

HCU

HafenCity Universität
Hamburg

Diplomarbeit

Energetische Untersuchung der Kühlräume
eines Lebensmittelbetriebes

Stefan Ehringer
Matrikelnr. 1736682

Ausgabetermin 13. Oktober 2008
Abgabetermin 22. Dezember 2008

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Diplomarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

22.12.2008

.....

Datum

Unterschrift

Danksagung

Für die Betreuung meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei meinem Referenten Prof.-Dr.-Ing. Peter Klotz bedanken.

Weiterer Dank gilt Dipl.-Ing. Kai Eckert vom Ingenieurbüro Eckert & Soltysiak für die Unterstützung bei der Themenfindung und für die Übernahme der Aufgabe des Koreferenten.

Und natürlich bin ich Allen sehr dankbar, die mich während der Bearbeitungszeit der Diplomarbeit unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VII
Symbole	IX
1. Einleitung	1
2. Allgemeines zum Neubau von Lebensmittelbetrieben	2
2.1. Kälteanlagen	2
2.2. Kühlräume.....	3
2.3. Tiefkühlräume.....	4
2.4. Hygiene	5
3. Grundlagen für die Erstellung der Untersuchung	7
3.1. Wandaufbau.....	7
3.2. Decken / Dächer.....	8
3.3. Bodenaufbau.....	9
3.4. Unterfrierschutz.....	10
4. Wärmebrücken.....	12
4.1. Tauwasserbildung	12
5. Nutzenergiebedarf nach DIN V 18599	20
5.1. Bilanzierung	21
5.2. Nutzungsrandbedingungen und Klimadaten	21
5.3. Nutzenergiebedarf für Kühlen nach DIN 18599	22
5.3.1. Transmissionswärmequellen	24
5.3.2. Lüftungswärmequellen.....	28
5.3.3. Wärmequellen über opake Bauteile	31
5.3.4. interne Wärmequellen.....	32
5.3.5. Ausnutzungsgrad von Wärmequellen	35
6. Berechnungen.....	36
6.1. Raumgeometrien.....	36
6.2. Raum-Solltemperaturen	36
6.3. U-Werte.....	37
6.4. Klimadaten	39
6.5. Weitere Randbedingungen.....	40

7.	Ergebnisse	43
7.1.	Kühlraum I.....	43
7.1.1.	wirtschaftliche Betrachtung	44
7.2.	Kühlraum II.....	46
7.2.1.	wirtschaftliche Betrachtung	47
7.3.	Kühlraum III.....	49
7.3.1.	mit Bodendämmung.....	49
7.3.2.	ohne Bodendämmung	50
7.3.3.	wirtschaftliche Betrachtung	51
7.4.	Kühlraum IV	54
7.4.1.	mit Bodendämmung.....	54
7.4.2.	ohne Bodendämmung	55
7.4.3.	wirtschaftliche Betrachtung	56
7.5.	Kühlraum V	59
7.5.1.	mit Bodendämmung.....	59
7.5.2.	ohne Bodendämmung	60
7.5.3.	wirtschaftliche Betrachtung	61
7.6.	Kühlraum VI	64
7.6.1.	mit Bodendämmung.....	64
7.6.2.	ohne Bodendämmung	65
7.6.3.	wirtschaftliche Betrachtung	66
7.7.	Kühlraum VII	69
7.7.1.	mit Bodendämmung.....	69
7.7.2.	ohne Bodendämmung	70
7.7.3.	wirtschaftliche Betrachtung	71
7.8.	Kühlraum VIII.....	74
7.8.1.	mit Bodendämmung.....	74
7.8.2.	ohne Bodendämmung	75
7.8.3.	wirtschaftliche Betrachtung	76
8.	Zusammenfassung.....	79
9.	Fazit	82
10.	Literaturverzeichnis	83
11.	Anlagen.....	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Hoesch Thermowand	7
Abbildung 2 - maximaler Wassergehalt der Luft	13
Abbildung 3 - durchlaufende Stütze an Außenwand.....	15
Abbildung 4 - Temperaturverlauf des Kühl- und Dachraums.....	16
Abbildung 5 - Taupunkttemperatur von Luft bei 20°C.	16
Abbildung 6 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze im Kühlraumbereich.....	17
Abbildung 7 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze im Dachbereich.....	17
Abbildung 8 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze in beiden Bereichen.....	18
Abbildung 9 - Temperaturverlauf in Hamburg 2006	22
Abbildung 10 - Bodenaufbau.....	38
Abbildung 11 - Temperaturen der Jahre 2000-2007	39
Abbildung 12 - Durchschnittstemperatur 2006.....	40
Abbildung 13 - schematische Grundrissdarstellung.....	41
Abbildung 14 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum I.....	43
Abbildung 15 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum II.....	46
Abbildung 16 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum III mit Bodendämmung	49
Abbildung 17 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum III ohne Bodendämmung.....	50
Abbildung 18 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum IV mit Bodendämmung.....	54
Abbildung 19 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum IV ohne Bodendämmung	55
Abbildung 20 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum V mit Bodendämmung.....	59
Abbildung 21 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum V ohne Bodendämmung	60
Abbildung 22 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VI mit Bodendämmung.....	64
Abbildung 23 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VI ohne Bodendämmung	65
Abbildung 24 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VII mit Bodendämmung.....	69
Abbildung 25 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VII ohne Bodendämmung	70
Abbildung 26 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VIII mit Bodendämmung.....	74
Abbildung 27 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VIII ohne Bodendämmung	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Taupunkttemperaturen	14
Tabelle 2 - Wärmestrom je Person	33
Tabelle 3 - Dämmstandard Tiefkühlräume	37
Tabelle 4 - Dämmstandard Kühlräume	38
Tabelle 5 - Geometrie und Raumtemperatur der Kühlräume	42
Tabelle 6 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum I	43
Tabelle 7 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum I	44
Tabelle 8 - Einsparungen Kühlraum I	44
Tabelle 9 - Kosten der Dämmstandards	44
Tabelle 10 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum II	46
Tabelle 11 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum II	47
Tabelle 12 - Einsparungen Kühlraum II	47
Tabelle 13 - Kosten der Dämmstandards	47
Tabelle 14 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum III mit Bodendämmung	49
Tabelle 15 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum III ohne Bodendämmung	50
Tabelle 16 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum III mit Bodendämmung	51
Tabelle 17 - Einsparungen Kühlraum III mit Bodendämmung	51
Tabelle 18 - Kosten der Dämmstandards	52
Tabelle 19 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum III ohne Bodendämmung	52
Tabelle 20 - Mehrkosten Kühlraum III ohne Bodendämmung	53
Tabelle 21 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum IV mit Bodendämmung	54
Tabelle 22 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum IV ohne Bodendämmung	55
Tabelle 23 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum IV mit Bodendämmung	56
Tabelle 24 - Einsparungen Kühlraum IV mit Bodendämmung	56
Tabelle 25 - Kosten der Dämmstandards	57
Tabelle 26 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum IV ohne Bodendämmung	57
Tabelle 27 - Mehrkosten Kühlraum IV ohne Bodendämmung	58
Tabelle 28 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum V mit Bodendämmung	59
Tabelle 29 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum V ohne Bodendämmung	60
Tabelle 30 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum V mit Bodendämmung	61
Tabelle 31 - Einsparungen Kühlraum V mit Bodendämmung	61
Tabelle 32 - Kosten der Dämmstandards	62
Tabelle 33 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum V ohne Bodendämmung	62
Tabelle 34 - Mehrkosten Kühlraum V ohne Bodendämmung	63
Tabelle 35 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VI mit Bodendämmung	64
Tabelle 36 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VI ohne Bodendämmung	65
Tabelle 37 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VI mit Bodendämmung	66
Tabelle 38 - Einsparungen Kühlraum VI mit Bodendämmung	66

Tabelle 39 - Kosten der Dämmstandards	67
Tabelle 40 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VI mit Bodendämmung	67
Tabelle 41 - Mehrkosten Kühlraum VI ohne Bodendämmung	68
Tabelle 42 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VII mit Bodendämmung	69
Tabelle 43 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VII ohne Bodendämmung	70
Tabelle 44 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VII mit Bodendämmung	71
Tabelle 45 - Einsparungen Kühlraum VII mit Bodendämmung	71
Tabelle 46 - Kosten der Dämmstandards	72
Tabelle 47 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VII ohne Bodendämmung	72
Tabelle 48 - Mehrkosten Kühlraum VII ohne Bodendämmung	73
Tabelle 49 - monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VIII mit Bodendämmung	74
Tabelle 50 - zusätzlicher monatlicher Nutzkältebedarf Kühlraum VIII ohne Bodendämmung	75
Tabelle 51 - Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VIII mit Bodendämmung	76
Tabelle 52 - Einsparung Kühlraum VIII mit Bodendämmung	76
Tabelle 53 - Kosten der Dämmstandards	77
Tabelle 54 - zusätzlicher Nutz- und Endenergiebedarf Kühlraum VIII ohne Bodendämmung	77
Tabelle 55 - Mehrkosten Kühlraum VIII ohne Bodendämmung	78
Tabelle 56 - Zusammenfassung der Kühlräume	79

Symbole

Symbol	Bedeutung	übliche Einheit
A	Fläche	m ²
A _B	Bezugsfläche	m ²
B'	charakteristisches Bodenplattenmaß	m
c	spezifische Wärmekapazität	kJ/(kg·K), Wh/(kg·K)
c _{wirk}	wirksame Wärmekapazität der Gebäudezone	kJ/K, Wh/K
d _{mth}	Anzahl der Tage des Monats	d/mth
d _t	wirksame Gesamtdicke der Bodenplatte	m
e _{wind}	Windschutzkoeffizient	--
F _f	Strahlungswirksamer Formfaktor zwischen Bauteil und Himmel bzw. Teilbestrahlungsfaktor für seitliche Abschattungsflächen	--
h _r	Äußerer Abstrahlungskoeffizient	W/(m ² ·K)
H	Wärmetransferkoeffizient allgemein	W/K
H _T	Wärmetransferkoeffizient für Transmission für die gesamte Gebäudezone	W/K
H _{T,D}	Wärmetransferkoeffizient für Transmission zwischen beheizter Gebäudezone und Außenluft	W/K
H _{T,s}	Wärmetransferkoeffizient für Transmission über das Erdreich	W/K
H _{T,iz}	Wärmetransferkoeffizient zwischen der betrachteten Zone i und der benachbarten Gebäudezone z	W/K
H _V	Wärmetransferkoeffizient für Lüftung	W/K
H _{V,inf}	Wärmetransferkoeffizient für Infiltration	W/K
H _{V,win}	Wärmetransferkoeffizient für Fensterlüftung	W/K
I _s	Mittlere monatliche Strahlungsintensität der Sonne	W/m ²
L _S	stationär thermischer Leitwert nach DIN EN ISO 13370	W/K
\dot{m}	Massestrom eines Stoffes	kg/h
n	Luftwechselrate nach DIN EN ISO 7345	h ⁻¹
n ₅₀	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz	h ⁻¹
n _{inf}	Infiltrationsluftwechsel	h ⁻¹
n _{nutz}	nutzungsbedingter Mindestluftwechsel	h ⁻¹

n_{win}	mittlerer täglicher Fensterluftwechsel	h^{-1}
Δn_{win}	zusätzlicher Fensterluftwechsel während der Nutzungszeit	h^{-1}
P	exponierter Umfang der Bodenplatte	m
$q_{i,p}$	Durchschnittliche tägliche Wärmeabgabe von Personen	Wh/(m ² ·d)
Q	Wärme, Wärmemenge nach DIN EN ISO 7345	Wh, kWh, Wh/a, kWh/a
$Q_{c,b}$	Bilanzierter Kühlbedarf der Gebäudezone	Wh, kWh
Q_I	Interne Wärmeeinträge	Wh, kWh
$Q_{i,L,elektr}$	täglicher elektrischer Energiebedarf für Beleuchtung	Wh, kWh
$Q_{i,source,goods}$	Wärmequelle durch Stofftransport	Wh, kWh
Q_{source}	Wärmequellen	Wh, kWh
Q_S	Solarwärmeeinträge, Strahlungswärme	Wh, kWh
$Q_{S,op}$	Wärmequelle durch Strahlung auf opake Flächen	Wh, kWh
Q_T	Transmissionswärmequellen	Wh, kWh
$Q_{T,e}$	Transmission durch Außenbauteile	Wh, kWh
$Q_{T,z}$	Transmission von angrenzenden Gebäudezonen	Wh, kWh
$Q_{T,s}$	Transmission über das Erdreich	Wh, kWh
Q_V	Lüftungswärmequellen	Wh, kWh
$Q_{V,inf}$	Lüftungswärmequellen durch Infiltration	Wh, kWh
$Q_{V,win}$	Lüftungswärmequellen durch Fensterlüftung	Wh, kWh
R	Wärmedurchlasswiderstand, Wärmeübergangswiderstand	(m ² ·K)/W
R_f	Wärmedurchlasswiderstand der Bodenplatte	(m ² ·K)/W
R_{si}	innerer Wärmeübergangswiderstand	(m ² ·K)/W
R_{se}	äußerer Wärmeübergangswiderstand	(m ² ·K)/W
t	Zeitspanne	h
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(m ² ·K)
U_0	Grundwert des Wärmedurchgangskoeffizienten der Bodenplatte	W/(m ² ·K)
ΔU_{WB}	pauschaler außenflächenbezogener Wärmebrückenzuschlag	W/(m ² ·K)
V	Raumvolumen	m ³
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s, m ³ /h
w	Dicke der Außenwand	m

α	Strahlungsabsorptionsgrad (an opaken Oberflächen)	--
θ_e	Außenlufttemperatur	°C
θ_i	Innentemperatur	°C
θ_{in}	Eintrittstemperatur	°C
θ_{out}	Austrittstemperatur	°C
θ_z	Temperatur eines angrenzenden Bereichs	°C
$\Delta\theta_{er}$	Differenz der Außenlufttemperatur und der Himmelstemperatur	K
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
ρ	Rohdichte	kg/m ³
μ_L	Raumbelastungsgrad für Beleuchtung	--

1. Einleitung

Die durch den Menschen hervorgerufene globale Erwärmung ist seit den 80er Jahren ein wichtiges Thema im Umweltschutz. So wird unter anderem durch das Verbrennen von fossilen Brennstoffen, z. B. für die Stromerzeugung, CO₂ in der Atmosphäre angereichert. Der daraus resultierende Anstieg der Durchschnittstemperatur auf der Erde hat eine Vielzahl globaler Folgen für die Flora und Fauna.

Um den CO₂-Ausstoß und den Verbrauch von begrenzten Ressourcen merklich zu reduzieren, werden die Richtlinien und Normen im Bauwesen bzgl. Energieeinsparungen immer detaillierter verfasst, und die Anforderungen bei Neubauten und Altbausanierungen werden stetig anspruchsvoller.

Für die energetische Bewertung von Gebäuden, insbesondere von Nicht-Wohngebäuden, gibt es seit dem Jahr 2005 die DIN V 18599. Mit Hilfe der Vornormenreihe sollen Nicht-Wohngebäude bewertet und gegebenenfalls optimiert werden, um die zukünftigen Anforderungen der Energieeinsparverordnung einzuhalten.

Kühlräume sind bisher noch nicht in den Normen und Richtlinien erfasst, so dass gerade in diesem Bereich großes Einsparpotenzial steckt. In der folgenden Untersuchung wird der Nutzkältebedarf für unterschiedliche Kühlräume mit verschiedenen Randbedingungen, wie Geometrie der Räume sowie Raumtemperatur, anhand der DIN V 18599 Teil 2 ermittelt und bewertet. Es sollen Aussagen über die Auswirkungen unterschiedlicher Dämmstandards auf den Energiebedarf erarbeitet werden.

Vorab werden der Aufbau und die Anforderungen an einen Lebensmittelbetrieb kurz erläutert.

2. Allgemeines zum Neubau von Lebensmittelbetrieben

Bei dem Neubau eines Lebensmittelbetriebes muss ein hoher Standard an Betriebs- und Produkthygiene gewährleistet werden. Das Gebäude wird, um die Hygienevorschriften einzuhalten, in schwarze und weiße Bereiche unterteilt. In den schwarzen Bereichen ziehen sich die Mitarbeiter um und gelangen dann über Schleusen in die weißen Bereiche, in denen die Lebensmittel verarbeitet werden. Ab hier ist ein erhöhtes Maß an Hygiene einzuhalten. Um diese gewährleisten zu können, ist es notwendig, Lebensmittel schon bei der Herstellung zu kühlen. So können sich die Mikroorganismen nicht mehr oder nur noch vereinzelt vermehren. Dies geschieht in der Regel bei einer maximalen Temperatur von bis zu 10°C. Je nach Produkt unterscheiden sich die Lager- und Verarbeitungstemperaturen. Für den Transport und die Lagerung von Schlachtkörpern als Beispiel gibt der Gesetzgeber eine Kerntemperatur von +7°C vor.¹

2.1. Kälteanlagen

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre sagt, Wärme kann nicht von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen.

Um einen Kühlraum auf ein bestimmtes Temperaturniveau zu bringen, muss ihm demnach Wärme entzogen werden. Wärme ist eine Form von Energie und kann von einem Körper zu einem anderen übertragen werden, wenn zwischen den Körpern eine Temperaturdifferenz vorhanden ist.

In der Kältetechnik gibt es je nach Art und Nutzung verschiedene Verfahren einem Raum Wärme zu entziehen. Bei größeren Kälteanlagen geschieht dies in der Regel über die Verdampfung. Ein flüssiges Kältemittel nimmt während seiner Verdampfung Wärme auf. Diese Phasenänderung erzeugt in einem Kältemittelkreislauf Kälte.

¹ Verordnung (EG) Nr. 853/2004, Anhang III, Kapitel V Abs 2b, 30.04.2004

Bei der Auswahl des Kältemittels müssen diverse Kriterien beachtet werden. Der Einsatz von FCKW (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) in Kälteanlagen ist in Neubauten laut der EG-Verordnung 3093/94² seit dem 01.01.1995 verboten und der Einsatz von H-FCKW (teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe) wird ab dem 01.01.2015 verboten sein. Die FCKW sind in großem Umfang mit an der Ozonlochbildung beteiligt und tragen außerdem zum Treibhauseffekt bei.

Die wichtigsten Anforderungen an Kältemittel stehen im Folgenden in der Reihenfolge, in der die Kriterien gewichtet werden sollten:

- Ökologische Eigenschaften
- Thermodynamische Eigenschaften
- Physikalische Eigenschaften
- Chemische Eigenschaften
- Physiologische Eigenschaften

2.2. Kühlräume

Die Kühlräume eines Lebensmittelbetriebes bilden ein wichtiges Glied in der Kette zwischen Produktion und Verbrauch von Lebensmitteln. Durch Kältebehandlung und -einwirkung werden Lebensmittel über einen bestimmten Zeitraum vor dem Verderb geschützt. Die Dauer der Haltbarkeit von Lebensmitteln ist dabei stark von der Lagertemperatur abhängig, die bei Kühlräumen im positiven wie auch im negativen Temperaturbereich liegen kann. Die ständige Einhaltung der erforderlichen Lagertemperatur ist dabei von wesentlicher Bedeutung für die Lebensmittel und wird in der Verordnung (EG) Nr. 852/2004 des Europäischen Parlaments³ und für Lebensmittel tierischen Ursprungs in der Verordnung (EG) Nr. 853/2004 des Europäischen Parlaments⁴ geregelt. Die Kontrollen der Temperaturen erfolgen meistens über Temperaturfühler, die in den Räumen

² Verordnung (EG) Nr. 3093/94, Artikel 4 Abs. 1, 15.12.1994

³ Verordnung (EG) Nr. 852/2004, Artikel 1 Abs. 1c, 30.04.2004

⁴ Verordnung (EG) Nr. 853/2004, Anhang III, Kapitel V Abs 2b, 30.04.2004

angebracht sind oder über direkte Warentemperaturmessungen. Die Temperaturen des Lagerguts müssen lückenlos protokolliert werden.

Kühlräume werden je nach Nutzungsbereich in verschiedenen Größen gebaut. Die Größe sollte dabei von innen nach außen bemessen werden, so dass sie an das zu lagernde Gut und die Anzahl angepasst wird. Die Raumhöhe spielt eher für die Logistik eine Rolle, da große Raumhöhen langsameren Umschlag bedeuten.

Die Kühlung in einem Kühlraum erfolgt meistens über Luftkühler, die durch elektrisch angetriebene Ventilatoren zwangsbelüftet werden. Bei größeren Kühlräumen findet die Kaltluftverteilung über Luftkanäle statt.

Herrschen in dem Kühlraum Temperaturen unter 0°C, so muss der Luftkühler in regelmäßigen Abständen abgetaut werden, da sich dieser sonst mit Reif zusetzt und nicht mehr die Sollleistung erreichen kann.

Der Kältebedarf eines Kühlraumes setzt sich im Wesentlichen zusammen aus:

- Abkühlung des Kühlgutes
- Wärmeeinfall durch Wände, Decken, Kühlraumboden
- Kälteverluste durch Türöffnen
- Wärmequelle in Form von Personen, Beleuchtung und im Raum befindlichen maschinellen Einrichtungen, wie z. B. Ventilatoren, Flurförderfahrzeuge, Verpackungsanlagen o. Ä.

2.3. Tiefkühlräume

In den Tiefkühlräumen eines Lebensmittelbetriebes findet die Gefrierkonservierung statt. Das Schockfrostverfahren ist ein industrielles Verfahren, bei dem innerhalb weniger Minuten die Temperatur der einzufrierenden Lebensmittel auf -40°C und tiefer abgesenkt wird. Die Lagerung erfolgt dann bei Temperaturen von bis zu -30°C. Das Prinzip der Kältetechnik ist das gleiche wie bei Kühlräumen, nur dass das Kältemittel mit niedrigeren Temperaturen in die Verdampfer gelangt.

2.4. Hygiene

Die Hygiene bei Lebensmitteln ist immer wieder ein Thema, auch in der Öffentlichkeit. So sorgen seit 2006 „Gammelfleischskandale“ für Aufsehen. Auslöser sind überschrittene Haltbarkeitsdaten, unterbrochene Kühlketten, oder auch mangelnde Hygiene in den Lebensmittelbetrieben.

Lebensmittel sind ein idealer Nährboden für Mikroorganismen und können mit Rückständen und Schadstoffen belastet sein. Daher gibt es strenge Auflagen für die Produktion und Lagerung von Lebensmitteln innerhalb der EU-Staaten. Seit dem 1. Januar 2006 gilt in Deutschland unmittelbar europäisches Recht. Seitdem finden in allen EU-Mitgliedsstaaten drei EU-Verordnungen zur Lebensmittelhygiene direkte Anwendung, die die bisherige nationale Verordnung ablösen:

- EG-Verordnung 852/2004 über Lebensmittelhygiene
- EG-Verordnung 853/2004 Besondere Vorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs
- EG-Verordnung 854/2004 Amtliche Überwachung von zum menschlichen Verzehr bestimmten Erzeugnissen tierischen Ursprungs

Nach der Lebensmittelhygiene-Verordnung (LMHV) ist jeder Betrieb, der Lebensmittel herstellt, verarbeitet oder in Verkehr bringt, selbst verpflichtet, für eine „betriebliche Eigenkontrolle“⁵ der Lebensmittel zu sorgen und diese zu dokumentieren.

Auch die Gesundheit der Mitarbeiter eines Lebensmittel verarbeitenden Betriebes spielt eine große Rolle. So dürfen nur solche in diesen Betrieben arbeiten, die eine Bescheinigung des Gesundheitsamtes und einen Gesundheitspass besitzen.

Um die Hygienevorschriften einhalten zu können, müssen die verwendeten Baustoffe leicht zu reinigen sowie wasser- und säurebeständig sein. Die Böden werden, aufgrund von Punktbelastungen aus Maschinen der Schlachttechnik oder

⁵ Lebensmittelhygiene-Verordnung: Anlage I, Abs. 5, Seite 5, 08.08.2007

aus dynamischen Beanspruchungen durch Flurförderfahrzeuge, in Beton ausgeführt.

Da Beton eine raue Oberfläche hat und es teilweise zu kleinen Rissen kommen kann, wird die Oberfläche je nach Nutzungsbereich beschichtet. So wird gewährleistet, dass sich keine Mikroorganismen ansiedeln und eine einfache und gründliche Reinigung erfolgen kann.

Die Bodenbeschichtung wird in den meisten Fällen bis über eine Bodenleiste geführt und mit dieser verklebt, so dass auch hier keine Fugen, sondern visuell und hygienetechnisch saubere Übergänge zur Wand entstehen.

3. Grundlagen für die Erstellung der Untersuchung

Grundsätzlich steht beim Bau von Kühlräumen bzw. -hallen die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Das fertige Gebäude muss schnell und günstig errichtet und für die spätere Nutzung optimal bemessen werden, so dass in vielen Fällen auch Erweiterungen der Kühlräume möglich sind.

3.1. Wandaufbau

Das Traggerüst der Kühlräume bzw. -hallen wird häufig in Skelettbauweise mit Stahlstützen hergestellt. Zwischen den Tragstützen werden unterschiedliche Ausführungsformen gewählt.

Die gebräuchlichsten Wandaufbauten sind zurzeit Wandplatten als Betonfertigteile oder Sandwich-Isolier-Paneele, die vor die Stahlstützen gestellt werden.



Abbildung 1 - Hoesch Thermowand⁶

Die Wandplatten aus Beton werden in einem Betonwerk vorgefertigt und auf der Baustelle mit einem Kran eingesetzt. Die Betonfertigteile erhalten auf der Innenseite zunächst eine Dampfbremse, die porenfrei und fugendicht sein muss und dem Wasserdampf gegenüber einen großen Widerstand bietet. Auf die Dampfbremse wird eine Wärmedämmung aus Polystyrolhartschaum aufgebracht. Polystyrolhartschaum ist ein geschlossenzelliger, harter Schaumstoff, der aus dem Kunststoff Polystyrol hergestellt wird. Die Schichtdicke des Dämmstoffes ist abhängig von der zu erwartenden Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Als Schutz gegen mechanische Beschädigungen erhält die

⁶ Hoesch Bausysteme: http://www.hoesch.at/files/Hoesch_isowand_design+ems-PU_Datenblatt.pdf (gefunden 12.12.2008)

Wärmedämmung häufig raumseitig eine Metallverkleidung, z.B. aus Alu-Trapezblechen.

Die Sandwich-Isolier-Paneele sind statische Fertigbauteile und bestehen aus einem Schaumkern und zwei metallischen Deckschichten. Die Deckschichten übernehmen hier die Funktion der Dampfbremse und des Berührungsschutzes. Bei der Wärmedämmung handelt es sich in den meisten Fällen um einen Kern aus Polyurethanhartschaum. Der Dämmstoff ist alterungsbeständig, schimmel- und fäulnisresistent und verrottet nicht. Nach der DIN 4102 wird Polyurethanhartschaum als schwer entflammbar klassifiziert. Durch den Verbund (Haftung oder Verklebung) der Deckschichten mit der Wärmedämmung ergibt sich für das Sandwichpaneel eine hohe Tragfähigkeit und eine große Steifigkeit.

Eine weitere Ausführungsart des Wandaufbaus stellen die Beton-Sandwich-Elemente dar. Diese bestehen aus einer äußeren Betonplatte mit ca. 80mm Dicke und einer inneren Betonplatte von ca. 100 bis 180mm Dicke, die zugleich die tragende Funktion des Elementes übernimmt. Zwischen beiden Betonplatten befindet sich die Wärmedämmung aus Polystyrolschaum. Diese Wandelemente bieten einen hohen Feuerwiderstand. Gleichzeitig stellen die innere und die äußere Betonscheibe einen guten Schutz gegen Beschädigungen dar. Zudem wirkt sich die innere Scheibe als Kältespeicher günstig auf eine konstante Raumtemperatur aus.

In den folgenden Kapiteln wird der Wandaufbau aus Sandwichpaneelen zugrunde gelegt. Dieses ist zurzeit die am häufigste zur Ausführung kommende Variante.

3.2. Decken / Dächer

Beim Dachaufbau von Kühlhäusern kann, wie auch bei anderen Gebäuden, zwischen einer Kalt- und einer Warmdachausführung unterschieden werden.

Bei der Kaltdachausführung wird die Kühlraumdecke von den Dachbindern abgehängt. Das ungedämmte Dach wird auf die Tragkonstruktion aufgelegt. Dadurch entsteht ein begehrbarer, nicht wärmegeämmter Dachraum. Durch die außen liegende Tragkonstruktion für das Dach wird bei dieser Lösung der zu kühlende Raum kleiner gehalten.

Im Gegensatz hierzu steht die Warmdachausführung. Hier wird die Deckenisolierung des Kühlraumes samt Dachabdichtung auf die Tragkonstruktion aufgelegt. Dadurch ergibt sich ein größeres zu kühlendes Raumvolumen. Der Konstruktionsraum für die Dachträger, der bei heutigen Kühlhausbauten mit entsprechenden Raumbreiten ohne weiteres eine Konstruktionshöhe von 2m einnehmen kann, ist für die Kaltlagerung üblicherweise nicht nutzbar.

Für die äußere Dachform bei Kühlhäusern kann zwischen einem Flach-, Pult- oder Satteldach gewählt werden. Bei Flachdächern werden zur Dacheindeckung und -abdichtung meistens Kunststofffolien oder Bitumen-Schweißbahnen verwendet. Bei Pult- und Satteldächern kommen Trapezbleche zur Ausführung, die bei entsprechender Sickenntiefe auch Weiten von 5m und mehr überbrücken können. Dadurch wird eine wirtschaftliche Montage möglich.

Die Ableitung des Niederschlagswassers sollte bei Kühlhäusern nach Möglichkeit an der Gebäudeaußenseite erfolgen. Die Innenentwässerung müsste mit einer Rohrbegleitheizung ausgeführt werden.

Die abgehängten Kühlraumdecken werden auch häufig aus Sandwichpaneelen mit entsprechender Wärmedämmung ausgeführt. Wie unter Punkt 3.2. bereits beschrieben, kann hier aufgrund der Blechkaschierung auf eine Dampfbremse verzichtet werden.

Die Tragkonstruktionen bei der Warmdachausführung werden in der Regel mit Trapezblechen überspannt, auf die eine Wärmedämmung aufgebracht wird. Hierauf wird die Dampfbremse verlegt. Die Abdichtung erfolgt wie bei Flachdächern mittels Kunststofffolien oder Bitumen-Schweißbahnen.

3.3. Bodenaufbau

Durch den Einsatz immer größerer und schwererer Flurförderzeuge, bedingt durch die zunehmenden Raumhöhen der Kühlhäuser, werden die Bodenplatten immer höheren Belastungen ausgesetzt. Zur Erzielung der notwendigen Festigkeit und Steifigkeit erreichen die Bodenplatten neuerer Kühlhäuser heute Dicken von 200mm und mehr.

Um Rissbildungen in den Bodenplatten vorzubeugen, erfolgt das Betonieren der Platten abschnittsweise. Zwischen den Abschnitten werden Trennfugen angeordnet, die mit einem Kantenschutz aus Profilstahl versehen werden, um ein Ausbrechen der Fugenränder unter der späteren Belastung zu verhindern.

Sofern der Boden in Lebensmittelbetrieben bestimmten Hygieneanforderungen unterliegt, werden auf der Bodenplatte Beschichtungen aufgetragen. Diese können je nach Nutzung des Kühlraums auf Polyurethan-Basis oder aus Kunstharzen bestehen. Sie werden fugenlos auf dem Beton aufgebracht und sind schon nach wenigen Stunden voll belastbar. Die Beschichtungen sind gegen aggressive Reinigungsmittel beständig, die in Lebensmittel verarbeitenden Betrieben zur Reinigung eingesetzt werden müssen.

Die Bodenplatte wird auf einer Sauberkeitsschicht betoniert. Zwischen den beiden Schichten wird häufig, sofern keine kapillarbrechende Schicht aus Kies unter der Sauberkeitsschicht ansteht, eine Dampfbremse ausgelegt.

Bei der Auswahl der Wärmedämmung für den Boden ist neben dem erforderlichen Dämmwert auch die unter Umständen hohe Druckbeanspruchung des Materials zu berücksichtigen. Neben Polystyrol- und Polyurethan-Schaumstoffen höherer Druckfestigkeit kommt bei der Bodenisolierung zum Teil auch Foamglas zum Einsatz. Foamglas wird aus natürlichen Rohstoffen, wie z. B. Sand, Dolomit und Kalk hergestellt und wird nach DIN 4102 als nicht brennbar (A1) klassifiziert.

Auf eine Wärmedämmung im Bodenaufbau wird jedoch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten oftmals verzichtet. Eine Untersuchung aus ökologischer und ökonomischer Sichtweise erfolgt im Kapitel 6 ff.

3.4. Unterfrierschutz

Bei Kühlhäusern mit Innentemperaturen unter -5°C ist ein Unterfrierschutz unerlässlich. Durch das Auffrieren des unter dem Kühlraum anstehenden Bodens kann es zu erheblichen Schäden am Gebäude kommen.

Ein Unterfrierschutz kann auf mehrere Arten ausgeführt werden. Eine Lösung hierzu besteht in der Unterlüftung des Kühlhauses. Dabei wird der Boden des

Kühlhauses entweder auf Stützen gelegt oder es werden unter dem Boden Rohre verlegt. Durch den so geschaffenen Hohlraum wird dann Luft geleitet, die häufig zuvor in einem Wärmeaustauscher erwärmt wird. Unterstützt wird die Durchlüftung meistens durch Gebläse. In der Praxis kommt diese Art des Unterfrierschutzes jedoch selten zur Anwendung.

Weit verbreitet sind die Unterfrierschutz-Bodenheizungen. Diese werden teils elektrisch betrieben, jedoch kommen heute meistens Flüssigkeitsheizungen mit einem Glykol-Wasser-Gemisch als Wärmeträger zum Einsatz. Bei der elektrischen Heizung werden Heizkabel unter der Wärmedämmung und Dampfbremse im Abstand verlegt oder es kommen Heizmatten zur Verwendung.

Die Flüssigkeitsheizung wird heute mit Kunststoffrohren ausgeführt, die entweder in Haarnadelform oder als Leitersystem verlegt werden. Um einen Defekt und somit einen unbeheizten Bereich ausschließen zu können, werden die Kunststoffrohre oft überlappt verlegt. Gleiches gilt auch für die Verlegung der Heizkabel.

4. Wärmebrücken

Schwachstellen in der Wärmedämmung der Gebäudehülle können den Wärmeschutz erheblich reduzieren und erhöhen die Gefahr der Schimmelpilzbildung durch Tauwasser. Über diese Schwachstellen wird zusätzliche Wärmeenergie transportiert. Sie werden als Wärmebrücken bezeichnet.

Wärmebrücken weisen einen besonders hohen Wärmestrom auf. Wärmebrücken, die in einem Kühlraum auftreten, haben gegenüber der Raumtemperatur eine wesentlich höhere Oberflächentemperatur. Dies kann dazu führen, dass sich Tauwasser bildet und somit die Grundlage für das Entstehen von hygienischen Beeinträchtigungen oder Korrosion von Stahlbauteilen gegeben ist.

Die Wärmebrücken können zustande kommen durch:

- ungünstige geometrische Formen, z.B. Eckbereiche oder Gebäudekanten an denen die Außenoberfläche erheblich größer ist als die Innenoberfläche
- Luftundichtheiten, insbesondere bei Windanströmung, die bei Kühlräumen in den meisten Fällen zum Anstieg der Bauteil- und Raumtemperaturen führen und unsachgemäße Verlegung der Sandwichpaneele
- Verwendung von Stoffen mit höherer Wärmeleitfähigkeit, z.B. Stahlstützen ohne ausreichende Wärmedämmung, die verschiedenen Temperaturbereichen ausgesetzt sind.

4.1. Tauwasserbildung

Die thermischen Berechnungen mit den dazugehörigen Bildern in dem Kapitel 4.1 und 4.2 sind mit dem Programm AnTherm (Version 4.67.3271.33739) von T.Kornicki, Dienstleistungen in EDV & IT, erstellt. Die Berechnungen sind beispielhaft für eine Wärmebrücke mit einem Stoff höherer Wärmeleitfähigkeit durchgeführt.

Luft enthält immer Wasser in Form von nicht sichtbarem Wasserdampf. Die Wasseraufnahmefähigkeit der Luft hängt von der Lufttemperatur ab. In der

Abbildung 2 ist der maximale Wassergehalt in Abhängigkeit von der Lufttemperatur dargestellt.

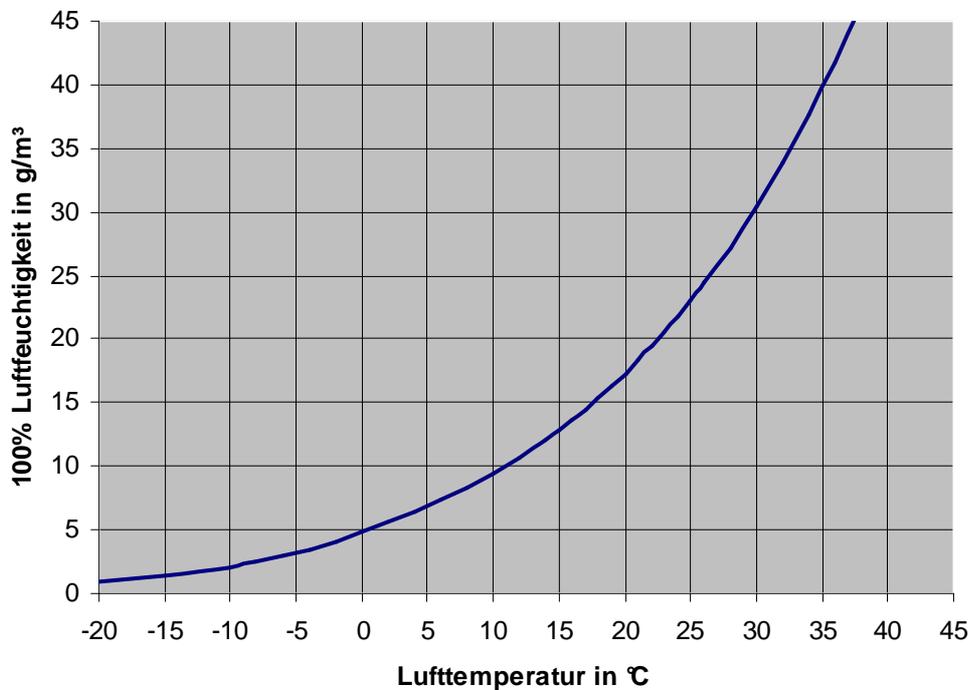


Abbildung 2 - maximaler Wassergehalt der Luft

Bei 0°C kann ein Kubikmeter Luft ca. 5g Wasser aufnehmen. Bei 20°C beträgt der maximale Wassergehalt von einem Kubikmeter Luft ca. 17g, bei -20°C ca. 1g. Ist der jeweils maximale Wert erreicht, kann die Luft keine weitere Feuchtigkeit mehr aufnehmen. Man spricht dann von gesättigter Luft oder von 100% relativer Luftfeuchtigkeit.

Die relative Luftfeuchtigkeit ist bei gleich bleibendem Wassergehalt stark von der Temperatur abhängig. Beim Erwärmen feuchter Luft sinkt die relative Luftfeuchtigkeit, beim Abkühlen steigt diese.

Sinkt die Temperatur soweit, dass die relative Luftfeuchte 100% erreicht, muss die Luft bei weiterer Abkühlung Wasserdampf abgeben. Diese Temperatur wird als Taupunkttemperatur bezeichnet.

Die Taupunkttemperatur wird durch die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Taupunkttemperatur in Abhängigkeit von der relativen Feuchte und der Lufttemperatur:

Lufttemperatur [°C]	Taupunkttemperatur [°C] bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von											
	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
2											0,5	1,3
4									0,9	1,7	2,5	3,3
6							1,0	1,9	2,8	3,7	4,5	5,3
8					0,7	1,9	2,9	3,9	4,8	5,6	6,5	7,3
10	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2
12	-1,0	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
14	0,6	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
15	1,5	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
16	2,4	4,1	5,6	7,0	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
17	3,3	5,0	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
18	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
19	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
20	6,0	7,7	9,3	10,7	12,0	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
21	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
22	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
23	8,7	10,4	12,0	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
24	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17,0	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
25	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18,0	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
26	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
28	13,1	15,0	16,6	18,1	19,5	20,8	22,0	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1
30	14,9	16,8	18,4	20,0	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1

Tabelle 1 - Taupunkttemperaturen⁷

In Räumen und auf Bauteilen muss andauernde Tauwasserbildung vermieden werden, da es sonst zu Beeinträchtigungen der Konstruktion und zu Hygieneproblemen kommt.

Bei Sandwichelementen ist wegen der gasdiffusionsdichten Stahldeckschichten eine Wasserdampfdiffusion durch das Bauteil nicht möglich. Außerdem lässt die geschlossenzellige Schaumstruktur von Polyurethan-Hartschaum, auch an den Schnittflächen des Elementes, keine Wasseraufnahme zu.

Die Dämmfähigkeit der Elemente bleibt auf Dauer gesichert. Sie können darum hinsichtlich der Anforderungen an den Feuchteschutz nach DIN 4108 Teil 4 als unbedenkliche Bauteile eingestuft werden.

⁷ Glatthor, Andrea: Taupunkttemperatur in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und -feuchtigkeit. <http://www.d-r-h.de/hilfstabellen/luftfeuchte-tab02.html> (gefunden 16.12.2008)

Aufgrund der Luftabkühlung in Kühlräumen kann es wichtig sein, Oberflächen von Bauteilen zu schützen, die mehrere Temperaturbereiche durchlaufen. Dies betrifft häufig die durchlaufenden Stahlstützen vom Traggerüst vor der Außenwand, wie in Abbildung 3 dargestellt. In dem Beispiel ist über dem Kühlraum ein Dachraum angeordnet.

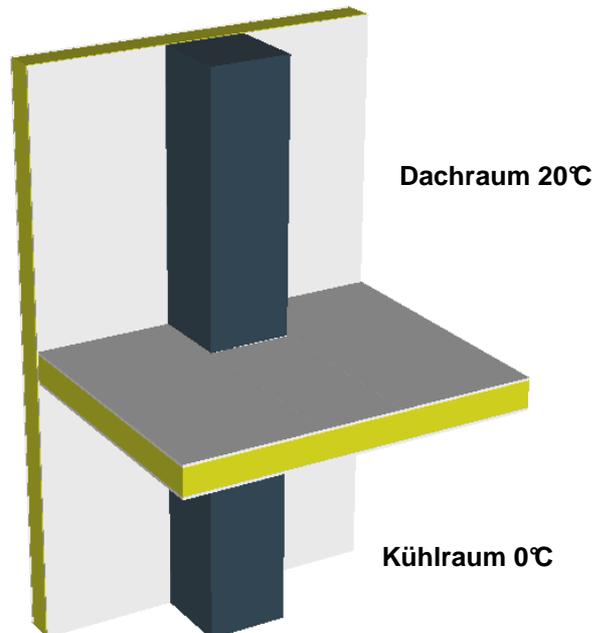


Abbildung 3 - durchlaufende Stütze an Außenwand

Ohne notwendige Maßnahmen gegen Tauwasserbildung wird die wärmere Luft aus dem Dachraum an der Stütze abgekühlt und der Wasserdampf wird an dieser kondensieren. Dies kann bei andauernder Tauwasserbildung Korrosionsschäden hervorrufen und zu Hygieneproblemen führen. Des Weiteren wird über die Stütze ein großer Wärmestrom in den Kühlraum gelangen. Die Raumtemperatur des Kühlraums wird im Bereich der Stütze stark ansteigen. Somit könnte die geforderte Lagertemperatur für Lebensmittel in dem Bereich nicht garantiert werden. Die Folge wäre ein Verlust an Lagerfläche.

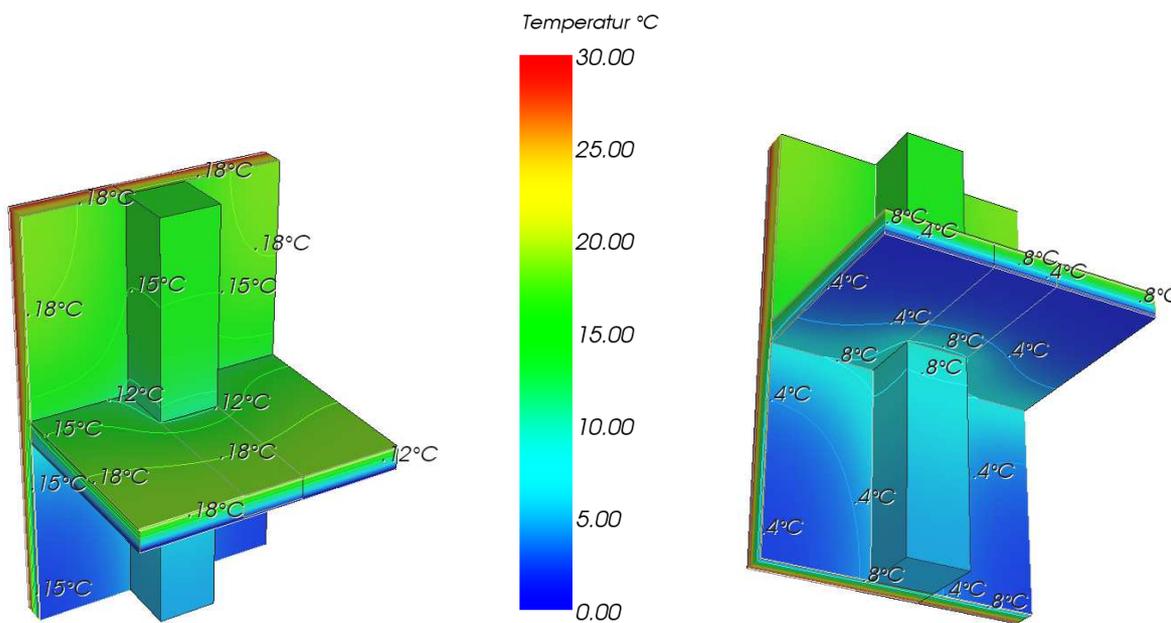


Abbildung 4 - Temperaturverlauf des Kühl- und Dachraums

In der Abbildung 4 sind die Temperaturbereiche auf den Sandwichpaneelen und der Stütze dargestellt. Für die Berechnung ist eine Temperatur von 20°C im Dachraum und 0°C im Kühlraum, sowie eine Außentemperatur im Sommerfall von 30°C angesetzt. Die Deckenkonstruktion besteht aus 100er PU-Paneelen.

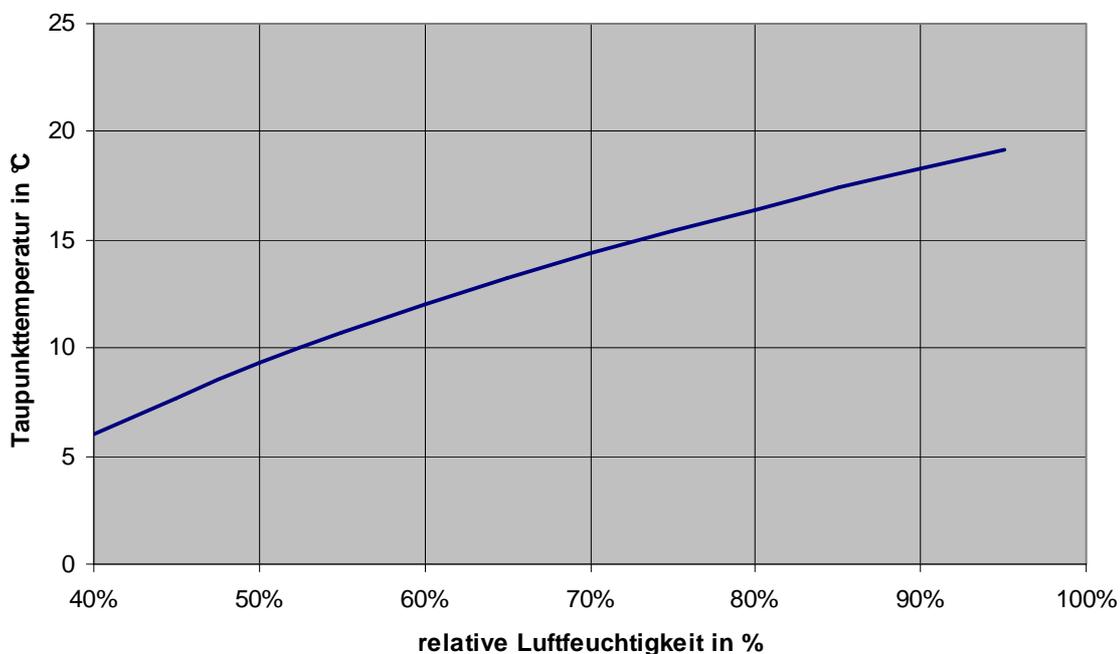


Abbildung 5 - Taupunkttemperatur von Luft bei 20°C

Die Oberflächentemperatur der Stütze beträgt im Bodenbereich des Dachraums 11,15°C. Die Abbildung 5 zeigt hier, dass bei einer Raumtemperatur von 20°C und

einer Taupunkttemperatur von ca. 11°C Kondenswasserbildung bereits ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 58% unvermeidbar ist.

Werden im Vorwege keine Maßnahmen getroffen, kommt es bereits nach kurzer Zeit zu Korrosionsbildung.

Abbildung 6 und 7 zeigen die Temperaturverläufe mit Sandwichpaneelen als Dämmung um die Stütze.

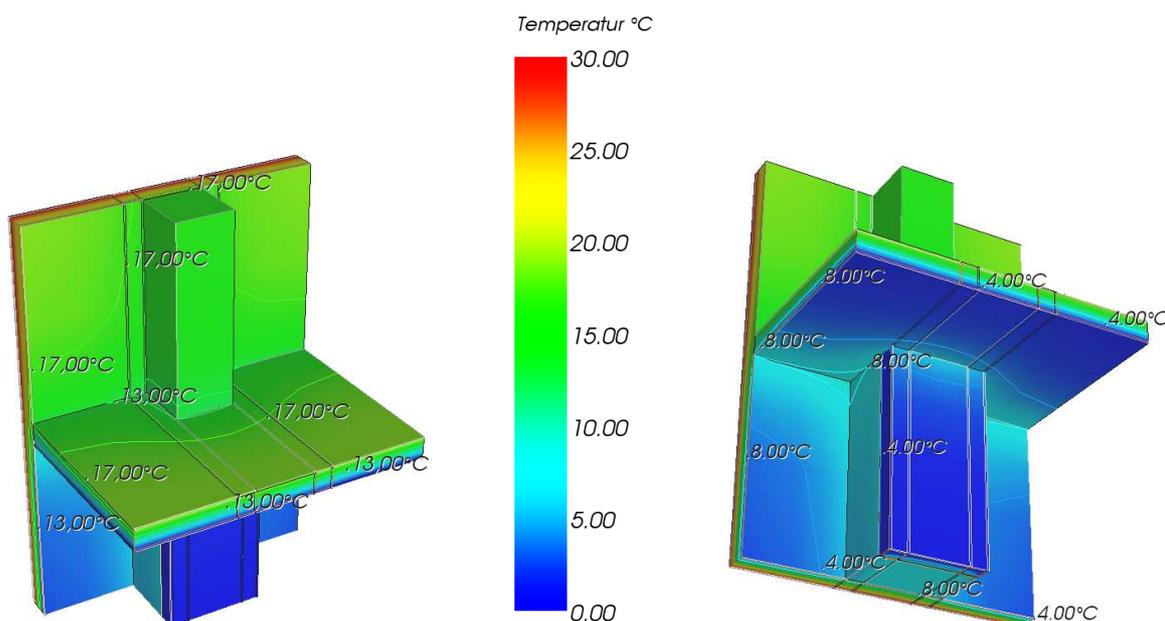


Abbildung 6 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze im Kühlraumbereich

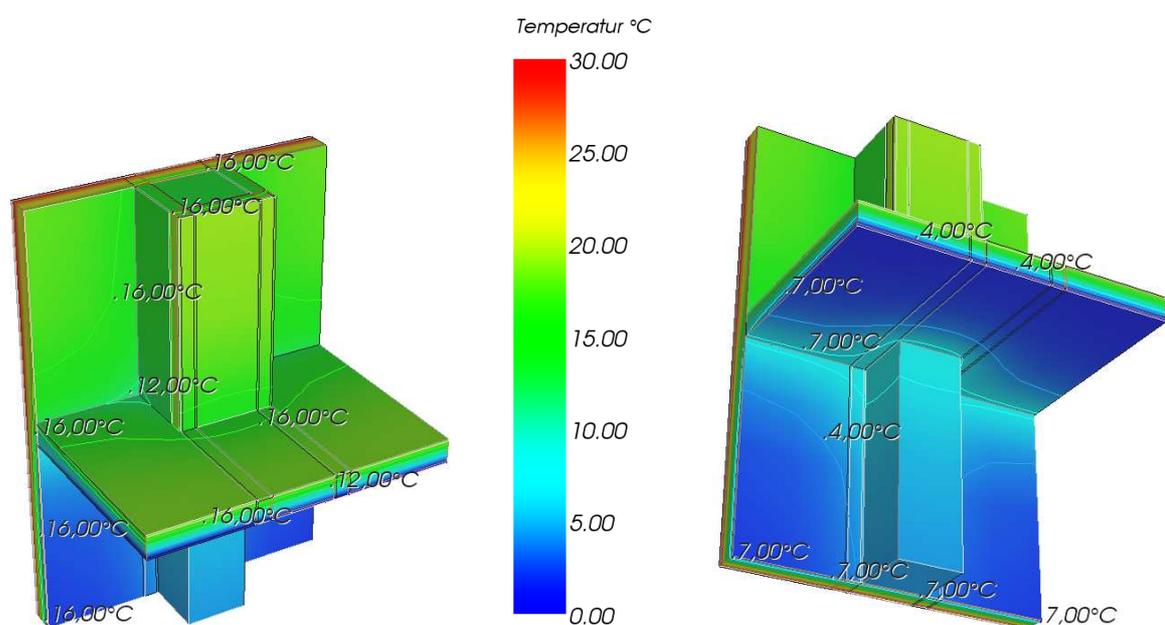


Abbildung 7 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze im Dachbereich

In Abbildung 6 sind die Berechnungen mit einem 80er Panel als Dämmung um die Stütze im Kühlhausbereich durchgeführt worden. In diesem Fall steigt die Temperatur im Bodenbereich des Dachraums auf 12,29°C.

Dämmt man die Stütze im Dachbereich, wie in Abbildung 7 dargestellt, erreicht man eine minimal höhere Oberflächentemperatur von 11,20°C als ohne Dämmung.

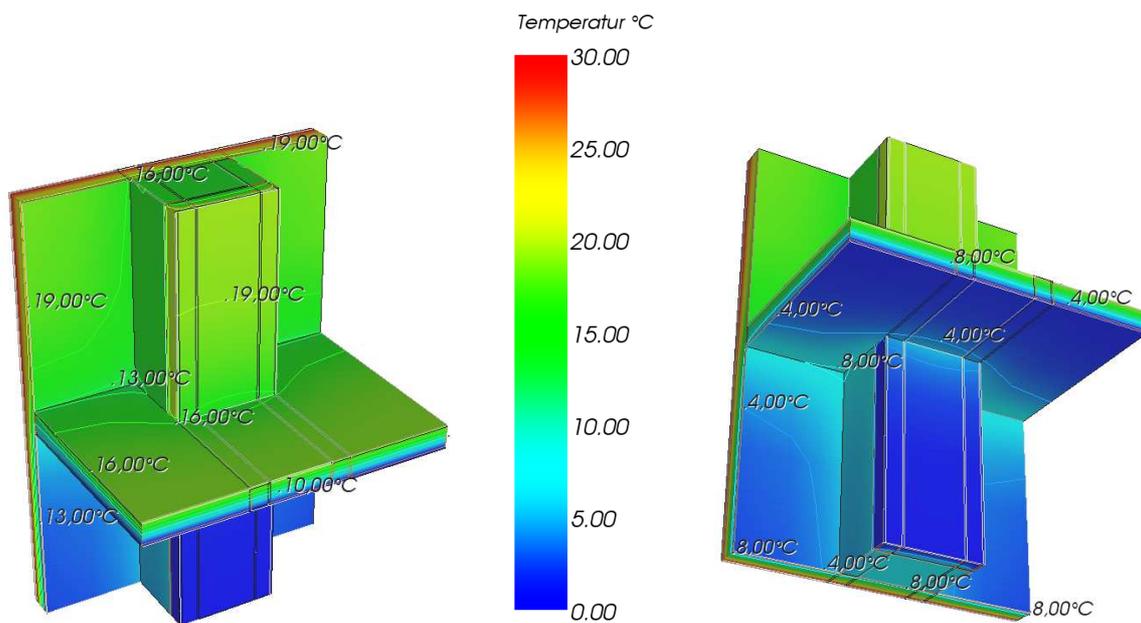


Abbildung 8 - Temperaturverlauf mit Dämmung um die Stütze in beiden Bereichen

Eine Wärmedämmung auf der gesamten Länge der Stütze erzielt keinen nennenswerten Vorteil gegenüber der 2. Berechnung mit der gedämmten Stütze im Kühlraumbereich. Hier liegt die Temperatur im Eckbereich auf dem Boden im Dachraum bei 12,29°C.

Um im Bereich von Wärmebrücken die Tauwasserbildung auf den raumseitigen Bauteiloberflächen zu vermeiden, sollte folgende Mindestanforderung an die Temperatur im Bereich der ungünstigsten Stelle erfüllt werden:

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \geq 0,70 \quad (1)$$

mit: f_{Rsi} = Temperaturfaktor nach DIN EN ISO 10211-2

θ_{si} = kleinste raumseitige Oberflächentemperatur in °C

θ_i = Innenlufttemperatur in °C

θ_e = Außenlufttemperatur in °C

Der Temperaturfaktor für die Berechnung mit der Wärmedämmung um die Stütze im Kühlraumbereich liegt bei $f_{Rsi} = 0,61$, für die Berechnung mit der Wärmedämmung im Dachraum bei $f_{Rsi} = 0,55$. In der dritten Berechnung mit beidseitiger Wärmedämmung liegt der Temperaturfaktor bei $f_{Rsi} = 0,61$.

In allen drei Beispielen kommt es demnach zu Tauwasserbildung, da der Temperaturfaktor von 0,7 nicht eingehalten wird. Die Werte in der Tabelle 1 zeigen, dass ab einer Taupunkttemperatur von ca. 12°C und einer Raumtemperatur von 20°C Tauwasserbildung ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60% zu erwarten ist. Selbst mit einem 200er PU-Paneel als Schutz um die Stütze, ergeben die Berechnungen einen Temperaturfaktor von $f_{Rsi} = 0,67$, bei der minimalsten Oberflächentemperatur im Dachraum von 13,34°C.

Ein Temperaturfaktor von 0,7 kann erst bei einer Temperatur von 10°C im Dachraum erzielt werden.

Um die Tauwasserbildung in diesen Bereichen zu vermeiden, ist ein besonderes Augenmerk auf die konstruktive Ausbildung zu legen. Weiter sollte die Temperatur in den angrenzenden Bereichen möglichst gering gehalten werden. Dieser Temperaturunterschied lässt sich auch nicht mehr über eine höhere Qualität der Wärmedämmung auffangen. Zudem steigt die Oberflächentemperatur im Kühlraum stark an, so dass mehr Energie aufgewendet werden muss, um diesen wieder zu kühlen.