolgt wieder entsprechend Fall 3 in Abb. 2-10 (S.20) und ergibt für GA3 einen Rechenwert von 0,001665 (Tab. A- 3 S.106) und für GA4 einen Rechenwert von 0,001612 (Tab. A- 4 S.106).

GA5

In GA5 werden die beiden Flächen A_D und A_E vereinfacht als gleich groß angenommen (vgl. Abb. 4-7, Grundriss). Diese Annahme ist im Gegensatz zu GA2 bis GA4, wo zur jeweils betrachteten Dachplattenfläche (A_D) die entsprechende Eisfläche (A_E) grafisch ermittelt wird, physikalisch unpräzise. Dennoch wird GA5 weiter verfolgt und im Verlauf dieses Kapitels diskutiert. Für GA5 ergibt F_{ED} laut Gl. 2-50 (S. 21) mit den Eingangswerten $a = 4,76$ m, $b = 9,85$ m und $h = 5,87$ m einen Rechenwert von 0,2291.

Mit den Einstrahlzahlen F_{ED} , die mit den fünf Geometrieansätze ermittelt wurden, werden die in Tab. 4-9 angegebenen Temperaturen $\Theta_{D,i}$ entsprechend Gl. 4-5 bis berechnet. Für die Randbedingungen ($\Theta_{L,i}$, $\Theta_{D,e}$) werden die Messwerte des 13.03.2010 während der Zeit von 07:30 bis 08:50 (vgl. Abb. 3-9 S.41) herangezogen, da in diesem Zeitraum stationäre Temperaturzustände vorlagen. $\Theta_{E,i}$ wird mit -5 °C angenommen. Für $h_{cv,D,i}$ werden in Anlehnung an Tab. 4-5 (S.60) Werte von 8,12 und 16 [W/(m²K)] gewählt.

Tab. 4-9: Modell 1 - Berechnung von $\Theta_{D,i}$ in Abhängigkeit unterschiedlicher $h_{cv,D,i}$ und Geometrieansätze GA

					Rechnung	Messung (13.03.2010, 07:30 - 08:50)			
$h_{cv,D,i}$ [W/(m ² K)]	Geometrie- ansatz	F_{ED} [-]	A_E [m ²]	A_D [m ²]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{E,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]
8	GA1	1,0	1,00	1,00	-1,73	0,1	-0,5	-5,0	-0,8
	GA2	0,03728	619,89	32,94	-1,43				
	GA3	0,001665	467,25	1,00	-1,51				
	GA4	0,001612	298,10	1,00	-1,17				
	GA5	0,2291	46,89	46,89	-0,81				
12	GA1	1,0	1,00	1,00	-1,44				
	GA2	0,03728	619,89	32,94	-1,20				
	GA3	0,001665	467,25	1,00	-1,26				
	GA4	0,001612	298,10	1,00	-0,99				
	GA5	0,2291	46,89	46,89	-0,72				
16	GA1	1,0	1,00	1,00	-1,26				
	GA2	0,03728	619,89	32,94	-1,06				
	GA3	0,001665	467,25	1,00	-1,11				
	GA4	0,001612	298,10	1,00	-0,89				
	GA5	0,2291	46,89	46,89	-0,67				

Anhand des Vergleichs der berechneten Werte und des Messwerts für $\Theta_{D,i}$ laut Tab. 4-9 zeigt sich, dass die Wahl des Geometrieansatzes für den langwelligen Strahlungsaustausch einen größeren Einfluss auf die Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ hat als $h_{cv,D,i}$.

Mit GA1 bzw. GA5 ergeben sich die niedrigsten bzw. höchsten Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$.

GA2 bis GA4 sind hinsichtlich der Größenermittlung für die jeweilige Eisfläche A_E gegenüber GA1 und GA5 die physikalisch präziseren GA (im Rahmen der für Modell 1 getroffenen Vereinfachungen bezüglich der Wände und des Deckenrosts). Für die Wahl von GA2 bis GA4, die sich in der Lage und Größe von A_D und A_E unterscheiden, ist festzustellen, dass die Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ wie folgt beeinflusst werden:

- Die mit GA4 berechneten Temperaturen $\Theta_{D,i}$ sind höher als jene, die mit GA3 berechnet werden, da A_D in GA4 näher am Eisflächenrand liegt als in GA3 und deshalb der resultierende Strahlungswärmestrom zwischen A_E und A_D in GA4 geringer ist als in GA3.
- Die mit dem GA2 berechneten $\Theta_{D,i}$ liegen zwischen den berechneten $\Theta_{D,i}$ des GA3 und GA4.

Wird die Messunsicherheit von $\pm 0,4$ K für den Messwert von $\Theta_{D,i}$ in Tab. 4-9 außer Acht gelassen, kann der Messwert für $\Theta_{D,i}$ nur mit dem GA5 abgebildet werden. Deshalb wird in den folgenden Modellen 2 und 3 der langwellige Strahlungsaustausch auf Basis von GA5 des Modells 1 berechnet, obwohl dieser Ansatz physikalisch unpräzise ist.

4.2.2.2 Modell 2 - langwelliger Strahlungsaustausch mit Deckenrost

Modell 2 (vgl. Abb. 4-11, S.69) wird gegenüber Modell 1 (vgl. Abb. 4-6, S.63) um den Deckenrost der Eissporthalle erweitert. In Abb. 4-9 ist der Deckenrost im Grundriss dargestellt, wobei 1 m² der Hallenfläche betrachtet wird, in welchem die Deckenrostfläche A_R 0,378 m² einnimmt.

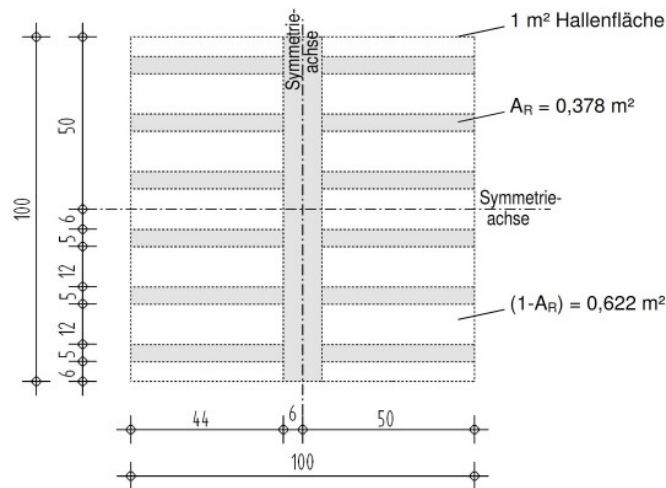


Abb. 4-9: Grundrissdarstellung (Ausschnitt 1 m²) des Deckenrosts der offenen Eissporthalle Bergheim

Mit Modell 2 wird der langwellige Strahlungsaustausch des Deckenrosts mit der Eisfläche und der Dachplattenfläche in vereinfachter Weise berücksichtigt und dabei der Einfluss des Deckenrosts auf die $\Theta_{D,i}$ untersucht. Als Randbedingungen werden wie auch in Modell 1 die Temperaturen $\Theta_{D,e}$, $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{E,i}$ vorgegeben.

Wie bereits bei der Gl. 2-40 (S.17) angemerkt, kann der Wärmestrahlungsaustausch zwischen zwei Flächen unterschiedlicher Temperatur durch die Anordnung eines oder mehrerer Strahlungsschutzschirme(s) zwischen den beiden Flächen verringert werden. Demnach wirkt der Deckenrost der Eissporthalle zwischen der Dachplatte und der Eisfläche neben seiner gestalterischen Funktion auch als Strahlungsschutzschirm. Da für die Anwendung der Gl. 2-40 vorausgesetzt wird, dass die lineare Ausdehnung der Flächen wesentlich größer ist als ihr Abstand zueinander und der Strahlungsschutzschirm vollflächig sein muss, kann diese Gleichung nicht zur Beschreibung des Wärmestrahlungsaustauschs zwischen der Dachplatte, dem Deckenrost und der Eisfläche herangezogen werden. Deshalb wird in Modell 2 die Annahme getroffen, dass der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Dachplattenfläche A_D , der Deckenrostfläche A_R und der Eisfläche A_E nur in vertikaler Richtung, also rechtwinkelig zu A_D , A_R und A_E , erfolgt (vgl. Abb. 4-10).

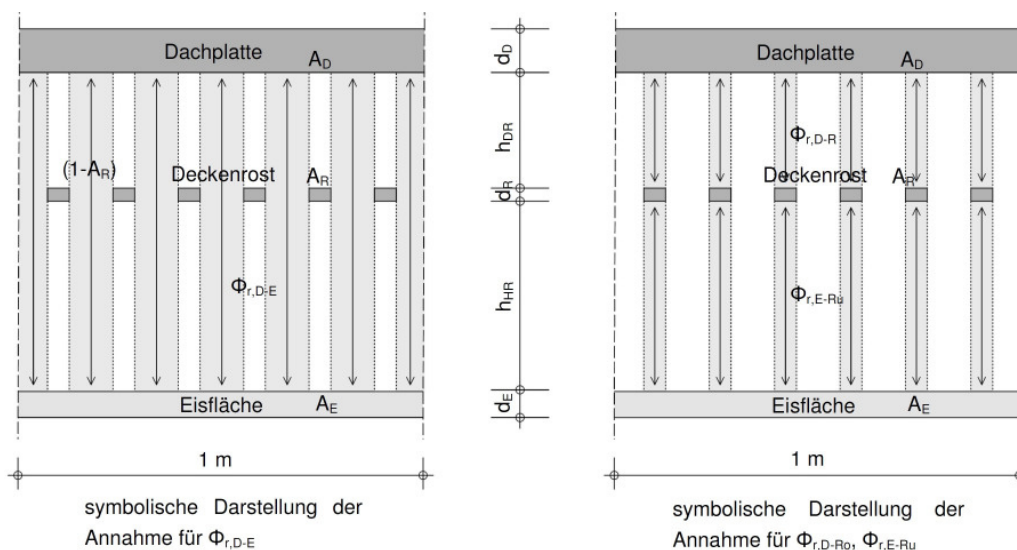


Abb. 4-10: Annahme des langwelligeren Strahlungsaustauschs in Modell 2

Entsprechend der in Abb. 4-10 dargestellten Annahme für den langwelligenen Strahlungsaustausch in Modell 2 ergeben sich die folgenden Strahlungswärmeströme:

- $\Phi_{r,D-E}$ zwischen der Dachplatte und der Eisfläche
- $\Phi_{r,D-R_o}$ zwischen der Dachplatte und der ihr zugewandten Deckenrostfläche A_R
- $\Phi_{r,E-R_u}$ zwischen der Eisfläche und der ihr zugewandten Deckenrostfläche A_R

Die Berechnung von $\Phi_{r,D-E}$ in Modell 2 laut Gl. 4-15 wird die Einstrahlzahl F_{ED} zwischen der Eisfläche und der Dachplatte benötigt. F_{ED} wird aus Modell 1 (GA5) übernommen ($F_{ED} = F_{DE}$ laut der Reziprozitätsbeziehung - Gl. 2-44 auf S.19) und beträgt 0,2291 (vgl. S.66). Zur Berechnung von $\Phi_{r,D-R_o}$ und $\Phi_{r,E-R_u}$ sind die Einstrahlzahl der Dachplatte auf den Deckenrost F_{DR} sowie die Einstrahlzahl der Eisfläche auf den Deckenrost F_{ER} erforderlich. In Tab. 4-10 sind die Rechenwerte für F_{DR} und F_{ER} auf Basis des GA5 angegeben (ermittelt aus Gl. 2-47, S.20).

Tab. 4-10: F_{DR} und F_{ER} auf Basis von GA5

Einstrahl - zahl	a [cm]	b [cm]	h [cm]	Rechenwert der Einstrahlzahl
F_{DR}	476	985	101	0,7435
F_{ER}	476	985	486	0,2833

Für die mathematische Beschreibung von Modell 2 wird im Folgenden 1 m² Hallenfläche betrachtet.

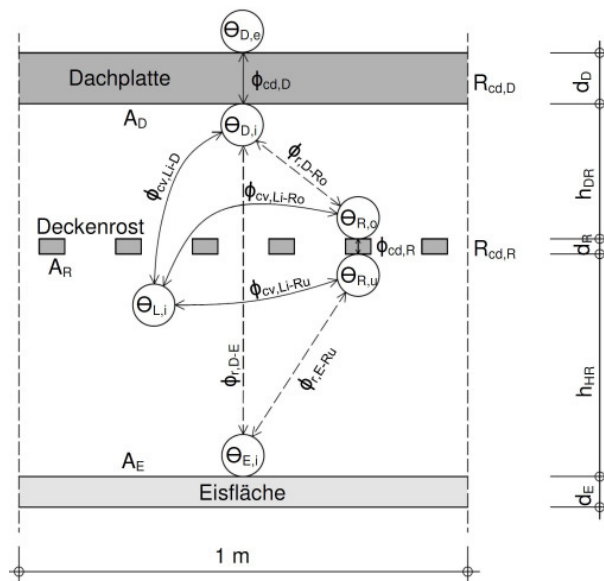


Abb. 4-11: Modell 2 – langwelliger Strahlungsaustausch mit Deckenrost

In Modell 2 wird, wie in Abb. 4-11) dargestellt, an der Deckenrostober- und -unterseite jeweils ein Temperaturknoten angesetzt ($\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$). Zwischen den Knoten $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$ stellt sich der Wärmeleitungsstrom $\Phi_{cd,R}$ ein. Die konvektiven Wärmeströme $\Phi_{cv,Li-R_o}$ bzw. $\Phi_{cv,Li-R_u}$ werden zwischen dem Knoten $\Theta_{L,i}$ und den Knoten $\Theta_{R,o}$ bzw. $\Theta_{R,u}$ angesetzt.

Im stationären Zustand muss die Summe der Wärmeströme in den Knoten $\Theta_{D,i}$, $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$ den Zahlenwert 0 ergeben, was durch die Bilanzgleichungen Gl. 4-9 bis Gl. 4-11 ausgedrückt

wird. Die Wärmeströme in den Bilanzgleichungen werden laut Gl. 4-12 bis Gl. 4-17 berechnet, wobei $\Phi_{cd,D}$ laut Gl. 4-6 und $\Phi_{cv,Li-D}$ laut Gl. 4-7 ermittelt wird.

$$\text{Knoten } \Theta_{D,i}: \Phi_{cd,D} - \Phi_{cv,Li-D} - \Phi_{r,D-E} + \Phi_{r,D-Ro} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-9}$$

$$\text{Knoten } \Theta_{R,o}: \Phi_{cv,Li-Ro} - \Phi_{r,D-Ro} - \Phi_{cd,R} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-10}$$

$$\text{Knoten } \Theta_{R,u}: \Phi_{cd,R} + \Phi_{cv,Li-Ru} - \Phi_{r,E-Ru} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-11}$$

Gl. 4-12 beschreibt den Wärmestrom $\Phi_{cd,R}$ infolge Wärmeleitung zwischen den Knoten $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$, Gl. 4-13 und Gl. 4-14 beschreiben die konvektiven Wärmeströme zwischen der Luft des Dachraums und der Deckenrostober- bzw. -unterseite.

$$\Phi_{cd,R} = \frac{1}{R_{cd,R}} \cdot (\theta_{R,o} - \theta_{R,u}) \cdot A_R [W] \quad \text{Gl. 4-12}$$

$$\Phi_{cv,Li-Ro} = h_{cv,R} \cdot (\theta_{L,i} - \theta_{R,o}) \cdot A_R [W] \quad \text{Gl. 4-13}$$

$$\Phi_{cv,Li-Ru} = h_{cv,R} \cdot (\theta_{L,i} - \theta_{R,u}) \cdot A_R [W] \quad \text{Gl. 4-14}$$

Gl. 4-15 bis Gl. 4-17 beschreiben die Wärmeströme infolge Wärmestrahlung, wobei die Abmessungen und Annahmen laut Abb. 4-9 und Abb. 4-10 berücksichtigt werden.

$$\Phi_{r,D-E} = A_D \cdot F_{DE} \cdot \varepsilon_E \cdot \varepsilon_D \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_{D,i}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{E,i}}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,622 [W] \quad \text{Gl. 4-15}$$

$$\Phi_{r,D-Ro} = A_D \cdot F_{DR} \cdot \varepsilon_D \cdot \varepsilon_R \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_{R,o}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{D,i}}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,378 [W] \quad \text{Gl. 4-16}$$

$$\Phi_{r,E-Ru} = A_E \cdot F_{ER} \cdot \varepsilon_E \cdot \varepsilon_R \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_{R,u}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{E,i}}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,378 [W] \quad \text{Gl. 4-17}$$

A_D	[m ²]	Dachplattenfläche
A_E	[m ²]	Eisfläche
A_R	[m ²]	Deckenrostfläche
F_{DE}	[-]	Einstrahlzahl der Dachplatte auf die Eisfläche
F_{DR}	[-]	Einstrahlzahl der Dachplatte auf den Deckenrost
F_{ER}	[-]	Einstrahlzahl der Eisfläche auf den Deckenrost
ε_E	[-]	Emissionsgrad Eis (0,92 laut Tab. 2-3, S.15)
ε_D	[-]	Emissionsgrad Decke (0,9 für Holz laut Tab. 2-3, S.15)
ε_R	[-]	Emissionsgrad Deckenrost (0,9 für Holz laut Tab. 2-3, S.15)
C_s	[W/(m ² K ⁴)]	Strahlungskoeffizient schwarzer Strahler (5,67 laut S.13)
d_R	[m]	Dicke des Deckenrosts (0,03 m)
$R_{cd,R}$	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand Deckenrost; $R_{cd,R} = d_R / \lambda_{Holz}$
$h_{cv,R}$	[W/(m ² K)]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient des Deckenrosts ($h_{cv,R} = h_{cv,D,i}$)
Θ_{Ro}	[°C]	Temperatur der Deckenrostfläche oben

$\Theta_{R,u}$	[°C]	Temperatur der Deckenrostfläche unten
$T_{E,i}$	[K]	$\Theta_{E,i} + 273,16$
$T_{D,i}$	[K]	$\Theta_{D,i} + 273,16$
$T_{R,o}$	[K]	$\Theta_{R,o} + 273,16$
$T_{R,u}$	[K]	$\Theta_{R,u} + 273,16$

Gl. 4-9 bis Gl. 4-17 stellen ein nichtlineares Gleichungssystem dar. Um den Einfluss des Deckenrosts auf $\Theta_{D,i}$ zu diskutieren, sind in Tab. 4-11 die Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$, die mit Modell 1 und Modell 2 berechnet werden, zusammengefasst. Als Randbedingung werden die Mittelwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,e}$ der Messung 2010 (vgl. Tab. 3-5 S.45) verwendet, wobei $\Theta_{E,i}$ mit -5 °C angenommen wird. Das nichtlineare Gleichungssystem des Modells 2 wird mit dem Programm EES [37] numerisch gelöst.

Tab. 4-11: Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ ohne und mit Deckenrost (Modell 1 und 2)

Modell	$h_{cv,D,i} ; h_{cv,R}$ [W/(m²K)]	Geometrie- ansatz	F_{DE} [-]	F_{DR} [-]	F_{ER} [-]	A_E [m²]	A_D [m²]	A_R [m²]	$\Theta_{E,i}$ [°C]	Rechnung			MW Messung 2010		
										$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{R,o}$ [°C]	$\Theta_{R,u}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
1	11,1 17,0	5	0,2291	-	-	1	1	-	-5	1,19 1,37	-	-	1,76	1,37	0,36
2	11,1	5	0,2291	0,7435	0,2833	1	1	0,378	-5	1,37	1,59	1,28			

Aus dem Vergleich der Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ in Tab. 4-11 ist ersichtlich, dass mit Modell 2 bei einem Wert von 11,1 [W/(m²K)] für $h_{cv,D,i}$ der Mittelwert von $\Theta_{D,i}$ der Messung 2010 erreicht wird, während dies mit Modell 1 bei einem Wert von 17,0 [W/(m²K)] für $h_{cv,D,i}$ zutrifft. Es zeigt sich also wie erwartet, dass der Deckenrost in Modell 2 als Strahlungsschirm wirkt, wodurch der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Dachplatte und der Eisfläche vermindert wird und folglich der Dachplatte weniger Wärme durch Konvektion zugeführt werden muss, um den Mittelwert $\Theta_{D,i}$ der Messung 2010 zu erreichen.

4.2.2.3 Modell 3 - langwelliger Strahlungsaustausch mit vereinfachtem Deckenrost

In Kapitel 4.2.1 (S.60) wurde allgemein die Vereinfachung getroffen, in den Modellen der Eissporthalle den Dach- und Hallenraum als ein Modellraum (Zone) mit homogenem Modellklima zusammenzufassen. Folglich wird auch bei der instationären thermischen Simulation der Eissporthalle in Kapitel 5 nur eine thermische Zone modelliert.

Im folgenden Modell 3 (Abb. 4-12) wird - im Unterschied zu Modell 2 mit den beiden Deckenrosttemperaturen $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$, vgl. Abb. 4-11 (S.69) - dem Deckenrost nur eine Temperatur (Θ_R) zugewiesen, das restliche Modell bleibt unverändert. Der Einfluss dieser Änderung hinsichtlich $\Theta_{D,i}$ soll untersucht werden.

Werden in den Wärmeströmungsgleichungen des Modells 2 die Temperaturen $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$ durch Θ_R ersetzt, resultieren die Gl. 4-18 bis Gl. 4-25 des Modells 3. Die Bilanzgleichungen der Wärmeströme (Gl. 4-18 und Gl. 4-19) des Modells 3 stellen ein nichtlineares Gleichungssystem dar, das zur Bestimmung von $\Theta_{D,i}$ numerisch gelöst wird (EES [39]).

4 Entwicklung eines physikalischen Modells

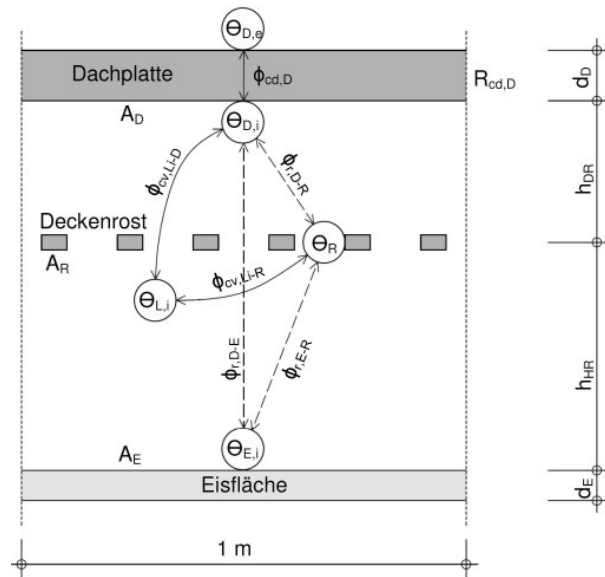


Abb. 4-12: Modell 3 – langwelliger Strahlungsaustausch mit vereinfachtem Deckenrost

$$\text{Knoten } \Theta_{D,i}: \Phi_{cd,D} - \Phi_{cv,Li-D} - \Phi_{r,D-E} + \Phi_{r,D-R} = 0 \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-18}$$

$$\text{Knoten } \Theta_R: \Phi_{cv,Li-R} - \Phi_{r,D-R} - \Phi_{r,E-R} = 0 \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-19}$$

Die Gleichungen für $\Phi_{cd,D}$ (Gl. 4-6), $\Phi_{cv,Li-D}$ (Gl. 4-7) und $\Phi_{r,D-E}$ (Gl. 4-15) wurden bereits angegeben. Gl. 4-20 beschreibt den konvektiven Wärmestrom zwischen $\Theta_{L,i}$ und Θ_R :

$$\Phi_{cv,Li-R} = h_{cv,R} \cdot (\theta_{L,i} - \theta_R) \cdot (2 \cdot A_R) \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-20}$$

Gl. 4-21 und Gl. 4-22 beschreiben die Wärmeströme infolge Wärmestrahlung.

$$\Phi_{r,D-R} = A_D \cdot F_{DR} \cdot \varepsilon_D \cdot \varepsilon_R \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_R}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{D,i}}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,378 \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-21}$$

$$\Phi_{r,E-R} = A_E \cdot F_{ER} \cdot \varepsilon_E \cdot \varepsilon_R \cdot C_s \cdot \left[\left(\frac{T_R}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{E,i}}{100} \right)^4 \right] \cdot 0,378 \text{ [W]} \quad \text{Gl. 4-22}$$

A_D	[m ²]	Dachplattenfläche
A_E	[m ²]	Eisfläche
A_R	[m ²]	Deckenrostfläche
F_{DR}	[-]	Einstrahlzahl der Dachplatte auf den Deckenrost
F_{ER}	[-]	Einstrahlzahl der Eisfläche auf den Deckenrost
ε_E	[-]	Emissionsgrad Eis (0,92 laut Tab. 2-3, S.15)
ε_D	[-]	Emissionsgrad Decke (0,9 für Holz laut Tab. 2-3, S.15)
ε_R	[-]	Emissionsgrad Deckenrost (0,9 für Holz laut Tab. 2-3, S.15)
C_s	[W/(m ² K ⁴)]	Strahlungskoeffizient schwarzer Strahler (5,67 laut S.13)
$h_{cv,R}$	[W/(m ² K)]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient des Deckenrosts ($h_{cv,R} = h_{cv,D,i}$)
Θ_R	[°C]	Temperatur des Deckenrosts
$T_{E,i}$	[K]	$\Theta_{E,i} + 273,16$
$T_{D,i}$	[K]	$\Theta_{D,i} + 273,16$
T_R	[K]	$\Theta_R + 273,16$

In Tab. 4-12 sind die berechneten Werte für $\Theta_{D,i}$ und Θ_R bzw. $\Theta_{R,o}$ und $\Theta_{R,u}$ aus Modell 2 und Modell 3 zusammengefasst, wobei als Randbedingungen wieder die Mittelwerte von $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,e}$ der Messung 2010 (vgl. Tab. 3-5, S.45) herangezogen werden.

Tab. 4-12: Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$, $\Theta_{R,o}$, $\Theta_{R,u}$, Θ_R (Modell 2 und Modell 3)

Modell	$h_{cv,D,i}; h_{cv,R}$ [W/(m²K)]	Geometrie- ansatz	F_{DE} [-]	F_{DR} [-]	F_{ER} [-]	A_E [m²]	A_D [m²]	A_R [m²]	$\Theta_{E,i}$ [°C]	Rechnung				MW Messung 2010		
										$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{R,o}$ [°C]	$\Theta_{R,u}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
2	11,1	5	0,2291	0,7435	0,2833	1	1	0,378	-5	1,37	1,58	1,28	-	1,76	1,37	0,36
3										1,36	-	-	1,44			

Anhand Tab. 4-12 ist ersichtlich, dass mit Modell 2 gegenüber Modell 3 eine um 0,01 K höhere Temperatur für $\Theta_{D,i}$ berechnet wird. Die Modellierung zweier Deckenrosttemperaturen erscheint folglich nicht zweckmäßig.

4.2.3 Modell 4

Der Einfluss des langwelligen Strahlungsaustausches auf $\Theta_{D,i}$ wurde mit den Modellen 1 bis 3 untersucht, wobei $\Theta_{D,e}$, $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{E,i}$ die Randbedingungen vorgeben. Mit dem in Abb. 4-13 dargestellten Modell 4, das eine Erweiterung des Modells 3 ist, wird neben $\Theta_{D,i}$ und Θ_R auch $\Theta_{E,i}$ und $\Theta_{L,i}$ berechnet; als Randbedingungen dienen $\Theta_{D,e}$, $\Theta_{L,e}$ und $\Theta_{E,e}$. In diesem Kapitel werden die folgenden physikalischen Zusammenhänge in Modell 4 untersucht:

- Der Einfluss des konvektiven Wärmeübergangs der Eisfläche ($h_{cv,E}$) auf $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$
- Der Einfluss des natürlichen Luftwechsels (Luftwechselzahl n) auf $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$
- Der Einfluss des konvektiven Wärmeübergangs der Dachplatte ($h_{cv,D,i}$) auf $\Theta_{L,i}$

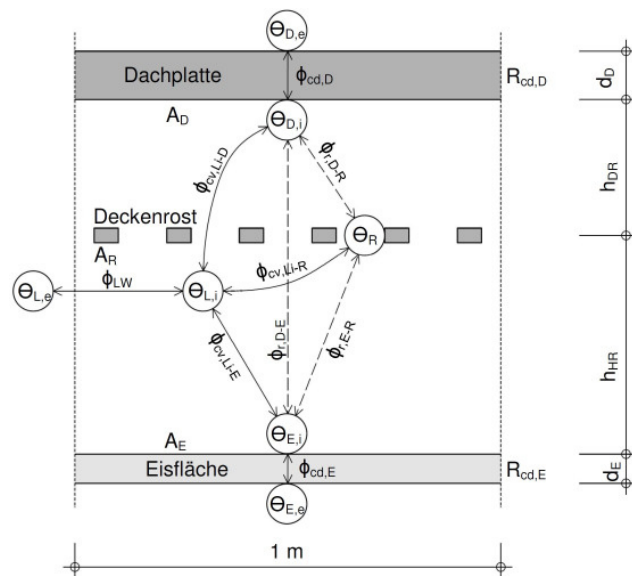


Abb. 4-13: Symbolische Darstellung Modell 4

Modell 4 wird gegenüber Modell 3 um die Wärmeströme $\Phi_{cv,Li-E}$, Φ_{LW} und $\Phi_{cd,E}$ ergänzt (vgl. Tab. 4-7, S.62). Entsprechend der Vorgehensweise bei den Modellen 2 und 3 werden für Modell 4 die Bilanzgleichungen der Wärmeströme formuliert (Gl. 4-23 bis Gl. 4-26).

$$\text{Knoten } \Theta_{D,i}: \Phi_{cd,D} - \Phi_{cv,Li-D} - \Phi_{r,D-E} + \Phi_{r,D-R} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-23}$$

$$\text{Knoten } \Theta_{L,i}: \Phi_{cv,Li-D} - \Phi_{cv,Li-E} + \Phi_{LW} - \Phi_{cv,Li-R} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-24}$$

$$\text{Knoten } \Theta_R: \Phi_{cv,Li-R} - \Phi_{r,D-R} - \Phi_{r,E-R} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-25}$$

$$\text{Knoten } \Theta_{E,i}: \Phi_{cv,Li-E} + \Phi_{r,D-E} + \Phi_{r,E-R} - \Phi_{cd,E} = 0 [W] \quad \text{Gl. 4-26}$$

Die Gleichungen für $\Phi_{cd,D}$ (Gl. 4-6), $\Phi_{cv,Li-D}$ (Gl. 4-7), $\Phi_{r,D-E}$ (Gl. 4-15), $\Phi_{r,D-R}$ (Gl. 4-21) und $\Phi_{r,E-R}$ (Gl. 4-22) sind bereits bekannt. Mit Gl. 4-27 und Gl. 4-28 werden die konvektiven Wärmeströme zwischen Hallenluft und Eisfläche ($\Phi_{cv,Li-E}$) und dem natürlichen Luftwechsel (Φ_{LW}) beschrieben.

$$\Phi_{cv,Li-E} = h_{cv,E} \cdot (\Theta_{L,i} - \Theta_{E,i}) \cdot A_E [W] \quad \text{Gl. 4-27}$$

$$\Phi_{LW} = n \cdot c_L \cdot \rho_L \cdot A_H \cdot (h_{HR} + h_{DR}) \cdot (\Theta_{L,e} - \Theta_{L,i}) [W] \quad \text{Gl. 4-28}$$

Gl. 4-29 beschreibt die Wärmeleitung in der Eisfläche.

$$\Phi_{cd,E} = R_{cd,E} \cdot (\Theta_{E,i} - \Theta_{E,e}) \cdot A_E [W] \quad \text{Gl. 4-29}$$

n	[1/h]	Luftwechselzahl
c _L	[Wh/(kgK)]	spezifische Wärmekapazität Luft (0,28 laut Tab. 2-3, S.15)
ρ _L	[kg/m ³]	Rohdichte Luft (1,23 laut Tab. 2-3, S.15)
A _H	[m ²]	Hallengrundrissfläche
A _E	[m ²]	Eisfläche
h _{HR}	[m]	Höhe Hallenraum (4,86)
h _{DR}	[m]	Höhe Dachraum (1,01)
d _E	[m]	Eisdicke (0,06)
λ _{Eis}	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit Eis (2,3 laut Tab. 2-3, S.15)
R _{cd,E}	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand Eisfläche; R _{cd,E} = d _E / λ _{Eis}
h _{cv,E}	[W/(m ² K)]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Eisfläche

In den folgenden Betrachtungen wird das nichtlineare Gleichungssystem (Gl. 4-23 bis Gl. 4-26) des Modells 4 zur Bestimmung von $\Theta_{D,i}$, $\Theta_{R,i}$, $\Theta_{E,i}$ und $\Theta_{L,i}$ numerisch gelöst (EES [37]). Es werden n, h_{cv,E} und h_{cv,D,i} variiert um die Abhängigkeiten von $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ zu evaluieren, während die in Tab. 4-13 zusammengefassten Randbedingungen Konstanten darstellen.

Tab. 4-13: Randbedingungen für die Rechenwerte in Tab. 4-14 bis Tab. 4-17

Geometrie- ansatz	F _{DE} [-]	F _{DR} [-]	F _{ER} [-]	A _E [m ²]	A _D [m ²]	A _R [m ²]	Θ _{E,e} [°C]	Mittelwerte Messung 2010	
								Θ _{L,e} [°C]	Θ _{D,e} [°C]
5	0,2291	0,7435	0,2833	1	1	0,378	-5	2,28	0,36

Einfluss von h_{cv,E} auf Θ_{L,i} und Θ_{D,i}

Um den Einfluss von h_{cv,E} auf $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ in Modell 4 festzustellen, werden n und h_{cv,D,i} konstant gehalten. Für die Berechnung der in Tab. 4-14 dargestellten Rechenwerte werden n und h_{cv,D,i} im mittleren Bereich zwischen den in Tab. 4-4 (S.57) und Tab. 4-5 (S.60) angege-

benen Grenzwerten gewählt. Die Werte für $h_{cv,E}$ werden zwischen den Grenzwerten laut Tab. 4-5 variiert.

Tab. 4-14: Einfluss von $h_{cv,E}$ auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$

n [1/h]	$h_{cv,E}$ [W/(m ² K)]	$h_{cv,D,i}$; $h_{cv,R}$ [W/(m ² K)]	Rechnung				Mittelwerte Messung 2010			
			$\Theta_{E,i}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,e}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
12	2	10	-4,54	1,21	1,52	1,13	1,76	1,37	2,28	0,36
12	4	10	-4,30	0,88	1,16	0,83				
12	6	10	-4,11	0,61	0,86	0,58				
12	8	10	-3,94	0,38	0,61	0,38				

Entsprechend Tab. 4-15 zeigt sich, dass mit ansteigendem $h_{cv,E}$ die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ immer weiter unter den Mittelwert der Messung 2010 für $\Theta_{L,i}$ fallen. Mit den Annahmen für $h_{cv,E}$ von 4 bis 8 kann der Mittelwert der Messung für $\Theta_{D,i}$ nicht abgebildet werden, da bereits die Rechenwerte $\Theta_{L,i}$ unter dem Mittelwert der Messung für $\Theta_{D,i}$ liegen und folglich der Dachplatte nicht ausreichend Wärme durch Konvektion für den Temperaturhub auf den Messwert in diesem Modell zugeführt werden kann. Aus diesem Grund wird in der nächsten Betrachtung $h_{cv,E}$ klein gewählt und n schrittweise erhöht.

Einfluss von n auf $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$

Durch Variation von n bei konstantem $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$ ergibt sich Tab. 4-15 wie folgt.

Tab. 4-15: Einfluss von n auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$

n [1/h]	$h_{cv,E}$ [W/(m ² K)]	$h_{cv,D,i}$; $h_{cv,R}$ [W/(m ² K)]	Rechnung				Mittelwerte Messung 2010			
			$\Theta_{E,i}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,e}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
14	2	10	-4,54	1,30	1,62	1,22	1,76	1,37	2,28	0,36
16	2	10	-4,53	1,37	1,69	1,28				
18	2	10	-4,53	1,42	1,75	1,33				
20	2	10	-4,52	1,47	1,80	1,37				

Mit größer werdendem n entsprechend Tab. 4-15 steigen die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ an, da der Dachplatte bei höherem Luftwechsel mehr Wärme zugeführt werden kann. Bei einer Luftwechselzahl von 18 bzw. 20 erreichen die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ annähernd die Mittelwerte der Messung 2010 für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$.

Einfluss von $h_{cv,D,i}$ auf $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$

Um festzustellen, in wieweit sich die Größe von $h_{cv,D,i}$ auf die Rechenwerte $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ auswirkt, werden in den Berechnungen für Tab. 4-16 n und $h_{cv,E}$ konstant gehalten, während $h_{cv,D,i}$ solange erhöht wird, bis sich der Rechenwert von $\Theta_{L,i}$ ändert.

Tab. 4-16: Einfluss von $h_{cv,D,i}$ auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$

n [1/h]	$h_{cv,E}$ [W/(m ² K)]	$h_{cv,D,i}$; $h_{cv,R}$ [W/(m ² K)]	Rechnung				Mittelwerte Messung 2010			
			$\Theta_{E,i}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,e}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
18	2	8	-4,53	1,35	1,76	1,26	1,76	1,37	2,28	0,36
18	2	9	-4,53	1,39	1,75	1,30				
18	2	14	-4,53	1,54	1,75	1,47				
18	2	15	-4,53	1,55	1,74	1,48				

Anhand Tab. 4-16 ist ersichtlich, dass $h_{cv,D,i}$ im Wertebereich von 9 bis 14 die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ nicht beeinflusst, während erwartungsgemäß die Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ stärker von $h_{cv,D,i}$ abhängig sind.

Zusammenfassend ist für die angestellten Betrachtungen (Tab. 4-14 bis Tab. 4-16) festzustellen, dass die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ hauptsächlich von n und $h_{cv,E}$ abhängen und in weiterer Folge die Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ von $h_{cv,D,i}$ und den Rechenwerten für $\Theta_{L,i}$ abhängen. Die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ stimmen mit dem Mittelwert der Messung 2010 für $\Theta_{L,i}$ annähernd überein, wenn $h_{cv,E}$ mit $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und n mit 18 h^{-1} gewählt wird, wobei $h_{cv,E}$ und n in dem laut Tab. 4-5 (S.60) und Tab. 4-4 (S.57) angegebenen Bereich liegen. Der Wert für $h_{cv,E}$ von $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ist im Vergleich zum Wärmeübergangskoeffizienten nach ÖNORM EN ISO 6946 [21] laut Abb. 4-4 (erzwungene Konvektion, S.59) gering. Aus diesem Grund wird in Tab. 4-17 eine abschließende Betrachtung angestellt, wobei $h_{cv,E}$ von 2 bis $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erhöht wird und n bzw. $h_{cv,D,i}$ variiert werden, bis die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ mit den Mittelwerten der Messung übereinstimmen. Dazu muss mit größer werdendem $h_{cv,E}$ auch n erhöht werden. Die resultierende Luftwechselzahlen von 24 und 29 h^{-1} bei einem $h_{cv,E}$ von 3 und $4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ liegen außerhalb des in Tab. 4-4 (S.57) angegebenen Bereichs.

Tab. 4-17: Kombinationen von n und $h_{cv,E}$, damit die Rechenwerte die Mittelwerte der Messwerte abbilden

n [1/h]	$h_{cv,E}$ [W/(m ² K)]	$h_{cv,D,i} ; h_{cv,R}$ [W/(m ² K)]	Rechnung				Mittelwerte Messung 2010			
			$\Theta_{E,i}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]	$\Theta_{L,e}$ [°C]	$\Theta_{D,e}$ [°C]
18,6	2	10,5	-4,53	1,45	1,76	1,37				
24,0	3	10,5	-4,38	1,46	1,76	1,37	1,76	1,37	2,28	0,36
29,0	4	10,5	-4,24	1,46	1,76	1,37				

Die Werte für n , $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$ in Tab. 4-17 stellen in Kapitel 5.3 die Basis bei der Parametervariation dar.

5 THERMISCHE SIMULATION DER EISSPORTHALLE

Zur thermischen Simulation der Eissporthalle Bergheim wird aus dem Programmpaket TRNSYS das Modul Type56 [38], das sogenannte Mehrzonenmodell, verwendet. In Kapitel 5.1 wird Type56 kurz beschrieben; von der Eingabe des Simulationsmodells in Type56 handelt Kapitel 5.2. Die Validierung des Simulationsmodells erfolgt in Kapitel 5.3, anschließend werden Variationen des Dachaufbaus mit dem validierten Simulationsmodell untersucht.

5.1 Kurzbeschreibung von Type56

Im Folgenden wird Type56 kurz beschrieben; eine ausführlichere Beschreibung des Aufbaus und des Berechnungsalgorithmus ist im zugehörigen Handbuch [38] zu finden.

Mit Type56 (Mehrzonenmodell) kann ein Gebäude, das in der Regel aus einzelnen Zonen (Räumen) besteht, abgebildet werden. Innerhalb des Mehrzonenmodells stellt eine Zone eine Bilanzgrenze für Wärmeströme dar, die sich zwischen den Knoten des sogenannten Stern-Netzwerks (vgl. Abb. 5-2) einer Zone einstellen. Für jede Zone kann nur eine Lufttemperatur definiert werden. Zwischen zwei Zonen sowie einer Zone und der Außenluft kann ein Luftwechsel simuliert werden.

Eine Zone ist kein exaktes geometrisches Modell eines Raums. So werden beispielsweise die Wände eines Raums nur hinsichtlich ihrer Flächengröße, ihres Volumens und ihrer thermischen Eigenschaften repräsentiert, die Lage und Orientierung der Wände zueinander wird nicht abgebildet.

In Type56 stehen vier unterschiedliche Wandkategorien zur Verfügung, von denen im Folgenden zwei verwendet werden: „boundary wall“ und „internal wall“. Bei einer „boundary wall“ wird vom Benutzer die Oberflächentemperatur an der Außenseite der Zonenwand vorgegeben, während die Oberflächentemperatur an der Innenseite berechnet wird. Eine „internal wall“ befindet sich gänzlich innerhalb einer Zone und besitzt definitionsgemäß nur eine Wandtemperatur. Sowohl der „boundary wall“ als auch der „internal wall“ kann der zonenzugewandten Wandseite eine Wärmequelle oder Wärmesenke („wall gain“) aufgeprägt werden. Für die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Wände können fixe Werte eingegeben werden, oder diese durch einen programminternen bzw. selbst gewählten Algorithmus berechnet werden. Zur Bestimmung der Wandtemperaturen wird in TRNSYS [39, S.6-120] die Transferfunktionenmethode verwendet.

5.2 Simulationsmodell

Die Vorgehensweise bei der Eingabe des Simulationsmodells, das auf Modell 4 basiert (Abb. 4-13, S.73), wird folgend beschrieben. Dabei wird im Besonderen auf die Modellierung des langwelligen Strahlungsaustauschs eingegangen.

Die Dachplatte und die Eisfläche des Modells (Abb. 4-13, S.73) werden als „boundary wall“ modelliert. Dabei sind $\Theta_{D,e}$ und $\Theta_{E,e}$ die vorgegebenen Wandaußentemperaturen und $\Theta_{D,i}$ und $\Theta_{E,i}$ die berechneten Wandinnentemperaturen. Der Deckenrost wird als „internal wall“ modelliert.

Einstrahlzahlen-Netzwerk und Stern-Netzwerk

Das in Type56 verwendete Stern-Netzwerk zur Modellierung der Wärmeströme innerhalb der Zone wird in der Arbeit von Seem [39, S.41ff] beschrieben und stellt eine Transformation des Einstrahlzahlen-Netzwerks dar. In Abb. 5-1 sind das Einstrahlzahlen-Netzwerk und das Stern-Netzwerk für die Dachplatte und die Eisfläche der Eissporthalle dargestellt, wobei im Folgenden nur Konvektion und Wärmestrahlung zwischen den Knoten betrachtet wird.

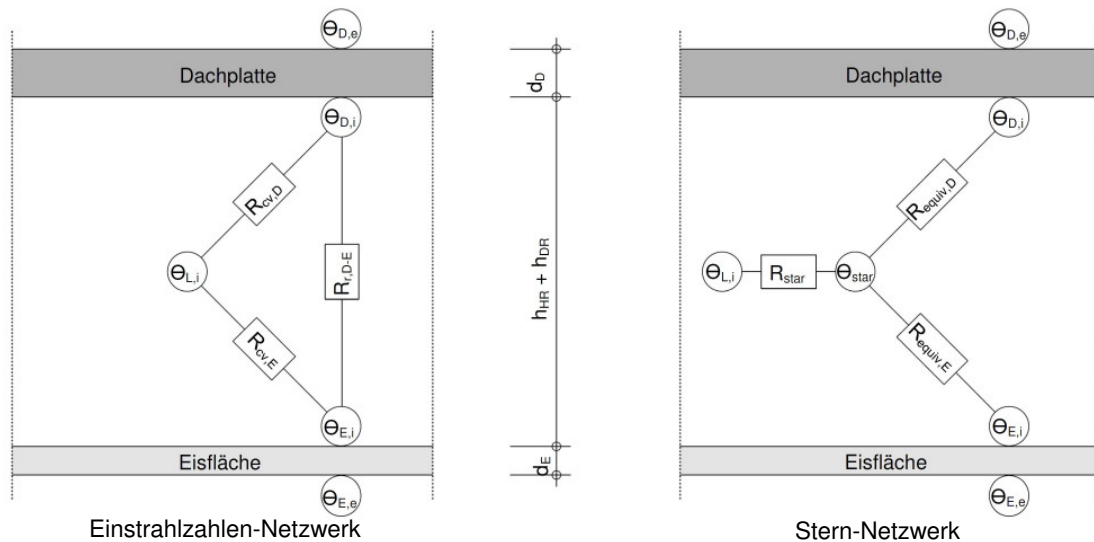


Abb. 5-1: Einstrahlzahlen-Netzwerk und Stern-Netzwerk einer Zone im Handbuch zu TRNSYS [38, S.6-123], Seem [39, S.43], Meyer [40, S.188]

R Widerstände (werden im Text beschrieben)

Θ_{star} „artificial temperature node“ laut dem Handbuch zu TRNSYS [38, S.6-122]

Damit das Einstrahlzahlen-Netzwerk (Abb. 5-1 links) in das Stern-Netzwerk (Abb. 5-1 rechts) transformiert werden kann, müssen die konvektiven Widerstände $R_{cv,D}$ und $R_{cv,E}$ bekannt sein. Der Widerstand $R_{r,D-E}$, der den langwelligigen Strahlungsaustausch zwischen der Dachplatte und der Eisfläche im Einstrahlzahlen-Netzwerk abbildet, wird laut Seem [39, S.42] mit Gl. 5-1 berechnet.

$$R_{i-j,rad} = \frac{1}{\varepsilon_i \cdot A_i \cdot G_{i-j} \cdot \sigma \cdot 4 \cdot \bar{T}^3} \quad \text{Gl. 5-1}$$

ε_i Emissionsgrad der Oberfläche i

A_i Fläche

G_{i-j} Absorptionsfaktor der Oberflächen i und j

σ Stefan-Boltzmann-Konstante

\bar{T} mittlere Temperatur der Oberflächen im Raum

Im Handbuch zu TRNSYS [38] wird nicht angegeben, wie $R_{i-j,rad}$ programmintern berechnet wird, obwohl die mittlere Temperatur der Raumbooberflächen \bar{T} eingegeben werden kann (Defaultwert: 293,15 K). In der Arbeit von Meyer [40, S.187] ist der Hinweis zu finden, dass in TRNSYS der Absorptionsfaktor G_{i-j} (Gl. 5-1) flächengewichtet bezüglich der Oberflächen berechnet wird. Der Widerstand $R_{i-j,rad}$, der in weiterer Folge den Strahlungswärmestrom zwi-

schen der Dachplatte und der Eisfläche im Einstrahlzahlen-Netzwerk (Abb. 5-1 links, $R_{r,D-E}$) beschreibt, wird also programmintern nicht auf Basis von Einstrahlzahlen berechnet. Nach der Transformation des Einstrahlzahlen-Netzwerks (Abb. 5-1 links) in das Stern-Netzwerk (Abb. 5-1 rechts), können die Widerstände R_{star} , $R_{equiv,D}$ und $R_{equiv,E}$ des Stern-Netzwerks mit Gl. 5-2 bis Gl. 5-4 laut Seem [39, S.51] berechnet werden.

$$R_{star} = \frac{R_{cv,D} \cdot R_{cv,E}}{R_{cv,D} + R_{cv,E} + R_{r,D-E}} \quad \text{Gl. 5-2}$$

$$R_{equiv,D} = \frac{R_{cv,D} \cdot R_{r,D-E}}{R_{cv,D} + R_{cv,E} + R_{r,D-E}} \quad \text{Gl. 5-3}$$

$$R_{equiv,E} = \frac{R_{cv,E} \cdot R_{r,D-E}}{R_{cv,D} + R_{cv,E} + R_{r,D-E}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Umgehung der programminternen Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs

Wird nun unter Vorgabe von $\Theta_{D,e}$, $\Theta_{L,e}$ und $\Theta_{E,e}$ das Simulationsmodell (Abb. 4-13, S.73) in TRNSYS unter stationären Randbedingungen evaluiert, ergeben sich für $\Theta_{E,i}$, Θ_R , $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ die in Tab. 5-1 gezeigten Unterschiede zu den Ergebnissen aus der Berechnung mit EES (vgl. Modell 4 Kapitel 4.2.3, S.73). Grund dafür ist, wie oben erwähnt, dass der langwellige Strahlungsaustausch zwischen der Dachplatte, dem Deckenrost und der Eisfläche in TRNSYS über den flächengewichteten Absorptionskoeffizienten $G_{i,j}$ (Gl. 5-1) erfolgt, während in Modell 4 Einstrahlzahlen verwendet werden.

Tab. 5-1: Berechnungsergebnisse aus TRNSYS und EES (Modell 4)

Berechnung	\bar{T}^* [K]	$\Theta_{D,e}$ [°C]	$\Theta_{L,e}$ [°C]	n [1/h]	$h_{cv,F}$ [W/(m²K)]	$h_{cv,D,i} ; h_{cv,R}$ [W/(m²K)]	Berechnungsergebnis			
							$\Theta_{E,i}$ [°C]	Θ_R [°C]	$\Theta_{L,i}$ [°C]	$\Theta_{D,i}$ [°C]
TRNSYS	279,79	20,00	17,00	10	2	8	-2,61	10,94	12,97	11,57
EES	-						-3,59	13,56	14,66	14,15
TRNSYS	271,88	0,36	2,28				-4,26	0,21	0,88	0,22
EES	-						-4,55	1,02	1,40	0,95

*mittlere Oberflächentemperatur

Um die programminterne Berechnung des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen der Eisfläche und der Dachplatte in den beiden in Abb. 5-1 gezeigten Netzwerken zu umgehen, muss der Widerstand $R_{r,D-E}$ im Einstrahlzahlen-Netzwerk (Abb. 5-1 links) unendlich groß werden. Dies gelingt, indem die mittlere Oberflächentemperatur \bar{T} in Gl. 5-1 Null gesetzt wird. Demnach findet auch im Stern-Netzwerk (Abb. 5-1 rechts) kein langwelliger Strahlungsaustausch statt, da das Stern-Netzwerk eine Transformation des Einstrahlzahlen-Netzwerks ist. Wird in den Gleichungen Gl. 5-2 bis Gl. 5-4 $R_{r,D-E}$ als unendlich großer Widerstand angenommen, werden folgende Zusammenhänge ersichtlich:

- R_{star} wird Null, und folglich gilt $\Theta_{star} = \Theta_{L,i}$
- der Widerstand $R_{equiv,D}$ des Stern-Netzwerks ist gleich dem Widerstand $R_{cv,D}$ des Einstrahlzahlen-Netzwerks, analog dazu $R_{equiv,E} = R_{cv,E}$

Für die praktische Simulation ist die Eingabe $\bar{T} = 0 \text{ K}$ problematisch, da dies zur Instabilität von TRNSYS führt. Mittels einer Konvergenzstudie zeigt sich schnell, dass im Rahmen des Temperaturbereichs, der in dieser Arbeit behandelt wird, bereits $\bar{T} = 1,0 \text{ K}$ ausreicht, um die programminterne Berechnung des langwelligigen Strahlungsaustauschs zu umgehen, ohne die Stabilität der Simulation zu beeinflussen.

Eingabe des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell in Abb. 5-2 besteht analog zu Modell 4 aus einer Zone, wobei die Volumen und Flächen der Modellkomponenten (Dachplatte, Deckenrost und Eisfläche) im Anhang (S.106) angeführt sind.

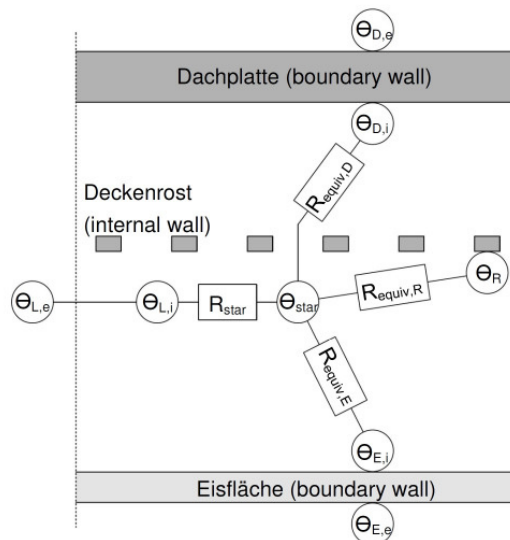


Abb. 5-2: Simulationsmodell der Eissporthalle mit dem Stern-Netzwerk im Type56 nach TRNSYS [40, S.6-123], Seem [41, S.43]

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, wurde die mittlere Oberflächentemperatur im Raum \bar{T} 1,0 K gesetzt, um die programminterne Berechnung des langwelligigen Strahlungsaustauschs zwischen der Dachplatte, dem Deckenrost und der Eisfläche zu umgehen. Dann ist es allerdings erforderlich, die auftretenden Wärmeströme infolge des langwelligigen Strahlungsaustauschs zwischen den Innenwandflächen analog Modell 4 zu berechnen und als „wall gain“ (WG_i) in den Knoten $\Theta_{D,i}$, Θ_R und $\Theta_{E,i}$ des Simulationsmodells anzusetzen.

$WG_{D,i}$ [W] ...Summe von $\Phi_{r,D-E}$ (Gl. 4-15) und $\Phi_{r,D-R}$ (Gl. 4-21)

WG_R [W] ...Summe von $\Phi_{r,D-R}$ (Gl. 4-21) und $\Phi_{r,E-R}$ (Gl. 4-22)

$WG_{E,i}$ [W] ...Summe von $\Phi_{r,D-E}$ (Gl. 4-15) und $\Phi_{r,E-R}$ (Gl. 4-22)

Wird das Simulationsmodell auf diese Weise in Type56 eingegeben, ist unter stationären Bedingungen der Unterschied zwischen den simulierten Temperaturen $\Theta_{E,i}$, Θ_R , $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ und den mit Modell 4 berechneten Temperaturen (EES) vernachlässigbar (Übereinstimmung auf drei Nachkommastellen). Bei den folgenden Simulationen wird dementsprechend vorgegangen.

5.3 Validierung des Simulationsmodells

Im Rahmen der Validierung des Simulationsmodells (Abb. 5-2, S.80) wird eine Parameterstudie durchgeführt. Für die Validierung wird die Messung 2010 während der Winternutzung (21.02 – 15.03.2010) verwendet.

Wie bereits in Kapitel 4.1.1 (S.52) erläutert, sind die Strömungsgeschwindigkeiten der Luft im Halleninneren nicht bekannt, weshalb für die Simulation konstante Parameter (Luftwechsellzahl n und Wärmeübergangskoeffizienten $h_{cv,E}$, $h_{cv,D,i}$) angesetzt werden. Um zu beurteilen, unter welcher Parametervariation das Simulationsmodell (Abb. 5-2 S.80) die Messung 2010 bestmöglich abbildet, werden folgende Bewertungskriterien verwendet:

- Die Kondensationsdauer an der Innenseite der Dachplatte.
- Der Vergleich zwischen den Mittelwerten für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ aus Simulation und Messung.
- Die Größe des mittleren Quadrat-Wurzel-Fehlers (WMQF, siehe Anhang S.92) zwischen den simulierten und den gemessenen Werten für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$.
- Der maximale Fehler (Δ_{max}) zwischen den simulierten und den gemessenen Werten für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$.

Als Basis für die Parametervariation werden die in Tab. 4-17 (S.76) gegebenen Werte für n , $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$ verwendet. Es werden n und $h_{cv,D,i}$ bzw. $h_{cv,R}$ für $h_{cv,E}$ von 2 bis 4 $W/(m^2K)$ so lange variiert, bis die Mittelwerte der simulierten und der gemessenen Werte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ übereinstimmen. Als Randbedingungen werden die Messwerte von $\Theta_{L,e}$ und $\Theta_{D,e}$ verwendet, sowie $\Theta_{E,e}$ von -5 °C. Der Simulationszeitschritt beträgt 10 Minuten. In Tab. 5-2 sind die Simulationsergebnisse der Parametervariation zusammengefasst.

Tab. 5-2: Simulationsergebnisse der Parametervariation

Parameter			Ergebnisse Simulation							Messung 2010		
$h_{cv,E}$ [W/(m²K)]	n [1/h]	$h_{cv,D,i}$ $h_{cv,R}$ [W/(m²K)]	MW $\Theta_{L,i}$ [°C]	WMQF $\Theta_{L,i}$ [°C]	Δ_{max} $\Theta_{L,i}$ [°C]	MW $\Theta_{D,i}$ [°C]	WMQF $\Theta_{D,i}$ [°C]	Δ_{max} $\Theta_{D,i}$ [°C]	Kondensationsdauer [min]	MW $\Theta_{L,i}$ [°C]	MW $\Theta_{D,i}$ [°C]	Kondensationsdauer [min]
2,0	17,0	11,0	1,72	0,42	1,60	1,33	0,70	2,50	410	1,76	1,37	310
	18,0	11,0	1,75	0,43	1,60	1,35	0,70	2,50	410			
	18,5	11,0	1,76	0,43	1,60	1,37	0,70	2,50	380			
3,0	22,0	11,0	1,72	0,46	1,70	1,34	0,72	2,60	410			
	23,0	11,0	1,74	0,46	1,70	1,35	0,72	2,60	390			
	24,0	11,0	1,76	0,47	1,70	1,37	0,72	2,60	360			
4,0	28,0	11,0	1,74	0,49	1,80	1,36	0,73	2,70	370			
	29,0	11,0	1,76	0,49	1,80	1,38	0,74	2,70	360			
	29,0	10,7	1,76	0,49	1,80	1,37	0,73	2,70	360			

Es zeigt sich, dass mit größer werdendem $h_{cv,E}$ auch n erhöht werden muss damit die Mittelwerte der simulierten Temperaturen ($\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$) mit den Mittelwerten der gemessenen Temperaturen übereinstimmen. WMQF und Δ_{max} für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ steigen mit größer werdendem $h_{cv,E}$ an. Die Kondensationsdauer der Simulation stimmt mit der Messung 2010 gut überein, wobei die Werte des WMQF für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$ größer sind als die Messunsicherheit ($\pm 0,4$ K). Für die Beurteilung des Simulationsmodells sind in Abb. 5-3 die simulierten und gemessenen Temperaturen ($\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$) bzw. relativen Feuchtigkeiten ($\varphi_{L,i}$ und $\varphi_{D,i}$) dargestellt, wobei die Parametervariation mit $h_{cv,E} = 3,0$, $n = 24$ und $h_{cv,D,i} = 11,0$ laut Tab. 5-2

verwendet wird. In weiterer Folge wird diese Parametervariation auch für die Simulation verschiedener Dachaufbauten in Kapitel 5.4 verwendet.

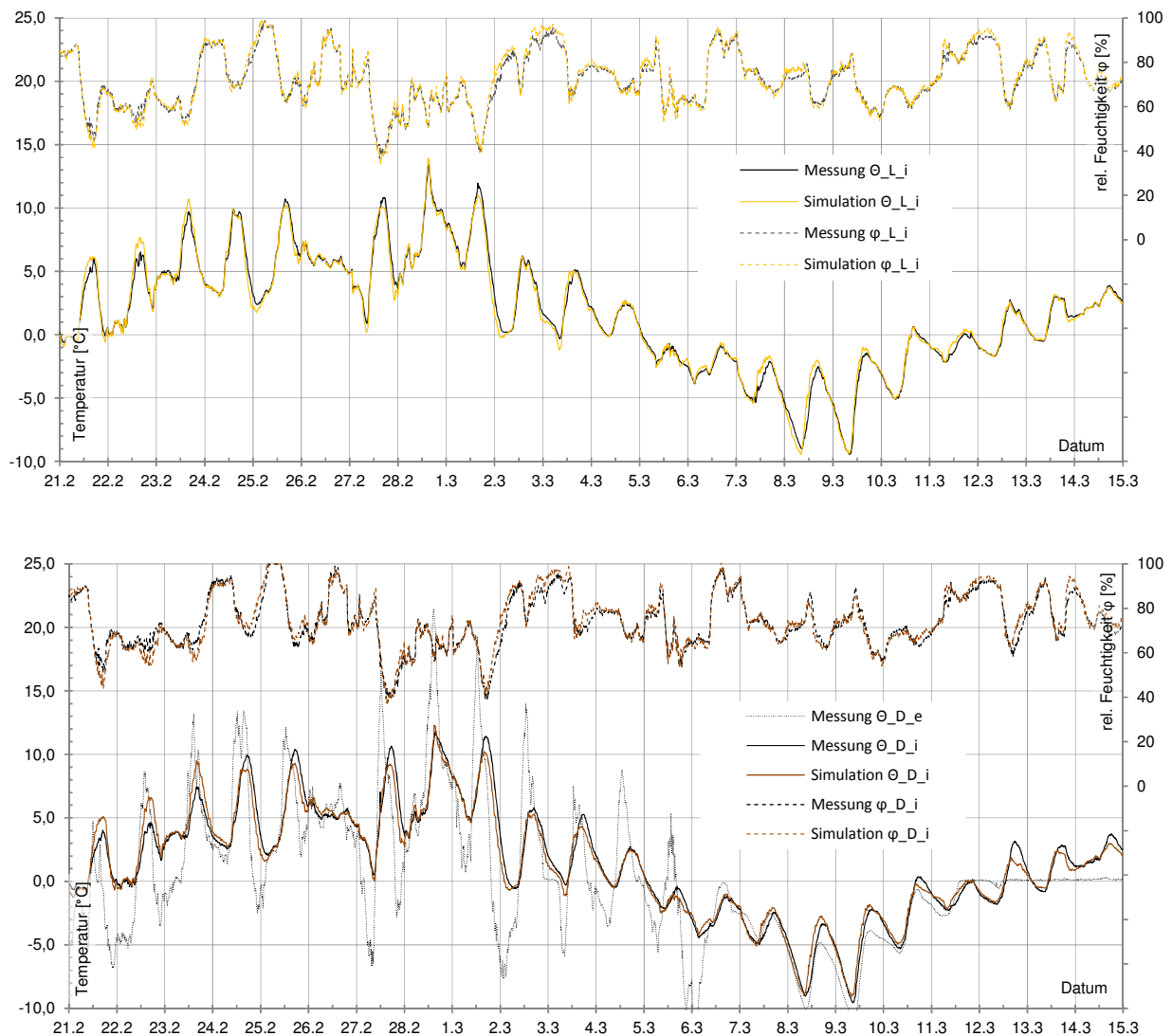


Abb. 5-3: Vergleich zwischen der Messung 2010 und der Simulation ($h_{cv,E} = 3,0$, $n = 24$, $h_{cv,D,i} = 11,0$)

Die Abweichungen für den Betrachtungszeitraum eines Tages scheinen nicht rein statistischer Natur zu sein, wobei die bereits in Kapitel 4.2.1 (S.60) diskutierten Modellvereinfachungen vermutlich teilweise zur Erklärung herangezogen werden können:

- Vernachlässigung des Oberlichteinflusses auf die Wärmebilanz
- keine Unterscheidung zwischen Dach- und Hallenraum hinsichtlich des Modellklimas

5.4 Variation des Dachaufbaus

Um den Einfluss des Dachaufbaus auf die Entstehung von Oberflächenkondensat an der der Eisfläche zugewandten Seite der Hallendecke zu untersuchen, werden mit dem Simulationsmodell der Eissporthalle (Abb. 5-2, S.80) verschiedene Dachaufbauten evaluiert. Dazu wird das in Kap. 5.2 beschriebene Simulationsmodell insofern verändert, als anstelle der gemessenen Daten für die Außenlufttemperatur die Werte des in TRNSYS verfügbaren Klimadatensatzes für den Standort Salzburg (AT-Salzburg-111500.tm2) verwendet werden,

und die Oberflächentemperatur der Dachfolie $\Theta_{D,e}$ im Modell berechnet wird. Die Simulation wird für den Zeitraum der Winternutzung (16.11. bis zum 15.03., 2865 Stunden) mit einem Zeitschritt von einer Stunde und den in Tab. 5-2 markierten Parametern ($h_{cv,E} = 3,0$, $n = 24$, $h_{cv,D,i} = 11,0$) durchgeführt.

Es werden die vier in Abb. 5-4 dargestellten Dachaufbauten (DA1 bis DA4) untersucht, wobei DA1 den gebauten Zustand der Eissporthalle Bergheim zeigt. In Anlehnung an das Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I (Kapitel 1.2, S.3) wird DA2 simuliert, der gegenüber DA1 eine geringere Wärmespeichermasse hat. Werden DA1 und DA2 um eine 5,0 cm dicke Wärmedämmung ergänzt, entstehen DA3 und DA4 (Eissporthallentyp II, S.2).

Weiters wird der solare Absorptionskoeffizient α_s der Dachfolie variiert. Im Handbuch zu TRNSYS [38, S.6-41] wird für Asbestbeton ein Wert von 0,65 für α_s vorgeschlagen. Um den Einfluss eines höheren α_s auf die Kondensationsdauer zu untersuchen, wird zusätzlich ein Wert von 0,85 bei der Simulation von DA1 bis DA4 gewählt.

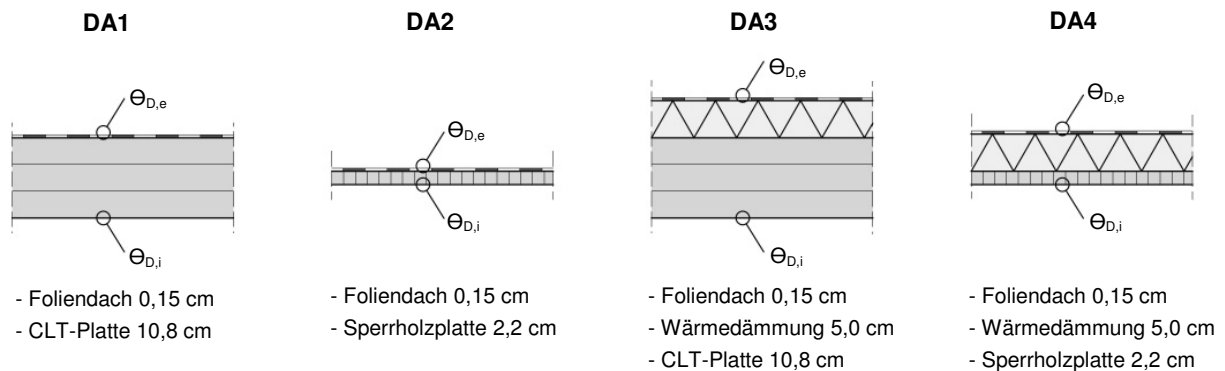


Abb. 5-4: Untersuchte Dachaufbauten

In Tab. 5-3 und Tab. 5-4 sind die Simulationsergebnisse für die oben genannten Randbedingungen zusammengefasst. Die grafische Darstellung der Simulationsergebnisse für DA1 bis DA4 und α_s von 0,65 befindet sich im Anhang (Abb. A- 14 bis Abb. A- 17, S.107ff).

Tab. 5-3: Simulationsergebnisse für DA1 bis DA4 mit $\alpha_s = 0,65$

min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen Stundenwerten

Bauteil-aufbau	MW $\Theta_{L,i}$ [°C]	min $\Theta_{L,i}$ [°C]	max $\Theta_{L,i}$ [°C]	MW $\Theta_{D,e}$ [°C]	min $\Theta_{D,e}$ [°C]	max $\Theta_{D,e}$ [°C]	MW $\Theta_{D,i}$ [°C]	min $\Theta_{D,i}$ [°C]	max $\Theta_{D,i}$ [°C]	Kondensationsdauer* [h]
DA1	0,07	-14,6	14,6	-0,59	-18,3	24,1	-0,18	-14,3	13,6	189
DA2	0,05	-14,9	15,2	-0,54	-18,0	23,8	-0,29	-15,6	16,8	337
DA3	0,08	-14,5	14,4	-0,61	-18,5	25,1	-0,15	-13,8	12,4	155
DA4	0,08	-14,6	14,7	-0,60	-18,6	25,3	-0,16	-14,4	14,0	168

* an der der Eisfläche zugewandten Seite der Hallendecke

Tab. 5-4: Simulationsergebnisse für DA1 bis DA4 mit $\alpha_s = 0,85$

min...Minimum, max...Maximum, MW...Mittelwert; jeweils ermittelt aus allen Stundenwerten

Bauteil-aufbau	MW $\Theta_{L,i}$ [°C]	min $\Theta_{L,i}$ [°C]	max $\Theta_{L,i}$ [°C]	MW $\Theta_{D,e}$ [°C]	min $\Theta_{D,e}$ [°C]	max $\Theta_{D,e}$ [°C]	MW $\Theta_{D,i}$ [°C]	min $\Theta_{D,i}$ [°C]	max $\Theta_{D,i}$ [°C]	Kondensationsdauer* [h]
DA1	0,08	-14,6	14,6	-0,13	-18,3	28,2	-0,13	-14,2	13,9	184
DA2	0,08	-14,9	15,5	-0,13	-18,0	27,6	-0,14	-15,6	18,2	326
DA3	0,08	-14,5	14,4	-0,14	-18,5	29,3	-0,13	-13,7	12,5	151
DA4	0,08	-14,6	14,8	-0,14	-18,6	29,5	-0,13	-14,4	14,3	165

* an der der Eisfläche zugewandten Seite der Hallendecke

Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse aus Tab. 5-3 und Tab. 5-4 zeigt sich, dass der Einfluss von α_s auf die Kondensationsdauer gering ist, weshalb folgend nur auf die Varianten mit $\alpha_s = 0,65$ eingegangen wird.

Für DA2 ergibt sich gegenüber DA1, DA3 und DA4 die größte Kondensationsdauer (337 h) – hier ist wenig Speichermasse und auch keine Dämmung vorhanden. Durch die Anordnung einer Wärmedämmung zwischen der CLT-Platte bzw. Sperrholzplatte und der Dachfolie (DA3 und DA4) verringert sich die Kondensationsdauer signifikant gegenüber den jeweiligen ungedämmten Aufbauten (DA1 und DA2). Es zeigt sich, ausgehend von DA2 mit 337 h, dass der Einsatz einer Wärmedämmung einen stärkeren Einfluss auf die Kondensationsdauer hat als eine Erhöhung der Wärmespeichermasse (vgl. DA4 mit 168 h und DA1 mit 189 h).

In Kapitel 2.4.2 (S.28) wurde hinsichtlich des Kondensationsschutzes bei offenen Eissporthallen festgestellt, dass durch eine entsprechende Planung des Konstruktionsaufbaues der Kondensatbildung an den Bauteiloberflächen entgegenzuwirken ist und in den Konstruktionsteilen eine Holzfeuchte von 20 % nicht überschritten werden soll. Da in der vorliegenden Arbeit nur die Oberflächenkondensation, nicht aber das Feuchte- und Diffusionsverhalten im Bauteilinneren behandelt wird, kann nicht beurteilt werden, ob DA4 für eine offene Eissporthalle geeignet ist, obwohl die Kondensationsdauer von DA4 (168 h) unter jener von DA1 (189 h) liegt.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der vorliegenden Arbeit wird das Ziel verfolgt, die offene Eissporthalle Bergheim hinsichtlich des Feuchteverhaltens (Oberflächenkondensation an der Innenseite der Dachplatte sowie Wärmespeicherverhalten der Dachplatte) zu untersuchen.

Dazu wurden die an der Eissporthalle durchgeführten Temperatur- und Luftfeuchtemessungen ausgewertet (s. Kapitel 3). Anhand der Messdaten zeigt sich, dass die Lufttemperatur im Dachraum meist unter der Außenlufttemperatur liegt, was durch den konvektiven Wärmeaustausch mit der Eisfläche bedingt ist. Diese Abkühlung führt dazu, dass die relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum über die relative Feuchtigkeit der Außenluft steigt. Auch die Innenseite der Dachplatte wird infolge des Wärmestrahlungsaustausches mit der Eisfläche abgekühlt. Die Bedingungen für die Kondensation an der Innenseite der Dachplatte sind einerseits von der Außenluftfeuchte und andererseits vom Wärmespeicherverhalten der Dachplatte abhängig (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Dass das Wärmespeicherverhalten der Dachplatte zur Verringerung der Oberflächenkondensation beiträgt, kann qualitativ aus der Messung abgeleitet, quantitativ jedoch nicht erfasst werden.

Aus diesem Grund wurde ein physikalisches Modell (Kapitel 4), das das thermische Verhalten der Eissporthalle abbildet, ausgearbeitet. Dabei wurde der Dachraum mit dem Hallenraum vereinfacht als eine Zone modelliert. Im Lauf der schrittweisen Entwicklung des Modells wurden die wesentlichen physikalischen Parameter mittels stationärer Betrachtungen abgeschätzt. Dabei stellen der natürliche Luftwechsel zwischen dem Dachraum und der Umgebung, sowie der Wärmestrahlungsaustausch zwischen der Dachplatteninnenseite und der Eisfläche die größte Unsicherheit dar.

Die Validierung des instationären thermischen Simulationsmodells der Eissporthalle, das auf dem physikalischen Modell (Kapitel 4) basiert, ergab eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Kondensationsdauer an der Dachplatteninnenseite zwischen der Messung und der Simulation (Tab. 5-2, S.81). Dabei liegt der mittlere Quadratwurzelfehler zwischen den gemessenen und den simulierten Temperaturwerten im Bereich der Messunsicherheit.

Das validierte Simulationsmodell wurde anschließend verwendet, um zu untersuchen, wie sich eine Variation des Dachaufbaus auf die Kondensationsdauer an der Innenseite der Dachplatte auswirkt (Kapitel 5.4). Es zeigt sich, dass der Einsatz einer Wärmedämmung einen stärkeren Einfluss auf die Kondensationsdauer hat als eine Erhöhung der Wärmespeichermasse. Ob sich eine schädliche Bauteilfeuchte in der Dachkonstruktion einstellt, kann mit den angestellten Untersuchungen nicht beurteilt werden; dazu ist eine hygrothermische Simulation erforderlich. Eine weitere Verfeinerung des Modells hinsichtlich Zonierung, Luftwechsel und Wärmestrahlungsaustausch zwischen den Raumboberflächen könnte die Signifikanz der Simulationsergebnisse erhöhen. Gleichzeitig wäre eine umfangreichere Messung zur Validierung des Modells zweckmäßig.

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Die folgende Auflistung fasst die in dieser Arbeit häufig verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen zusammen. Formelzeichen und Abkürzungen, die nur einmalig vorkommen, werden an entsprechender Stelle beschrieben.

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung und Einheit
A_D	Dachplattenfläche [m^2]
A_E	Eisfläche [m^2]
A_R	Deckenrostfläche [m^2]
c	Wärmekapazität [$J/(kgK)$]
C_s	Strahlungskoeffizient schwarzer Strahler [$W/(m^2K^4)$]
C_{12}	Gesamtstrahlungskoeffizient [$W/(m^2K^4)$]
f_{12}	Einstrahlzahl eines Flächenelementes 1 auf eine Fläche 2 [-]
F_{12}	Einstrahlzahl einer Fläche 1 auf eine Fläche 2 [-]
F_{ED}	Einstrahlzahl der Eisfläche auf die Dachplatte [-]
F_{ER}	Einstrahlzahl der Eisfläche auf den Deckenrost [-]
F_{DE}	Einstrahlzahl der Dachplatte auf die Eisfläche [-]
F_{DR}	Einstrahlzahl der Dachplatte auf den Deckenrost [-]
h_{cv}	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient bei Mischkonvektion [$W/(m^2K)$]
$h_{cv, frei}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient freie Konvektion [$W/(m^2K)$]
$h_{cv, zwang}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient erzwungene Konvektion [$W/(m^2K)$]
$h_{cv, D, i}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Dachplatte innen [$W/(m^2K)$]
$h_{cv, E}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Eisfläche [$W/(m^2K)$]
$h_{cv, R}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient des Deckenrosts [$W/(m^2K)$]
h_r	Wärmestrahlungsübergangskoeffizient [$W/(m^2K)$]
Nu	Nusselt-Zahl [-]
Pr	Prandtl-Zahl [-]
Ra	Rayleigh-Zahl [-]
Re	Reynolds-Zahl [-]
q	Wärmestromdichte [W/m^2]
q_{cv}	Wärmestromdichte infolge konvektiven Wärmeübergangs [W/m^2]
q_r	Wärmestromdichte infolge Strahlung [W/m^2]
T	absolute Temperatur in Kelvin [K]
α_s	Absorptionsgrad für Solarstrahlung [-]
Δ	Differenz
ε	Emissionsgrad [-]
Θ	Celsius-Temperatur [$^{\circ}C$]
$\Theta_{D, e}$	Temperatur der auf der Dachplatte außen angebrachten Dachfolie [$^{\circ}C$]
$\Theta_{D, i}$	Oberflächentemperatur der Dachplatte innen [$^{\circ}C$]

$\Theta_{E,e}$	Eistemperatur der Hallenraum zugewandten Seite [°C]
$\Theta_{E,i}$	Vorlauftemperatur der Kältemaschine [°C]
$\Theta_{L,e}$	Außenlufttemperatur [°C]
$\Theta_{L,i}$	Lufttemperatur im Dachraum [°C]
$\Theta_{LOL,i}$	Lufttemperatur im Dachraum [°C]
Θ_R	Temperatur des Deckenrosts [°C]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]
ν	kinematische Viskosität [$10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$]
ρ	Dichte [kg/m^3]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$]
φ	relative Feuchtigkeit [%]
$\varphi_{D,i}$	relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Dachplatte [%]
$\varphi_{L,i}$	relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum [%]
$\varphi_{L,e}$	relative Luftfeuchtigkeit der Außenluft [%]
$\varphi_{LOL,i}$	relative Luftfeuchtigkeit im Dachraum unter dem Oberlicht [%]
Φ	Wärmestrom [W]
$\Phi_{cd,E}$	Wärmestrom infolge eindimensionaler Wärmeleitung in der Eisfläche [W]
$\Phi_{cd,D}$	Wärmestrom infolge eindimensionaler Wärmeleitung in der Dachplatte [W]
$\Phi_{cv,Li-D}$	konvektiver Wärmestrom zwischen der Luft des Dachraums und der Dachplatte [W]
$\Phi_{cv,Li-E}$	konvektiver Wärmestrom zwischen der Luft des Dachraums und der Eisfläche [W]
$\Phi_{cv,Li-R}$	konvektiver Wärmestrom zwischen der Luft des Dachraums und dem Deckenrost [W]
Φ_{LW}	Wärmestrom infolge des Luftwechsels der Eissporthalle [W]
$\Phi_{r,D-E}$	Wärmestrom infolge des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen der Dachplatte und der Eisfläche [W]
$\Phi_{r,D-R}$	Wärmestrom infolge des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen der Dachplatte und dem Deckenrost [W]
$\Phi_{r,E-R}$	Wärmestrom infolge des langwelligen Strahlungsaustauschs zwischen der Eisfläche und dem Deckenrost [W]

Abkürzungen

BS, BSH	Brettschichtholz
CLT	Cross laminatet timber (Brettsperrholz)
RLT	Raumluftechnische Anlage
GA	Geometrieansatz
PC	Polycarbonat

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DIN 18036:2010-03, Eissportanlagen – Anlagen für den Eissport mit Kunsteisflächen – Grundlagen für Planung und Bau; Ausgabe 03/2010, Berlin, Beuth Verlag
- [2] Fritzen K.: Bei Sanierungen Vorsicht geboten!, Bauen mit Holz, S. 40-42, Nr. 7/8, Jg. 109, Köln, Bruderverlag, 2007, ISSN 0005-6545
- [3] Fritzen K.: Zur Problematik bei Eissporthallen, Bauen mit Holz, S. 44-46, Nr. 3, Jg. 108, Köln, Bruderverlag, 2006, ISSN 0005-6545
- [4] Marquardt H.; Mainka G.-W.: Tauwasserausfall in Eissporthallen, Bauphysik, S. 91-101, Nr. 2, Jg. 30, Berlin, Ernst & Sohn, 2008, ISSN 0171-5445
- [5] Güldenpfenning J.; et al.: Zur Feuchteproblematik in Eissporthallen, Bautechnik, S. 133-138, Nr. 3, Jg. 87, Berlin, Ernst & Sohn, 2010, ISSN 0932-8351
- [6] Firma: mfgarchitekten Moßhammer ZT- KEG f. Architektur; Hilmteichstraße 13, A-8010 Graz
<http://mfgarchitekten.at>, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [7] Eislauf- und Minigolfhalle in Bergheim, Detail, S.1114, Bauen mit Holz, Serie 46, München, Institut für internationale Architektur, 2006, ISSN 0011-9571
- [8] Fischer H.-M; et al.: Lehrbuch der Bauphysik, 6. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2008, ISBN 978-3-519-55014-3
- [9] Glück B.: Wärmeübertragung, Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1990, ISBN 3-345-00515-8
- [10] ÖNORM EN 12524; Baustoffe und – produkte, Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften, Tabellierte Bemessungswert; Ausgabe 09/2000, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [11] Firma: KLH Massivholz GmbH; A-8842 Katsch an der Mur Nr.202
http://www.klh.at/fileadmin/klh/kunde/2011/Technische%20Anwendungen/Statik/Neu/KLH_Technische%20Kenndaten.pdf, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [12] Firma: Knauf Insulation GmbH; Industriestraße 18, A-9586 Fürnitz
http://www.knaufinsulation.at/sites/at.knaufinsulation.net/files/PDBL_Flachdach-DD%C3%A4mmplatte-DDP_01-2015.pdf, [letzter Zugriff 25.05.2015]

- [13] Glück B.: Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie (LOWEx), 2008, Plauen in Deutschland, Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie <http://berndglueck.de/lowex.php>, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [14] Glück B.: Zustands – und Stoffwerte, 2. Auflage, Berlin, Verlag für Bauwesen GmbH, 1991, ISBN 3-345-00487-9 bzw. alternativ: <http://berndglueck.de/stoffwerte.php>, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [15] Baehr H.D.; Stephan K.: Wärme- und Stoffübertragung, 7. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, ISBN 978-3-642-10194-6 (eBook)
- [16] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006, ISBN 978-3-540-25504-8 (eBook)
- [17] Glück B.: Strahlungsheizung - Theorie und Praxis, Karlsruhe, Verlag C. F. Müller, 1982, ISBN 3-7880-7157-5
- [18] Kollmar A.; Liese W.: Die Strahlungsheizung, 4. Auflage, München, Oldenburg, 1957
- [19] Lohmeyer G.; Post M.: Praktische Bauphysik, 8. Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2013, ISBN 3-8348-1794-5
- [20] Recknagel H.; et al.: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 74. Auflage, München, Oldenburg Industrieverlag, 2009, ISBN 978-3-8356-3134-2
- [21] ÖNORM EN ISO 6946; Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizienten – Berechnungsverfahren; Ausgabe 04/2008, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [22] ÖNORM EN ISO 7726; Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen (ISO 7726:1998); Ausgabe 10/2001, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [23] VORNORM ÖNORM ENV 13005; Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen; Ausgabe 07/1999, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [24] Bernhard F.; Handbuch der Technische Temperaturmessung, 2. Auflage, Berlin, Springer Vieweg, 2014, ISBN 978-3-642-24506-0 (eBook)
- [25] ÖNORM B 8110-2; Wärmeschutz im Hochbau, Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz; Ausgabe 07/2003, Wien, Österreichisches Normungsinstitut

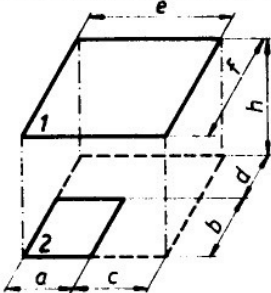
- [26] ÖNORM B 1995-1-1; Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Ausgabe 08/2010, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [27] ÖNORM EN 335; Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten; Ausgabe 05/2013, Wien, Österreichisches Normungsinstitut
- [28] Firma: Gemini Data Loggers (UK) Ltd.; Scientific House, Terminus Road, Chichester, West Sussex, PO19 8UJ, United Kingdom
<http://geminidataloggers.com>, [25.05.2015]
- [29] ZAMG: Jahrbuch 2010 bzw. 2011 der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [30] Podesser A.; et al.: Klimaatlas Steiermark, Kapitel 3, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung, Nebel, Version 2.0, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik http://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10727497_16178332/ff18155c/3_LU_FTFEUCHTE%20UND%20BEW%C3%96LKUNG%20-%20Vers_2.0.pdf, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [31] Hau E.: Windkraftanlagen, Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 5. Auflage, Berlin Heidelberg, Springer Vieweg, 2014, ISBN 978-3-642-28877-7 (e-Book)
- [32] Etheridge D.: Natural ventilation of buildings: theory measurement and design, 1. editon, Chichester, Wiley, 2012, ISBN 978-0-470-66035-5
- [33] De Gids W.; Phaff H.: Ventilation rates and energy consumption due to open windows: a brief overview of research in the Netherlands, Air Infiltration Review, S. 4-5, 4 (1), 1982
- [34] Larsen T.; Heiselberg P.: Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference, Energy and Buildings, S. 1031-1040, Vol 40, Elsevier, 2008, ISSN 0378-7788
- [35] Caciolo M.; et al.: Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects, Energy and Buildings, S. 1765-1773, Vol 43, Elsevier, 2011, ISSN 0378-7788

- [36] Wienrich W.; Anhalt M.: Schnelles Eis - Untersuchungen zur Beeinflussung von Qualität und Energieaufwand beim Sporteis, 1. Auflage, Köln, Sportverlag Strauß, 2002, ISBN 3-89001-140-3
- [37] EES – Engineering Equation Solver; F-Chart Software
<http://www.fchart.com/ees/>, [letzter Zugriff 25.05.2015]
- [38] TRNSYS 16 – a transient system simulation programm, Volume 6, Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild; Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison
- [39] Seem J.E.: Modeling of Heat in Buildings, Dissertation, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin Madison, 1987
- [40] Meyer S.: Wirkung eines hybriden Doppelfassadensystems auf die Energiebilanz und das Raumklima der dahinterliegenden Räume, Dissertation, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 2001
- [41] Rinne H.: Statistische Methoden der Qualitätssicherung, 2. Auflage, Frankfurt am Main, Verlag Harri Deutsch, 1997, ISBN 3-8171-1559-8

ANHANG

F₁₂ für parallele, nicht gleiche Rechteckflächen

Die Gleichung zur Berechnung der Einstrahlzahl F₁₂ des Fall 2 in Abb. 2-10 auf Seite 20 ist in der folgenden Abbildung angegeben.



$\bar{a} = \frac{a}{h} \quad \bar{b} = \frac{b}{h} \quad \bar{c} = \frac{c}{h}$
 $\bar{d} = \frac{d}{h} \quad \bar{e} = \frac{e}{h} \quad \bar{f} = \frac{f}{h}$
 $A = \sqrt{\bar{a}^2 + 1} \quad B = \sqrt{\bar{b}^2 + 1}$
 $C = \sqrt{\bar{c}^2 + 1} \quad D = \sqrt{\bar{d}^2 + 1}$
 $E = \sqrt{\bar{e}^2 + 1} \quad F = \sqrt{\bar{f}^2 + 1}$

Parallele nicht gleiche Rechteckflächen 1 und 2

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi\bar{e}\bar{f}} \left\{ \bar{f} E \arctan \frac{\bar{f}}{E} + \bar{f} A \arctan \frac{\bar{f}}{A} - \bar{f} C \arctan \frac{\bar{f}}{C} - \bar{f} \arctan \bar{f} \right.$$

$$+ \bar{e} F \arctan \frac{\bar{e}}{F} - \bar{e} D \arctan \frac{\bar{e}}{D} + \bar{e} B \arctan \frac{\bar{e}}{B} - \bar{e} \arctan \bar{e}$$

$$+ \bar{a} F \arctan \frac{\bar{a}}{F} - \bar{a} D \arctan \frac{\bar{a}}{D} + \bar{a} B \arctan \frac{\bar{a}}{B} - \bar{a} \arctan \bar{a}$$

$$- \bar{d} E \arctan \frac{\bar{d}}{E} - \bar{d} A \arctan \frac{\bar{d}}{A} + \bar{d} C \arctan \frac{\bar{d}}{C} + \bar{d} \arctan \bar{d}$$

$$+ \bar{b} E \arctan \frac{\bar{b}}{E} + \bar{b} A \arctan \frac{\bar{b}}{A} - \bar{b} C \arctan \frac{\bar{b}}{C} - \bar{b} \arctan \bar{b}$$

$$- \bar{c} F \arctan \frac{\bar{c}}{F} + \bar{c} D \arctan \frac{\bar{c}}{D} - \bar{c} B \arctan \frac{\bar{c}}{B} + \bar{c} \arctan \bar{c}$$

$$\left. + \frac{1}{2} \ln \frac{(D^2 + \bar{e}^2)(A^2 + \bar{d}^2)(B^2 + \bar{c}^2)(C^2 + \bar{f}^2) A^2 B^2 E^2 F^2}{(B^2 + \bar{e}^2)(A^2 + \bar{b}^2)(E^2 + \bar{f}^2)(A^2 + \bar{f}^2)(C^2 + \bar{d}^2) D^2 C^2} \right\}$$

Abb. A- 1: Formel zur Berechnung von F₁₂ für parallele, nicht gleiche Rechteckflächen, Glück [9, S.186]

Mittlerer Quadrat-Wurzel-Fehler WMQF

Der WMQF laut Rinne [41, S.200] ist ein quantitativer Prognosefehler.

$$WMQF = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L d_{T+l}^2}$$

$$d_{T+l} = \hat{x}_{T+l} - x_{T+l}$$

- L Länge des Prognosezeitraums (Anzahl der Prognosen)
- d_{T+l} einfacher Prognosefehler
- x_{T+l} in T + l realisierter Wert der Größe X
- ŷ_{T+l} in T + l prognostizierter Wert der Größe X
- T + l einen zukünftigen Zeitpunkt (für Bestandsgrößen) oder Zeitabschnitt (für Ereignis- oder Stromgrößen); l = 1, 2, ..., L;

Vertikal- und Horizontalschnitt der Eishalle Bergheim

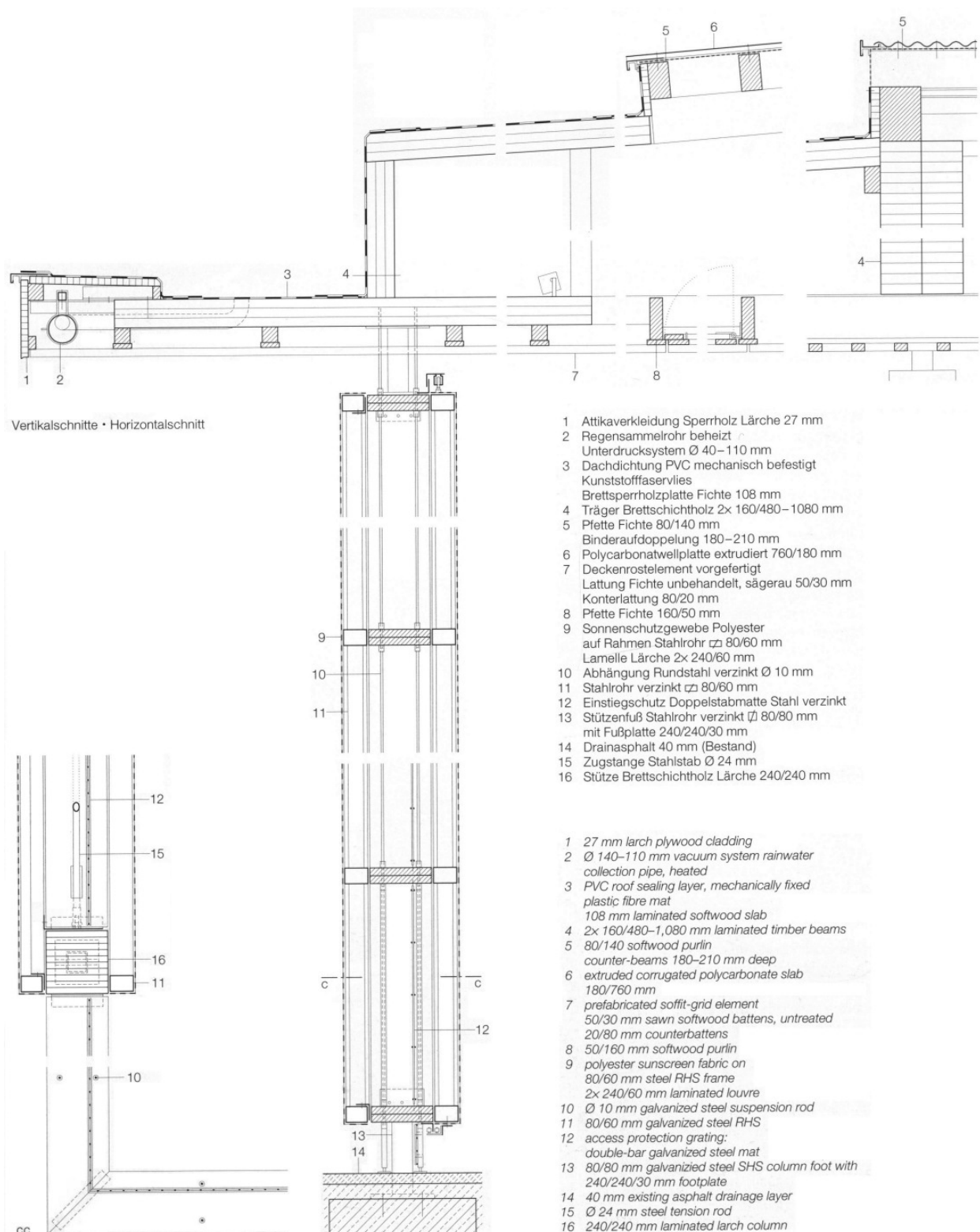


Abb. A- 2: Detaillierter Vertikal- und Horizontalschnitt der Eishalle Bergheim [7, S.1114]

Messung 2010 – Messwerte 21.02. bis 08.04.

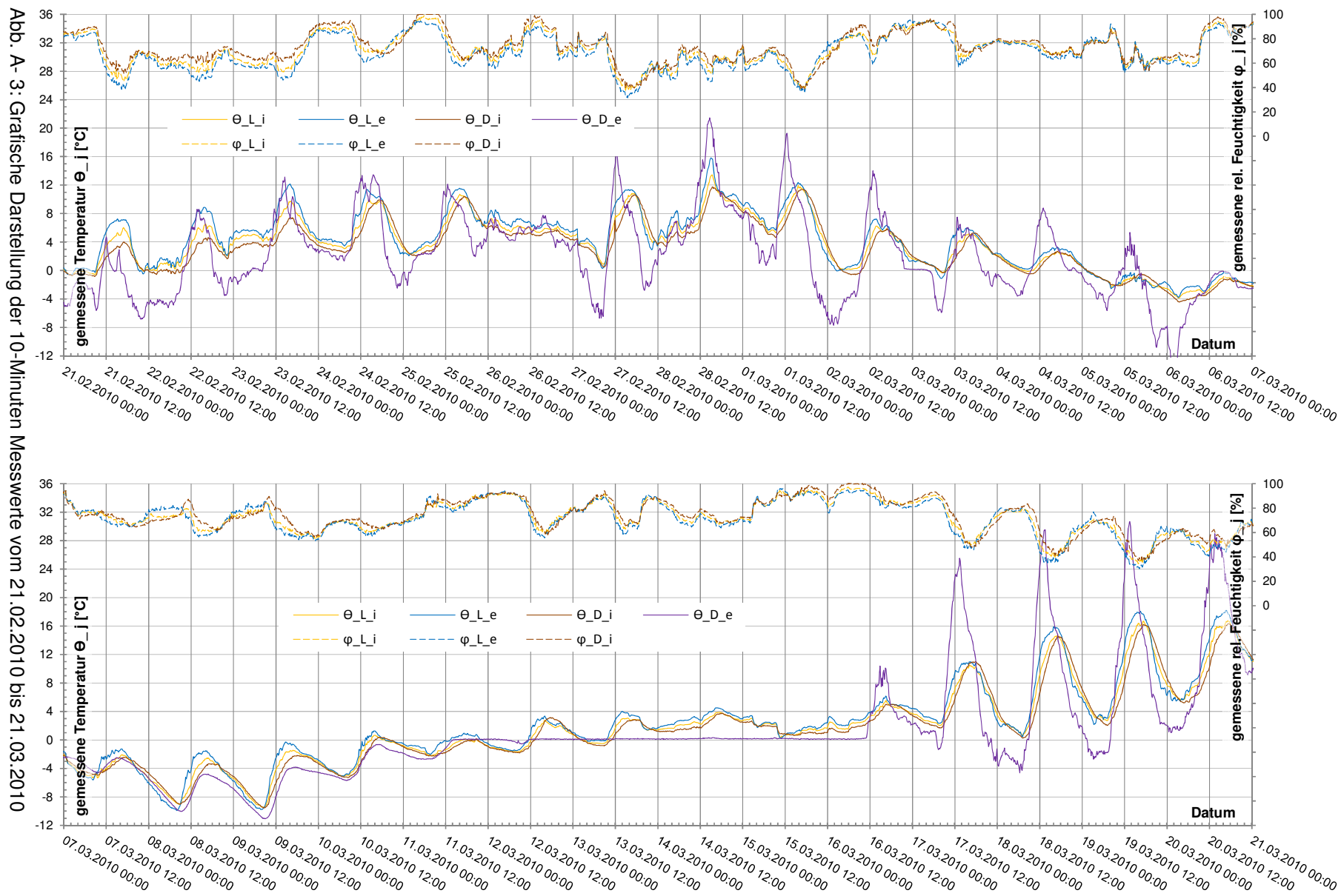
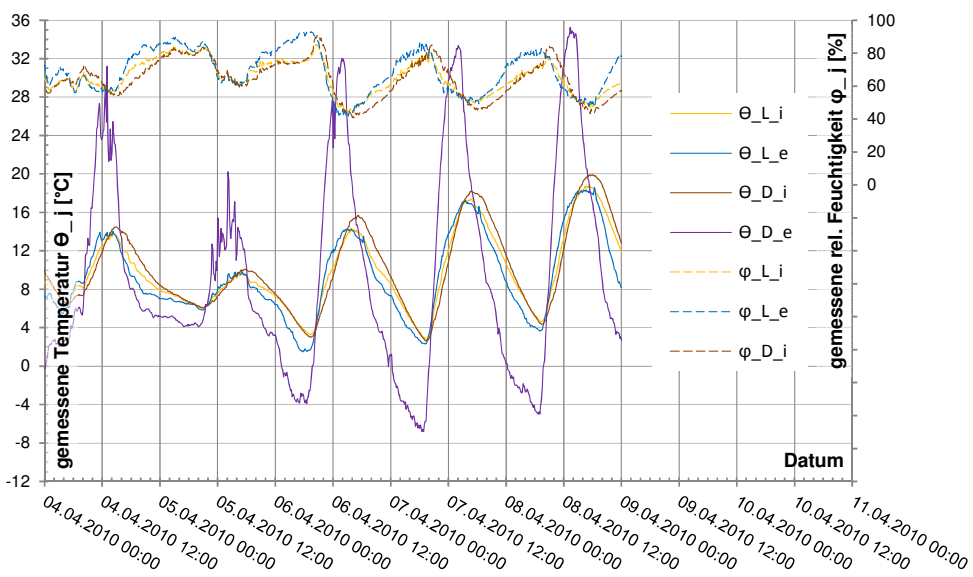
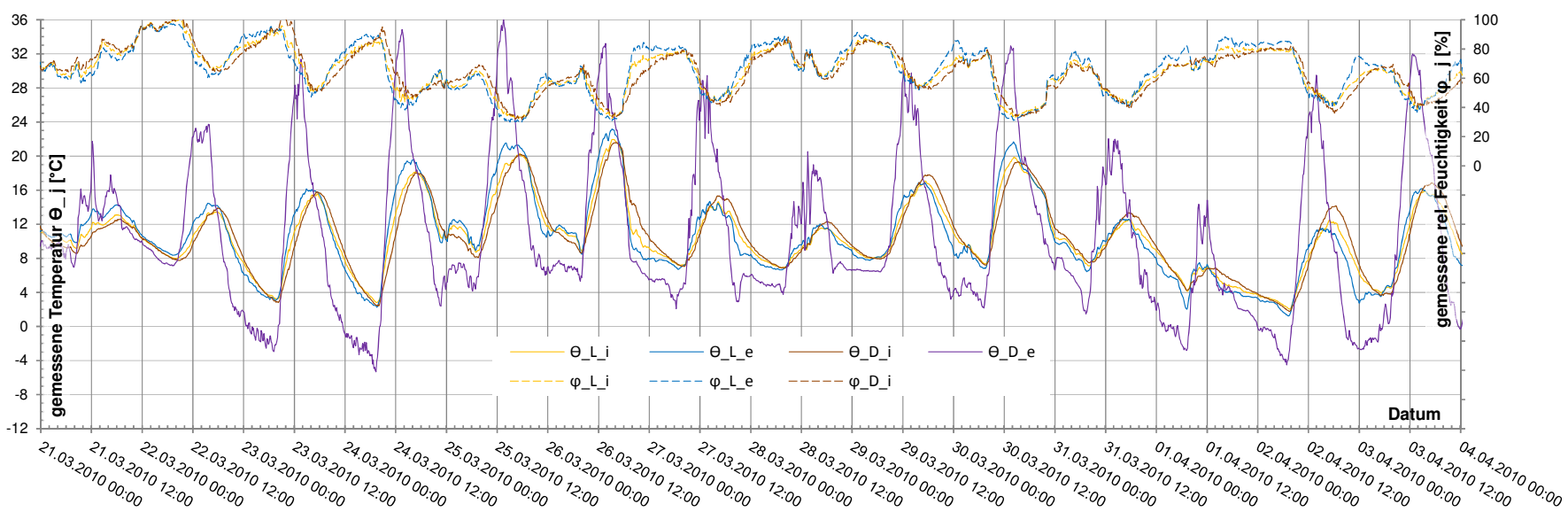


Abb. A-3: Grafische Darstellung der 10-Minuten Messwerte vom 21.02.2010 bis 21.03.2010

Abb. A-4: Grafische Darstellung der 10-Minuten Messwerte vom 21.03.2010 bis 08.04.2010



Messung 2010/2011 – Messwerte 17.10. bis 17.04.

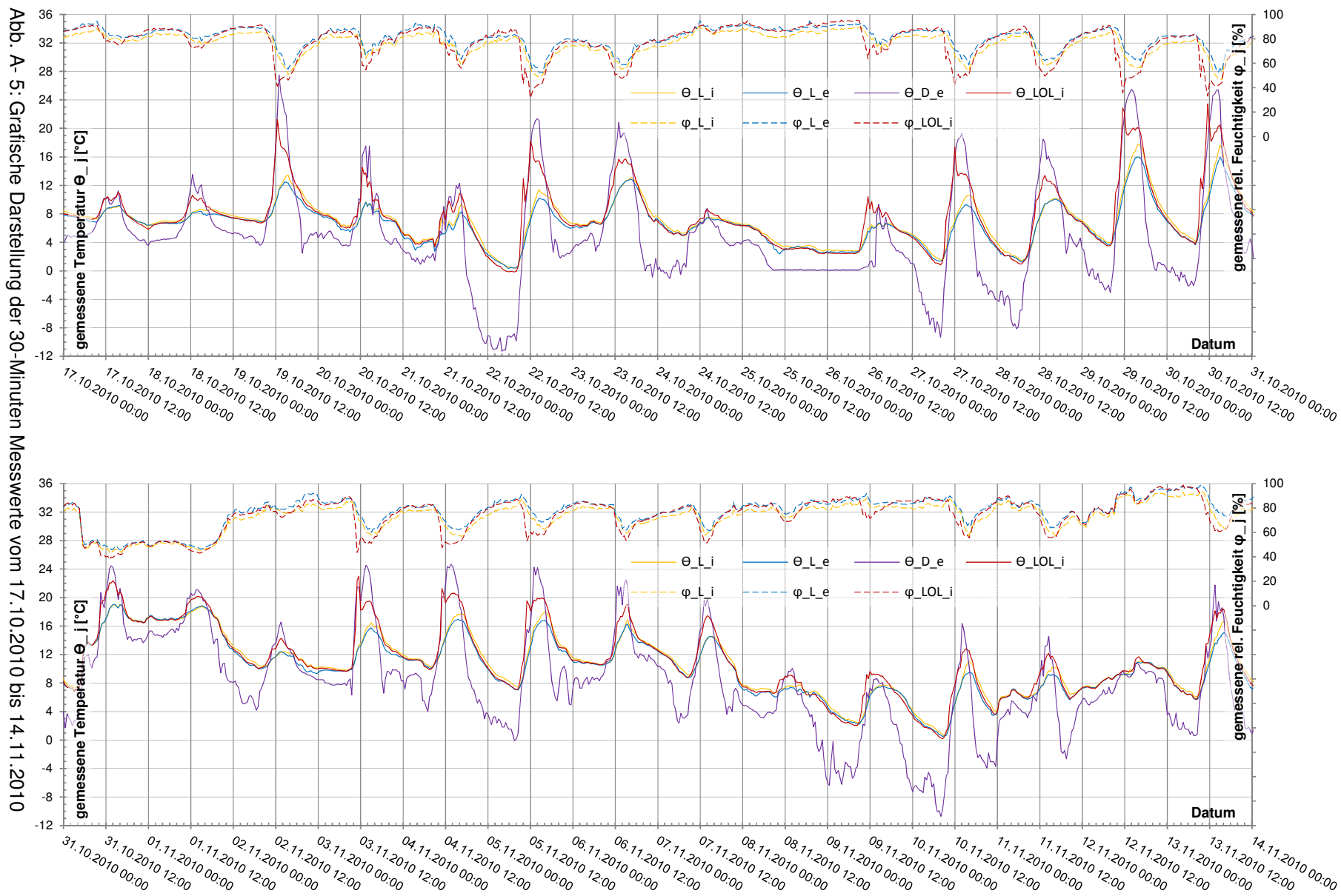


Abb. A- 5: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 17.10.2010 bis 14.11.2010

Abb. A- 6: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 14.11.2010 bis 12.12.2010



Abb. A-7: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 12.12.2010 bis 09.01.2011

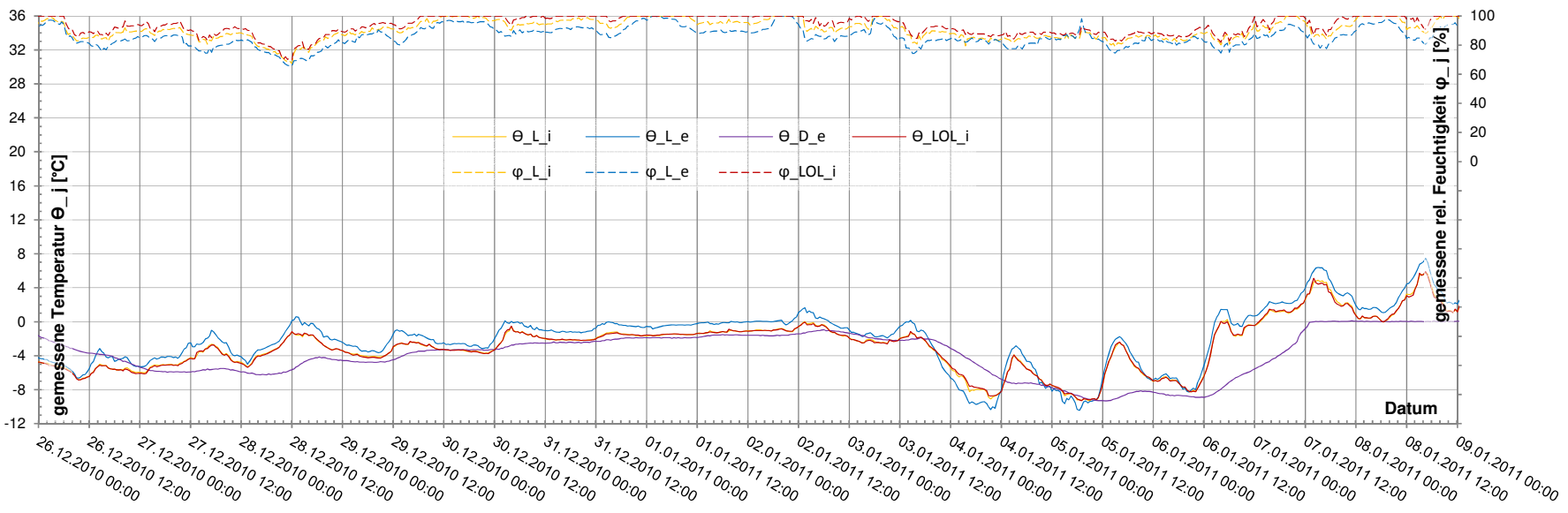
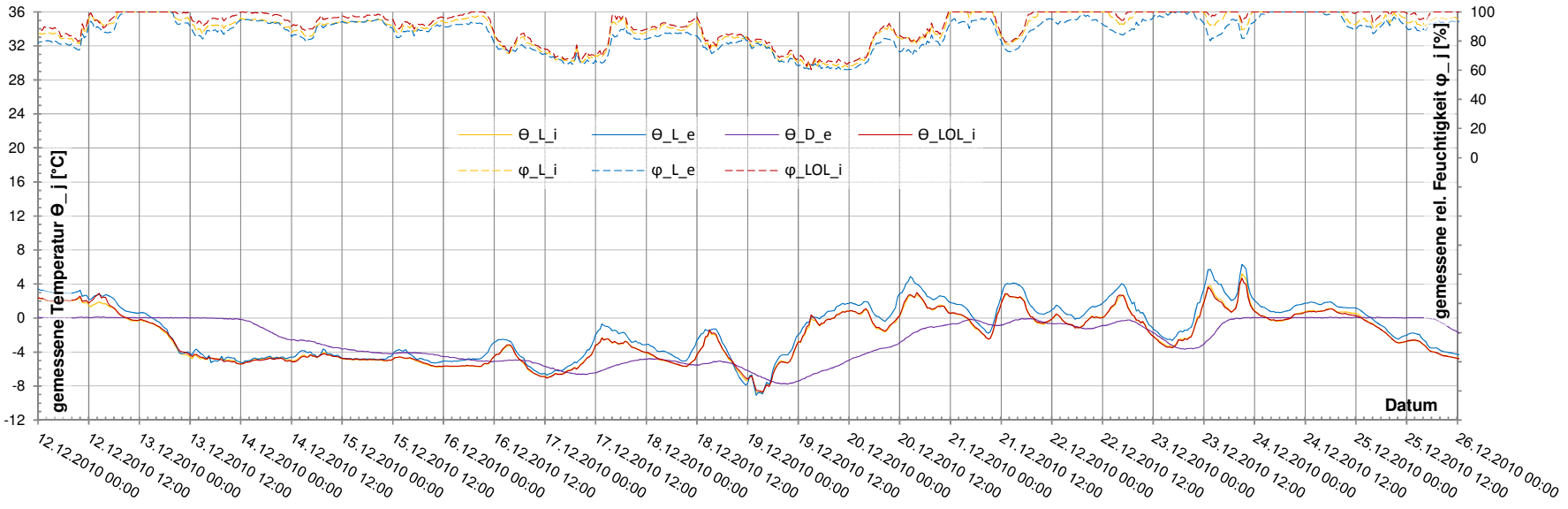


Abb. A- 8: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 09.01.2010 bis 06.02.2011

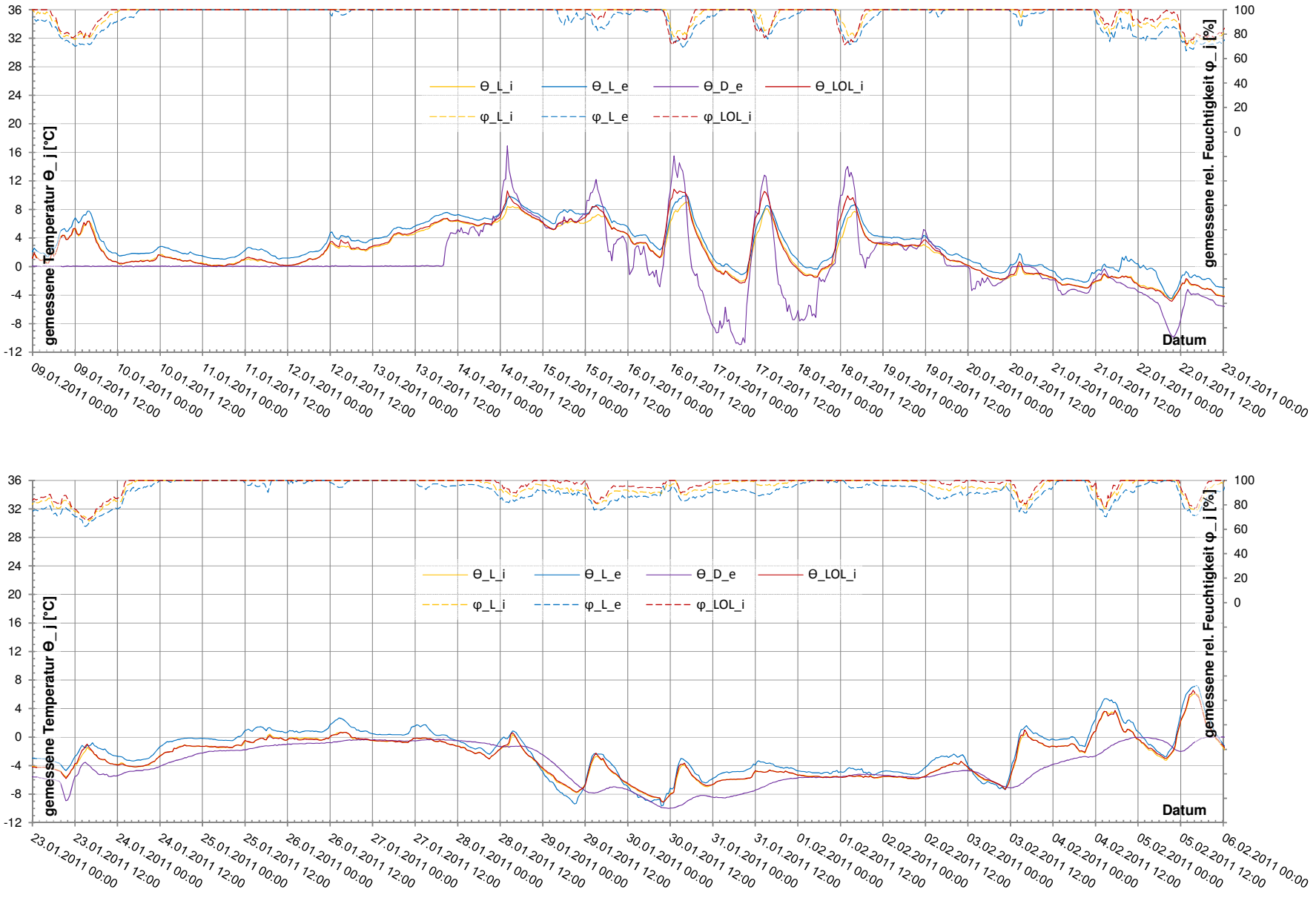


Abb. A- 9: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 06.02.2010 bis 06.03.2011

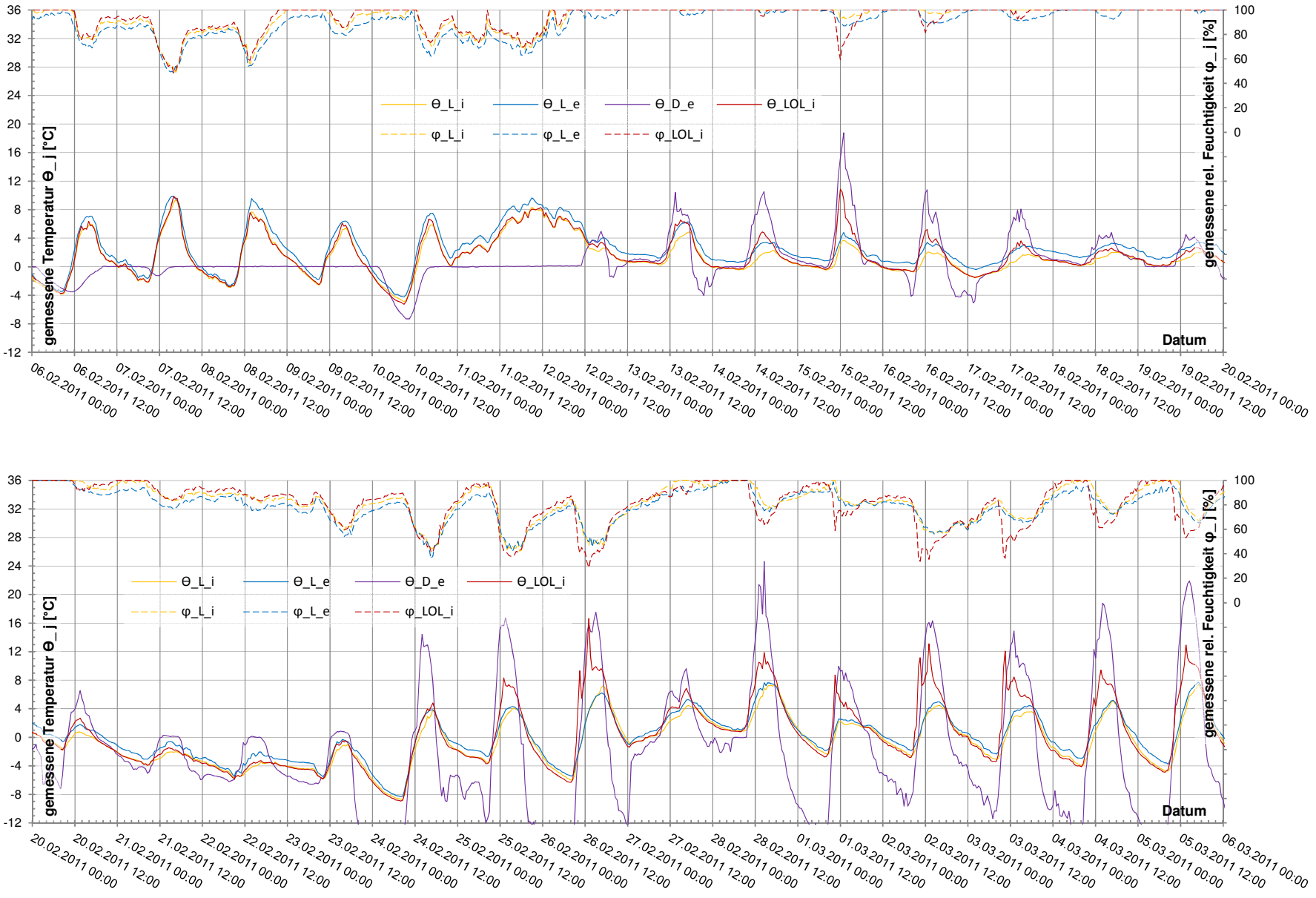


Abb. A- 10: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 06.03.2010 bis 03.04.2011

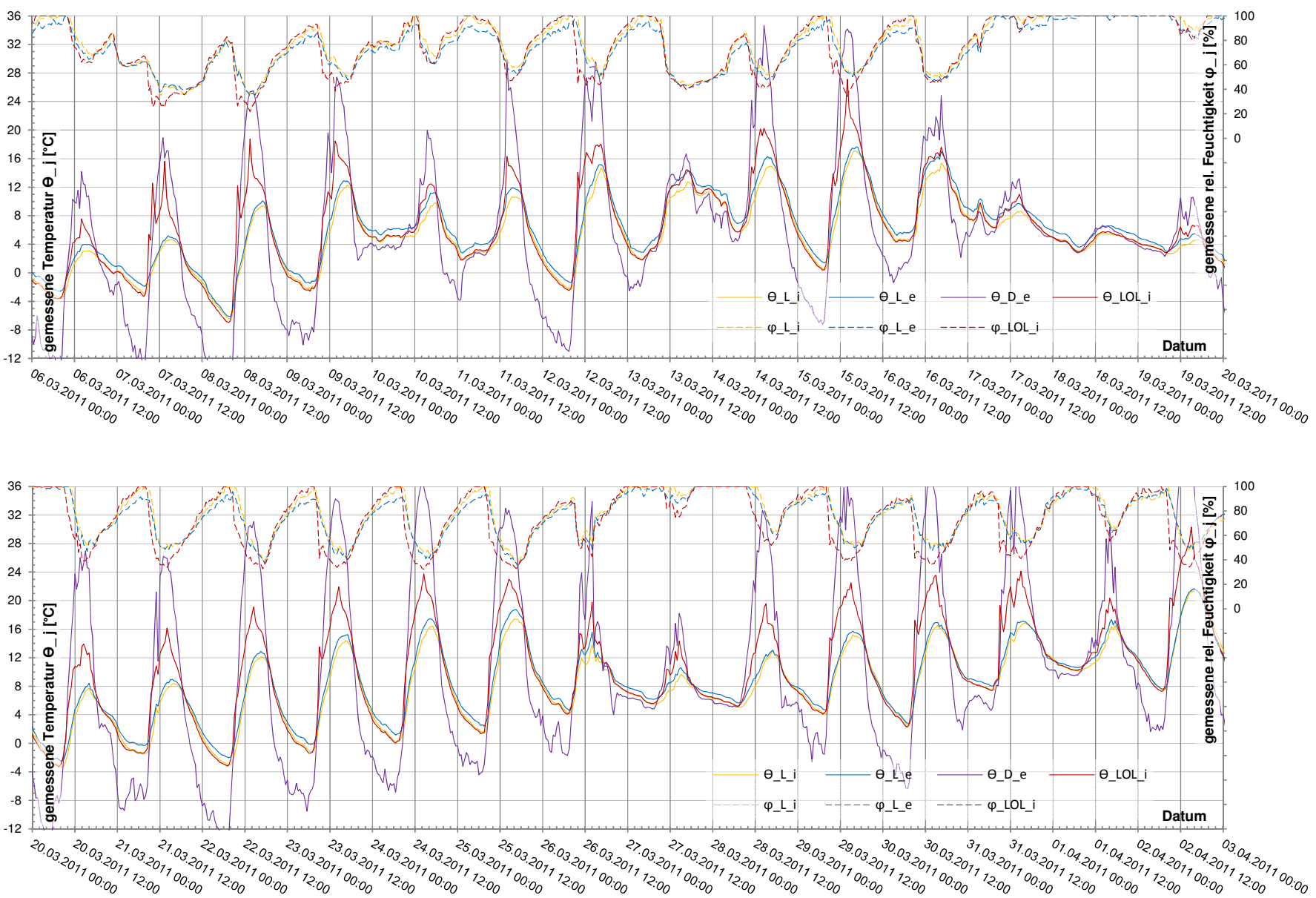
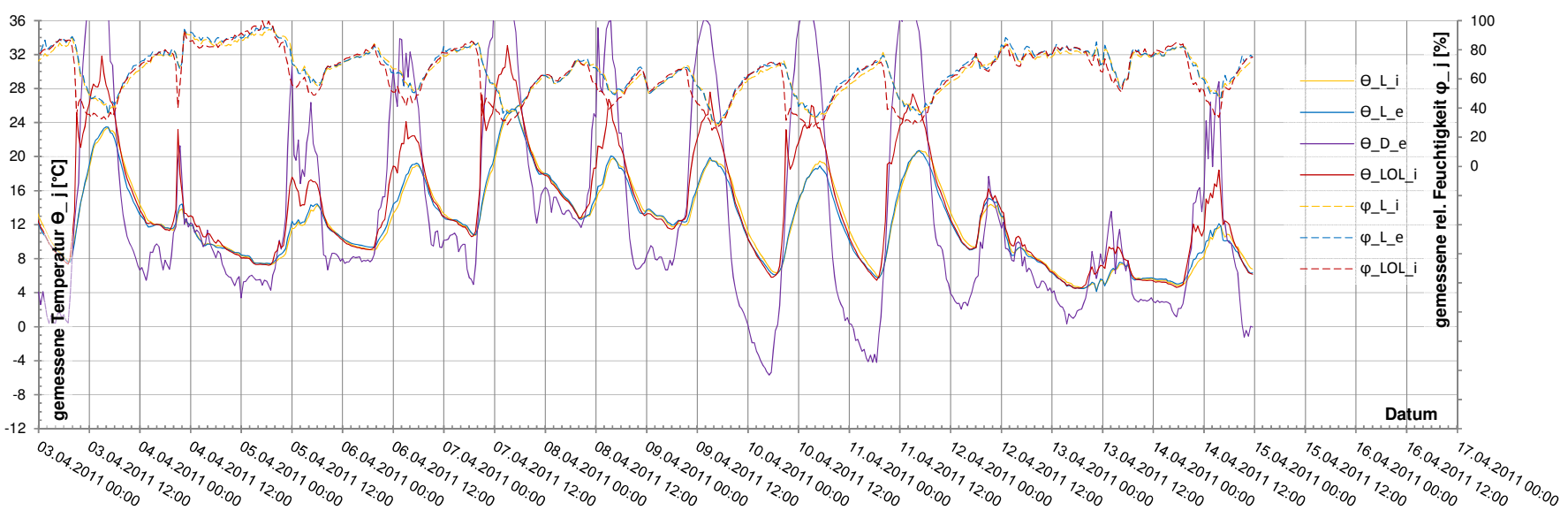


Abb. A- 11: Grafische Darstellung der 30-Minuten Messwerte vom 03.04.2010 bis 17.04.2011



Klimdaten ZAMG

Tab. A- 1: Monatsübersichten der meteorologischen Station Salzburg Flughafen 2010 [29]

Datum	Temperatur MW [°C]	rel. Luftfeuchtigkeit φ [%] *			Bewölkung** MW	Windrichtung [-] und Windstärke [Beaufort]			Schnee [cm]	Neuschnee [cm]	Beaufort	m/s	
		07:00	14:00	19:00		07:00	14:00	19:00					
21.02.2010	2,8	76	29	48	4	SE	2	SE	3	S	2	2	0
22.02.2010	3,8	56	36	50	7,3	S	3	NW	1	SE	2	2	-
23.02.2010	7,3	50	32	45	7,3	SE	4	SE	1	NW	2	-	-
24.02.2010	8,1	68	48	81	8	SE	3	N	2	NW	1	-	-
25.02.2010	6,4	91	46	55	6,3	S	3	SE	4	SE	2	-	-
26.02.2010	7	50	89	44	9,3	S	2	S	4	W	4	-	-
27.02.2010	5,2	56	24	32	3	W	1	SE	3	SE	2	-	-
28.02.2010	9,5	31	28	54	9,3	SE	3	S	2	NW	2	-	-
01.03.2010	7,1	71	29	43	2	NW	2	NW	3	NW	1	-	-
02.03.2010	3,4	88	69	96	9,3	S	1	NW	3	NW	3	-	-
03.03.2010	2,7	97	46	75	3	S	1	NE	3	NE	2	-	-
04.03.2010	-1	74	52	63	9,7	NW	2	N	2	SW	2	-	-
05.03.2010	-0,5	76	51	47	8,3	W	2	NW	3	NW	3	-	-
06.03.2010	-2,7	50	94	93	9,7	SE	3	SW	2	SW	2	-	-
07.03.2010	-3,4	85	59	57	6,3	W	2	NW	1	NE	2	8	8
08.03.2010	-8,3	93	45	47	5	N	1	NE	3	NE	2	6	-
09.03.2010	-7,4	91	46	44	6,3	S	1	NE	4	E	4	4	-
10.03.2010	-1,9	62	40	57	8,7	NE	4	NE	5	NE	4	3	-
11.03.2010	-1,2	95	72	95	10	NW	1	N	3	N	2	3	1
12.03.2010	11,1	85	44	52	7,7	NW	2	NW	3	N	1	2	0
13.03.2010	1	89	43	85	10	SE	1	NW	4	W	3	1	-
14.03.2010	2,8	66	63	48	9,7	W	3	W	3	W	3	-	-
15.03.2010	1,9	73	95	89	9,7	W	4	SW	1	SE	2	-	-
16.03.2010	3,8	93	70	59	9,3	SW	3	W	3	W	3	-	-
17.03.2010	6,3	88	30	53	8,7	SE	3	N	2	S	2	-	-
18.03.2010	9,3	69	19	45	7	S	3	N	1	S	2	-	-
19.03.2010	11,5	49	20	36	7	S	4	NE	1	S	2	-	-
20.03.2010	12,7	44	33	50	9	SE	4	N	2	NW	1	-	-
21.03.2010	11,9	56	82	83	8,7	SE	3	S	2	S	1	-	-
22.03.2010	11,5	94	43	67	8	S	2	NE	2	S	1	-	-
23.03.2010	9	96	40	55	4,7	S	2	N	1	NE	1	-	-
24.03.2010	11	61	19	42	1,3	SE	3	N	2	W	1	-	-
25.03.2010	14,1	53	18	36	3,7	S	3	S	1	S	2	-	-
26.03.2010	15,8	45	21	83	6,3	SE	3	SE	3	NW	6	-	-
27.03.2010	9,6	89	30	49	8,7	S	2	NW	1	SW	1	-	-
28.03.2010	8,4	95	67	66	8	SW	2	SW	3	S	2	-	-
29.03.2010	12,1	82	41	65	7,3	S	3	N	2	N	2	-	-
30.03.2010	13,5	45	23	24	7	S	4	SE	4	SE	4	-	-
31.03.2010	10,9	75	35	47	7,7	NW	3	SW	2	SW	3	-	-
01.04.2010	5	75	91	91	8,7	S	3	NW	3	S	3	-	-
02.04.2010	5,4	89	33	37	4,3	S	3	NW	2	NE	2	-	-
03.04.2010	8,4	62	26	49	9	SE	4	N	3	NW	2	-	-
04.04.2010	9,6	55	47	93	9,3	NW	3	NW	3	SW	2	-	-
05.04.2010	8,7	89	53	89	9,3	W	3	W	3	SW	2	-	-
06.04.2010	7,6	96	30	37	1,3	S	1	NE	2	NE	3	-	-
07.04.2010	8,4	92	35	44	0,7	S	1	N	2	N	3	-	-
08.04.2010	9,4	93	35	40	0,7	-	0	N	2	NW	1	-	-
09.04.2010	10,1	94	32	53	4,3	W	1	NW	3	N	3	-	-
17.10.2010	7,2	95	79	76	10	NW	2	NE	3	NE	3	-	-
18.10.2010	6,5	91	75	83	10	W	1	NW	2	N	1	-	-
19.10.2010	8,7	94	44	86	5,7	C	0	S	1	S	1	-	-
20.10.2010	6,9	88	71	81	8,7	SW	1	W	3	SW	1	-	-
21.10.2010	5	77	59	90	5,7	W	2	N	3	S	2	-	-
22.10.2010	4,9	86	32	76	5,7	SE	3	S	1	SE	2	-	-
23.10.2010	9,1	67	41	82	6,3	SE	3	SE	2	S	2	-	-
24.10.2010	5,3	92	89	95	9,7	S	1	NW	2	S	2	-	-
25.10.2010	3,1	94	95	95	10	NW	1	N	1	-	0	-	-
26.10.2010	3,7	95	58	87	9	S	1	NW	3	S	2	-	-
27.10.2010	4,7	95	37	81	2,3	S	2	S	2	SE	2	-	-
28.10.2010	5,6	73	48	69	7,7	SE	3	SE	2	SE	3	-	-
29.10.2010	10,8	85	39	70	1,7	SE	3	S	2	S	2	-	-
30.10.2010	12,1	61	28	78	5,7	SE	4	S	2	NE	1	-	-
31.10.2010	12,6	29	28	31	7	SE	5	SE	3	SE	4	-	-
01.11.2010	16,6	34	32	58	9	SE	4	SE	3	SW	2	-	-
02.11.2010	11,4	92	74	89	9,7	NW	1	N	2	N	2	-	-
03.11.2010	12,2	93	51	78	8,7	SE	1	S	2	S	2	-	-
04.11.2010	13,6	82	43	74	8,7	SE	2	S	1	S	2	-	-
05.11.2010	11,9	94	50	89	5,3	S	1	NW	1	S	1	-	-
06.11.2010	12,4	86	48	78	7,7	SE	2	S	2	SW	1	-	-
07.11.2010	11,2	85	46	85	9	SE	4	E	2	NW	1	-	-
08.11.2010	7,5	91	72	91	10	SW	1	N	2	W	2	-	-
09.11.2010	3,9	95	69	94	9	NW	1	NW	1	S	1	-	-
10.11.2010	5,5	94	44	85	3,3	NW	1	SE	1	S	2	-	-
11.11.2010	5,6	90	60	84	5,7	NW	3	C	0	SE	2	-	-
12.11.2010	6,6	71	90	94	9,3	S	3	SE	2	SE	3	-	-
13.11.2010	10,9	91	48	88	4	SE	2	SE	2	SE	2	-	-
14.11.2010	12,5	82	41	80	2,3	SE	4	SE	3	SE	2	-	-
15.11.2010	10,5	73	61	86	8,3	SE	2	N	1	N	2	-	-
16.11.2010	7	94	69	77	10	N	2	NW	3	NW	3	-	-
17.11.2010	4,4	93	78	87	9,7	W	2	S	1	NW	1	-	-
18.11.2010	6,2	92	67	90	9,3	NW	2	NW	1	NW	1	-	-
19.11.2010	4,4	96	90	93	9,3	NW	2	N	1	SE	1	-	-
20.11.2010	1,7	95	96	97	8	SW	1	N	1	E	2	-	-
21.11.2010	2,3	97	88	90	9,7	SW	2	NW	2	SE	1	-	-
22.11.2010	5	93	72	73	9,3	NE	2	NW	2	NW	1	-	-
23.11.2010	3,2	77	80	90	9,3	NW	2	NW	2	NW	2	-	-
24.11.2010	2,6	89	63	86	9,3	SW	2	W	2	SE	2	-	-
25.11.2010	2,5	96	53	87	7,7	SE	1	SE	2	S	2	-	-
26.11.2010	-1,5	86	90	83	9,7	SE	1	NW	3	W	2	-	-
27.11.2010	-1,6	95	51	83	3,3	SE	2	NE	2	SE	0	1	1
28.11.2010	-4,2	92	84	96	8,7	NE	1	N	1	NW	2	1	-
29.11.2010	-0,3	95	94	46	9,7	NW	2	NW	3	NW	1	4	4
30.11.2010	-5,3	93	73	91	5,3	S	1	NW	1	S	1	4	1
01.12.2010	-3,6	91	93	82	10	NW	2	NW	2	NW	2	4	0
02.12.2010	-2,2	93	82	89	9,7	SE	1	N	2	W	1	6	2
03.12.2010	-4,9	95	92	95	10	N	1	SW	1	NW	1	6	1
04.12.2010	-3,5	90	74	91	8	W	1	NW	1	SE	1	5	1
05.12.2010	-3	65	45	81	9,7	SE	4	SE	3	S	2	5	-
06.12.2010	1,2	75	81	93	9,3	E	1	NW	2	NW	1	5	-
07.12.2010	4,7	95	69	93	7,3	SE	2	S	2	SE	1	5	-
08.12.2010	6,5	86	56	88	7,7	S	3	SE	2	S	2	-	-
09.12.2010	3,3	95	56	87	8,7	NW	3	W	3	W	4	1	1
10.12.2010	-0,3	86	75	92	9,7	W	4	NW	2	NW	2	3	2
11.12.2010	2,1	96	69	63	10	S	2	W	4	W	4	18	15
12.12.2010	2,8	61	88	94	9,7	W	4	W	3	SW	2	-	-
13.12.2010	-2,8	95	86	83	9,3	NW	4	NW	3	N	2	10	10
14.12.2010	-5,4	90	71	88	9,7	N	1	NW	3	N	1	16	6
15.12.2010	-5,3	85	71	73	10	W	3	W	3	W	2	17	1
16.12.2010	-6,5	94	61	74	5,7	S	1	SE	2	SE	3	25	8
17.12.2010	-5,5	95	58	81	9,7	SE	4	SE	3	N	3	17	-
18.12.2010	-4,9	95	57	81	6,7	C	0	SE	2	SE	2	13	0
19.12.2010	-3,3	52	43	40	5,7	SE	4	SE	3	SE	4	10	-
20.12.2010	1,4	71	60	70	9	SE	3	S	2	SE	3	10	-
21.12.2010	1,7	76	59	74	6,3	SE	4	SE	3	SE	3	7	-
22.12.2010	1,9	93	76	97	6,3	NE	1	S	2	SW	1	6	-
23.12.2010	5,1	91	60	62	9	NE	1	W	1	S	3	5	-
24.12.2010	5,6	96	95	92	10	SW	1	N	2	NW	3	3	-
25.12.2010	-1,3												

ANHANG

Tab. A- 2: Monatsübersichten der meteorologischen Station Salzburg Flughafen 2011 [29]

Datum	Temperatur MW [°C]	rel. Luftfeuchtigkeit φ [%] *			Bewölkung** MW	Windrichtung [-] und Windstärke [Beaufort]			Schnee [cm]	Neuschnee [cm]	Beaufort	m/s			
		07:00	14:00	19:00		07:00	14:00	19:00							
01.01.2011	-0,8	08:00	80	86	10	S	2	NW	1	S	2	4	-	0	< 0,2
02.01.2011	-0,4	09:00	70	68	10	W	1	NW	1	W	2	4	-	1	0,3-1,5
03.01.2011	-3	10:00	64	96	5,3	SE	1	SE	1	S	2	6	2	2	1,6-3,3
04.01.2011	-9,4	11:00	55	63	5,3	S	1	SE	2	S	2	5	-	3	3,4-5,4
05.01.2011	-7,3	12:00	43	47	4	N	1	SE	2	E	2	5	-	4	5,5-7,9
06.01.2011	-1,2	13:00	36	58	7,3	SE	3	SE	4	SE	2	4	-	5	8,0-10,7
07.01.2011	5,7	14:00	55	70	9	SE	3	SE	2	SE	3	3	-	6	10,8-13,8
08.01.2011	4,8	15:00	62	76	6,3	S	2	SE	2	S	3	-	-	7	13,9-17,1
09.01.2011	6,8	16:00	49	81	7,3	SE	3	SE	1	SE	2	-	-	8	17,2-20,7
10.01.2011	1,7	17:00	96	96	10	N	1	NW	2	NW	1	-	-	9	20,8-24,4
11.01.2011	2,1	18:00	90	94	10	S	1	NW	2	NW	2	-	-	10	24,5-28,4
12.01.2011	4,1	19:00	83	92	9,3	SE	2	N	3	SE	2	-	-	11	28,5-32,6
13.01.2011	6,9	20:00	93	77	10	SE	3	SE	3	SW	2	-	-	12	> 32,6
14.01.2011	8,5	21:00	91	94	10	SE	3	SE	1	SE	2	-	-		
15.01.2011	8,1	22:00	60	88	9	W	4	NW	3	S	2	-	-		
16.01.2011	7,8	23:00	41	86	3,3	SE	4	NW	2	S	2	-	-		
17.01.2011	4,5	00:00	41	94	4	S	2	NW	1	S	1	-	-		
18.01.2011	4,6	01:00	43	82	7,7	SE	3	NW	1	S	2	-	-		
19.01.2011	3,1	02:00	91	95	10	SW	2	NW	3	W	1	-	-		
20.01.2011	-0,3	03:00	75	94	8,7	N	1	S	1	S	2	1	1		
21.01.2011	-0,9	04:00	59	89	8,7	NW	2	N	2	NW	1	3	2		
22.01.2011	-4,9	05:00	50	59	5,3	W	1	NE	2	NE	2	3	1		
23.01.2011	-4,7	06:00	49	76	6	SW	2	S	1	S	2	3	-		
24.01.2011	-2,2	07:00	95	94	10	SE	2	N	1	NW	1	6	4		
25.01.2011	-0,4	08:00	91	95	9,7	SE	2	SE	2	SE	1	24	20		
26.01.2011	1,3	09:00	93	95	10	W	2	-	0	NE	1	21	1		
27.01.2011	0,8	10:00	87	82	10	N	1	NW	2	NE	2	19	0		
28.01.2011	-2,3	11:00	69	94	4	NE	2	W	2	W	1	18	-		
29.01.2011	-7	12:00	72	91	3,7	N	1	NW	2	0	15	-			
30.01.2011	-8,2	13:00	79	90	5	NE	1	NW	1	NW	1	15	-		
31.01.2011	-7	14:00	85	87	10	S	1	W	1	W	2	14	-		
01.02.2011	-5,4	15:00	89	89	10	SW	2	NW	1	NW	1	14	0		
02.02.2011	-4,8	16:00	75	77	10	SW	1	-	0	S	1	14	0		
03.02.2011	-4,6	17:00	54	75	7,7	NW	1	S	1	SE	1	14	-		
04.02.2011	3	18:00	45	93	7,3	S	3	SE	1	S	2	12	-		
05.02.2011	1,5	19:00	49	88	1	S	2	S	2	S	2	10	-		
06.02.2011	1,3	20:00	39	60	1,3	SE	1	S	2	SE	2	7	-		
07.02.2011	6,3	21:00	30	47	0,7	SE	3	S	1	S	2	7	-		
08.02.2011	4,5	22:00	39	81	5,3	SE	2	NW	4	S	1	7	-		
09.02.2011	1,1	23:00	61	90	0,3	S	2	NW	3	S	1	4	-		
10.02.2011	1,6	00:00	33	62	5,7	NW	1	N	1	S	2	2	-		
11.02.2011	6,7	01:00	50	41	9,3	SE	2	SE	2	SW	3	-	-		
12.02.2011	7,5	02:00	93	95	9,7	W	3	NW	2	SE	1	-	-		
13.02.2011	3,6	03:00	91	94	9,3	NW	1	SE	3	NE	1	-	-		
14.02.2011	1,8	04:00	87	93	9,7	N	1	N	2	N	1	-	-		
15.02.2011	2,8	05:00	78	86	9,3	NW	1	NW	3	NW	2	-	-		
16.02.2011	1,7	06:00	77	88	10	NW	1	N	2	NW	2	-	-		
17.02.2011	1,5	07:00	78	86	10	N	1	NW	1	N	1	-	-		
18.02.2011	2,4	08:00	85	95	10	W	1	NW	1	NW	1	-	-		
19.02.2011	1,8	09:00	94	93	10	SE	1	S	2	N	1	-	-		
20.02.2011	0,7	10:00	75	77	9,7	SE	1	N	2	N	2	-	-		
21.02.2011	-2,1	11:00	65	86	9,7	N	2	N	2	N	2	2	2		
22.02.2011	-4,7	12:00	75	67	10	N	2	NW	2	NW	2	3	1		
23.02.2011	-3,4	13:00	46	68	3,3	NW	2	NW	4	SW	1	2	0		
24.02.2011	-1,7	14:00	24	56	2,3	SE	3	S	1	SW	1	2	-		
25.02.2011	0,3	15:00	24	46	2,7	NW	1	N	2	W	1	2	-		
26.02.2011	0,5	16:00	30	61	0	SE	2	N	2	SW	1	-	-		
27.02.2011	0	17:00	95	93	9,7	SE	1	SE	2	SE	2	-	-		
28.02.2011	3,7	18:00	73	91	6	N	1	SW	2	S	2	-	-		
01.03.2011	-0,9	19:00	67	69	7,7	S	1	N	3	NE	3	-	-		
02.03.2011	-0,5	20:00	33	39	0,7	S	1	NE	4	NE	3	-	-		
03.03.2011	-0,4	21:00	48	67	5,7	W	1	N	2	SW	1	-	-		
04.03.2011	-0,3	22:00	64	82	0,7	-	0	NW	3	W	2	-	-		
05.03.2011	1,1	23:00	51	72	1,3	-	0	NW	2	SW	1	-	-		
06.03.2011	-0,4	00:00	49	54	6	S	1	NW	3	NW	2	-	-		
07.03.2011	-0,1	01:00	20	21	0	SE	1	NE	4	NE	3	-	-		
08.03.2011	1	02:00	16	51	0,3	SE	1	NW	2	SW	1	-	-		
09.03.2011	6	03:00	35	57	4	SE	3	W	1	S	2	-	-		
10.03.2011	8,5	04:00	52	63	7	SE	2	NE	1	SE	2	-	-		
11.03.2011	6,9	05:00	39	64	5,3	S	2	NW	3	-	0	-	-		
12.03.2011	7	06:00	31	54	4	-	0	NW	2	W	1	-	-		
13.03.2011	9,4	07:00	28	27	9	SW	2	SE	3	SE	2	-	-		
14.03.2011	12,4	08:00	34	49	6,7	E	1	N	1	NE	2	-	-		
15.03.2011	10,1	09:00	24	47	4,3	S	1	N	1	E	1	-	-		
16.03.2011	12,5	10:00	30	34	7,3	SE	2	SE	3	SE	3	-	-		
17.03.2011	11,1	11:00	82	87	10	N	2	NW	4	W	2	-	-		
18.03.2011	6,1	12:00	89	95	10	W	2	W	3	NW	3	-	-		
19.03.2011	4,4	13:00	76	87	9,7	N	2	N	2	W	1	-	-		
20.03.2011	2,1	14:00	27	36	3,7	-	0	N	2	NE	2	-	-		
21.03.2011	3,2	15:00	29	36	3,7	S	1	N	3	NE	3	-	-		
22.03.2011	4,9	16:00	29	44	6	-	0	NW	2	NW	2	-	-		
23.03.2011	7,8	17:00	27	45	3,3	SE	3	NW	2	N	1	-	-		
24.03.2011	9,9	18:00	25	46	6	S	2	N	2	NW	1	-	-		
25.03.2011	11,6	19:00	28	30	6,7	SE	3	NW	4	W	2	-	-		
26.03.2011	9,8	20:00	52	88	8	SE	1	NW	4	SE	2	-	-		
27.03.2011	8,5	21:00	71	95	9,7	S	2	N	2	NW	2	-	-		
28.03.2011	9,3	22:00	70	84	6,7	NW	2	NW	2	W	1	-	-		
29.03.2011	10,6	23:00	35	53	2,3	SE	2	N	2	N	1	-	-		
30.03.2011	10,3	00:00	34	46	2,3	SE	3	N	2	S	2	-	-		
31.03.2011	12,1	01:00	43	47	8,3	SE	3	NW	2	W	1	-	-		

MW...Mittelwert
 * Messung um 07:00,
 14:00 und 19:00 Uhr
 ** Bewölkung in
 Zehntel

GA3 und GA4

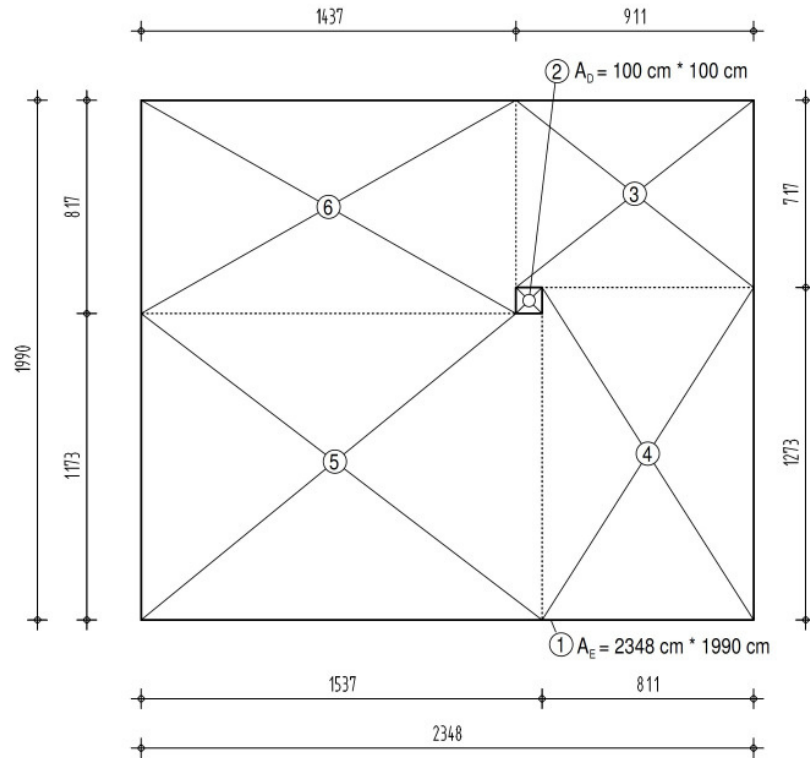


Abb. A- 12: Detaillierte Darstellung des GA3 für die Berechnung von F_{ED}

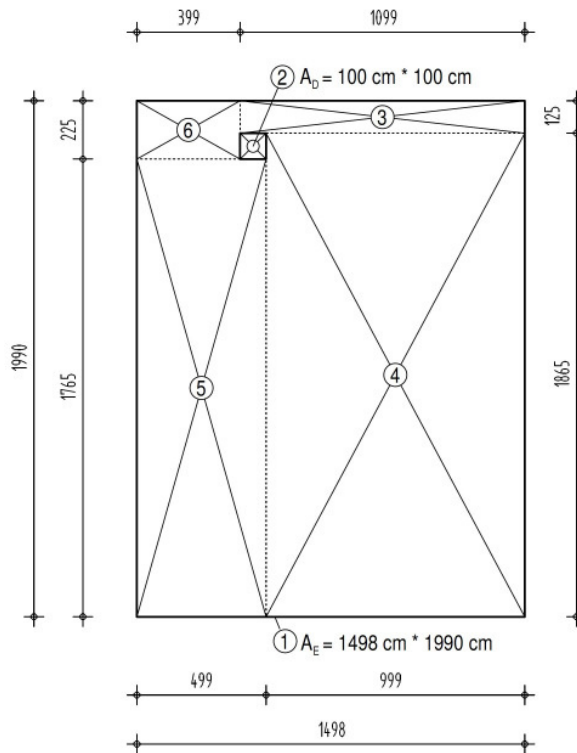


Abb. A- 13: Detaillierte Darstellung des GA4 für die Berechnung von F_{ED}

Tab. A- 3: Berechnung von F_{ED} des GA3

Einstrahl - zahl	a [cm]	c [cm]	e [cm]	b [cm]	d [cm]	f [cm]	h [cm]	Rechenwert der Einstrahlzahl
$F_{1,23456}$	2348	0	2348	1990	0	1990	587	0,60765
F_{13}	911	1437	2348	717	1273	1990	587	0,07689
F_{14}	811	1537	2348	1273	717	1990	587	0,13001
F_{15}	1537	811	2348	1173	817	1990	587	0,24761
F_{16}	1437	911	2348	817	1173	1990	587	0,15148
$F_{12} = F_{ED}$	$F_{12} = F_{1,23456} - F_{13} - F_{14} - F_{15} - F_{16}$							0,001665

Tab. A- 4: Berechnung von F_{ED} des GA4

Einstrahl - zahl	a [cm]	c [cm]	e [cm]	b [cm]	d [cm]	f [cm]	h [cm]	Rechenwert der Einstrahlzahl
$F_{1,23456}$	1498	0	1498	1990	0	1990	587	0,53783
F_{13}	1099	399	1498	125	1865	1990	587	0,01797
F_{14}	999	499	1498	1865	125	1990	587	0,35528
F_{15}	499	999	1498	1765	225	1990	587	0,15213
F_{16}	399	1099	1498	225	1765	1990	587	0,01084
$F_{12} = F_{ED}$	$F_{12} = F_{1,23456} - F_{13} - F_{14} - F_{15} - F_{16}$							0,001612

Volumen und Flächen des Simulationsmodells

Zonenvolumen:

$$V = 4,76 \cdot 9,85 \cdot 5,87 = 275,22 \text{ m}^3$$

Dachplatte :

$$A = 4,76 \cdot 9,85 = 46,89 \text{ m}^2$$

$$d_D = 0,11 \text{ m}$$

Eisfläche :

$$A = 4,76 \cdot 9,85 = 46,89 \text{ m}^2$$

$$d_{Eis} = 0,06 \text{ m}$$

Deckenrost :

$$A = 4,76 \cdot 9,85 \cdot 0,378 \cdot 2 = 35,45 \text{ m}^2$$

$$d_R = 0,03 \text{ m}$$

BSH-Träger :

$$V = 9,85 \cdot 0,81 \cdot 0,16 \cdot 2 = 2,55 \text{ m}^3$$

$$A = 9,85 \cdot (0,16 + 0,81) \cdot 2 = 19,11 \text{ m}^2$$

$$d_{Binder, Eingabe} = \frac{2,55}{19,11 \cdot 0,5} = 0,267 \text{ m}$$

Pfettenkonstruktion für Deckenrost :

$$V = 10 \cdot (4,76 \cdot 0,16 \cdot 0,08) = 0,61 \text{ m}^3$$

$$A = 10 \cdot 4,76 \cdot (0,16 \cdot 2 + 0,08) = 19,04 \text{ m}^2$$

$$d_{QT, Eingabe} = \frac{0,61}{19,04 \cdot 0,5} = 0,064 \text{ m}$$

Simulationsergebnisse TRNSYS

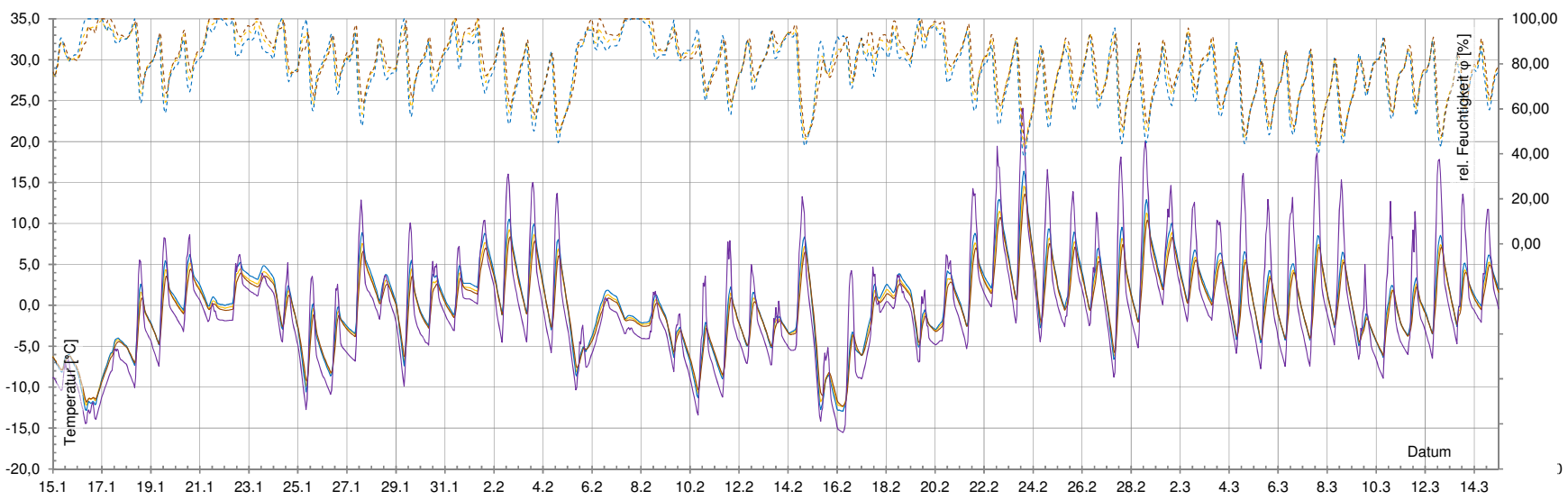
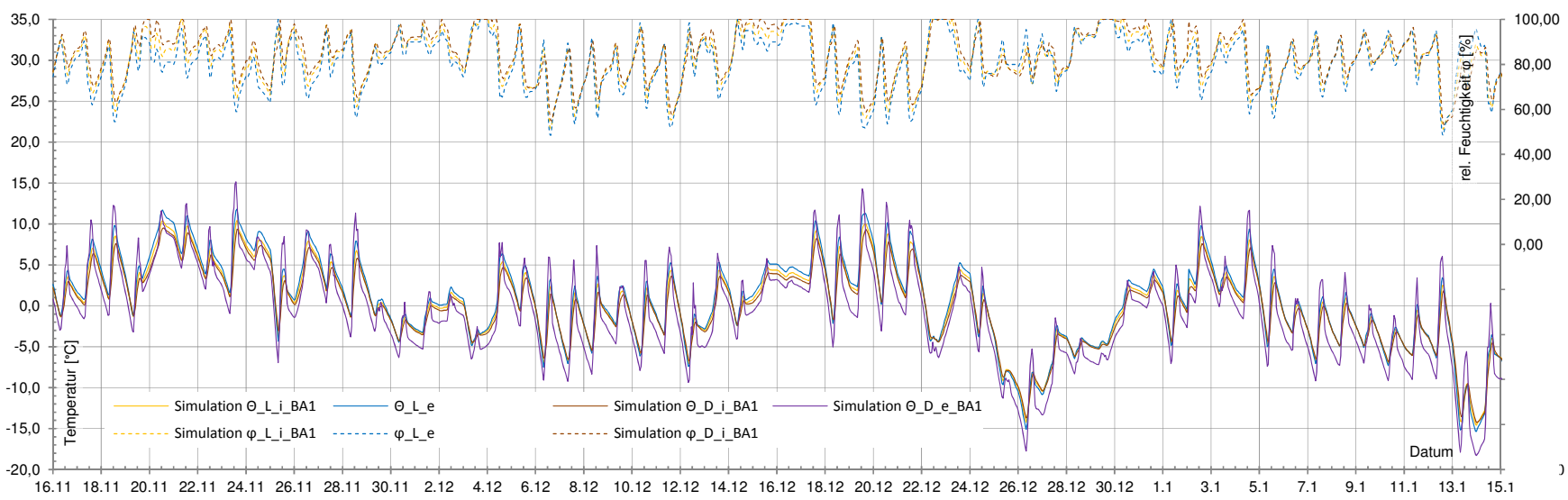


Abb. A- 14: Grafische Darstellung der Simulation des BA1, $\alpha = 0,65$

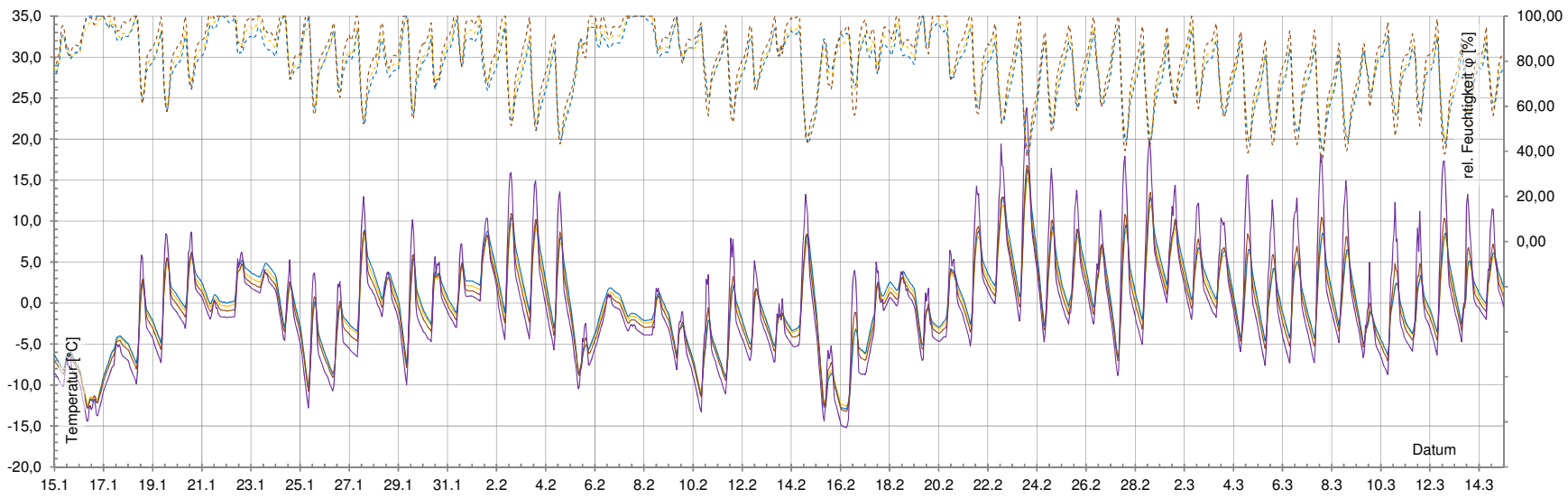
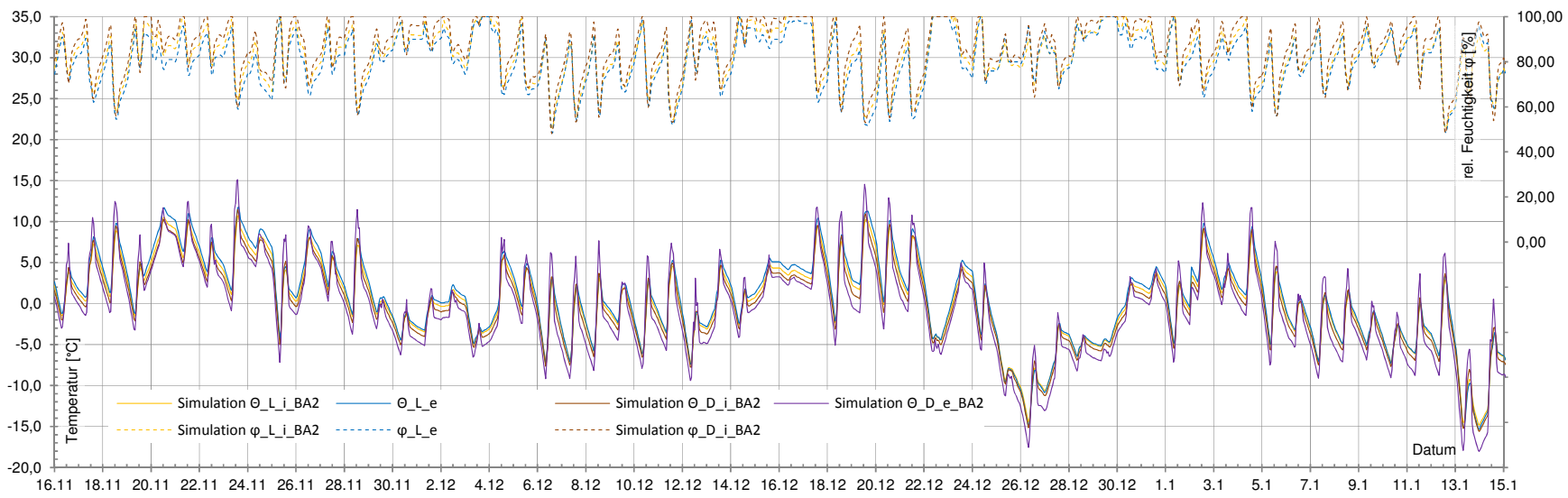


Abb. A- 15: Grafische Darstellung der Simulation des BA2, $\alpha = 0,65$

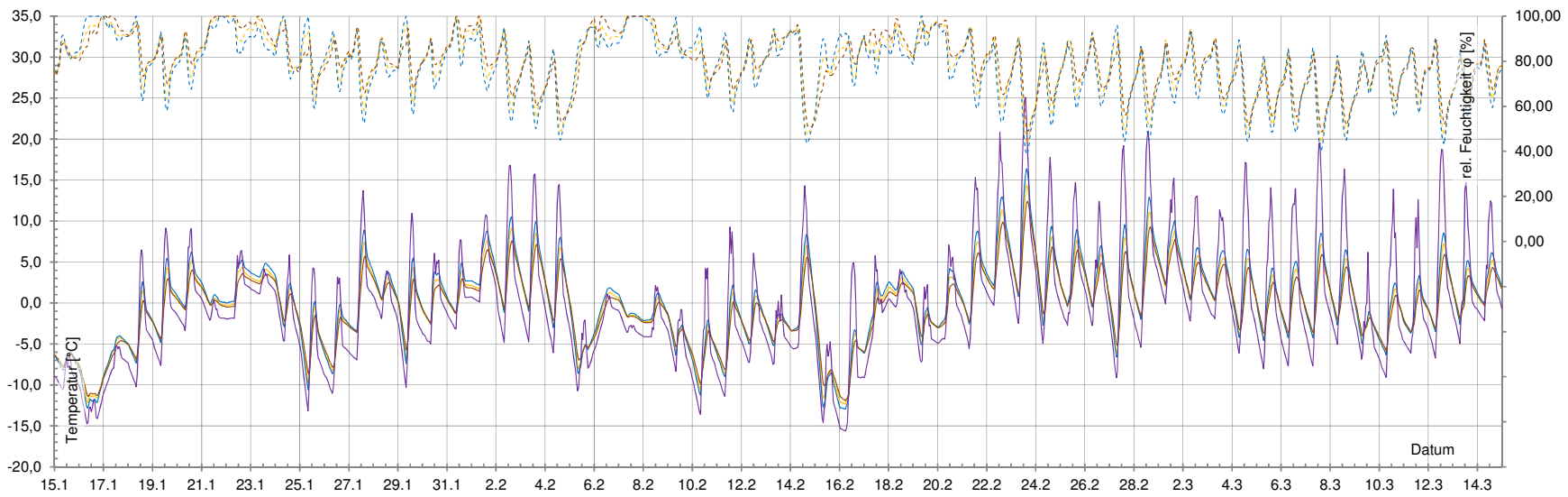
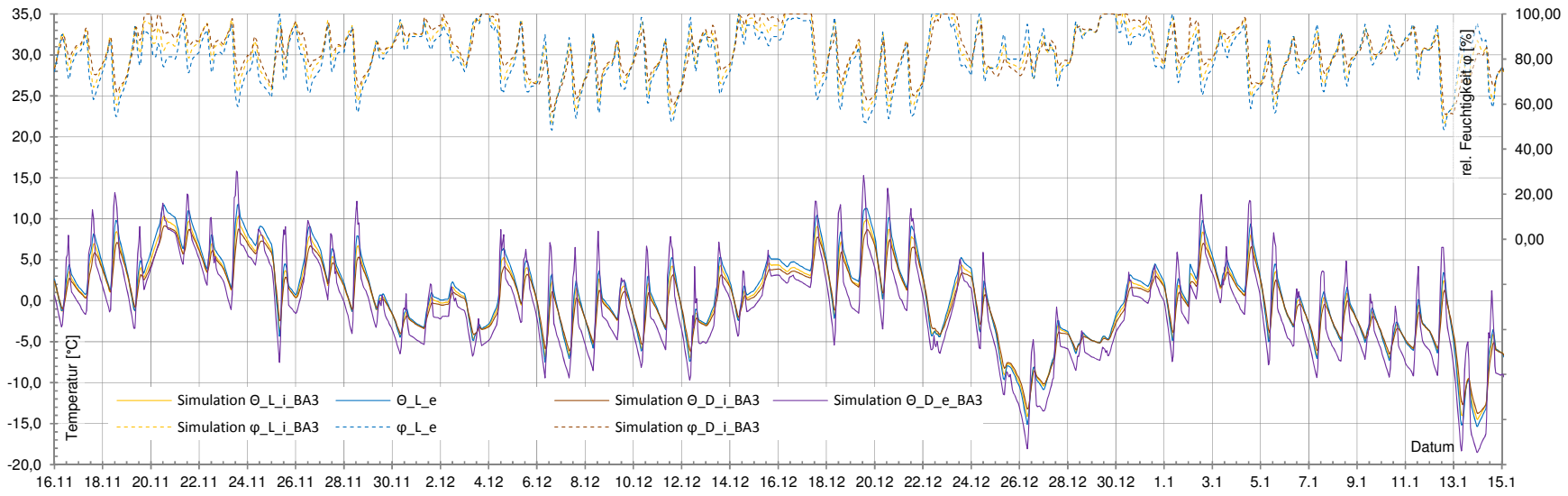


Abb. A- 16: Grafische Darstellung der Simulation des BA3, $\alpha = 0,65$

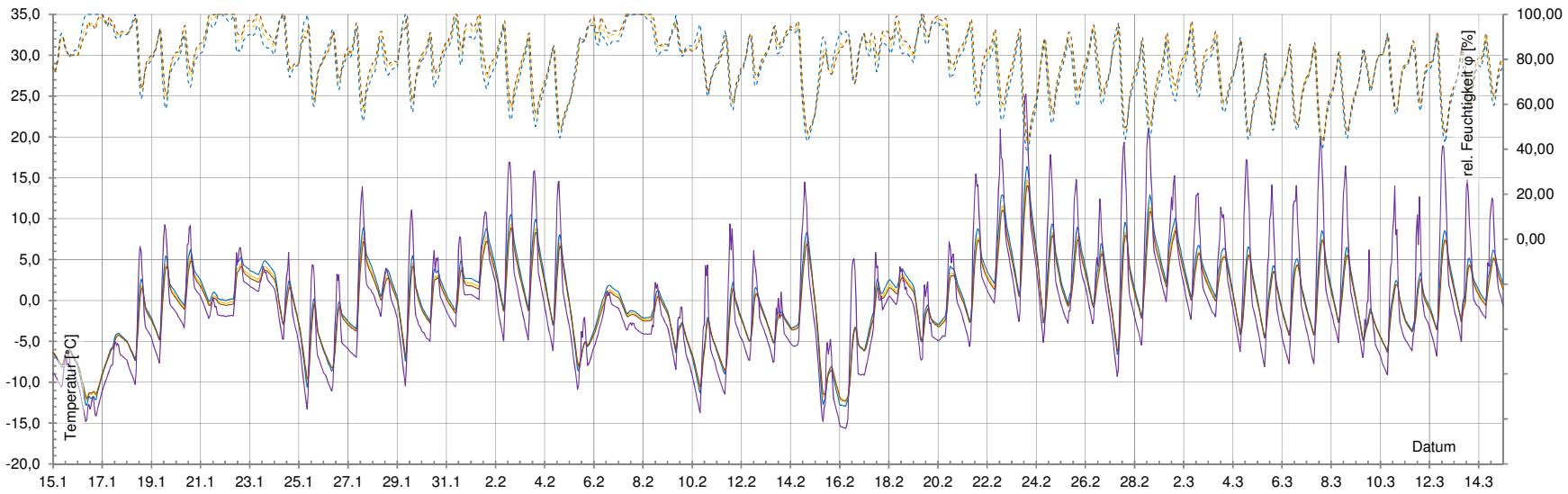
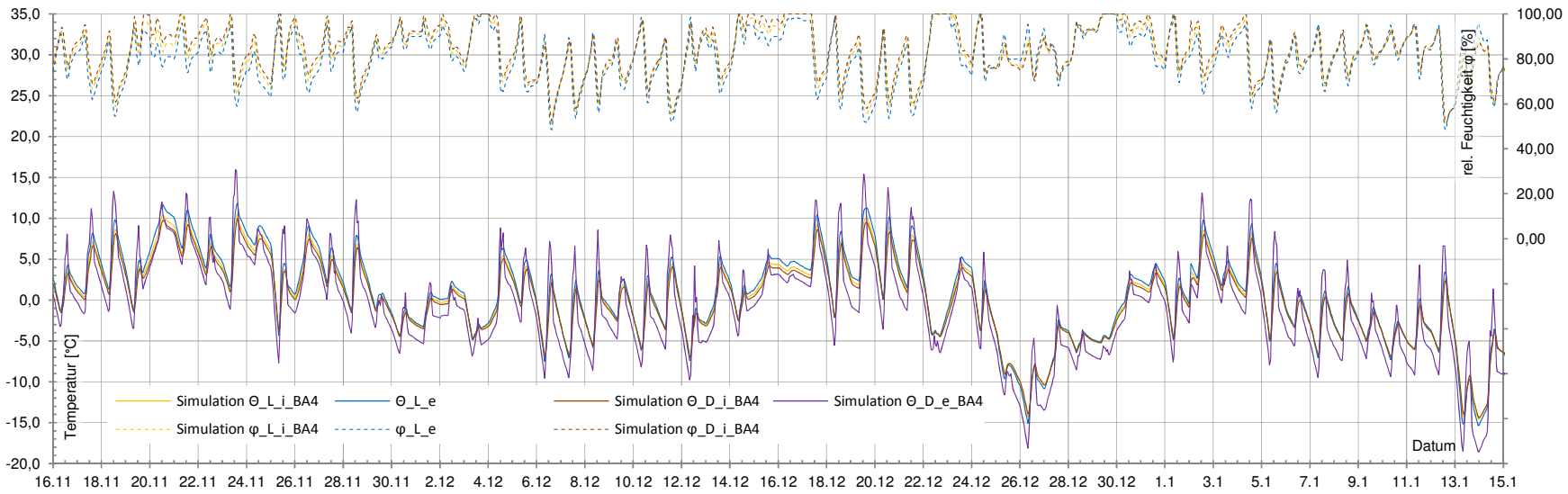


Abb. A- 17: Grafische Darstellung der Simulation des BA4, $\alpha = 0,65$

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1-1: Fallbeispiel für den Eissporthallentyp I, Fritzen [2, S.40]	3
Abb. 1-2: Fallbeispiel für den Eissporthallentyp II, Marquardt und Mainka [4, S.91,92].....	3
Abb. 2-1: Temperaturverlauf in einer einschichtigen homogenen Platte	7
Abb. 2-2: Parameter für die erzwungene Konvektion einer längsangeströmten Platte nach Glück [13, S.21]	10
Abb. 2-3: Parameter für die freie Konvektion einer horizontalen Platte nach Glück [13, S.22].....	11
Abb. 2-4: Spektralspezifische Ausstrahlung des schwarzen Strahlers in logarithmischer Darstellung laut Baehr [15, S.619].....	13
Abb. 2-5: Spiegelnd und diffus reflektierende Oberfläche nach Baehr[15, S.611].....	15
Abb. 2-6: Strahlungsschutzschirme zwischen zwei gleich großen parallelen Flächen nach Baehr [15, S.687]	17
Abb. 2-7: Geometrische Beziehungen zwischen Flächenelementen und symbolische Darstellung der Einstrahlzahlen laut Glück [9, S.168, S.169].....	18
Abb. 2-8:Einstrahlzahlen einer Rechteckfläche auf die übrigen Rechteckflächen im quaderförmigen Raum nach Glück [17, S.350].....	19
Abb. 2-9: Grafische Darstellung zur Summationsbeziehung und dem Zerlegungsetz nach [20, S.Ka 7]	20
Abb. 2-10:Einstrahlzahlen F_{12} unterschiedlicher Fälle im quaderförmigen Raum nach Glück[17], [9] bzw. nach Kollmar und Liese [18].....	20
Abb. 2-11: Schematische Darstellung des Wärmedurchganges laut Fischer [8, S.123].....	21
Abb. 2-12: Allgemeines Signalflossbild einer Temperaturmesseinrichtung mit Berührungsthermometer laut Bernhard [24, S.59].....	23
Abb. 2-13:Wärmeströme, Isothermen und Temperaturverläufe laut Bernhard [24, S.123].....	24
Abb. 2-14: Lufttemperaturmessung, thermische Kopplung und Einflussfaktoren laut Bernhard [24, S.200]	25
Abb. 3-1: Außenansichten der Eishalle Bergheim (© Paul Ott, Graz))	29
Abb. 3-2: Innenansichten der Eishalle Bergheim (© Paul Ott, Graz)).....	30
Abb. 3-3: Grundriss der Eishalle Bergheim; Lage der Messpunkte; überarbeitet nach mfgarchitekten [6]; Legende siehe Abb. 3-4	31
Abb. 3-4: Schnitte der Eishalle Bergheim; Lage der Messpunkte; überarbeitet nach mfgarchitekten [6]	32
Abb. 3-5: Dachraum und Oberlicht der Eishalle Bergheim	33
Abb. 3-6: Messunsicherheiten der verwendeten Temperaturmesssysteme laut Gemini Data Loggers [30].....	35
Abb. 3-7: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung 2010, Tagesmittelwerte sowie Kennzeichnung ausgewählter Tage	38
Abb. 3-8: 10-Minutenwerte der Messung 2010 - Tage mittlerer Bewölkung - Winternutzung.....	39
Abb. 3-9: 10-Minutenwerte der Messung 2010 - trübe Tage, Schnee am Dach - Winternutzung	41
Abb. 3-10: 10-Minutenwerte der Messung 2010 – mittlere Bewölkung, heitere Tage - Sommernutzung	42
Abb. 3-11: $\Delta\phi_{L_i_e}$ in Abhängigkeit der Häufigkeit – Messung 2010 - Winternutzung	44
Abb. 3-12: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessung 2010/11 Tagesmittelwerte.....	46
Abb. 3-13: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – trübe Tage - Winternutzung	47
Abb. 3-14: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – trübe Tage - Winternutzung	47

Abb. 3-15: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – an Tagen mittlerer Bewölkung, Schnee am Dach - Winternutzung	48
Abb. 3-16: 30-Minutenwerte der Messung 2010/2011 – heitere Tage - Winternutzung	49
Abb. 3-17: $\Delta\phi_{L_i_e}$ und $\Delta\phi_{LOL_i_e}$ in Abhängigkeit der Häufigkeit – Winternutzung 2010/2011 ...	50
Abb. 4-1: Horizontale Windgeschwindigkeiten auf Basis der logarithmischen Höhenformel	54
Abb. 4-2: Grundriss des Obergeschosses mit dem Versuchsraum und den Anströmrichtungen des Experiments [nach 35, S.1766,1771].....	56
Abb. 4-3: Pfade für n_{DR-e} , n_{HR-e} und n_{DR-HR}	57
Abb. 4-4: Größenordnungen für $h_{cv,zwang}$ und $h_{cv,frei}$ nach Gl. 2-16 bis Gl. 2-24	59
Abb. 4-5: Größenbereich der Mischkonvektion $h_{cv,D,i}$ durch Überlagerung von $h_{cv,zwang}$ und $h_{cv,frei}$	59
Abb. 4-6: Modell 1 – langwelliger Strahlungsaustausch ohne Deckenrost	63
Abb. 4-7: GA2 bis GA5 in Modell 1 der Eissporthalle Bergheim.....	65
Abb. 4-8: Detaillierte Darstellung des GA2 für die Berechnung von F_{ED}	66
Abb. 4-9: Grundrissdarstellung (Ausschnitt 1 m ²) des Deckenrosts der offenen Eissporthalle Bergheim	68
Abb. 4-10: Annahme des langewelligen Strahlungsaustauschs in Modell 2.....	68
Abb. 4-11: Modell 2 – langwelliger Strahlungsaustausch mit Deckenrost	69
Abb. 4-12: Modell 3 – langwelliger Strahlungsaustausch mit vereinfachtem Deckenrost.....	72
Abb. 4-13: Symbolische Darstellung Modell 4	73
Abb. 5-1: Einstrahlzahlen-Netzwerk und Stern-Netzwerk einer Zone im Handbuch zu TRNSYS [38, S.6-123] ,Seem [39, S.43], Meyer [40, S.188].....	78
Abb. 5-2: Simulationsmodell der Eissporthalle mit dem Stern-Netzwerk im Type56 nach TRNSYS [40, S.6-123], Seem [41, S.43]	80
Abb. 5-3: Vergleich zwischen der Messung 2010 und der Simualtion ($h_{cv,E} = 3,0$, $n = 24$, $h_{cv,D,i} = 11,0$)	82
Abb. 5-4: Untersuchte Dachaufbauten	83

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2-1: Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c und Wärmeleitfähigkeit λ ausgewählter Stoffe	9
Tab. 2-2: Stoffwerte der Luft bei einem Druck von 1 bar nach Glück [14, S.83ff].....	11
Tab. 2-3: Gegenüberstellung der Absorptionsgrade α_S für Solarstrahlung und Emissionsgrade ϵ für Wärmestrahlung verschiedener Materialien laut Baehr [15] und VDI-Wärmeatlas [16]	15
Tab. 2-4: Wärmeübergangswiderstände laut ÖNORM EN ISO 6946 [21, S.9].....	22
Tab. 2-5: Gegenüberstellung von Normen nach DIN und ähnlichlautender ÖNORM.....	27
Tab. 2-6: Zuordnung von Tragwerken zu Nutzungsklassen laut ÖNORM B 1995-1-1 [26, S.7].....	28
Tab. 3-1: Erfasste Messgrößen der Messung 2010 und 2010/2011.....	36
Tab. 3-2: Vergleich der Messwerte um 06:00 Uhr des 24.02.2010 mit denen des 25.02.2010	40
Tab. 3-3: Extrem- und Mittelwerte von $p_{L,i}$, $p_{L,e}$ und $\Delta p_{L,i,e}$ der Messung 2010 - Winternutzung	43
Tab. 3-4: Extrem- und Mittelwerte von $\phi_{L,i}$, $\phi_{L,e}$ - $\Theta_{L,i}$ und $\Delta\phi_{L,i,e}$ der Messung 2010 - Winternutzung	44
Tab. 3-5: Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010 – Winternutzung (21.02 bis 15.03.).....	45
Tab. 3-6: Extrem- und Mittelwerte $\Delta p_{L,i,e}$, $\Delta p_{LOL,i,e}$ der Messung 2010/2011 - Winternutzung.....	50
Tab. 3-7: Relative Häufigkeit von $\Delta\phi_{L,i,e}$ und $\Delta\phi_{LOL,i,e}$ – Winternutzung 2010/2011	51
Tab. 3-8: Extrem- und Mittelwerte der Messung 2010/2011 Winternutzung.....	51
Tab. 4-1: Windgeschwindigkeiten v_{10} in Abhängigkeit der Windrichtung bzw. der Summe der Beobachtungen vom 21.02. bis 15.03.2010	53
Tab. 4-2: Windgeschwindigkeiten $v_{hcv,E}$, $v_{hcv,D}$ und v_{10}	54
Tab. 4-3: Durchschnittliche, minimale und maximale Abweichungen der mit den Berechnungsansätzen ermittelten Luftwechselzahl vom Experiment [nach 36 S.1772].....	56
Tab. 4-4: Luftwechselzahlen für den einseitigen Luftwechsel der offenen Eissporthalle Bergheim.....	57
Tab. 4-5: Grenzwerte für $h_{cv,E}$ und $h_{cv,D,i}$	60
Tab. 4-6: Komponenten des Modells 4 der Eissporthalle	61
Tab. 4-7: Wärmeströme in Modell 4	62
Tab. 4-8: Berechnung von F_{ED} in GA2.....	64
Tab. 4-9: Modell 1 - Berechnung von $\Theta_{D,i}$ in Abhängigkeit unterschiedlicher $h_{cv,D,i}$ und Geometrieansätze GA	67
Tab. 4-10: F_{DR} und F_{ER} auf Basis von GA5.....	69
Tab. 4-11: Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$ ohne und mit Deckenrost (Modell 1 und 2).....	71
Tab. 4-12: Rechenwerte für $\Theta_{D,i}$, $\Theta_{R,o}$, $\Theta_{R,u}$, Θ_R (Modell 2 und Modell 3).....	73
Tab. 4-13: Randbedingungen für die Rechenwerte in Tab. 4-14 bis Tab. 4-17	74
Tab. 4-14: Einfluss von $h_{cv,E}$ auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$	75
Tab. 4-15: Einfluss von n auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$	75
Tab. 4-16: Einfluss von $h_{cv,D,i}$ auf die Rechenwerte für $\Theta_{L,i}$ und $\Theta_{D,i}$	75
Tab. 4-17: Kombinationen von n und $h_{cv,E}$, damit die Rechenwerte die Mittelwerte der Messwerte abbilden	76
Tab. 5-1: Berechnungsergebnisse aus TRNSYS und EES (Modell 4)	79
Tab. 5-2: Simulationsergebnisse der Parametervariation.....	81
Tab. 5-3: Simulationsergebnisse für DA1 bis DA4 mit $\alpha_S = 0,65$	83
Tab. 5-4: Simulationsergebnisse für DA1 bis DA4 mit $\alpha_S = 0,85$	83