



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Studie über den Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur bei der
Eisabtauung an Thermoblech-Eiserzeugern

Bachelorarbeit

Studiengang Verfahrenstechnik

vorgelegt von
Artur Kitschaikin
1934320

Hamburg
am 11. Oktober 2012

Gutachter: Prof. Dr. Constantin, Canavas (HAW-Hamburg)
Gutachter: Dr.-Ing. Bernhard, Spang (BUCO)

Die Bachelorarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit der Firma BUCO
Wärmeaustauscher International GmbH

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem im Ausgabeantrag formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtliche oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Artur Kitschaikin

Hamburg, den 11.10.2012

Danksagung

Anfangs möchte ich mich ganz herzlich bedanken,

bei Herrn Dr. –Ing. Bernhard Spang für die Bereitstellung des interessanten Themas, für die Übernahme des externen Gutachters und für die fachliche und konstruktive Begleitung dieser Arbeit,

bei Herrn Prof. Dr. Constantin Canavas für die Übernahme des Erstgutachtens,

bei den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Firma BUCO Wärmeaustauscher International GmbH und BUCO Laserplate GmbH

und bei meiner Familie für die moralische Stärkung, Verständnis und die finanzielle Unterstützung während meines Studiums.

Zu guter Letzt möchte ich mich an dieser Stelle bei meiner Freundin Aljona für ihre Liebe und Unterstützung während meiner Studienzeit bedanken.

Zusammenfassung

Wasser in seinem festen Aggregatzustand wird schon seit langer Zeit zur Erhöhung der Haltbarkeit von Lebensmitteln eingesetzt. Früher musste auf den Wintereinbruch gewartet werden, damit Eis, das in Blöcken aus Seen geschnitten wurde, zum Verbraucher geleifert werden konnte. Heutzutage wird Eis industriell durch Anfrieren von Wasser an gekühlten Oberflächen erzeugt und dann zum Verbraucher geleitet. Dies geschieht mittels Eiserzeuger, die z.B. in Produktionsanlagen integriert wurden, damit sie permanent Eis für verschiedene Herstellungsverfahren zur Verfügung stellen. Dies könnte z.B. eine Wurstwarenproduktionsanlage sein. Dort wird das erzeugte Eis zur Kühlung beim Zerkleinerungsvorgang des Fleisches eingesetzt. Die Firma BUCO Wärmeaustauscher International GmbH stellt solche Eiserzeuger her. Diese Eiserzeuger beinhalten sogenannte Thermobleche, an denen herunterrieselndes Wasser gefriert. Die Kühlung der Thermobleche wird durch verdampfendes Kältemittel in den Thermoblechen bewirkt. Die gesamte Eiserzeugung erfolgt durch einen Kompressionskälteprozess. Das an den Thermoblechen angefrorene Wasser wird periodisch durch heißes Kältemittelgas (Heißgas) abgetaut, welches während des Kompressionskälteprozess entsteht.

Da die Firma BUCO den Einfluss der Heißgasparameter auf die Abtauung der Thermoblech-Eiserzeuger noch nicht ausreichend untersucht hat, bestand das Ziel dieser Arbeit darin, den Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur auf diesen Abtauprozess zu untersuchen. Die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit wurde auf nur ein Thermoblech bezogen. Da keine Messungen oder Simulationen durchgeführt werden konnten, wurde die Einflussstudie anhand von theoretischen Berechnungen durchgeführt.

Es wurde ein quasistationäres Betrachtungsmodell des Wärmeübergangs im Thermoblech anhand von vielen Annahmen erstellt. Dieses Modell wurde so konstruiert, dass das Tauen des Eises nur durch den abgegebenen Wärmestrom des Heißgases bewirkt wird. Andere Faktoren wurden durch bestimmte Annahmen vernachlässigt. Somit wurde gewährleistet, dass nur der Heißgasmassenstrom und die Heißgastemperatur die Abtauung beeinflussen. Anhand des Betrachtungsmodells wurde der Temperaturverlauf im Thermoblech über Wärmebilanzen berechnet. Dafür wurde das Thermoblech in geeignete Bilanzräume aufgeteilt. Anschließend wurden die Wärmeströme in den Bilanzräumen berechnet, um eine

Aussage über die Abtauzeit wiederzugeben. Die Berechnungen wurden in einem für diese Arbeit erstellten Excel-Programm durchgeführt. Für die Einflussstudie wurden Heißgastemperaturintervall von 40-100°C und Heißgasmassenstromintervall von 30-100 kg/h betrachtet.

Das Ergebnis dieser Arbeit war, dass der Heißgasmassenstrom und die Heißgastemperatur gleichermaßen die Abtauung beeinflussen. Dass ein Parameter deutlich dominierender war, wurde nicht festgestellt.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	i
Danksagung	ii
Zusammenfassung	iii
Abkürzungen	vii
1. Einleitung	1
1.1. Aufgabenstellung und Ziel der Bachelorarbeit	2
1.2. Methodik	3
1.3. Gliederung	3
2. Theoretische Grundlagen.....	4
2.1. Eiserzeugung.....	4
2.1.1. Eisarten.....	6
2.1.2. Funktionsweise des „BUCOdelot ice-pack“ Thermoblech-Eiserzeugers	7
2.1.3. Beschreibung des Thermobleches „BUCOplate“	11
2.1.4. Ammoniak als Kältemittel	15
2.1.5. Ammoniak-Kreislauf bei der Eiserzeugung.....	15
2.1.6. Wärmeübergang bei der Eiserzeugung	17
2.2. Eisabtauung.....	19
2.2.1. Varianten der Eisabtauung	19
2.2.2. Beschreibung der Heißgasabtauung von BUCO Thermoblech-Eiserzeugern	20
2.2.3. Thermodynamischer Zustand des heißen Ammoniakgases	22
2.2.4. Wärmeübergang bei der Heißgasabtauung	23
3. Literaturrecherche zur Eisabtauung.....	27
4. Studie des Einflusses der Heißgasparameter Massenstrom und Temperatur auf die Abtauung.....	29

4.1. Modell zur Berechnung der Eisabtauung.....	29
4.2. Berechnungen für die Eiflussstudie	31
4.2.1. Berechnung des Temperaturverlaufs des Heißgases in dem Thermoblech.....	32
4.2.2. Berechnung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten	36
4.2.3. Berechnung der Abtauzeit.....	38
5. Ergebnisse.....	39
5.1. Ergebnisse der Berechnungen mit BUCO Parametern	39
5.1.1. Temperaturverlauf im Thermoblech	39
5.1.2. Mittlerer Wärmeübergangskoeffizienten	40
5.1.3. Abtauzeit	41
5.2. Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur auf die Abtauung	42
6. Diskussion	46
7. Ausblick.....	48
8. Literaturverzeichnis	49
9. Abbildungsverzeichnis	52
10. Tabellenverzeichnis	53
11. Anhang	54

Abkürzungen

A	Wärmeübertragungsfläche
A_{Ell}	Elliptische Querschnittsfläche
A_{ges}	Gesamte Querschnittsfläche eines Bilanzraums
b	Kanalbreite
B	zu schmelzende Eisdicke
$c_{P,I}$	spezifische Wärmekapazität des Mediums I
d_h	hydraulischer Durchmesser
h	Kanalhöhe
H	Höhe des Bilanzraums
L	Länge des Bilanzraums
m_I	Masse des Mediums I
\dot{m}_I	Massenstrom des Mediums I
Nu	Nußelt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Q_E	Erstarrungsenergie
q_E	Erstarrungsenthalpie
Q_S	Schmelzenergie
q_S	Schmelzenthalpie
\dot{Q}_I	Wärmestrom des Mediums I
Re	Reynolds-Zahl
t	Abtauzeit

t_A	angenommene Abtauzeit
U_{Ell}	elliptischer Umfang
V_{Eis}	Volumen abzutauendes Eis
V_{ges}	gesamtes Volumen des Bilanzbereiches
V_K	gesamtes Volumen der Kanäle im Bilanzbereich
\dot{V}_{Hg}	Volumenstrom des Heißgases

Griechische Symbole:

α	mittlerer Wärmeübergangskoeffizient
η	Viskosität
η_0	Viskosität in Wandnähe
ϑ_I	Temperatur des Mediums I
λ_I	Wärmeleitfähigkeit des Mediums I
ρ_I	Dichte des Mediums I
ω_I	Strömungsgeschwindigkeit des Mediums I

Indizes:

a	außen
Hg	Heißgas
I	innen
K	Kanal
KM	Kältemittel
W	Wand
α	Eintritt
ω	Austritt

1. Einleitung

Gefrorenes Wasser oder Eis wird bereits seit langer Zeit zur Kühlung und Haltbarmachung von Lebensmitteln verwendet. Früher musste bis zum Wintereinbruch gewartet werden um Eis zu bekommen. Damals wurde das Eis aus dem zugefrorenen Fluss oder See herausgeschnitten und zu den Kunden, die Ihren Eischrank (heutiger Kühlschranks) damit betrieben, als Eisblock geliefert. In der Vergangenheit machte man sich den beim Schmelzen entstehenden Kühleffekt zu Nutze, um die Haltbarkeit der Lebensmittel zu erhöhen.

Heutzutage wird Eis industriell durch Anfrieren von Wasser an gekühlten Oberflächen erzeugt. Es wird in den verschiedensten Bereichen der Prozesstechnik zur Kühlung verwendet. Ein Hauptabnehmer des Eises ist die Lebensmittelherstellung und Lagerung. Bei der Herstellung von Wurstwaren wird Eis zur Kühlung des Fleisches beim Zerkleinerungsvorgang benötigt. Beim Zerkleinern wird Reibungswärme in das Fleisch eingebracht, welches das Fleisch garen könnte, wenn das Eis die Reibungswärme nicht absorbieren würde. [20] Allgemein bekannt ist auch die Verwendung von Eis zum Lagern von gefangenem Fisch in Fangboten. Dabei wird der Fisch in Kisten gelegt und mit dem Eis beschüttet. Beim Schmelzen kühlt das Eis den Fisch bis auf 1-2°C herunter. Der Fisch bleibt dann 12-16 Tage verkaufsfähig. [20] Eine andere Anwendung ist die Kühlung von Beton in Ländern mit hohen Außentemperaturen. Das Eis wird in den Betonmischer eingeleitet um eine gewünschte Mischtemperatur zu erreichen. Die Frischbetontemperatur wird dabei auch niedrig gehalten. Dadurch werden Risse, die durch thermische Spannungen entstehen, vermieden. [6]; [10] Weitere Anwendungsgebiete sind:

- Chemische Industrie
- Pharmazeutische Industrie
- Brauereiwesen
- Molkereien [7]

Industriell wird Eis in der Regel durch Anfrieren von Wasser an einer Oberfläche, die durch verdampfendes Kältemittel gekühlt wird, erzeugt. Dabei werden Rohre, Platten oder Trommeln verwendet, in denen innen das Kältemittel verdampft und außen das Wasser anfriert. [9]

Das angefrorene Eis muss dann periodisch von der Kühlfläche abgetragen werden. Durch die Periodendauer kann unter sonst gleichen Bedingungen die Eisdicke eingestellt werden. Das Abtragen des Eises erfolgt meist mechanisch durch Abschaben. Beim Abschaben müssen die Oberflächen glatt sein. Außerdem ist das mechanische Abtragen von Eis mit einem hohen Verschleiß der Bauteile behaftet und könnte zu dem noch Risse verursachen, aus denen Kältemittel austreten kann. Das angefrorene Eis sollte daher werkstoffschonend abgetragen werden. [9]

Neben der mechanischen Abtragung kann Eis auch durch Abtauverfahren abgetragen werden. Dabei wird das Eis angetaut, wodurch sich ein kleiner Flüssigkeitsfilm zwischen Oberfläche und Eis bildet. Dieser Flüssigkeitsfilm führt zum Abgleiten der Eisschicht. Wenn die Eiszerzeugung mittels eines Kompressionskälteprozesses erfolgt, kann z.B. das heiße Kältemittelgas nach dem Kompressor (Heißgas) zur Abtauung verwendet werden. [16]

Es gibt verschiedene Abtauverfahren auf die noch im weiteren Verlauf dieser Arbeit eingegangen wird. Diese Verfahren und auch die Heißgasabtauung werden überwiegend bei der Eisabtauung von Luftkühlern verwendet. Bei der Abtauung von Luftkühlern ist es sehr wichtig das Eis abzutauen, da Eisbildung bei diesem Prozess ein unerwünschter Nebeneffekt ist, der den Wärmeübergang stört und somit die Luftkühlung. [12]

1.1. Aufgabenstellung und Ziel der Bachelorarbeit

Zu den Produkten der Firma BUCO Wärmeaustauscher International GmbH gehören Eiserzeuger, die periodisch durch heißes Kältemittelgas abgetaut werden. Wie genau der Abtauprozess verläuft und welchen Einfluss die Heißgasparameter (Heißgasmassenstrom und Heißgastemperatur) auf die Abtauung haben, wurde von der Firma noch kaum untersucht. Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, der Firma BUCO den Einfluss der Heißgasparameter auf die Heißgasabtauung aufzuzeigen, damit eine eventuelle Optimierung, der derzeit von BUCO verwendeten Heißgasparameter, durchgeführt wird. Daher vergab die Firma die Aufgabe eine Studie über den Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur bei der Abtauung an Thermoblech-Eiserzeugern in dieser Arbeit durchzuführen.

1.2. Methodik

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung begann mit einer intensiven Literaturrecherche. Anhand der recherchierten Erkenntnisse wurde ein quasistationäres Betrachtungsmodell des Wärmeübergangs des Thermoblechs erstellt. Durch Annahmen wurde das Modell so konstruiert, dass nur der Wärmestrom des Heißgases die Abtauung bewirkt. Anhand dieses Betrachtungsmodells wurde ein Excel-Programm für die Berechnungen erstellt. Mit diesem Programm wurden der Temperaturverlauf im Thermoblech, der mittlere Wärmeübergangskoeffizient und die Abtauzeit berechnet. Das Ergebnis wurde anschließend anhand von Diagrammen veranschaulicht und diskutiert.

1.3. Gliederung

Diese Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

- Kapitel 1:
Kapitel 1 beinhaltet die Einführung, Aufgabenstellung und Gliederung dieser Arbeit. Außerdem wird die Vorgehensweise zum Lösen der Aufgabenstellung beschrieben.
- Kapitel 2:
In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen dieser Arbeit dargestellt. Sie beinhalten die Beschreibung der Eiserzeugung und der Eisabtauung.
- Kapitel 3:
In diesem Kapitel ist die Durchführung der Literaturrecherche dargestellt. Es wird beschrieben, wo gesucht wurde und welche Stichwörter verwendet wurden.
- Kapitel 4:
Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau des Betrachtungsmodells und die Durchführung der Berechnungen.
- Kapitel 5:
Im 5. Kapitel sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt.
- Kapitel 6:
Im sechsten Kapitel erfolgt die Diskussion der Arbeit und der Ergebnisse.
- Kapitel 7:
Dieses Kapitel enthält einen Ausblick über das behandelte Thema.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Eiserzeugung

Der Begriff „Eis“ wird in dieser Arbeit als Wasser im festen Aggregatzustand, also gefrorenes Wasser verstanden. Dabei wird das Wasser bei Umgebungsdruck auf 0°C abgekühlt und durch weitere Energieabfuhr zum Erstarren gebracht. Die zum Erstarren benötigte Wärmeenergie macht sich nicht durch eine weitere Temperaturniedrigung bemerkbar, sondern nur durch eine Enthalpie Änderung. Diese Wärmeenergie bleibt beim Erstarren und beim Verflüssigen von Wasser immer gleich, bei anderen Stoffen kann die Wärmeenergie höher oder niedriger sein als die von Wasser. Diese Wärmeenergie wird auch als Schmelz- bzw. Erstarrungsenthalpie bezeichnet. [2][18]

Die Abbildung 1 zeigt das Temperatur-Wärme-Diagramm von Wasser. Hier werden die Temperatur- und Wärmeenergieverläufe im Wasser deutlich. Bei einer Temperatur von 0°C ist keine Zu- oder Abnahme der Temperatur abgebildet, nur die Enthalpie nimmt zu oder ab, je nachdem ob der Schmelz- oder Erstarrungsvorgang betrachtet wird.

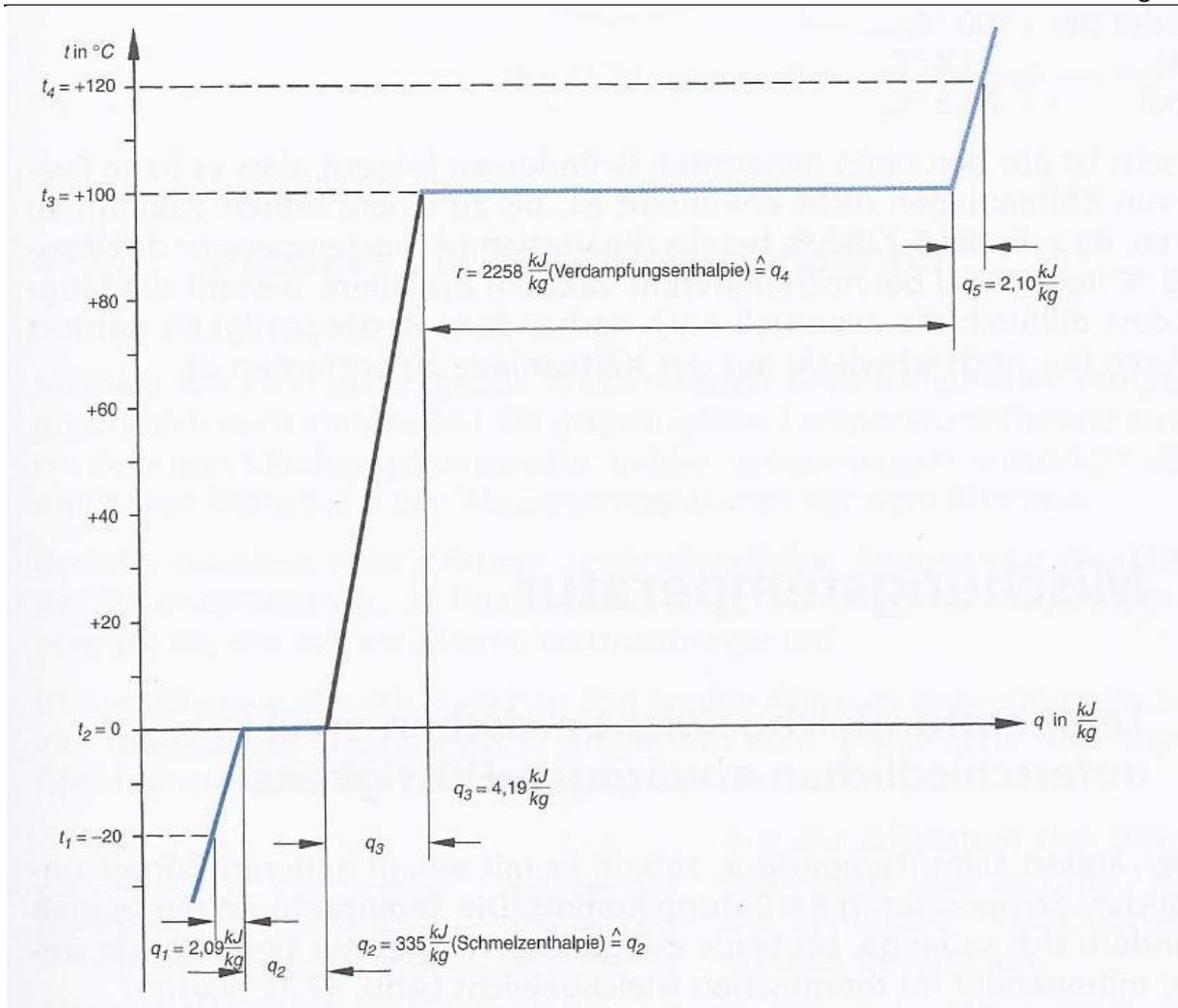


Abbildung 1: Temperatur-Wärme-Diagramm von Wasser [2]

Die zum Schmelzen bzw. Erstarren benötigte Wärmeenergie kann nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$Q_S = m_{Eis} * q_S \quad (1) [2]$$

$$Q_E = m_{Wasser} * q_E \quad (2) [2]$$

Wird anstatt der Masse der Massenstrom eingesetzt ergibt sich aus Gleichungen (1) und (2) folgende Gleichungen für den Wärmestrom:

$$\dot{Q}_S = \dot{m}_{Eis} * q_S \quad (3) [2]$$

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_W * q_E \quad (4) [2]$$

Bei den Gleichungen (1) bis (4) ist $q_S = q_E$.

q_S ist die Schmelzenthalpie und q_E die Erstarrungsenthalpie.

2.1.1. Eisarten

Eis kann nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden. Es gibt zwei unterschiedliche Eisvarianten, die sich nicht in der Form, sondern in der visuellen Qualität voneinander unterscheiden.

Das „Trübeis“ oder auch „Matteis“ ist ein industriell hergestelltes Eis aus Leitungswasser, bei dessen Entstehung in den Erstarrungsprozess nicht eingegriffen wird. Aufgrund von im Wasser enthaltenen Luftteilchen, werden diese beim Gefrieren ausgeschieden und im Eis eingeschlossen. Durch die eingeschlossenen Luftteilchen ist das Eis undurchsichtig und milchig weiß. [9]

Die andere Eisvariante ist das „Klareis“. Klareis wird ebenfalls industriell aus Leitungswasser hergestellt, jedoch mit dem Unterschied dass bei dem Eiserzeugungsprozess Bewegung in das zu gefrierende Wasser eingebracht wird. Diese kann z.B. durch Schütteln, Lufteinblasen oder durch das Herunterrieseln von Wasser an einer kühlenden Oberfläche geschehen. Bei der Bewegung wird Luft aus dem Wasser entfernt und kann deshalb nicht im Eis eingeschlossen werden. Das entstandene Eis ist daher klar und durchsichtig. [9]

Eis wird auch durch folgende Formen unterschieden:

- Blockeis
- Schnee-Eis und Brei-Eis
- Brucheis
- Scherbeneis
- Röhreneis

[9]

Das Scherbeneis findet große Verwendung bei sehr vielen Herstellungs- und Kühlprozessen. Die in der Einleitung erwähnten Herstellungsprozesse verwenden alle Scherbeneis. Ein mögliches Herstellungsverfahren von Scherbeneis ist das Gefrieren von Wasser an einer ins Wasserbad getauchten Trommel. In dieser Trommel verdampft das Kältemittel und entzieht so dem Wasser Wärmeenergie. An der Außenseite der Trommel bildet sich eine Eisschicht. Diese Schicht wird dann durch leichte Deformation der Trommel abgesprengt. [9]

Ein weiteres Herstellungsverfahren für Scherbeneis wird in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Auf die anderen Eisformen wird in dieser Arbeit nicht mehr eingegangen.

2.1.2. Funktionsweise des „BUCOdelot ice-pack“ Thermoblech-Eiszeugers

Der von der Firma „BUCO Wärmeaustauscher International GmbH“ entwickelte Eiszeuger produziert Scherbeneis als Klareis.

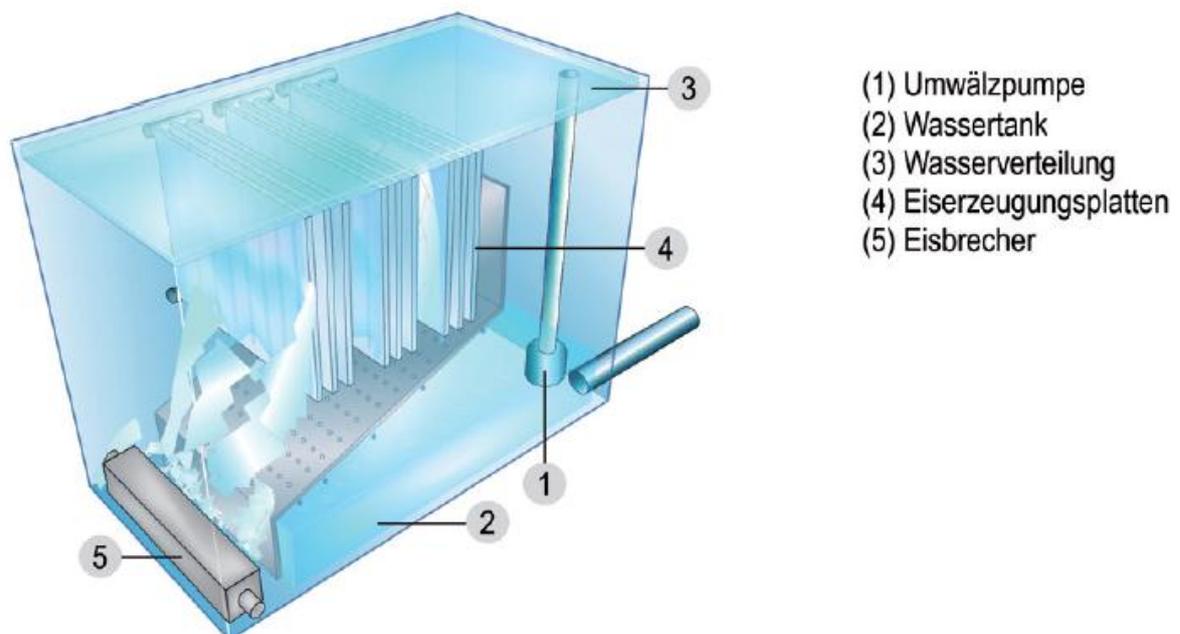


Abbildung 2: Aufbau des BUCOdelot ice-pack [7]

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau des BUCO Eiserzeugers dargestellt. Das Eis wird wie folgt erzeugt:

1. Das Frischwasser wird durch den Frischwasserzulauf in den Wassertank (2) geleitet
2. Das Frischwasser wird durch eine Umwälzpumpe (1) aus dem Wassertank (2) angesaugt und zum Wasserverteiler (3) gefördert.
3. Der Wasserverteiler (3) ist eine Wanne mit Lochreihen, die sich über den Eiserzeugungsplatten (Thermobleche) (4) befinden. Das Wasser strömt durch die Lochreihen und rieselt dann an den Eiserzeugerplatten herunter.
4. In den Eiserzeugerplatten (4) verdampft flüssiges Kältemittel und kühlt so das Wasser ab. Bis das Wasser gefriert muss es erst auf nahe 0°C abgekühlt werden. Die Wasserversorgung ist ein zirkulierender Betrieb. Das Wasser kann sich so nach und nach abkühlen.
5. Hat das Wasser die gewünschte Temperatur erreicht, beginnt das Wasser langsam an den Eiserzeugerplatten zu gefrieren. Durch das weiter anhaltende zirkulieren des Wassers wird die Eisschicht immer dicker.
6. Nach einer bestimmten Anfrierzeit, wird die Abtauung eingeleitet.
7. Dabei strömt heißes Kältemittelgas in die Eiserzeugungsplatten (4) und taut so die wandnahe Eisschicht ab. Durch den sich bildenden Wasserfilm lösen sich die Eisschichten von den Platten und fallen dann auf ein Gitter.
8. Das Gitter trennt das Eis von dem herunterrieselnden Wasser.
9. Aufgrund der Neigung des Gitters gleiten die durch den Aufprall schon zerbrochenen Eisplatten zur rotierenden Welle (Eisbrecher) (5)
10. Der Eisbrecher (5) zerkleinert dann das Eis zu kleinen Eisscherben. [16]

Das entstandene Scherbeneis kann danach über Förderbänder oder Förderschnecken einem Prozess zugeführt werden. Je nach Wunsch kann die Dicke der Eisscherben variiert werden. Dies geschieht durch Erhöhung oder Erniedrigung der Anfrierzeit. [16]

Die Abbildungen 3 bis 6 zeigen Fotos von der Inbetriebnahme eines BUCO-Eiserzeugers in einer Wurstfabrik. Diese Fotos veranschaulichen einen realen Prozess der Eiserzeugung.



In der Abbildung 3 ist ein BUCO Eiserzeuger fotografiert worden. Dieser stellt Scherben eis für eine Wurstwarenproduktionsanlage her.

Abbildung 3: BUCO Eiserzeuger in Wurstwarenproduktionsanlage



In der Abbildung 4 ist das Innenleben eines BUCO Eiserzeugers zu sehen. Hier sind die Eiserzeugerthermobleche erkennbar.

Abbildung 4: Innenleben BUCO Eiserzeuger



Abbildung 5: Erstes Scherbeneis nach der Abtaung



Abbildung 6: Einsatzbereites Scherbeneis

In der Abbildung 5 ist das erste Abgetaute Eis nach der Zerkleinerung durch die Eisbrecher zu sehen. Oben im Bild sind die Eisbrecher abgebildet. Das Scherbeneis liegt auf einem Förderband, das sich unter dem Eiserzeuger befindet.

In der Abbildung 6 ist das erzeugte Scherbeneis zu sehen. Dieses Eis kann nun dem Produktionsprozess über ein Förderband beigefügt werden.

2.1.3. Beschreibung des Thermobleches „BUCOplate“

Die BUCO Eiserzeuger bestehen aus sogenannten Thermoblechen. Diese haben sehr gute thermodynamische Eigenschaften. Sie weisen eine große Wärmeübertragungsfläche auf und haben eine hervorragende Stromführung [8]. Es gibt viele unterschiedliche Varianten von Thermoblechen. Einige Thermoblechvarianten sind in der Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Thermoblechvarianten

Diese Thermobleche sind wie folgt aufgebaut:

1. Zwei glatte Blechtafeln gleicher oder unterschiedlicher Wanddicke werden durch Laser- oder Widerstandsschweißung mit einander verbunden. Das Schweißmuster kann jedoch von Blech zu Blech verschieden sein. Bei manchen Blechen gibt es Ringmuster, welches außen voll verschweißt ist. Dies kommt auf den Anwendungsfall des Thermobleches an.
2. Zwei Anschlüsse werden an die verschweißten Thermobleche geschweißt. Mit Hilfe der Anschlüsse werden die Bleche dann hydraulisch mit Luft aufgedrückt. Durch das Aufdrücken entstehen Kanäle in den Blechen. Durch diese Kanäle strömt dann das kalte oder heiße Medium.
3. Anschließend werden die Bleche nach Bedarf poliert, gebeizt oder elektropoliert. Dies hängt dann ebenfalls vom Einsatzbereich des Thermobleches ab. [14];[4]

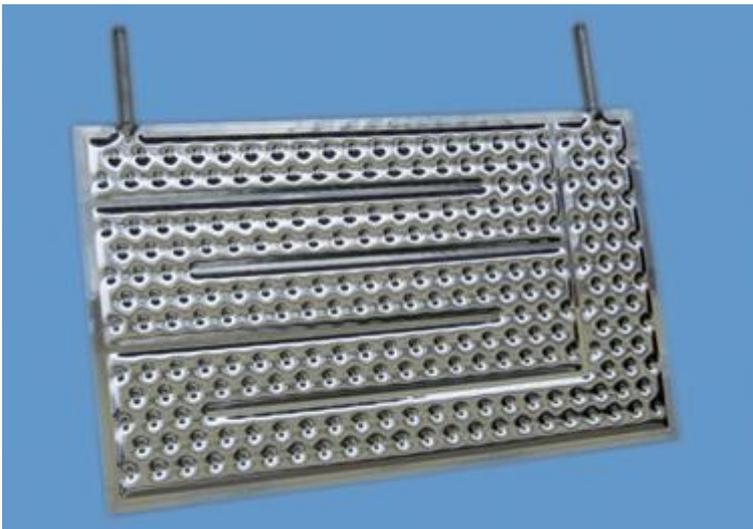


Abbildung 8 zeigt ein fertiggestelltes Thermoblech. Das Schweißmuster und die aufgedrückte Form sind deutlich erkennbar. Bei dieser Abbildung handelt es sich jedoch nicht um das Thermoblech eines Eiserzeugers.

Abbildung 8: Variante eines Thermoblechs [7]

Thermobleche werden meist zu Wärmeaustauschsystemen zusammen gebaut. [14] In der Abbildung 4 (Kapitel 2.1.2) des Innenlebens eines Eiserzeugers war ein solches System zu erkennen.

Das in Abbildung 9 dargestellte Thermoblech wird in BUCO Thermoblech-Eiszeugern eingebaut. Die rot hervorgehobenen Linien sind die Schweißnähte, die die einzelnen Wege der Stromführung trennen. Jeder Weg hat drei Kanäle in denen dann das Kältemittel strömt. Bei dieser Form des Thermoblechs wird das flüssige Kältemittel von unten eingebracht und verdampft, dann strömt es von Weg zu Weg bis es oben zum größten Teil gasförmig austritt.

Die in Abbildung 9 dargestellte Form des Thermoblechs wird den Berechnungen und Analysen in dieser Arbeit zugrunde gelegt. Diese Abbildung ist ein veränderter Ausschnitt, aus der im Anhang dargestellten Abbildung 23.

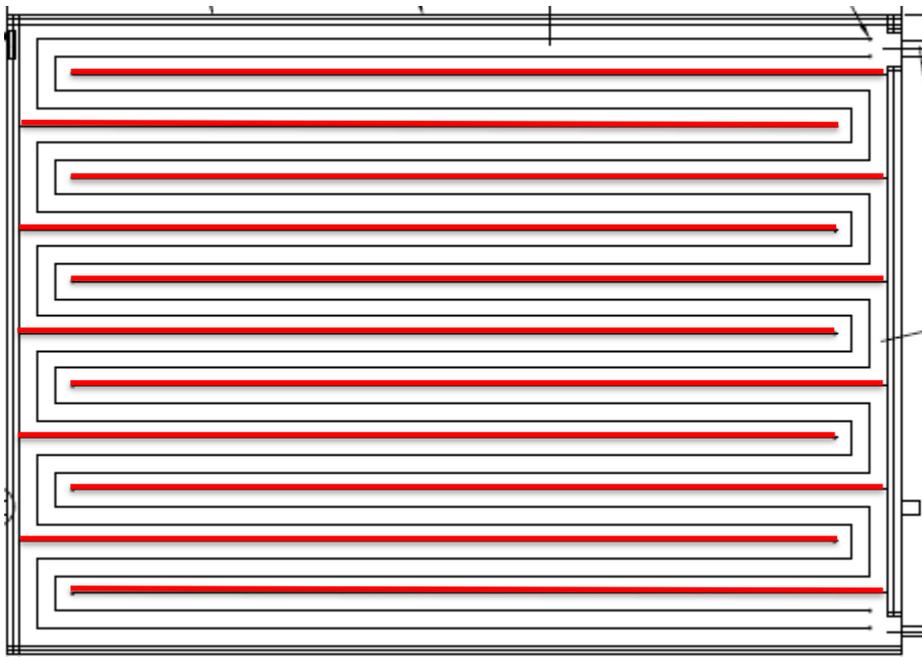


Abbildung 9: Eiszeugerplatte

Sehr interessant ist die Querschnittsform der Kanäle. Sie ist nicht rund wie ein Rohr, sondern erinnert eher an eine Ellipse. Abbildung 10 zeigt die Querschnittsform der Strömungskanäle.

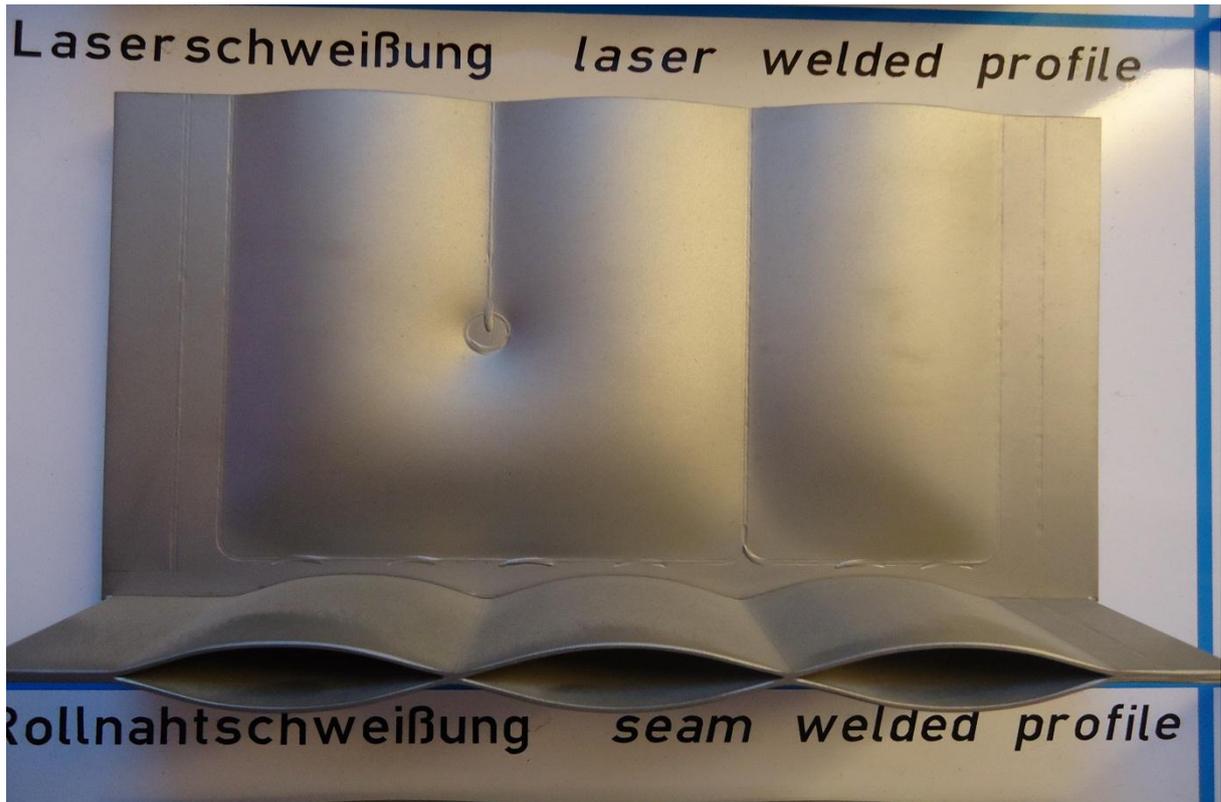


Abbildung 10: Querschnitt Eiserzeuger-Thermoblech

Durch die Annahme einer elliptischen Form der Kanäle kann die Querschnittsfläche und der Umfang der Kanäle nach folgenden Formeln berechnet werden: [11]

$$A_{EU} = \pi \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{h}{2} \quad (5) [12]$$

$$U_{EU} \approx \pi \cdot \left[1,5 \cdot \left(\frac{h}{2} + \frac{b}{2} \right) - \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{h}{2}} \right] \quad (6) [12]$$

Zur Veranschaulichung der Formelparameter dient Abbildung 11:

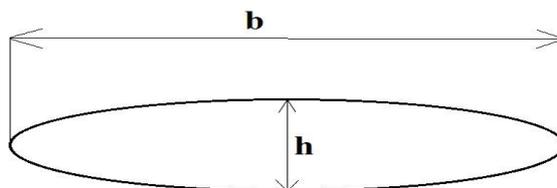


Abbildung 11: Annahme elliptischer Querschnitt [11]

2.1.4. Ammoniak als Kältemittel

Als Kältemittel werden Flüssigkeiten bezeichnet, die bei niedrigen Temperaturen und niedrigen Drücken verdampfen und so Wärmeenergie aus der Umgebung aufnehmen. Beim Wiederverflüssigen der Kältemittel wird die vorher aufgenommene Wärmeenergie wieder an die Umgebung abgegeben. [2]

Das Kältemittel Ammoniak (R717) ist ein natürliches Kältemittel. Es ist nicht ozonzerstörend und trägt auch nicht zum Treibhauseffekt bei. R717 verfügt über sehr gute thermodynamische Eigenschaften, wie hohe Verdampfungsenthalpie, gute volumetrische Kältemittelleistungen (umlaufende Kältemittelmasse wird kleingehalten) und geringe Entflammbarkeit. Außerdem ist Ammoniak sehr billig in der Herstellung und steht daher in großen Mengen zur Verfügung.

Einziger Nachteil von R717 ist seine hohe Toxizität und hohe Löslichkeit in Wasser. [15]

2.1.5. Ammoniak-Kreislauf bei der Eiserzeugung

Kompressionskälteanlagen basieren auf einem Kreisprozess bei dem das verdampfte Kältemittel wieder verflüssigt wird und so dem Prozess wieder zugeführt wird. [19]

In der Abbildung 12 ist der Kältemittelkreislauf eines theoretischen BUCO-Eiserzeugungsprozesses dargestellt. Das flüssige Ammoniak wird aus dem Flüssigkeitsabscheider (5) mittels einer Kältemittelpumpe in einen Sammler (7) gepumpt. Über den Sammler (7) wird das Ammoniak in die Thermobleche (8) aufgeteilt. In den Thermoblechen verdampft das meiste Ammoniak und gelangt dann als Nassdampf in den oberen Sammler. Durch den Saugdruck des Verdichters (1) gelangt der Ammoniak-Nassdampf wieder in den Flüssigkeitsabscheider. Aus dem Flüssigkeitsabscheider wird nur das Ammoniakgas vom Verdichter (1) angesaugt. Das Ammoniakgas muss frei von flüssigem Ammoniak sein, damit der Verdichter keinen Schaden durch Flüssigkeitsschläge bekommt. Im Verdichter wird das Ammoniakgas auf einen bestimmten Druck, den Kondensationsdruck, verdichtet. Danach gelangt das verdichtete heiße Ammoniakgas in den Kondensator (2) wo es kondensiert. Bevor das flüssige Ammoniak wieder dem Kreislauf zugegeben werden kann wird es noch durch das Expansionsventil (4) auf den Verdampfungsdruck entspannt. [9][2][18]

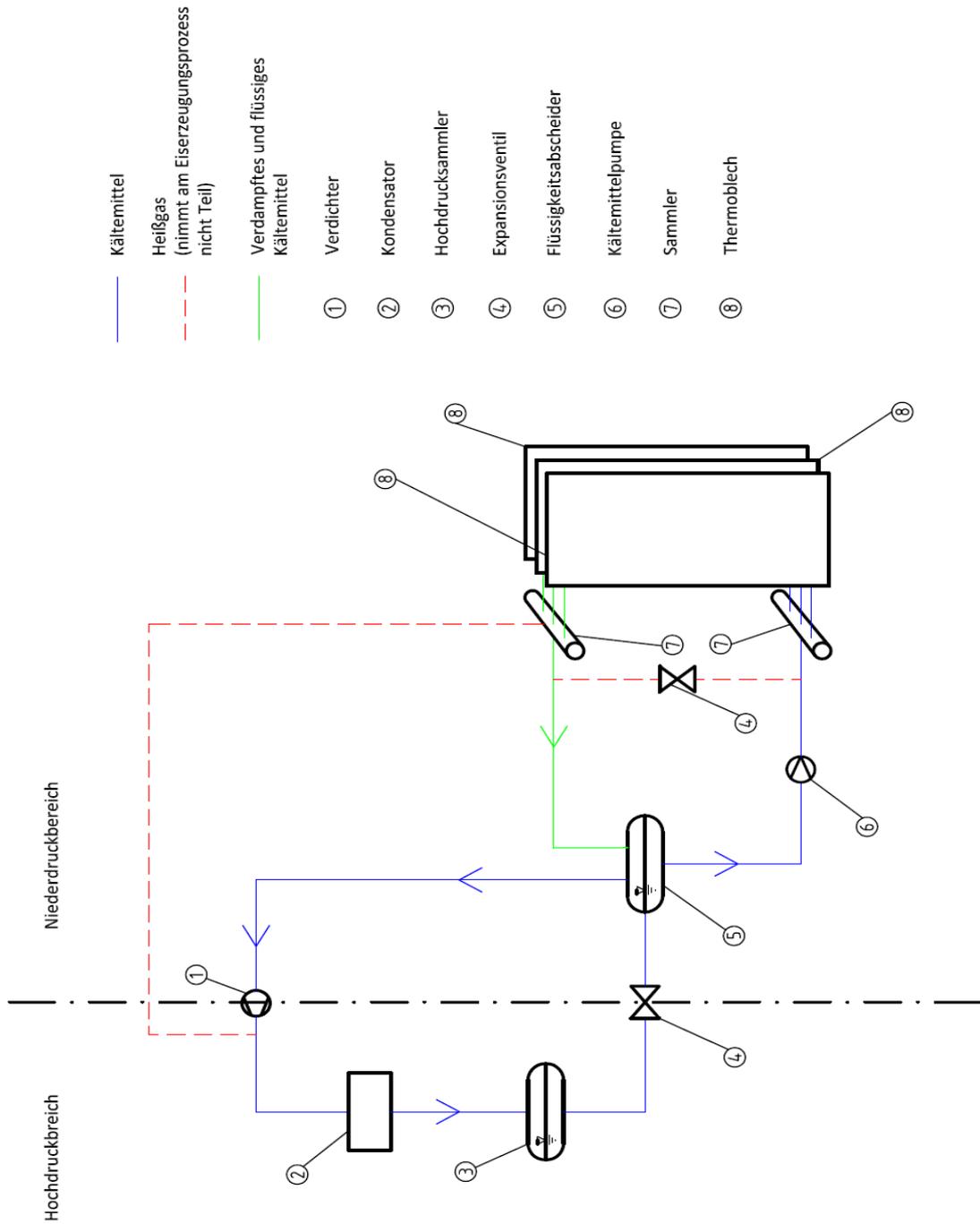


Abbildung 12: Kältemittelkreislauf von BUCO Eiserzeugern

Wichtig für die Wahl des geeigneten Verdichtungsendrucks ist die Kenntnis über herrschende Umgebungstemperaturen. Das verdichtete Kältemittel muss eine höhere Kondensationstemperatur aufweisen als die Umgebungstemperatur. Für eine europäische durchschnittliche Umgebungstemperatur von 21°C, wird für das Ammoniakgas eine Kondensationstemperatur von 35°C gewählt. Dies entspricht bei Ammoniak einem Druck von 13,5 bar. Die Kondensationsdrücke und dazugehörigen Kondensationstemperaturen können aus Tabellenwerken für die verschiedenen Kältemittel entnommen werden. [16]

2.1.6. Wärmeübergang bei der Eiserzeugung

Der Eiserzeugungsprozess ist sehr komplex. Bevor das Wasser an den Thermoblechoberflächen anfrieren kann, müssen die Thermoblechwände abgekühlt werden. Dies geschieht meist sehr schnell, da die Thermobleche kleine Wandstärken haben. Außerdem muss das Frischwasser ebenfalls vom verdampfenden Ammoniak auf nahe 0°C abgekühlt werden. [16]

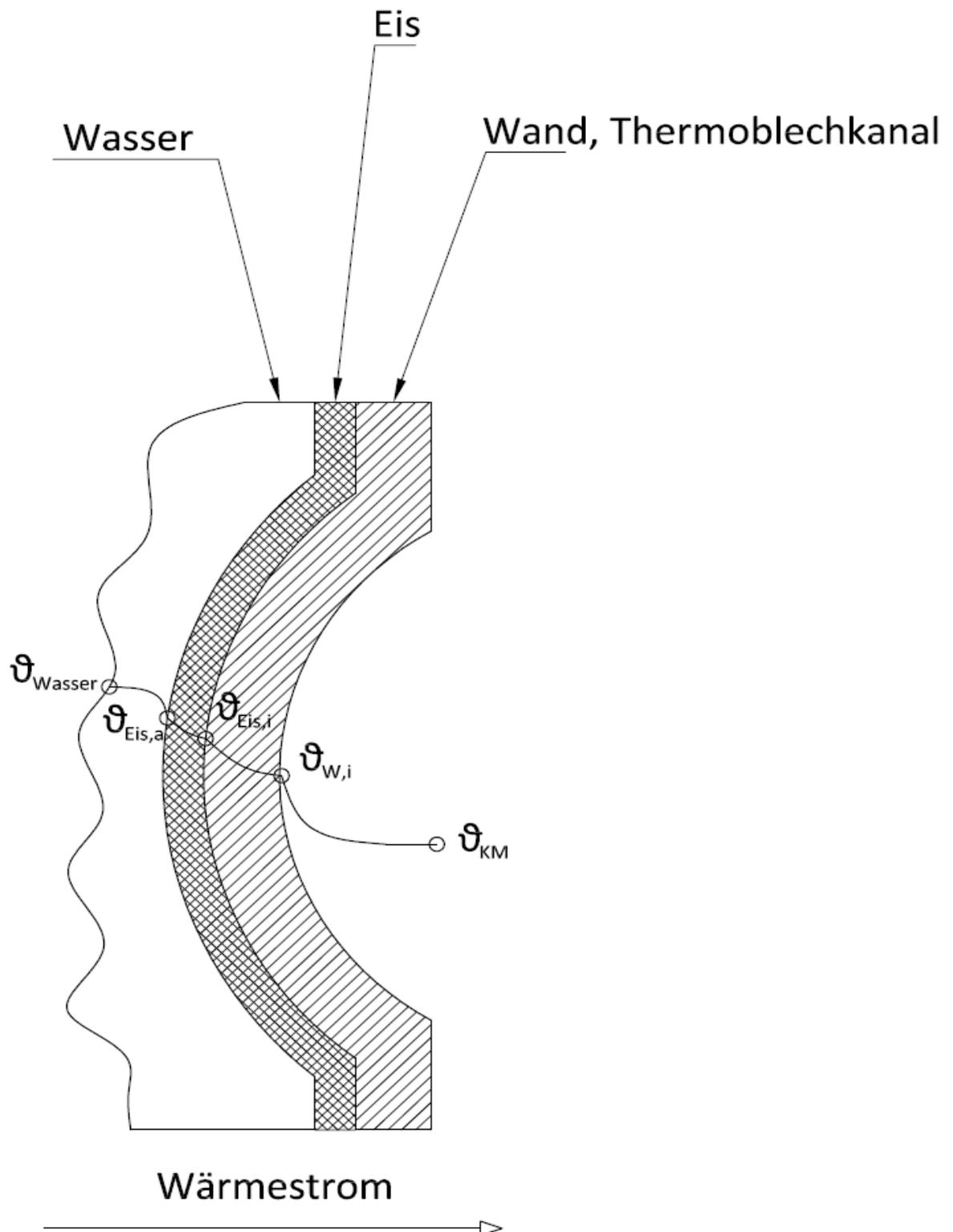


Abbildung 13: Theoretischer Verlauf des Wärmestroms durch die Platte bei Eisabtauung

Der in Abbildung 13 dargestellte Fall der Eiserzeugung, stellt den Wärmeübergang bei der Bildung von Eis an der Außenwand des Thermobleches dar. In dieser Betrachtung ist das Thermoblech bereist abgekühlt und das Wasser wurden ebenfalls auf eine Temperatur von nahe 0°C abgekühlt. Bei dieser Betrachtung wird Wärmeenergie vom rieselnden Wasser durch das Eis und die Wand an das Ammoniak abgegeben. Die aufgenommene Wärmeenergie des Kältemittels bewirkt das Verdampfen des Ammoniaks. Durch die Abnahme der Enthalpie des Wassers erstarrt dieses immer mehr zu Eis, dadurch wächst die Eisschicht.

2.2. Eisabtauung

Die Eisabtauung ist nicht nur ein Prozessschritt der industriellen Erzeugung von Eis durch anfrieren von Wasser. Die Methode des Abtauens wird in der Kältetechnik überwiegend bei Verdampfern eingesetzt, die die Luft für Kühlhäuser kühlen. Bei der Kühlung von Luft kondensiert und gefriert der in der Luft enthaltene Wasserdampf am Verdampfer. Das sich nach und nach bildende Eis verschlechtert den Wärmeübergang und sorgt so für eine schlechte Kühlung der Luft. Dieses Eis muss daher immer wieder vollständig entfernt werden. Dies kann durch die Heißgasabtauung oder andere Varianten realisiert werden. [12][9]

2.2.1. Varianten der Eisabtauung

Es werden folgende Verfahren zum Abtauen von Verdampfern Eingesetzt:

- Abtauen mit Luft
- Abtauen mit Wasser
- Abtauen mit Sole
- Abtauen durch elektrische Heizung [9]

Das Abtauen mit Luft wird bei Verdampfern durchgeführt, deren Oberflächentemperaturen unter 0°C liegt, die aber bei Umgebungstemperaturen von über 4°C arbeiten. [9]. Bei dieser Methode werden die Verdampfer durch einen von Ventilatoren erzeugten Luftstrom abgetaut. Dabei wird die Wärmeenergie zum Abtauen aus der strömenden Luft entnommen.

Dieser Abtauprozess ist sehr zeitaufwendig. Je näher die Umgebungstemperatur an der Gefriertemperatur liegt, desto länger dauert die Abtauung. [9][12]

Beim Abtauen mit Wasser wird das Wasser auf den vereisten Verdampfer berieselt. Das Wasser kann aus dem Kondensator entnommen werden oder aus einem speziell für die Abtauung angefertigten Wasserkreislauf mit beheiztem Behälter stammen. Nach der Abtauung müssen die Verdampfer komplett von Wasser frei sein, sonst wird das Wasser am Verdampfer gefrieren. [9][12]

Das Abtauen mit Sole funktioniert ähnlich wie das Abtauen mit Wasser. Die Sole wird ebenfalls auf den vereisten Verdampfer berieselt. Durch eine Gefrierpunktniedrigung des Eises durch die Sole taut der Verdampfer ab. Ein Nachteil bei dieser Methode ist die Regeneration der Sole, deren Konzentration während der Abtauung abnimmt. [9] Eine weitere Möglichkeit wäre erwärmtes Glykol in einer im Verdampfer liegenden Rohrleitung strömen zu lassen. Der dabei auftretende Wärmestrom könnte für die Eisabtauung genutzt werden. [12]

Beim Abtauen durch elektrische Heizung sind im Verdampfer Heizstäben eingeführt. Diese werden periodisch aktiviert. Diese Abtaumethode wird bei kleinen und mittleren Kälteanlagen eingesetzt. [9]

2.2.2. Beschreibung der Heißgasabtauung von BUCO Thermoblech-Eiserzeugern

Es gibt folgende Möglichkeiten das Heißgasabtausystem zu realisieren:

- Abtauen durch direkte Zufuhr des Kältemittelgases
- Abtauen durch Heißdampfbypassregler
- Abtauen durch Prozessumkehr

[3]

In dieser Arbeit wird nur die Abtauung durch das direkte Einleiten des Ammoniakgases betrachtet.

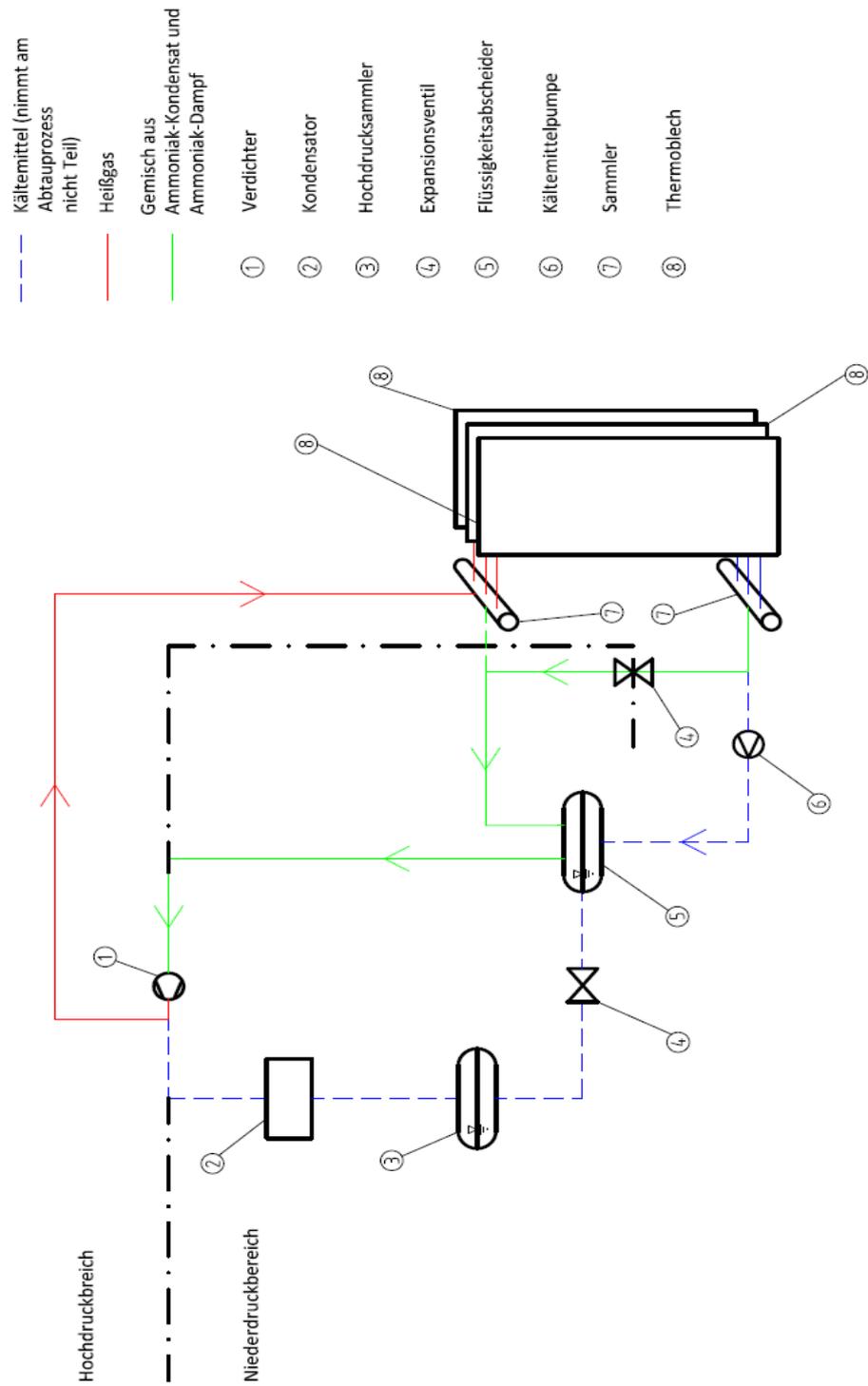


Abbildung 14: Kältemittelkreislauf bei der Eisabtaugung

Das in Abbildung 14 dargestellt RI-Fließbild zeigt den theoretischen Ammoniakkreislauf während der Eisabtauung. Das verdichtete heiße Ammoniak gelangt über ein Ventil in die Heißgasleitung. Über den oberen Sammler (7) wird das heiße Ammoniakgas in die Thermobleche (8) geleitet. In den Thermoblechen (8) kondensiert das heiße Ammoniakgas zum Teil und tritt dann aus den Thermoblechen in den unteren Sammler (7) ein. Das zum Teil kondensierte Ammoniakgas gelangt dann über eine Rohrleitung zum Expansionsventil (4). Danach gelangt das entspannte Ammoniak zum Flüssigkeitsabscheider (5). Von dort aus wird das reine Ammoniakgas vom Verdichter wieder angesaugt und verdichtet.

Beim oben beschriebenen Prozess wird nur das Verhalten des in den Thermoblechen strömenden Kältemittels betrachtet. Am Thermoblech geschieht folgendes während der Abtauung:

1. Das Wasser rieselt weiter an den Thermoblechen herab.
2. Nach kurzer Zeit beginnt das Eis sich an den ersten Wegen des Thermoblechs zu lösen. Das Eis fällt aber noch nicht ab, da das Eis an den unteren Wegen des Thermoblechs noch nicht ganz abgetaut ist.
3. Das Wasser dringt zwischen Eis und Thermoblechwand und drückt so das Eis etwas weiter vom Thermoblech weg.
4. Das Eis wird durch sein Eigengewicht nach unten gedrückt und durch den Druck des Wassers bricht es dann und fällt herunter.
5. Das restliche, sich im unteren Bereich des Thermoblechs befindende Eis löst sich ebenfalls und fällt herunter. [16]

Die Kenntnis über den Zustand des Ammoniakgases nach der Verdichtung ist für die Heißgasabtauung nicht uninteressant. Aus dem Zustand des Ammoniakgases könnten Vorüberlegungen über den Verlauf der Heißgasabtauung getroffen werden.

2.2.3. Thermodynamischer Zustand des heißen Ammoniakgases

Nach der Verdichtung steht das heiße Ammoniakgas unter einem erhöhten Druck, nämlich dem Kondensationsdruck. Während der Verdichtung wird das Ammoniakgas stark

komprimiert. Der Verdichter überträgt mechanische Leistung auf das Ammoniakgas und erhöht so die Enthalpie des Ammoniakgases. Die Erwärmung des Ammoniakgases wird nicht nur durch Wärmeenergie erzeugt, die aus der Umgebung aufgenommen wurde, sondern überwiegend durch die Aufnahme der mechanischen Leistung des Verdichters. Daher bringt die Verdichtung auch eine starke Temperaturerhöhung mit sich. Das heiße Ammoniakgas befindet sich nach der Verdichtung im überhitzten Zustand. Diesen Zustand macht man sich bei der Heißgasabtauung zunutze. [16]

Der BUCO Eiserzeuger kann bei der Heißgasabtauung als Kondensator betrachtet werden. Das eingeleitete überhitzte Ammoniakgas wird in den Thermoblechen entthitzt. [3] Je nach Eintrittstemperatur und Eintrittsdruck des Ammoniakgases setzt auch die Kondensation des Ammoniakgases ein.

2.2.4. Wärmeübergang bei der Heißgasabtauung

Der Abtauprozess ist ebenso komplex wie der Eiserzeugungsprozess. Dabei müssen die Thermoblechwände und das Eis erst erwärmt werden bevor das Antauen der Eisoberfläche beginnen kann.

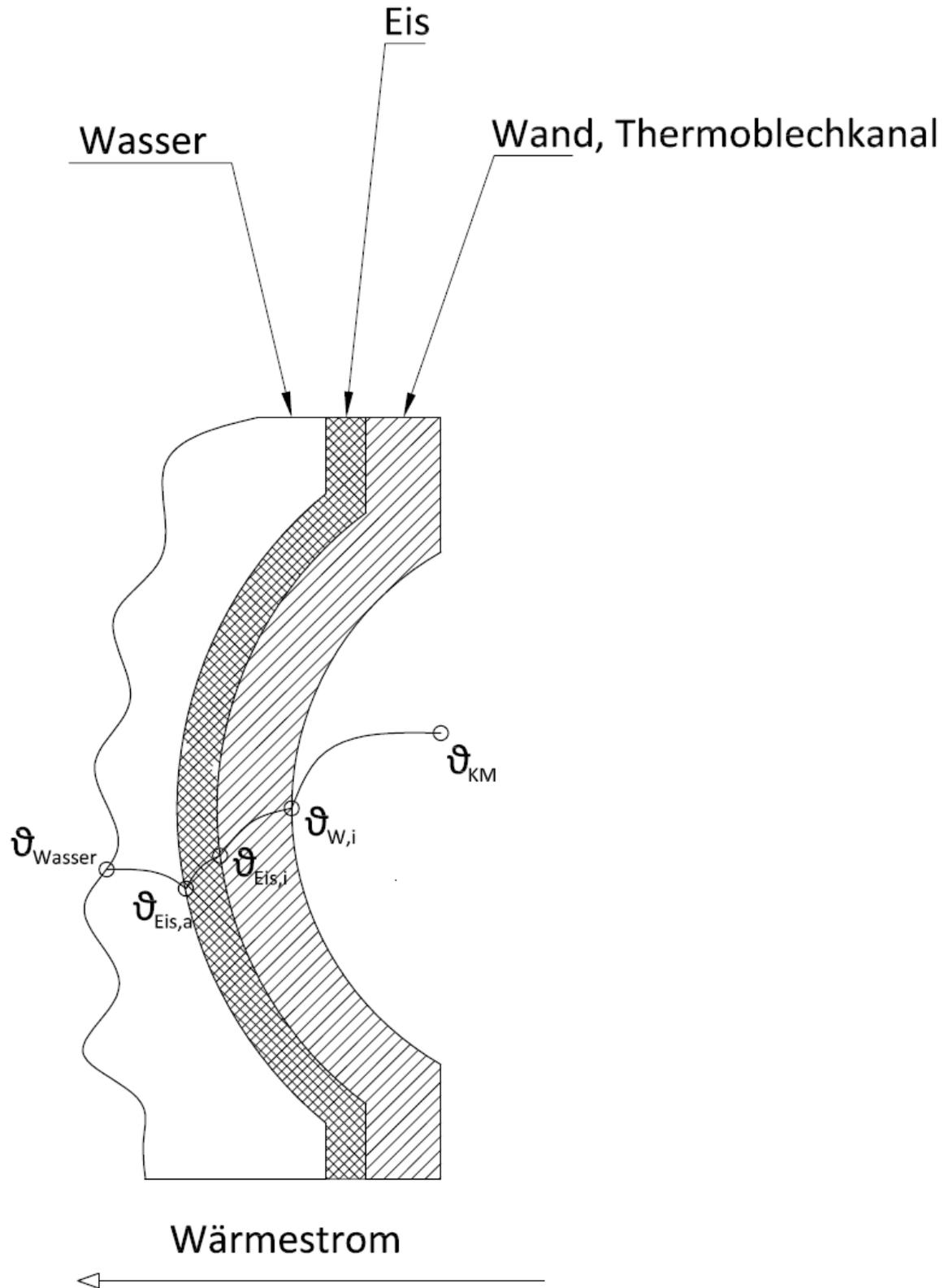


Abbildung 15: Theoretischer Verlauf des Wärmestroms während Abtauung

In Abbildung 15 ist der schematische Wärmübergang bei der Eisabtauung dargestellt. Der Wärmestrom wird durch erzwungene Konvektion vom Heißgas an die Thermoblechwand abgegeben. Dieser wird durch die Wand an das Eis abgegeben. Vom Wasser wird ebenfalls ein sehr kleiner Wärmestrom an das Eis abgegeben.

In der Nähe der Wand findet eine Kondensation des Heißgases statt. Bei Thermoblechen ist es noch nicht erforscht worden, wie die wandnahe Kondensation abläuft.

Der Zusammenhang zwischen Wärmestrom und der Temperaturänderung des Heißgases ergibt sich näherungsweise aus der kalorischen Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$\dot{Q}_{Hg,K} = \dot{m}_{Hg} * c_{p,Hg} * (\vartheta_{Hg,\alpha} - \vartheta_{Hg,\omega}) \quad [1] \quad (7)$$

Andererseits gilt für den Wärmestrom die Gleichung für den konvektiven Wärmeübergang:

$$\dot{Q}_{Hg} = \alpha * A * (\vartheta_{Hg} - \vartheta_{W,i}) \quad [1] \quad (8)$$

In der Gleichung (8) ist α der mittlere Wärmeübergangskoeffizient und A die Wärmeübertragungsfläche.

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient kann über die Nußelt-Zahl Nu berechnet werden.

$$Nu = \frac{\alpha * d_h}{\lambda_{Hg}} \quad [1] \quad (9)$$

Umformung nach α :

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{Hg}}{d_h} \quad [1] \quad (10)$$

Der Thermoblechkanal ist kein Rohr, daher muss der hydraulische Durchmesser d_h für die Berechnung der Nußelt-Zahl gewählt werden. Dieser wird nach folgender Beziehung berechnet:

$$d_h = \frac{4 * A_{EU}}{U_{EU}} \quad [9]. \quad (11)$$

A_{EU} und U_{EU} können nach Gleichung (5) und (6) berechnet werden.

Die Nußelt-Zahl kann anhand von folgenden empirisch ermittelten Korrelationen berechnet werden:

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} * \left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^{0,14} \quad [1] \quad (12)$$

Geltungsbereich für Gleichung (12): $0,5 < Pr < 120$, $10^4 < Re < 10^5$, $L/d_h \sim 60$.

$$Nu = 0,037 * (Re^{0,75} - 180) * Pr^{0,42} * \left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] * \left(\frac{\eta}{\eta_0}\right)^{0,14} \quad (13)$$

[1]

Geltungsbereich für Gleichung (13): $2300 < Re < 10^5$, $0,5 < Pr < 500$, $L/d_h \sim 10$.

$$Nu = \frac{\left(\frac{\zeta}{8}\right) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \sqrt{\frac{\zeta}{8}} * (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] \quad [1] \quad (14)$$

mit ζ :

$$\zeta = \frac{1}{(0,790 * \ln(Re) - 1,64)^2} \quad [1] \quad (15)$$

Geltungsbereich für Gleichung (14): $2300 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$, $0,5 \leq Pr \leq 2000$, $L/d_h > 1$

Die Re-Zahl wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$Re = \frac{\omega_{Hg} * \rho_{Hg} * d_h}{\eta_{Hg}} \quad [1] \quad (16)$$

Die Pr-Zahl kann aus dem aus Tabellenwerken entnommen werden.

Diese Korrelationen sind bei turbulenter Strömung zu wählen. Alle Stoffwerte sollen auf die arithmetische mittlere Temperatur ϑ_m bezogen werden. [1]

$$\vartheta_m = \frac{\vartheta_{Hg,\alpha} + \vartheta_{Hg,\omega}}{2} \quad [1] \quad (17)$$

3. Literaturrecherche zur Eisabtauung

Die Bachelorarbeit wurde mit einer umfangreichen Literaturrecherche begonnen. Dies war ein sehr wichtiger Teil der Arbeit, da das Ziel dieser Arbeit nur anhand von theoretischen Betrachtungen und Verständnissen erreicht werden konnte.

Die Literaturrecherche wurde auf eine Internet- und eine Bibliotheksrecherche aufgeteilt. Es wurde sowohl nach deutschsprachiger als auch englischsprachiger Literatur gesucht.

Am Anfang wurde im Internet recherchiert. Es wurden als erstes Stichwörter gesammelt bevor das Suchen begonnen werden konnte. Anhand folgender Stichwörter wurde die Internetsuche durchgeführt:

Deutsch: Kälteanlagen abtauen; Heißgas; Heißgasabtauung; Eiserzeugung; Eisabtauung; Kältetechnik; Kunsteis; Thermoblech; Wärmetauscher

Englisch: hot gas defrosting of evaporators; simulation of hot gas defrosting of evaporators; hot gas defrosting; hot gas defrosting cycle

Anfangs wurde die Suchmaschine Google verwendet. Es wurde viel Material gefunden, aber von diesem Material war kaum etwas zu gebrauchen, weil vieles eher Firmenprospekte waren auf denen nur ihr Produkt angepriesen wurde. Es wurden aber außerdem viele wissenschaftliche Suchmaschinen gefunden. Es wurden folgende Suchmaschinen für die weitere Internetsuche verwendet:

- Google scholar
- Scirus
- Scientific Commons
- BASE Search

Die Internetsuche war jedoch nicht sehr ergiebig. Die einzig gute Quelle war eine Masterarbeit aus den USA. Das komplette Ergebnis der Internetsuche ist in Tabelle 4 im Anhang aufgeführt.

Ergiebiger war die Recherche in den wissenschaftlichen Bibliotheken. Dafür wurde ein Online-Katalog auf der Homepage der HAW-Hamburg verwendet. Dieser Katalog umfasst alle wissenschaftlichen Bibliotheken in Hamburg. Es wurde ebenfalls mit dem Erstellen von Suchwörtern begonnen. Folgende Stichwörter wurden zusammengetragen:

Deutsch: Heißgas; Eisabtauung; Eiserzeugung; Kunsteis; Thermobleche; Thermoplatte; Eiserzeuger; Abtauarten; Abtaumöglichkeiten; Parameterstudie; Berechnungsmodell; Korrelation; Wärmeleitung; Wärmeübergang; Wärmedurchgang; Energiebilanz; Kältemittel; Ammoniak; Energieeffizienz; Kältetechnik;

Englisch: hot gas, ice defrosting, defrosting, ice production, thermoplate, ice maker, artificial ice, defrost variants, parametric study, calculation model, heat transfer, heat conduction, energy balance, correlation engineering, refrigerant, ammonia, reliability energy efficiency.

Das Ergebnis der Suche ist in Tabelle 5 im Anhang aufgeführt.

Die Bibliotheksrecherche war ergiebiger, da fast alle Bücher und auch Magazine verfügbar waren.

4. Studie des Einflusses der Heißgasparameter Massenstrom und Temperatur auf die Abtaung

Die Einflussstudie wird anhand eines erstellten Excel Programms durchgeführt. Das Programm wurde auf Grundlagen des unten beschriebenen Modells aufgebaut. Zur Orientierung wurden von BUCO folgende Werte vorgegeben:

- Heißgastemperatur: 70°C
- Heißgasmassenstrom: 60 kg/h
- Abtauzeit: 60s

Dies sind jedoch Erfahrungswerte und wurden deshalb noch nicht untersucht. Sie wurden auf Grundlagen der Prozesssicherheit gewählt.

4.1. Modell zur Berechnung der Eisabtaung

Für die Entwicklung des Modells auf dem die Berechnung aufbaut, wurde nochmals der Wärmeübergang bei der Eisabtaung betrachtet (siehe Kap. 2.2.4.).

Wie bereits in der Theorie erwähnt, ist der Abtauprozess sehr komplex aufgebaut. Der Abtauprozess ist mit vielen, von der Zeit abhängenden Temperaturänderungen, wie das Erwärmen des Thermobleches und des Eises auf 0°C, verbunden. Die starke Zeitabhängigkeit macht aus der Abtaung einen instationären Prozess. Die Berechnung und Betrachtung eines instationären Prozesses ohne Messungen und Simulationen wäre im Rahmen dieser Arbeit nicht zu bewältigen. Daher musste ein quasistationäres Modell für die Berechnungen entwickelt werden. Dabei wurde die Überlegung angestellt, welcher Zeitpunkt des Abtauprozesses für die Einflussstudie am geeignetsten ist. Der Zeitpunkt für dieses Modell wurde so gewählt, dass das Eis und die Wand eine Temperatur von 0°C haben. Zu diesem Zeitpunkt ist die Erwärmung der Platte und des Eises auf 0°C abgeschlossen aber das Schmelzen des Eises hat noch nicht eingesetzt. Bei einem späteren Zeitpunkt wäre der Schmelzvorgang schon im vollen Betrieb. Daher erscheint der gewählte Zeitpunkt als sehr vielversprechend. Bei diesem Modell kann quasistationär der benötigte Wärmestrom erfasst werden, der für die Abtaung der wandnahen Eisschicht benötigt wird, damit sich das Eis von der Wand löst und herunterfällt.

Bei der Erstellung des quasistationären Modells wurden folgende Annahmen getroffen:

- Wärmeleitwiderstand der Wand und des Eises werden vernachlässigt.
- Thermischer Kontaktwiderstand zwischen Wand und Eis wird vernachlässigt.
- Eis und Wand haben die gleiche Temperatur.
- Für den Wärmeübergang wird der Fall der ebenen Wand berücksichtigt.
- Elliptische Form des Plattenquerschnittes wird nur bei der Berechnung der Re-Zahl und der Nu-Zahl berücksichtigt.
- Wärmestrom wird vom Schmelzen des Eises aufrechterhalten (Schmelzenthalpie).
- Kondensation an den Thermoblechwänden wird vernachlässigt.
- Kondensation tritt nur beim Erreichen der Kondensationstemperatur auf.
- Druckverluste im Thermoblech werden vernachlässigt.
- Im Thermoblech herrscht turbulente Strömung.

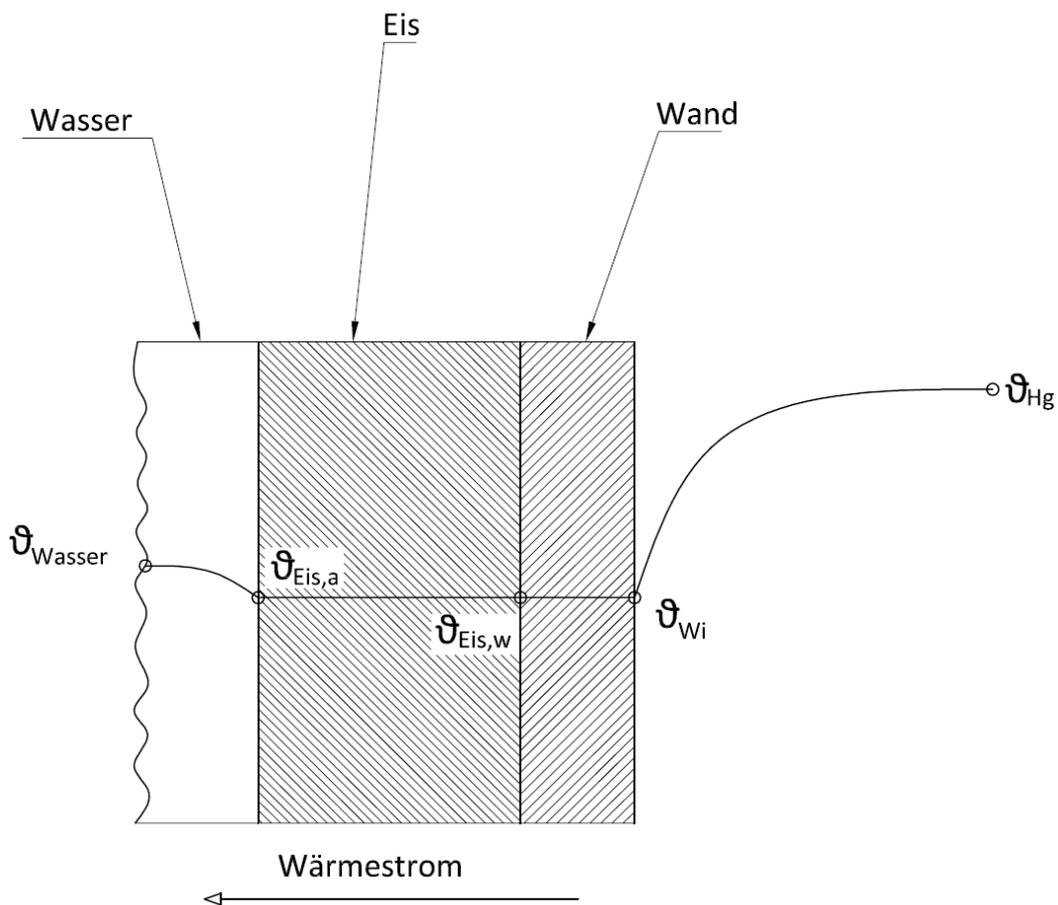


Abbildung 16: Quasistationäres Modell der Eisabtauung

Abbildung 16 zeigt das quasistationäre Modell des Wärmeübergangs bei der Eisabtauung, das unter Betrachtung des oben beschriebenen Zeitpunktes und der oben beschriebenen Annahmen erstellt wurde.

Durch die Vernachlässigungen der Wärmeleitwiderstände und der Kontaktwiderstände zwischen Eis und Wand wird der gesamte, vom heißen Ammoniakgas abgegebene, Wärmestrom vom Eis aufgenommen. Dies kann man in der Abbildung 16 als geraden Temperaturverlauf durch Thermoblechwand und Eis erkennen. Wie schon im Kapitel 2.2.4. erwähnt, kann die wandnahe Kondensation vernachlässigt werden, da dieser Sachverhalt noch nicht untersucht wurde. Außerdem ist für diese Einflussstudie nur das Verhalten des überhitzten Ammoniakgases interessant. Der in Abbildung 16 dargestellte Wärmestrom, der vom Wasser an das Eis übertragen wird, kann vernachlässigt werden, da er sehr gering ist.

4.2. Berechnungen für die Einflussstudie

Alle Berechnungen werden für die Heißgastemperaturen von 40-100 °C und für Heißgasmassenströme von 30-100 kg/h durchgeführt. Diese Parameter werden nur auf ein Thermoblech des Eiserzeugersystems bezogen. Der Druck des Heißgases kurz vor dem Eintritt in das Thermoblech wird mit 13,5 bar und die dazugehörige Kondensationstemperatur mit 35°C angenommen.

Der Heißgasdruck wurde unter folgenden Bedingungen mit 13,5 bar angenommen:

- Es wurde von der gängigen Kondensationstemperatur in Europa ausgegangen, welche 35°C beträgt. Der resultierende Kondensationsdruck beträgt 13,5 bar. Dieser Druck wird in etwa nach dem Verdichtungsprozess erreicht.
- Das nach der Verdichtung strömende Heißgas erfährt keine Druckverluste in der Rohrleitung und kommt so mit dem angenommenen Druck beim Thermoblech an.

4.2.1. Berechnung des Temperaturverlaufs des Heißgases in dem Thermoblech

Durch die oben getroffene Annahme hängt das Tauen des Eises nur von dem abgegebenen Wärmestrom des überhitzten Ammoniakgases ab. Da ein quasistationäres Modell betrachtet wird, ist der Temperaturverlauf im Thermoblech nur ortsabhängig.

Für die Berechnung des Temperaturverlaufs wurde das Thermoblech in Bilanzräume aufgeteilt.

Die Abbildung 17 zeigt die gewählte Aufteilung des Thermoblechs in Bilanzräume. Diese sind gestrichelt dargestellt und ergeben insgesamt 12 Bilanzräume (Anzahl der Wege des Thermoblechs).

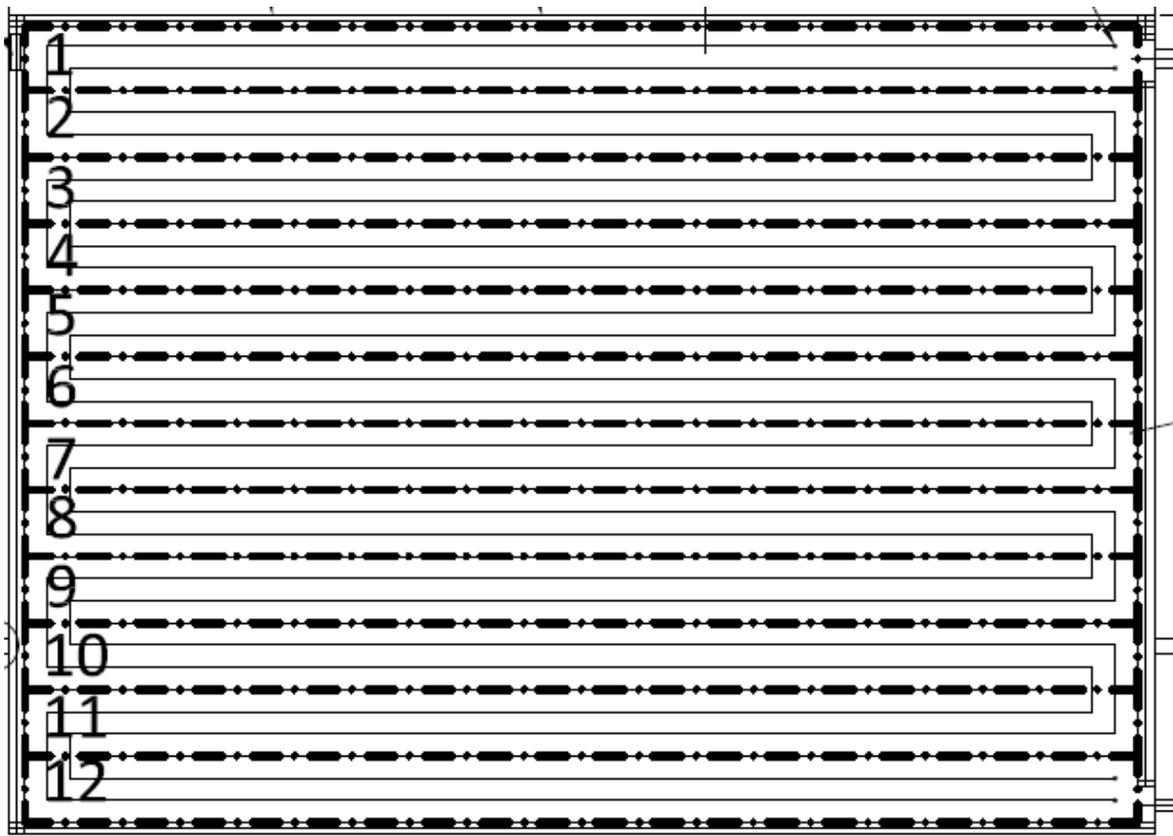


Abbildung 17: Angenommen Bilanzräume des Thermoblechs

Die Bilanzräume können beliebig klein gewählt werden. Wichtig ist jedoch das sie die Begrenzung eines Weges nicht überschreiten.



Abbildung 18: Mögliche Bilanzierung des Thermoblechs

Abbildung 18 zeigt eine mögliche Aufteilung des Thermoblechs in Bilanzräume. Hier ist der erste Weg des Thermoblechs in 3 Bilanzräume aufgeteilt.

Nach der Bilanzaufteilung kann eine Wärmebilanz aufgestellt werden, hierfür werden die Gleichung (3) und (7) gleichgesetzt.

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{Hg,K} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{Eis} * q_S = \dot{m}_{Hg} * c_{p,Hg} * (\vartheta_{Hg,\alpha,n} - \vartheta_{Hg,\omega,n}) \quad (19)$$

Auflösen der Wärmebilanz nach $\vartheta_{F,\omega,n}$:

$$\vartheta_{Hg,\omega,n} = \frac{\dot{m}_{Hg} * c_{p,Hg} * \vartheta_{Hg,\alpha,n} - \dot{m}_{Eis} * q_S}{\dot{m}_{Hg} * c_{p,Hg}} \quad (20)$$

$\vartheta_{Hg,\omega,n}$ ist die Austrittstemperatur des n-ten Bilanzraums. Zu beachten ist, dass die Austrittstemperatur eines Bilanzraums immer die Eintrittstemperatur des nächsten Bilanzraumes darstellt. Die spezifische Wärmekapazität ist abhängig von der Eintrittstemperatur eines Bilanzraumes. Sie wird durch Interpolation der im VDI Wärmeatlas [17] angegebenen Tabelle für c_p -Werte bestimmt. Diese Tabelle wurde in das Excel-Programm übernommen.

Für die Berechnung des Temperaturverlaufs muss noch die Menge des zu schmelzenden Eises \dot{m}_{Eis} im Bilanzraum für eine angenommene Abtauzeit t_A bestimmt werden. Die angenommene Abtauzeit ist 60s.

Für die Berechnung von \dot{m}_{Eis} muss vorerst aber noch die abzutauende Eisschichtdicke angenommen werden. Dafür wurden folgende Überlegungen aufgestellt:

- Haftung des Eises an der Oberfläche wird durch gefrorenes Wasser bewirkt, das im flüssigen Zustand in die raue Oberfläche des Thermoblechs eingedrungen ist.

4. Studie des Einflusses der Heißgasparameter Massenstrom und Temperatur auf die Abtauung

- Die Oberflächenrauigkeit von geschweißten Stahlrohren befindet sich im Bereich von 0,05 bis 0,1 mm [17]. Diese kann auf die Thermoblechoberfläche übertragen werden.
- Das Abtauen einer minimalen Eisschicht kann schon ausreichen, damit sich das Eis vom Thermoblech löst.

Anhand der Überlegungen wurde die abzutauende Eisschichtdicke B mit 0,1 mm angenommen.

Die Abbildung 19 zeigt extrem vergrößert die abzutauende Eisschicht eines Bilanzraums. Dabei ist B die abzutauende Eisschicht, H die Höhe des Bilanzraumes und L die Länge des Bilanzraumes. Für die Berechnung wird das durch gestrichelte Linien im dargestellten Querschnitt begrenzte Eis betrachtet. Um die anschließende Berechnung zu vereinfachen, wird angenommen, dass sich das Eis als elliptische Form um das Thermoblech bildet.

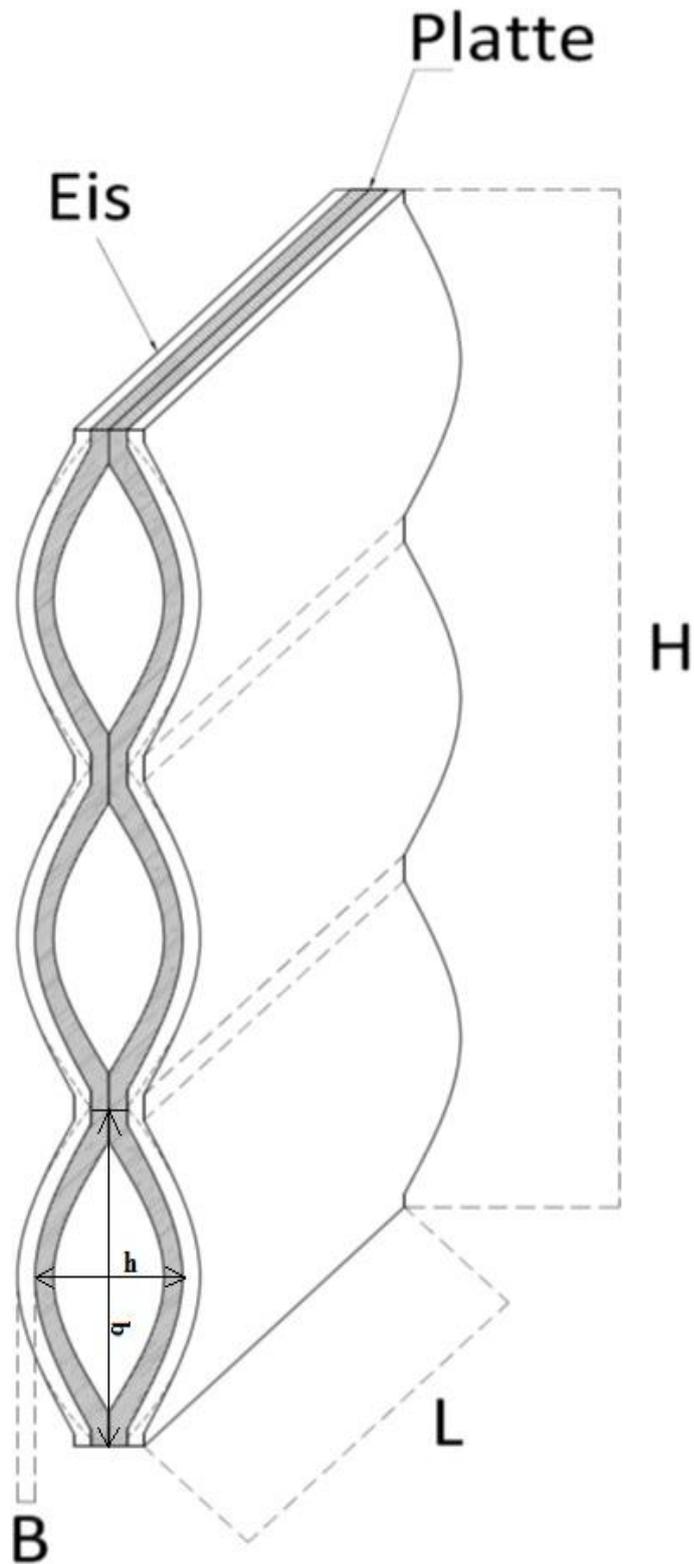


Abbildung 19: Skizze zur Berechnung von \dot{m}_{Eis}

Durch die vielen Vorüberlegungen und Annahmen kann \dot{m}_{Eis} nach folgenden Berechnungen ermittelt werden:

$$\dot{m}_{Eis} = \frac{\rho_{Eis} \cdot V_{Eis}}{t_A}; \text{ mit } \rho_{Eis} = 900 \text{ kg/m}^3 [9] \text{ und } t_A = 60\text{s} \quad (21)$$

Mit V_{Eis} :

$$V_{Eis} = V_{ges} - V_K \quad (22)$$

Mit V_K und V_{ges} :

$$V_K = A * L \quad (23)$$

$$V_{ges} = A_{ges} * L \quad (24)$$

Die Fläche A kann nach Gleichung (5) berechnet werden. Zu beachten ist, dass Gleichung (5) nur für einen Kanalquerschnitt gilt, deshalb muss die Fläche noch mit 3 multipliziert werden, da 3 Kanäle im Bilanzraum sind.

Die Fläche A_{ges} kann ebenfalls nach Gleichung (5) berechnet werden. Sie muss aber ebenfalls mit 3 multipliziert werden. Sie stellt die gesamte Querschnittsfläche (Thermoblech und abzetauende Eisdicke) dar.

Durch Einsetzen und Ergänzen der Gleichung (5) folgt:

$$V_K = \left[\left(\pi \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{h}{2} \right) * 3 \right] * L \quad (25)$$

$$V_{ges} = \left[\left(\pi \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{h+(2*B)}{2} \right) * 3 \right] * L \quad (26)$$

Die Abmessungen des Thermobleches können der im Anhang aufgeführten Abbildung 23 entnommen werden:

$$b = 39,5 \text{ mm}; h = 12 \text{ mm}; L = 1940 \text{ mm}; B = 0,1 \text{ mm}$$

4.2.2. Berechnung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten

Für die Berechnung des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten α werden weiterhin die für den Temperaturverlauf gewählten Bilanzräume betrachtet. Der mittlere α -Wert wird bei den

nachfolgenden Berechnungen für einen Kanal im Bilanzraum berechnet. Die anderen Kanäle des Bilanzraums haben denselben α -Wert wie der berechnete. Wie im Kapitel 2.2.4. bereits erwähnt, sollen die Stoffwerte auf die arithmetische mittlere Temperatur ϑ_m bezogen werden. Diese wird nach Gleichung (17) für jeden Bilanzraum berechnet. Alle Stoffwerte wurden durch Interpolation der Stoffwerttabellen des VDI Wärmeatlas ermittelt. Diese Tabellen wurden in das erstellte Excel-Programm übernommen.

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient wird nach Gleichung (10) berechnet:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda_{Hg}}{d_h}, \text{ mit } d_h:$$

$$d_h = \frac{4 * A_{EII}}{U_{EII}}, \text{ } A_{EII} \text{ und } U_{EII} \text{ wurden mit den Gleichungen (5) und (6) berechnet.}$$

Für die Berechnung der Nu-Zahl wurde folgende Korrelation gewählt:

$$Nu = \frac{(\zeta/8) * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \sqrt{\zeta/8} * (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3} \right],$$

mit ζ :

$$\zeta = \frac{1}{(0,790 * \ln(Re) - 1,64)^2}$$

Diese Nu-Korrelation hat einen großen Geltungsbereich und macht deshalb das erstellte Excel-Programm etwas universeller.

Die Pr-Zahl ist ebenfalls im VDI-Wärmeatlas für Ammoniak tabelliert und wird ebenfalls über Interpolation bestimmt.

Die Re-Zahl wird nach Gleichung (16) bestimmt:

$$Re = \frac{\omega_{Hg} * \rho_{Hg} * d_h}{\eta_{Hg}}$$

Die noch zu bestimmende Größe ist die Strömungsgeschwindigkeit des Heißgases. Diese wird nach folgenden Gleichungsbeziehungen bestimmt:

$$\omega_{Hg} = \frac{\dot{V}_{Hg}}{A * n}, \tag{27}$$

mit n = Anzahl der Kanäle im Bilanzraum und mit \dot{V}_{Hg} :

$$\dot{V}_{Hg} = \frac{\dot{m}_{Hg}/3600s}{\rho_{Hg}} \quad (28)$$

und mit A :

$$A = \pi \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{h-(2*s)}{2} \quad (29)$$

Die Thermoblechwandstärke s mit 1,5 mm wurde aus der im Anhang beigefügten Thermoblechzeichnung entnommen. Die Fläche A wurde nach einer kleinen Umformung der Gleichung (5) berechnet.

4.2.3. Berechnung der Abtauzeit

Bei der Berechnung der Abtauzeit t werden ebenfalls die Bilanzräume berücksichtigt. Die Abtauzeit wird für jeden Bilanzraum nach folgender Gleichung berechnet:

$$t = \frac{Q_S}{\dot{Q}_{Hg}} \quad (30)$$

mit: $Q_S = \rho_{Eis} * V_{Eis} * q_S$, $q_S = 335 \text{ KJ/Kg}$ [2] (31)

$$\dot{Q}_{Hg} = \alpha * A * (\vartheta_{Hg} - \vartheta_{W,i}), \text{ mit } \vartheta_{Hg} = \vartheta_m \text{ und } \vartheta_{W,i} = 0^\circ\text{C} = \text{konstant}$$

Die Fläche A wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$A = \left[\pi \cdot \left[1,5 \cdot \left(\frac{h-(2*s)}{2} + \frac{b}{2} \right) - \sqrt{\frac{b}{2} \cdot \frac{h-(2*s)}{2}} \right] \right] * L \quad (32)$$

Die Gleichung (32) ist die umgewandelte Gleichung (6).

Die Werte für ρ_{Eis} und V_{Eis} können aus dem Kapitel 4.2.1. entnommen werden.

5. Ergebnisse

Der erste Teil der Ergebnisse bezieht sich auf die Berechnung mit den vorgegeben BUCO Heißgasparametern. Diese sind im Kapitel 4 dargestellt.

Der zweite Teil der Ergebnisse ist die eigentliche Einflussstudie mit den im Kapitel 4.2. beschriebenen Massenstrom- und Temperatur-Intervallen. Interessant für die Studie ist der erste Bilanzraum, da die unteren Bilanzräume nicht mehr nur vom Wärmestrom abgetaut werden. Das Abfallen des Eis wird in den unteren Bilanzräumen auch durch die Faktoren beeinflusst, die im Kapitel 2.2.2. beschrieben wurden.

5.1. Ergebnisse der Berechnungen mit BUCO Parametern

5.1.1. Temperaturverlauf im Thermoblech

Tabelle 1: Temperaturverlauf in Thermoblech

Bilanzraum	Eintrittstemperatur [°C]	Austrittstemperatur [°C]	$\Delta\vartheta$
1	70,00	66,03	3,97
2	66,03	62,13	3,91
3	62,13	58,28	3,85
4	58,28	54,50	3,78
5	54,50	50,80	3,70
6	50,80	47,17	3,63
7	47,17	43,63	3,54
8	43,63	40,19	3,44
9	40,19	36,83	3,36
10	36,83	35,00	1,83
11	35,00	35,00	0,00
12	35,00	35,00	0,00

In Tabelle 1 ist der Temperaturverlauf bei der Heißgasabtauung unter den oben genannten BUCO Heißgasparametern dargestellt. Die Kondensationstemperatur wird im 10. Gang des Thermoblechs erreicht. Danach wird die Abtauung nur noch von der Kondensation des Ammoniakgases bestimmt. Betrachtet man die Temperaturdifferenzen jedes Ganges, fällt auf, dass sie fast kontinuierlich und sehr langsam abnehmen.

5.1.2. Mittlerer Wärmeübergangskoeffizienten

Tabelle 2: Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient mit Zwischenergebnissen

ϑ_m	Bilanzr.	Strömungsges.	Re-Zahl	ζ	Nu	α
°C	-	m/s	-	-	-	W/m ² *K
68,02	1	2,23	22760,37	0,025308	70,66	173,91
64,08	2	2,19	23086,61	0,025218	72,09	174,95
60,20	3	2,15	23417,09	0,025128	73,53	175,95
56,39	4	2,11	23751,53	0,025039	75,12	177,30
52,65	5	2,08	24089,05	0,024951	76,71	178,62
48,99	6	2,04	24429,29	0,024864	78,40	180,13
45,40	7	2,00	24771,25	0,024778	80,32	182,18
41,91	8	1,96	25113,64	0,024694	82,22	184,14
38,51	9	1,93	25460,85	0,02461	84,27	186,40
35,92	10	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation
35,00	11	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation
35,00	12	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation	Kondensation

Tabelle 2 zeigt die berechneten mittleren α -Werte für jeden Bilanzbereich. Bei Bilanzraum 10 ist die Kondensation erreicht. Bei der Kondensation ergeben sich laut Theorie viel höhere α -Werte in etwa über 1000 W/m² *K [17]. Leider ist nicht bekannt wie die Kondensation in den Thermoblechen verläuft. Außerdem ist zu erkennen, dass die Annahme einer turbulenten Strömung bestätigt wurde. Die Re-Zahlen liegen weit über 2300. Es ist auch zu erkennen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten von Bilanzraum zu Bilanzraum abnehmen. Dies ist auf einen Anstieg der Dichte von Bilanzraum zu Bilanzraum zurückzuführen.

5.1.3. Abtauzeit

Tabelle 3: Abtauzeiten für jeden Bilanzraum

ϑ_m	Bilanzraum	\dot{Q}_{Hg}	t
°C	-	kW	s
68,02	1,00	6,00	1,8
64,08	2,00	5,69	1,9
60,20	3,00	5,39	2,0
56,39	4,00	5,09	2,1
52,65	5,00	4,80	2,3
48,99	6,00	4,51	2,4
45,40	7,00	4,23	2,6
41,91	8,00	3,96	2,8
38,51	9,00	3,69	2,9
35,92	10,00	Kondensation	Kondensation
35,00	11,00	Kondensation	Kondensation
35,00	12,00	Kondensation	Kondensation

Tabelle 3 zeigt die theoretischen Abtauzeiten, die sich nur aus dem Wärmestrom für jeden Bilanzbereich ergeben. Die Abtauzeit steigt mit abfallendem Wärmestrom. Um die gesamte Abtauzeit zu erfassen, müssten auch Kenntnisse über den Wärmestrom, der während der Kondensation fließt, bekannt sein. Die Wärmeenergie wird während der Kondensation weiter an das Eis abgegeben, die Menge ist aber nicht bekannt.

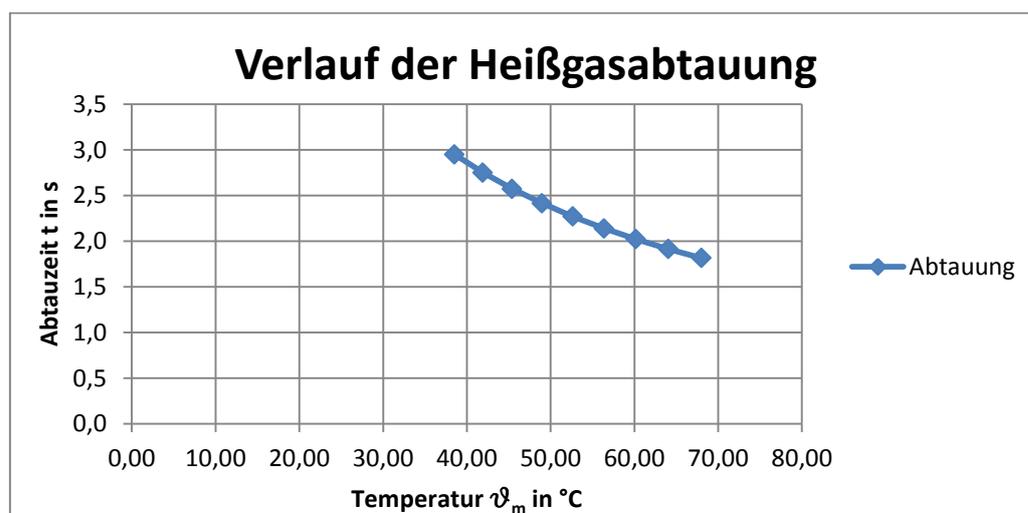


Abbildung 20: Verlauf der Abtauung

In Abbildung 20 ist die Abtauzeit in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur der Bilanzräume dargestellt. Die Abtauzeit nimmt mit abnehmender Temperatur zu. Die Kondensation ist hier nicht dargestellt. Diese verläuft bekanntermaßen bei konstanter Temperatur und könnte bei Kenntnis als negativer oder positiver Sprung der Linie dargestellt werden.

5.2. Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur auf die Abtauung

Der Einfluss der beiden Parameter auf die Abtauung wird anhand von 2 Diagrammen untersucht. Beide Diagramme sind auf den ersten Bilanzraum bezogen.

Die Abtauzeit des ersten Bilanzraumes in Abhängigkeit zur mittleren Temperatur des ersten Weges des Thermobleches bei unterschiedlichen Heißgasmassenströmen und Heißgastemperaturen ist in Abbildung 21 dargestellt. Die Heißgastemperaturintervalle sind durch blaue gestrichelte Linien markiert. Die Heißgasmassenstromintervalle sind die verschiedenen Kurven des Diagramms. Betrachtet man Heißgas beim Temperaturintervall von 40°C, fällt sofort der große Sprung der Abtauzeit auf, wenn der Heißgasmassenstrom von 30 kg/h auf 40 kg/h angehoben wird. Die Abtauzeit nimmt dabei um 1 Sekunde ab. Wird die Heißgastemperatur von 40°C auf 50°C erhöht, aber der Heißgasmassenstrom bei 30 kg/h beibehalten, ist ebenfalls eine Abnahme der Abtauzeit zu erkennen. Diese ist aber nicht so hoch, wie die bei einer gleichbleibenden Heißgastemperatur und Erhöhung des Heißgasmassenstroms. Diese Beobachtung lässt vermuten, dass die Abtauzeit und somit die Heißgasabtauung vom Heißgasmassenstrom etwas mehr beeinflusst wird als von der Heißgastemperatur. Wird das 40°C Intervall jedoch weiter beobachtet, fällt auf, dass bei zunehmendem Massenstrom die Abtauzeit immer weniger abnimmt. Bei einer Erhöhung des Heißgasmassenstroms von 90 kg/h auf 100 kg/h ist die Abnahme der Abtauzeit nur noch minimal. Wird im Gegensatz dazu die Heißgastemperatur bei einem Heißgasmassenstrom von 30 kg/h erhöht, kann man ebenfalls eine immer geringer werdende Abnahme der Abtauzeit feststellen. Diese sind in der Erhöhung der Temperatur von 90°C auf 100°C nicht so minimal, wie bei der Erhöhung des Massenstroms von 90 kg/h auf 100 kg/h. Diese Erkenntnis lässt wiederum die Vermutung zu, dass die Heißgastemperatur einen größeren Einfluss auf die Abtauung hat als der Massenstrom.

Diese beiden Feststellungen erwecken den Anschein, dass eigentlich beide Parameter fast gleichermaßen die Heißgasabtauung beeinflussen. Wird das gesamte Diagramm betrachtet, stellt man fest, dass bei niedrigen Temperaturen und niedrigen Massenströmen der Einfluss auf die Abtauung bei Erhöhung dieser Parameter größer ist. Steigen die Temperaturintervalle und die Massenströme, kann man erkennen, dass das Abnehmen der Abtauzeit immer geringer wird, sei es nur bei der Erhöhung des Massenstroms oder bei Erhöhung der Temperatur. Um Klarheit zu schaffen wird das zweite Diagramm betrachtet.

Das in Abbildung 22 dargestellte Diagramm zeigt den Wärmestrom \dot{Q}_{Hg} des ersten Bilanzraumes in Abhängigkeit zur mittleren Temperatur des ersten Weges bei unterschiedlichen Heißgastemperaturintervallen und unterschiedlichen Massenströmen. Die Heißgastemperaturintervalle sind durch blaue gestrichelte Linien markiert. Die Heißgasmassenstromintervalle sind die verschiedenen Kurven des Diagramms. Bei der Betrachtung des Diagramms fällt auf, dass der Wärmestrom durch Änderung der Heißgastemperaturintervalle nahezu linear ansteigt. Wird die Massenstromerhöhung betrachtet, fällt auf, dass die Zunahme des Wärmestroms immer geringer wird. Dies wurde ebenfalls beim ersten Diagramm beobachtet. Außerdem fällt auch noch auf, dass im unteren Bereich der Massenstrom und im oberen Bereich die Heißgastemperatur dominierender ist. Was man auch beobachten kann, ist eine Erhöhung der nahezu linearen Steigung der jeweiligen Massenstromlinien. Nach Betrachtung des zweiten Diagramms wird die Aussage über das Diagramm in der Abbildung 21 bestätigt, dass die beiden Parameter gleichermaßen die Abtauung beeinflussen. Die Erhöhung des Massenstroms bewirkt einen steileren Anstieg des Wärmestroms mit Zunahme der Heißgastemperatur.

Man kann festhalten, dass die Parameter Heißgastemperatur und Heißgasmassenstrom mit sehr kleinen Unterschieden bei niedrigen Werten und mit kaum sichtbaren Unterschieden im höheren Wertebereich die Heißgasabtauung gemeinsam beeinflussen. Anhand der Diagramme ist zu erkennen, dass die Abtauung bei hohen Heißgastemperaturen und hohen Heißgasmassenströmen schneller als bei niedrigen verläuft. Es wäre jedoch energetisch und prozesstechnisch ungünstig, die Abtauung so schnell durchführen zu lassen.

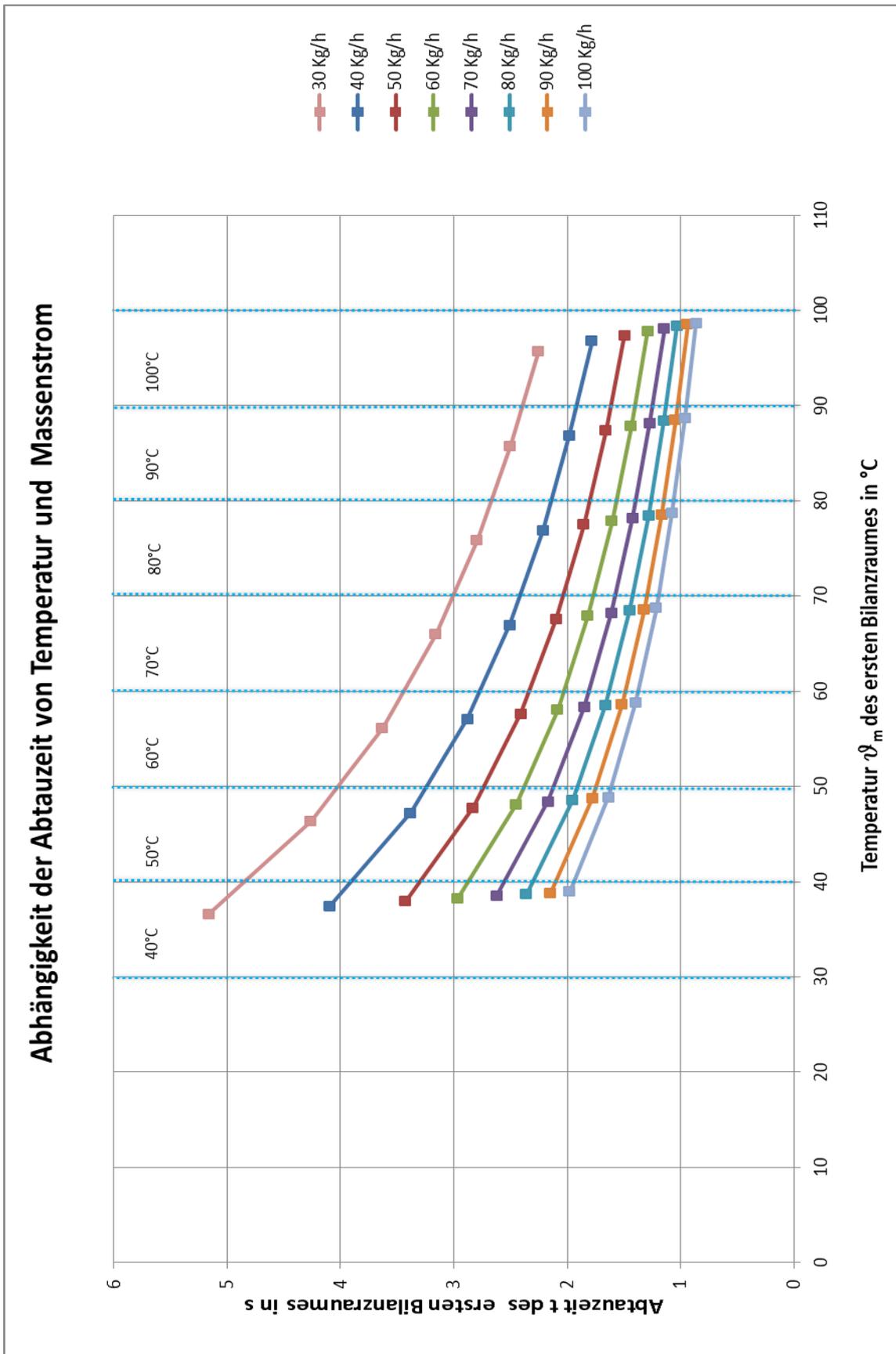


Abbildung 21: Abhängigkeit der Abtauzeit von Parametern

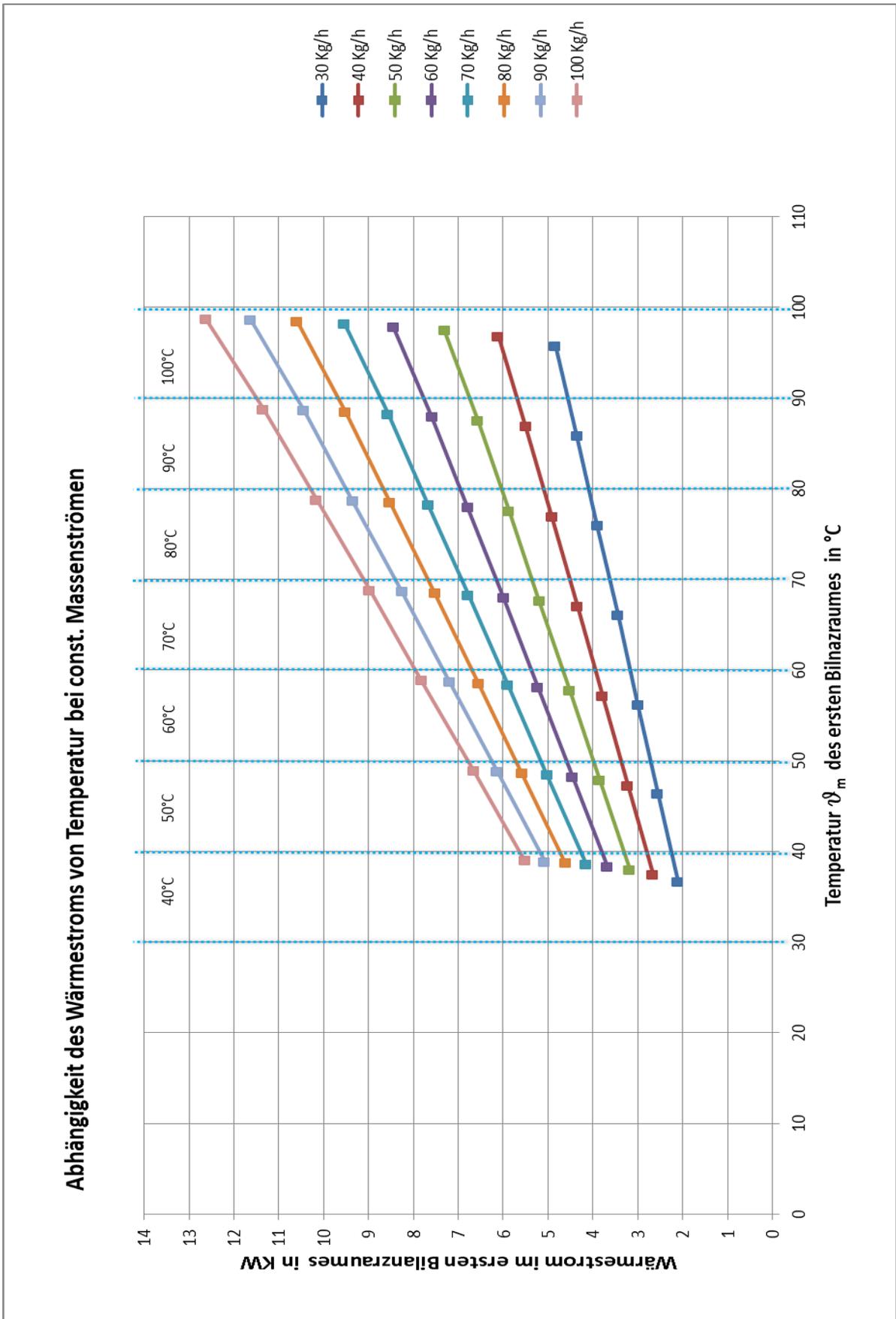


Abbildung 22: Abhängigkeit des Wärmestroms von Parametern

6. Diskussion

Das Thema dieser Arbeit wurde von der Firma BUCO Wärmeaustauscher International GmbH mit dem Ziel vergeben, den Prozess der Heißgasabtauung näher zu untersuchen. Der Thermoblech-Eiserzeuger gehört zu den wichtigsten Produkten der Firma. Dessen Abtauung wird jedoch mit Erfahrungswerten betrieben, die auf eine Prozesssicherheit ausgelegt sind.

Anhand eines erstellten quasistationären Betrachtungsmodells des Wärmeübergangs bei der Heißgasabtauung, wurden mit einem erstellten Excel-Programm Berechnungen zur Abtauung von Thermoblech-Eiserzeugern durchgeführt. Durch Betrachtungen der Berechnungsergebnisse konnte der Einfluss des Heißgasmassenstroms und der Heißgastemperatur auf die Abtauung wiedergegeben werden. Die beiden Parameter beeinflussen gleichermaßen die Heißgasabtauung. Dass ein Parameter dominiert und der andere Parameter eher eine passive Rolle bei dem Abtauvorgang einnimmt, wie vor Beginn der Berechnung vermutet, wurde nicht festgestellt.

Das quasistationäre Modell wurde Anhand von vielen Annahmen modelliert. Die Annahmen dienten in erster Linie dazu, die Berechnungen zu vereinfachen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Modell speziell so aufgebaut, dass die Abtauung des Eises nur durch das strömende Heißgas bewirkt wird und nicht auch zusätzlich durch das rieselnde Wasser und die auftretenden Schärkräfte. Somit ist das Modell für die Einflussstudie sehr geeignet. Einziger Nachteil des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modells ist die Vernachlässigung der Kondensation in dem Thermoblech. Die Kondensation konnte in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da dieser Prozessschritt bei Thermoblechen noch nicht erforscht wurde. Eine theoretische Berücksichtigung der Kondensation war nicht möglich. Berechnungen mit Heißgastemperaturen, die dicht an der Kondensationstemperatur des Heißgases lagen, konnten nicht fortgeführt werden, da das Abtauverhalten bei der Kondensation des Heißgases nicht bekannt war.

Werden die Erfahrungswerte von BUCO (Heißgasmassenstrom = 60 kg/h; Heißgastemperatur = 70°C) betrachtet, kann festgestellt werden, dass sie etwas überdimensioniert sind. Die Heißgasabtauung könnte auch bei kleineren Parametern erfolgreich verlaufen. Eine Überdimensionierung der BUCO Heißgasparameter würde noch mehr auffallen, wenn das Heißgas mit einem niedrigeren Druck in das Thermoblech strömen würde. Mit einer Druckänderung ändert sich auch die Kondensationstemperatur und somit das Eintreten der

Kondensation im Thermoblech. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies jedoch nicht untersucht. Mit dem erstellten Excel-Programm könnte dies nach Bedarf untersucht werden.

Das erstellte Berechnungsprogramm kann genutzt werden um den theoretischen Abtauvorgang darzustellen. Dieses könnte auch erweitert werden, wenn das Abtauverhalten bei der Kondensation des Heißgases bekannt wäre.

7. Ausblick

Das Thema der Heißgasabtauung ist sehr komplex und sollte weiter untersucht werden. Dies könnte anhand von Simulationen oder mit kleinen Versuchsanlagen durchgeführt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit die Kondensation nicht untersucht werden konnte, sollte die Untersuchung der Kondensation in den Thermoblechen in einer neuen Einflussstudie fortgesetzt werden. Dies könnte eventuell durch Messungen des Austrittszustandes des Heißgases erfolgen. Außerdem wäre es sinnvoll, den gesamten instationären Heißgasabtauungsprozess zu untersuchen.

Thermobleche könnten auch eventuell durch andere Methoden abgetaut werden. Diese sollten den Eiserzeugungsprozess und die Güte des erzeugten Eises nicht beeinträchtigen. Außerdem sollten sie energetisch effizient sein. Eine solche Methode, die während der Literaturrecherche auffiel, war das Abtauen mittels elektrischer Heizung. Dabei könnten an die Schweißnähte der Thermobleche Heitzstäbe angebracht werden, die das Eis ebenfalls periodisch abtauen. Das in der Kompressionskälteanlage entstehende Heißgas könnte dann kontinuierlich eine Wärmepumpe antreiben, die als Kondensator funktionieren würde. Ob die Verwendung von Heitzstäben energetisch sinnvoller wäre, als die Heißgasabtauung, müsste dann untersucht werden.

Anhand einer genaueren Kenntnis der Abtauung könnte der Eiserzeugungsprozess optimiert werden und so die Prozesskosten eingespart werden.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl: Wärme- und Stoffübertragung, 4. Aufl. Berlin (Springer Verlag), 2004.
- [2] Breidenbach, Karl: Der Kälteanlagenbauer, Band 1, 4. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 2003
- [3] Breidenbach, Karl: Der Kälteanlagenbauer, Band 2, 4. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 2003
- [4] BUCO Wärmeaustauscher International GmbH: Herstellung,
<http://www.buco-international.com/deutsch/manufacturing.php> (08.10.2012)
- [5] BUCO Wärmeaustauscher International GmbH: Zeichnung der Eiserzeugerplatte
- [6] H. GÖRRES & H. HALBMAYER: Euphrat-Kraftwerk Birecik, in Baugeologisches Seminar S. 51-65
http://www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/_/H87/H872/3Arbeitsgruppen/Veroeffentlichungen/Mitt_IAG_Boku_09.pdf#page=54 (08.10.2012)
- [7] HTT-AG/BUCO: Eiserzeuger,
http://www.htt-ag.com/leaflets/htt-buco-eiserzeuger-basis_de.pdf (08.10.2012)
- [8] HTT-AG/BUCO: Wärmeaustauschplatten,
http://www.htt-ag.com/leaflets/htt-buco-eiserzeuger-basis_de.pdf (08.10.2012)
- [9] IKET (Hrsg.): Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik, 19. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 2008

- [10] Messer Group GmbH: Entspannt bauen.
http://www.messergroup.com/de/Daten/Fachbroschueren/Baubranche/Betonk_hlen.pdf
(08.10.2012)
- [11] Niemann, Martin: Modellierung des Druckverlustes bei einphasiger Strömung in Thermoblechen, Diplomarbeit, Fachhochschule Hamburg, 2001
- [12] Oai The Ha: Modeling and Numerical Investigation of Hot Gas Defrost on a Finned Tube Evaporator Using Computational Fluid Dynamics, Masterarbeit, California Polytechnic State University, 2010
<http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1423&context=theses>
(08.10.2012)
- [13] Papula, Lothar: Mathematische Formelsammlung, 9. Aufl. Wiesbaden (Friedr. Vieweg & Sohn Verlag),2006
- [14] Petersen, Roy: Untersuchungen zur einphasigen Konvektion und Kondensation an Thermoplaten, Dissertation, Universität Paderborn, 2009.
<http://digital.ub.unipaderborn.de/hs/content/titleinfo/1650> (08.10.2012)
- [15] Reisner, Klaus: Fachwissen Kältetechnik, 4. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 2008.
- [16] Spang, Bernhard: Persönliches Gespräch
- [17] Verein Deutscher Ingenieure; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas, Berlin (Springer Verlag), 2006.
- [18] Veith, Heinz: Grundkurs der Kältetechnik, 10. Aufl. Berlin, Offenbach (VDE Verlag GmbH), 2011

- [19] von Cube, H.L. et al.: Lehrbuch der Kältetechnik, Band 1, 4. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 1997
- [20] von Cube, H.L. et al.: Lehrbuch der Kältetechnik, Band 2, 4. Aufl. Heidelberg (C.F. Müller Verlag), 1997.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Temperatur-Wärme-Diagramm von Wasser [2]	5
Abbildung 2: Aufbau des BUCOdelot ice-pack [7]	7
Abbildung 3: BUCO Eiserzeuger in Wurstwarenproduktionsanlage.....	9
Abbildung 4: Innenleben BUCO Eiserzeuger	9
Abbildung 5: Erstes Scherbeneis nach der Abtauung	10
Abbildung 6: Einsatzbereites Scherbeneis	10
Abbildung 7: Thermoblechvarianten.....	11
Abbildung 8: Variante eines Thermoblechs [7]	12
Abbildung 9: Eiserzeugerplatte	13
Abbildung 10: Querschnitt Eiserzeuger-Thermoblech.....	14
Abbildung 11: Annahme elliptischer Querschnitt [11]	14
Abbildung 12: Kältemittelkreislauf von BUCO Eiserzeugern	16
Abbildung 13: Theoretischer Verlauf des Wärmestroms durch die Platte bei Eisabtauung	18
Abbildung 14: Kältemittelkreislauf bei der Eisabtauung	21
Abbildung 15: Theoretischer Verlauf des Wärmestroms während Abtauung	24
Abbildung 16: Quasistationäres Modell der Eisabtauung	30
Abbildung 17: Angenommen Bilanzräume des Thermoblechs.....	32
Abbildung 18: Mögliche Bilanzierung des Thermobleches	33
Abbildung 19: Skizze zur Berechnung von \dot{m}_{Eis}	35
Abbildung 20: Verlauf der Abtauung.....	41
Abbildung 21: Abhängigkeit der Abtauzeit von Parametern	44
Abbildung 22: Abhängigkeit des Wärmestroms von Parametern	45
Abbildung 23: Zeichnung des betrachteten Thermoblechs [5]	54

10. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturverlauf in Thermoblech.....	39
Tabelle 2: Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient mit Zwischenergebnissen.....	40
Tabelle 3: Abtauzeiten für jeden Bilanzraum.....	41
Tabelle 4: Internetrecherche (rot = nicht gelesen; grün = gelesen).....	55
Tabelle 5: Bibliotheksrecherche	57

11. Anhang

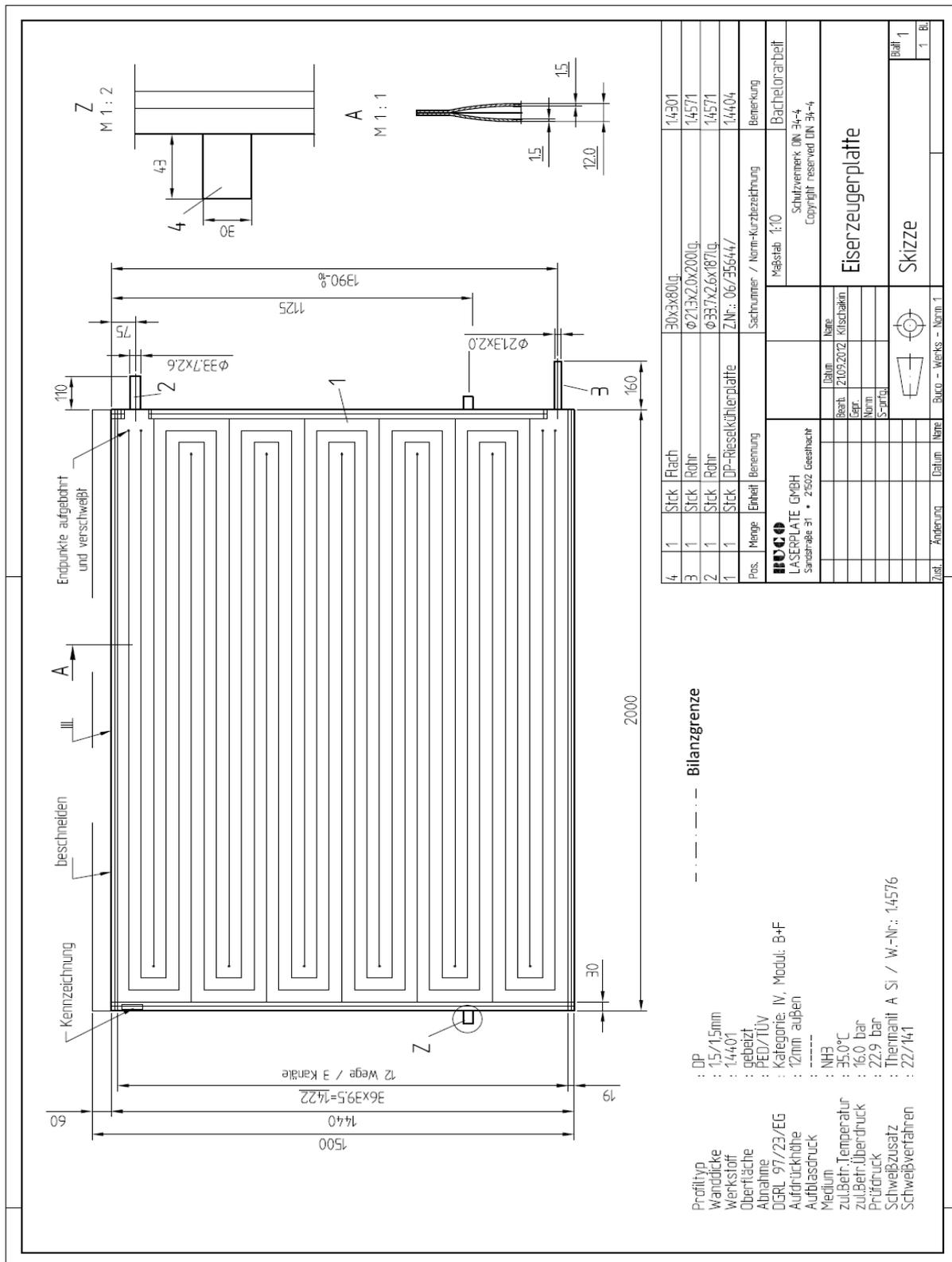


Abbildung 23: Zeichnung des betrachteten Thermoblocks [5]

Tabelle 4: Internetrecherche (rot = nicht gelesen; grün = gelesen)

Suchmaschine	Link	Gelesen/ nicht gelesen
Google	http://www.patent-de.com/19880707/DE3315391C2.html	
	http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/lebensmittel.pdf	
	http://retaaz.com/retaazphx/library/Optimizing%20Hot%20Gas%20Defrost%202.pdf	
	http://www.master-bilt.com/pdfs/coolit_jan11.pdf	
	http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1015&context=iracc&sei-redir=1&referer=http%3A%2F%2Fwww.google.de%2Furl%3Fsa%3Dt%26rct%3Dj%26q%3Dhot%2Bgas%2Bdefrost%2Bcycle%26source%3Dweb%26cd%3D37%26ved%3D0CHMQFjAGOB4%26url%3Dhttp%253A%252F%252Fdocs.lib.purdue.edu%252Fcgi%252Fviewcontent.cgi%253Farticle%253D1015%2526context%253Diracc%26ei%3D4LurT86sEsvKtAaEgZ2dBQ%26usg%3DAFQjCNFOW3vMLjVkpfbihALwxHsSVo0_lg#search=%22hot%20gas%20defrost%20cycle%22	

	http://www.ciras.iastate.edu/publications/EnergyBP-FoodIndustry/Sourcebook_Chapter8.pdf	
	http://www.heatcraft.com/products/PDF/LK%20Tech%20Bulletins%20Folder/LK-TB-RS-MOHAVE.pdf	
	http://www.energy.kth.se/courses/4A5109/Files/RefCh8_04.pdf	
	http://www.intkorea.kr/data/parkercic/Hot%20Gas%20Defrost.pdf	
	http://www.irc.wisc.edu/ASHRAE-TC101/programs/Annual%202002%20Sluga.pdf	
	http://toolbox.invensyscontrols.com/spaw2/SiteContent/Training%20COMMERCIAL%20REFRIGERATION%20Systems.pdf	
Google Scholar	http://www.waermepumpe.ch/ver/pdf/UAW12_Tagungsband.pdf	
	http://www.uba.de/nachhaltige-produktion-anlagensicherheit/anlagen/Ammoniak_Band_II_D.pdf	

Scirus	http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1423&context=theses	
	http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1140&context=theses	
	http://www.fao.org/docrep/006/y5013e/y5013e05.htm	
	http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/1650	
	http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/1333	
Scientific Commons	http://minds.wisconsin.edu/handle/1793/7610	
BASE Search	http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/400/	

Tabelle 5: Bibliotheksrecherche

Bücher und Zeitschriften	Suchwörter	Bibliothek	Gelesen	Qualität der Quelle	Links
Der Kälteanlagenbauer Band1 und Band2 Autor Karl Breidenbach	Kältetechnik, Kälteanlagen, Kältemittel	HAW		gut	
Lehrbuch der Kältetechnik Band1 und Band2 Autor: Cube/Steimle/Lotz/Kunis	Kältetechnik, Kälteanlagen, Kältemittel	HAW		gut	
Handbuch der Kältetechnik Autor: Rudolf Plank	Eiserzeugung,	HAW		zu alt	

	Kältetechnik				
Untersuchungen zur einphasigen Konvektion und Kondensation an Thermoplaten / von Roy Peterson	Thermoplaten	PDF		gut	http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/1650
Frost formation : the influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers / door Carolus Theodorus Sanders	defrosting	UH			-
Modelling and numerical simulation of fluid flow and heat transfer in thermoplates / Boban Maletić	thermoplates	PDF			http://digital.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/1333
Parameterstudie und vereinfachte Rechenverfahren für die energietechnische und wirtschaftliche Optimierung der Fenstergestaltung	Parameterstudie	TU		nicht verfügbar	
Berechnungsmodell der nichtadiabaten Verdunstungskühlung in Fluidkühltürmen und Verdunstungskondensatoren / Andreas Streng	Berechnungsmodell	BU/TU		kaum Bezug zum Thema	
Wärmeübertragung : Grundlagen / Walter Wagner	Wärmeleitung	TU/HAW-Tor		war OK	
Wärmeleitung / Ulrich Grigull; Heinrich Sandner	Wärmeleitung	TU/HAW-LS		zu alt	
Geometrische Aspekte der Wärmeübertragung	Wärmeleitung	UH/TU			
Zur mathematischen Behandlung der stationären Wärmeleitung in stückweise homogenen Medien / von Georg Karl Heinrich Walthe	Wärmeleitung	UH			
Wärmeleitung und Temperatursausgleich : die mathematische Behandlung instationärer Wärmeleitungsprobleme mit Hilfe von Laplace-Transformationen / von Heinz Tautz	Wärmeleitung	BU/UH			
Geometrisch eindimensionale Wärmeleitung beim Schmelzen und Erstarren / vorgelegt von	Wärmeleitung	UH			

Ferdinand Megerlin					
Über stationäre Gasbewegungen mit Berücksichtigung der inneren Wärmeleitung / Erich Oettinger	Wärmeleitung	UH			
Theorie der Wärmeleitung in einem homogenen schalenförmigen Körper, der von zwei nicht concentrischen Kugelflächen begrenzt wird / von Franz Dolberg (aus Wismar)	Wärmeleitung	UH			
Wärmeübergang bei der Verdampfung von Ammoniak in Plattenwärmeübertragern / von Matthias André http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/385366698.pdf	Wärmeübergang, Ammoniak	PDF		ok, angaben zu NH3 können verwendet werden	http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/385366698.pdf
Wärmeübergang und Druckverlust beim Strömungssieden von Ammoniak in horizontalen Rohren / Hans-Jürgen de Buhr	Wärmeübergang	Bundeswähr			
Strömungsstruktur, Wärmeübergang und Druckverlust in Kanälen mit gewellten Oberflächen / Harald Blomerius	Wärmeübergang	TU		kaum Verwendung für das Thema	
Konvektiver Wärmeübergang in vertikalen Gas-Feststoff-Strömungen / Wolfgang Mattmann	Wärmeübergang	TU		schlecht	
Der Wärmeübergang bei freier Konvektion und erzwungener, laminarer Strömung in senkrechten Rohren unter Berücksichtigung temperaturabhängiger Stoffwerte / von Hans-Jochen Kessle	Wärmeübergang	TU/UH			
Wärmeübergang und Druckverlust in querangeströmten Ovalrohrbündeln / von Horst Hanke	Wärmeübergang	TU/UH		etwas zu alt	
Experimentelle und theoretische	Wärmeübergang	TU/UH			

Untersuchungen über Mengenstromverteilung, Druckverlust und Wärmeübergang in Plattenwärmeaustauschern / Mohamed Khalil Bassiouny					
Strömung und örtlicher Wärmeübergang in Plattenwärmeaustauschern / von Hans-Peter Ladwig	Wärmeübergang	BU/TU/UH			
Freie Strömung und Wärmeübergang an lotrechten ebenen Platten : mit 10 Tafeln / Dietrich Sucker	Wärmeübergang	BU			
Wärmeübergang an einer mit einem Wasser-Luft-Strahl besprühten Platte / von Jacek Żelkowski	Wärmeübergang	UH			
Über den stationären Wärmedurchgang durch komplizierte Körper / von Walter Fritz Müller	Wärmedurchgang	UH			
Dampferzeuger : Kesselsysteme, Energiebilanz, Strömungstechnik / F. Brandt	Energiebilanz	HAW-Tor		nicht Verfügbar	
Korrelation zwischen Strompreisen und CO2-Zertifikatepreisen / Christof Bauer und Jan Christof Zink	Korrelation	HAW-LS		nicht gut	
Kältespeicher : Grundlagen, Technik, Anwendung / von Thorsten Urbaneck	Kältemittel	HAW-Tor		nicht Verfügbar	
Auslegung einer Kombikühlzelle für Kühlung und Tiefkühlung mit Wärmerückgewinnung / Stephan Senger	Kältemittel	UH			
Lexikon Kältetechnik / Dieter Schmidt. IKET (Hrsg.)	Kältemittel	HAW-Tor			
Pohlmann, Taschenbuch der Kältetechnik : Grundlagen, Anwendungen, Arbeitstabellen und Vorschriften / IKET (Hrsg.). [Autoren: Norbert Krug; Christian Hainbach]	Kältemittel	BUCO		sehr gut	
Ammonia as a refrigerant / Ed.: A.B. Pearson.	Kältemittel	HAW-Tor			

International Institute of Refrigeration (IIR)					
Thermodynamische, wärmetechnische und ökologische Betrachtungen für Kältemittel beim Einsatz in Wärmepumpen und Kältemaschinen / Klaus Spindler. Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (DKV)	Kältemittel	TU/HAW-Tor			
Fachwissen Kältetechnik für die industrielle und gewerbliche Praxis : eine Einführung mit Aufgaben und Lösungen / Klaus Reisner	Kältemittel	HAW-LS		nicht geeignet	
Vergleichsprozesse der Klimatechnik / Bernd Glück	Kältemittel	HAW-Tor			
Thermodynamische Eigenschaften umweltverträglicher Kältemittel : Zustandsgleichungen und Tafeln für Ammoniak, R 22, R 134a, R 152a und R 123 ; [mit PC-Arbeitsgleichungen] = Thermodynamic properties of environmentally acceptable refrigerants / Hans Dieter Baehr; Reiner Tillner-Roth	Kältemittel, Ammoniak	BU/TU/HAW-Tor			
Kälteanwendung / Eduard Emblik	Kältemittel	BU/TU		zu alt	
Kältetechnik / von Matts Bäckström und Eduard Emblik	Kältemittel	BU		zu alt	
Kältetechnik : Handbuch der Kälteerzeugung und Kälteanwendung ; thermodynamische Grundlagen, Berechnungsmethoden, Maschinen, Apparate, Anwendungsgebiete / Hans H.Brehm	Kältemittel	TU		schlecht	
Die Eis- und Kälteerzeugungs-Maschinen : Ihr Bau und ihre Verwendung in der Praxis ; ein Kompendium der gesamten Kälteindustrie ; mit... einem Anhang Tabellen / von Richard Stetefeld	Kältemittel	TU		schlecht, zu alt	
Verdampfung von Ammoniak und R 134a in Plattenwärmeübertragern / Stephan Kabelac	Ammoniak	BU/TU			

Thermodynamische Eigenschaften von Ammoniak (R 717) / Reinhold Döring	Ammoniak	TU		gut	
Experimentelle Bestimmung und Korrelation der Exzessenthalpie und des Exzessvolumens binärer wässriger Amin- und Alkohol-Systeme, sowie des Systems Wasser-Ammoniak in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Gemischzusammensetzung / von Hans Josef Staudt	Ammoniak	BU/TU/UH		etwas zu alt	
Die thermodynamischen Eigenschaften von Ammoniak : mit 10 Tabellen sowie Tafeln der Zustandsgrößen / Joachim Ahrendts und Hans Dieter Baehr	Ammoniak	BU/HAW-Tor		zu alt	
Druck-Volumen-Temperaturmessungen mit Ammoniak und Wasser / von Helmuth Garnjos	Ammoniak	UH		zu alt	
Energieeffizienz : ein Lehr- und Handbuch / Martin Pehnt, Hrsg	Energieeffizienz	UB/TU			
Die Bewertung der Klima- und Kältetechnik durch die Energieeinsparverordnung 2007	Kältetechnik	PDF			http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2009/3920/
Optimierung von wärmeübertragenden Profilblechen hinsichtlich ihres strömungs- und wärmetechnischen Verhaltens unter besonderer Berücksichtigung von Erosionserscheinungen / Kristina	Kältetechnik	TU		kaum Verwendung für Thema	
Thermodynamik in der Klima-, Heizungs-, Kältetechnik : Lehr- und Übungsbuch / Gernot H. Weber. Unter Mitarb. von Jürgen F. Weber	Kältetechnik	TU/UH			
Einführung in die konvektive Wärme- und Stoffübertragung / von Bernd Hanel. Unter Mitarb. von Erwin Richter	Kältetechnik	BU/TU/HAW-Tor			

Modellierung luft- und kältetechnischer Prozesse : Transportmodelle, mathematische Modelle, rechentechnische Modelle / von Günter Heinrich; Wilfried Krug	Kältetechnik	BU/TU		zu alt	
Untersuchung der Vereisung am Wärmetauscher eines Luftkühlers für Flugzeugküchen / Henning Nielsen	Wärmetauscher	HAW-Tor			
Effizienter Betrieb von Kälteanlagen : Energieeinsparung, Wärmerückgewinnung, Abwärmenutzung / Dieter Korn	Kälteanlagen	HAW-Tor			
Optimization of unit operations : boilers, chemical reactors, chillers, clean rooms, compressors, condensers, cooling towers, fans, fired heated, heat exchangers, HVAC systems, pumping stations, reboilers, vaporizers	chillers	TU		nicht gut	